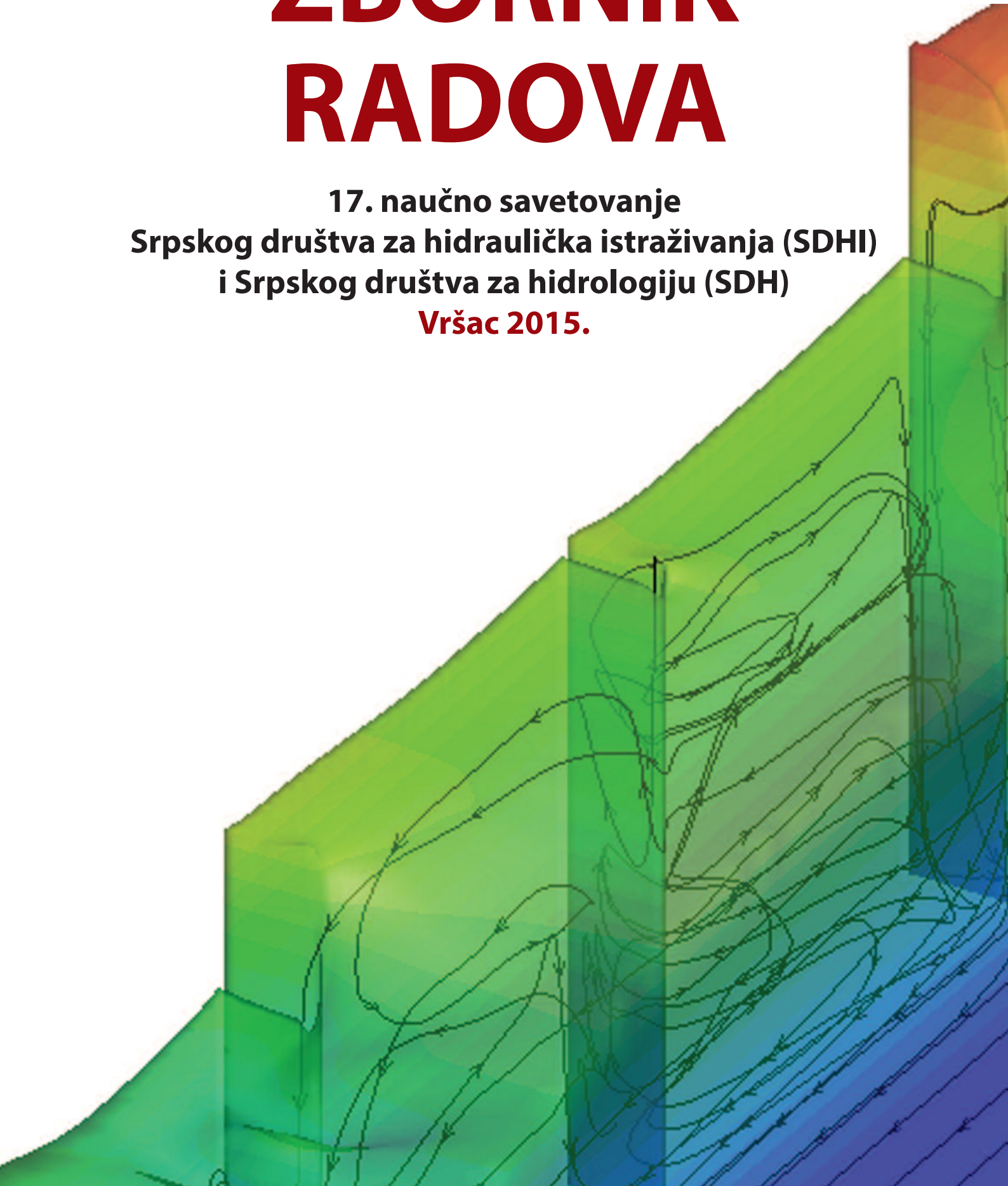


ZBORNİK RADOVA

17. naučno savetovanje
Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI)
i Srpskog društva za hidrologiju (SDH)
Vršac 2015.



Srpsko društvo za hidraulička istraživanja (SDHI)
Srpsko društvo za hidrologiju (SDH)

ZBORNİK RADOVA

**17. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i
Srpskog društva za hidrologiju**

Vršac, 5-6. oktobar 2015.

Priredili:
MARKO IVETIĆ
RADOMIR KAPOR
JASNA PLAVŠIĆ

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
Beograd

Zbornik radova 17. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i
Srpskog društva za hidrologiju
Vršac, 5-6. oktobar 2015.

Elektronsko izdanje na CD-u

Urednici

Marko Ivetić
Radomir Kapor
Jasna Plavšić

Izdavač

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Za izdavača

Prof. dr Branko Božić, dekan

Dizajn i priprema

Miodrag Jovanović i Agencija Omnibus

Tiraž

200 primeraka

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

626/628(082)(0.034.2)

532.5(082)(0.034.2)

СРПСКО друштво за хидрауличка истраживања (Београд). Научно саветовање
(17 ; 2015 ; Вршац)

Zbornik radova 17. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička
istraživanja i Srpskog društva za hidrologiju, Vršac, 5-6. oktobar 2015.

[Elektronski izvor] / priredili Marko Ivetić, Radomir Kapor, Jasna Plavšić.

- Beograd : Univerzitet, Građevinski fakultet, 2016 (Beograd : Dedraplast).

- 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. -

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 200. - Napomene uz tekst. -

Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts ; Apstrakti.

ISBN 978-86-7518-183-5

1. Иветић, Марко [приређивач, сакупљач], 1952- 2. Српско друштво за
хидрологију (Београд). Научно саветовање (17 ; 2015 ; Вршац)

а) Хидротехника - Зборници б) Хидродинамика - Зборници с) Хидраулика

- Зборници

COBISS.SR-ID 225386764

Sadržaj

Naučni odbor savetovanja	viii
Organizacioni odbor savetovanja	viii
Predgovor	ix
Uticao sistema napera na uzvodno usporavanje toka	1
<i>Miodrag Jovanović</i>	
Флувијална ерозија на Јужној и Великој Морави	18
<i>Слободан Петковић, Милан Малешев, Вања Дамјановић</i>	
О утицају подводних каскада на неке хидродинамичке показатеље течења на речним ушћима	30
<i>Дејана Ђорђевић, Иван Стојнић</i>	
Раванско 2Д течење у доводном каналу Барачка испред ЦС Бездан II на Дунаву	42
<i>Бела Варга, Матија Ступић, Срђан Колаковић</i>	
Нумеричко моделирање бурног течења у проводнику са хоризонталном кривином	52
<i>Милена Лучић, Љубодраг Савић, Радомир Капор, Никола Младеновић</i>	
Model za brze proračune ravanskog plavljenja	65
<i>Dragan Savić, Slobodan Djordjević, Albert Chen, Michel Guidolin</i>	
Procena karaktera strujanja u krivini zatvorenog provodnika pomoću SPH metode	87
<i>Nikola Rosić, Ljubodrag Savić, Dejana Đorđević, Milena Lučić</i>	
Modeliranje neustaljenog strujanja u poroznoj sredini metodom konačnih elemenata	97
<i>Damjan Ivetić, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović</i>	
Poređenje metoda za proračun propagacije talasa za potrebe hidrološkog modeliranja	110
<i>Žana Topalović, Marko Ivetić, Jasna Plavšić</i>	
Разматрање утицаја геометрије и хидрауличких отпора на основне одлике течења у кориту за велику воду	124
<i>Иван Стојнић, Филип Мухић, Дејана Ђорђевић</i>	
Процена криве протока у кориту за велику воду применом метода размене количине кретања и независних сегмената	135
<i>Филип Мухић, Филип Станић, Иван Стојнић, Дејана Ђорђевић</i>	
Zaštita naselja od velikih voda kontrolom protoka na uzvodnom mostovskom propustu	146
<i>Božidar Batinić, Dragutin Pavlović, Anja Randelović</i>	
Specifični pregradni hidrotehnički objekti hidroelektrane Papenoo 0, Tahiti	158
<i>Nataša Marinković</i>	
Uporedna analiza bočnog preлива sa glatkim brzotokom i piano key preлива sa stepenastim brzotokom na brani Yarascaу (Tасna, Peru)	167
<i>Dalibor Drašković</i>	
Ispitivanja lavirint preлива na dva fizička modela različitih razmera	183
<i>Danica Starinac, Predrag Vojt, Marijana Damnjanović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić, Budo Zindović, Dragiša Žugić</i>	

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Primer modeliranja hidraulike i upravljanja kaskadnog hidroenergetskog sistema	202
<i>Miloš Milišinić, Damjan Ivetić, Dušan Prodanović</i>	
Закони сличности хидрауличних турбина	215
<i>Мирослав Бенишек</i>	
Бурно течење у хоризонталној кривини затвореног проводника	230
<i>Милена Лучић, Љубодраг Савић, Радомир Капор, Никола Младеновић</i>	
Губитак енергије при хеликоидном течењу у затвореном проводнику са кривином.....	244
<i>Милена Лучић, Љубодраг Савић, Радомир Капор, Никола Младеновић</i>	
Зависност хидродинамичких притисака у слапишту од сужења степенастог брзотока	254
<i>Бојан Миловановић, Будо Зиндовић, Предраг Војт, Радомир Капор, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић</i>	
Анализа хидродинамичких притисака у умирујућем базену насуте бране	264
<i>Маријана Дамњановић, Предраг Војт, Даница Старинац, Драгиша Жугић, Радомир Капор, Љубодраг Савић</i>	
Анализа узгона на брану „Бајина Башта“ на основу података осматрања	273
<i>Јована Јосиповић, Бојан Миловановић, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић</i>	
Приказ садржаја научног пројекта МПНТР ТР 37005 „Оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије“	284
<i>Стеван Прохаска</i>	
Analiza uticaja klimatskih promena na režim oticanja u slivovima reka Toplice i Kolubare.....	293
<i>Mihailo Anđelić, Marija Ivković</i>	
Problemi u proceni uticaja klimatskih promena hidrološkim modeliranjem: primeri slivova Moravice i Crnog Timoka.....	313
<i>Jasna Plavšić, Filip Muhić, Aleksandar Petrović, Andrijana Todorović</i>	
Утицај климатских промена на хидролошке режиме на сливовима Колубаре, Топлице и Млаве	325
<i>Андрејана Тодоровић, Јасна Плавишић</i>	
Poređenje različitih pristupa za sagledavanje uticaja klimatskih promena na vodne resurse u slivu reke Crnice	341
<i>Vesna Tripković, Aleksandra Ilić, Stefan Prohaska, Borislava Blagojević</i>	
Утицај климатских промена на водне ресурсе – пројекат CCWaters, резултати пилот подручја реке Пек.....	357
<i>Dejan Dimkić, Stevan Prohaska, Bojan Stanković, Predrag Pajić, Željka Rudić</i>	
Утицај климатских промена на бујичне поплаве и ерозију земљишта са освртом на поплаве у 2014. години	372
<i>Milutin Stefanović, Mileta Milojević, Aleksandar Drobnjak</i>	
Нови методолошки оквир SDTS за дугорочне пројекције месечних протикаја у условима климатских промена.....	379
<i>Milan Stojković, Jasna Plavšić, Stevan Prohaska, Jovan Despotović, Dragutin Pavlović</i>	
Утицај климатских промена на пољопривредну производњу и мере ублажавања	390
<i>Ružica Stričević, Nevenka Đurović, Marija Čosić, Ivan Bogdan, Miloš Pavlović, Enike Gregorić</i>	
Утицај климатских промена на потребе за водом у пољопривредној производњи.....	404
<i>M. Božić, G. Nikolić, S. Kračunov, Ž. Rudić</i>	

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Pitanje pouzdanosti u projekcijama uticaja klimatskih i drugih promena na vodne resurse.....	414
<i>Dejan Dimkić</i>	
Preliminarna projekcija stanja vodnih resursa u Srbiji u uslovima promenjene klime	424
<i>Stevan Prohaska, Aleksandra Ilić, Vesna Tripković, Vladimir Đurđević</i>	
Comparison of Semi vs. Fully Distributed Urban Storm Runoff Models.....	434
<i>Rui Pina, Susana Ochoa, Maria Aivazoglou, Nuno Simões, Ana Mijic, Alfeu Sá Marques, Čedo Maksimović</i>	
Калибрација дистрибуираних хидролошких модела.....	443
<i>Андријана Тодоровић, Јасна Плавић, Милош Станић, Жељко Васић</i>	
Metod distribuiranih brzina za određivanje vremena kašnjenja sintetičkog jediničnog hidrograma	458
<i>Nikola Zlatanović</i>	
Kalibracija i verifikacija modela oticaja sa urbanih slivova	470
<i>Borislav Mašić, Miloš Stanić, Jasna Plavšić</i>	
Modeliranje urbanih slivova na osnovu javno dostupnih podataka	482
<i>Andrija Nedeljković, Aleksandar Sekulić, Nemanja Branislavljević</i>	
Performance of (Blue) Green Roof Systems: Full-Scale Experiments Based Modelling.....	493
<i>Xi Liu, Ana Mijić, Han Jung Kuo, Čedo Maksimović</i>	
Integralno upravljanje i korišćenje oticaja kišnih voda sa Ostružničkog mosta	500
<i>Jovan Despotović, Nenad Jaćimović, Jasna Plavšić, Miloš Stanić, Aleksandar Đukić, Dragutin Pavlović, Andriana Todorović, Vanja Živanović, Sanja Milić</i>	
Primena distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju oticaja u uslovima karsta	509
<i>Nenad Jaćimović, Miloš Stanić, Tina Dašić, Duško Vujović</i>	
Вишекритеријумска калибрација хидролошких модела	520
<i>Андријана Тодоровић, Милош Станић, Јасна Плавић, Жељко Васић</i>	
Dinamičke karakteristike pluviografa	537
<i>Predrag Vojt, Dragutin Pavlović</i>	
Principi modelisanja interakcije zagađivača i nanosa u rečnom toku	550
<i>Zoltan Horvat, Mirjana Horvat, Ognjen Gabrić</i>	
Kalibracija linijskog modela transporta nanosa	558
<i>Mirjana Horvat, Zoltan Horvat, Ognjen Gabrić</i>	
Prikaz i analiza rezultata merenja erozije u laboratorijskim uslovima.....	568
<i>Ognjen Gabrić, Jasna Plavšić</i>	
Merenje hidrauličkih veličina u dvofaznom fluidu	577
<i>Predrag Vojt, Budo Zindović, Dušan Prodanović</i>	
Hidraulička laboratorija Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu	585
<i>Slobodan Kolaković, Goran Jeftenić, Ljubomir Budinski, Matija Stipić, Svetlana Vujović</i>	
Bezbedno vodosnabdevanje i rizici – primer dva grada.....	598
<i>Milan Ivetić, Tamara Srdić, Marko Ivetić</i>	
Mogući uzroci havarije cevovoda Makiš – (Petlovo Brdo –) Mladenovac.....	610
<i>Marko Ivetić, Aleksandra Krsmanović, Ana Popović-Milijić</i>	

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Dekompozicija vodovodne mreže primenom WatNC algoritma	622
<i>Željko Vasilić, Miloš Stanić, Branislav Babić, Dušan Prodanović</i>	
Hidraulička analiza i proračun nedostajućih rezervoarskih kapaciteta pitke vode u NIVOS-u	631
<i>Dejan Jordanović</i>	
Modeliranje hidrauličkog udara u softverskom paketu AFT Impulse.....	639
<i>Ljubomir Budinski, Slobodan Kolaković, Matija Stipić, Goran Jeftenić, Svetlana Vujović</i>	
Analiza funkcionisanja kombinovane kanalizacije gradskog područja Novog Sada	651
<i>Matija Stipić, Borislav Mašić, Filip Stipić, Andrea Salvai</i>	
Hidraulička analiza kanalizacije pod pritiskom naselja Nadalj.....	665
<i>Matija Stipić, Goran Jeftenić, Slobodan Kolaković, Svetlana Vujović, Ljubomir Budinski</i>	
Hidrometeorološki uslovi koji su izazvali pojavu serije poplavnih talasa u Srbiji u periodu april-septembar 2014. godine.....	676
<i>Nedeljko Todorović, Dragan Đukić, Stevan Prohaska, Vladislava Bartoš Divac</i>	
Statistička ocena značajnosti jakih kiša koje su izazvale pojavu poplavnih talasa u Srbiji u periodu april-septembar 2014. godine.....	688
<i>Stevan Prohaska, Dragan Đukić, Vladislava Bartoš Divac, Nedeljko Todorović</i>	
Analiza formiranja, prostiranja i transformacije poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare	701
<i>Niloka Zlatanović, Stevan Prohaska</i>	
Одбрана од поплава на Сави 2014 - искуства и планови за унапређење система заштите.....	716
<i>Марина Бабић Младеновић, Васиљка Коларов, Владислава Бартош Дивац</i>	
Поплаве 2014. године на реци Јадар.....	726
<i>Вања Дамјановић, Милан Малешев</i>	
Шта после поплаве 2014?	738
<i>Марина Бабић Младеновић, Васиљка Коларов</i>	
Вујичне поплаве у Текији септембра 2014. године и радови на санацији	748
<i>Ирина Миловановић, Никола Златановић, Јелена Ћотрић, Рената Пузовић</i>	
План управљања ризицима од поплава на сливу Дунава.....	755
<i>Марина Бабић Младеновић, Васиљка Коларов</i>	
Заштита Београда од великих вода Дунава и Save.....	766
<i>Војислав Антонић, Марина Бабић Младеновић</i>	
Нове мере заштите града Параћина после поплаве 2014. године.....	775
<i>Зоран Кнежевић, Владислава Бартош Дивац, Милан Малешев</i>	
Узроци плављења Баричке реке и потребне мере заштите од поплава	785
<i>Борис Крунић, Милан Малешев, Вања Дамјановић</i>	
Заштита улаза у луку Ковин од засипања наносом Дунава	793
<i>Зоран Кнежевић, Марина Бабић Младеновић</i>	
Хидролошко-хидраулички истражни радови по траси газовода Јужни ток.....	804
<i>Владислава Бартош Дивац, Војислав Антонић, Драгана Нинковић</i>	
О одређивању просечног отицања са неизучених сливова на територији Србије.....	816
<i>Драган Јанковић</i>	

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Konsistentno određivanje zavisnosti visina–trajanje–povratni period kiše.....	826
<i>Jasna Plavšić, Žana Topalović, Jovan Despotović</i>	
Проблеми и решења при изради хидролошких анализа за коришћење вода код обновљивих извора енергије.....	838
<i>Срђан Марјановић</i>	
Хидролошко моделирање - доступност и поузданост података у реалном времену.....	848
<i>Марија Ивковић, Јулијана Нађ</i>	
Оптimalно управљање вишенаменском акумулацијом коришћењем модела HEC-5.....	860
<i>Александра Илић, Драган Милићевић, Olivera Potić</i>	
Прихватљивост гاما расподеле за прораčун индекса суше у сливу Јужне Мораве	871
<i>Владислава Михиловић, Борислава Благојевић</i>	
Пирсонов систем расподела и његова примена у хидрологији	887
<i>Марија Радичевић, Весна Јевремовић, Јасна Плавшић, Драгутин Павловић</i>	
Практични проблеми одређивања мјеродавних великих вода за потребе пројектовања система одбране од поплава	902
<i>Жана Топаловић, Јасна Плавшић</i>	
Неки аспекти при неparamетарском генерисању хидролошких серија података	913
<i>Ђурица Марковић, Јасна Плавшић, Синиша Илић</i>	
Примена модификоване TIPS методе за дугорочне пројекције серија годишњих проточаја.....	924
<i>Милан Стојковић, Стеван Прохаска, Јасна Плавшић</i>	
A maximum entropy spectral analysis of precipitation for the territory of Serbia.....	932
<i>Младен Милановић, Милан Гочић, Слаvisa Трајковић</i>	
IN MEMORIAM: Коста Ђонин (1922–2012)	939
<i>Радомир Капор</i>	
IN MEMORIAM: Стеван Брук (1923–2014)	941
<i>Стеван Прохаска, Миодраг Јовановић</i>	
IN MEMORIAM: Милорад Милорадов (1933–2015)	943
<i>Срђан Колковић, Радомир Фолић</i>	
Индекс аутора	946

Naučni odbor savetovanja

Prof. dr Marko Ivetić (Predsednik)
Prof. dr Dragan Arandelović
Doc. Dr Borislava Blagojević
Prof. dr Jovan Despotović
Prof. dr Milan Dimkić
Prof. dr Aleksandar Gajić
Doc. dr Lajoš Hovanj
Prof. dr Miodrag Jovanović
Prof. dr Radomir Kapor
Prof. dr Srđan Kolaković
Prof. dr Čedo Maksimović
Mr Jelisaveta Muškatirović
Prof. dr Zorana Naunović
Prof. dr Miloš Nedeljković
Prof. dr Sava Petković
Prof. dr Slobodan Petković
Prof. dr Jasna Plavšić
Prof. dr Dušan Prodanović
Prof. dr Stevan Prohaska
Prof. dr Dragan Savić
Prof. dr Miodrag Spasojević

Organizacioni odbor savetovanja

Prof. dr Marko Ivetić
Prof. dr Jasna Plavšić
Prof. dr Radomir Kapor
Andrijana Todorović, dipl. građ. inž.
Budo Zindović, dipl. građ. inž.

Predgovor

Poštovane kolegice i kolege,

Pred Vama je pregled radova prikazanih na 17. naučnom savetovanju Srpskog društva za hidraulička istraživanja i Srpskog društva za hidrologiju održanog u Vršcu oktobra 2015. godine. Ovog puta smo imali značajan broj pristiglih radova – tačno 80, koje ćete naći u ovom zborniku na preko 900 strana. Kao i na prošlom savetovanju, zbornik izdajemo u elektronskoj formi, na CD-u, sa radovima u PDF formatu, dok je knjiga apstrakata na srpskom i engleskom jeziku štampana i podeljena na samom savetovanju. Ovaj pristup je omogućio da prihvatimo i radove sa većim brojem strana nego što je to bio ranije slučaj, a da kvalitet slika, dijagrama i animacija, ostane onakav kako su ga dostavili autori. Pri tome je rok za prihvatanje radova bio mnogo fleksibilniji, dok su troškovi pripreme savetovanja značajno niži. Uz to, neki autori su dobili još dragocenog vremena da svoje radove dovedu do oblika u kom mogu da se prikažu u ovom zborniku.

I ovog puta Savetovanje je organizovano zajedno sa Srpskim društvom za hidrologiju (SDH), što je doprinelo ne samo povećanom broju radova već je omogućilo i da se pojedine važne teme, kao što su poplave iz 2014. godine kojima je posvećena posebna sesija, sagledaju sveobuhvatno. Deo radova je prikazan na odvojenim sednicama, a deo na zajedničkim, što nam je omogućilo da ceo program održimo u dva dana, uz aktivno prisustvo velikog broja učesnika, do samog kraja Savetovanja.

Radovi iz oblasti hidraulike pokrili su više tematskih oblasti, a najviše rečnu hidrauliku, hidrotehničke objekte, numeričko modeliranje i komunalnu hidrotehniku. U oblasti hidrologije veliki broj radova se bavio modernom temom – uticajem klimatskih promena na vodne resurse, kao i determinističkim i stohastičkim hidrološkim modelima. Najveći deo „domaćih“ radova je vezan za tekuće naučno istraživačke projekte Ministarstva nauke. Stiče se utisak da učesnici Savetovanja spremno očekuju novi ciklus projekata.

Već iz samog spiska radova se može videti prožimanje nauke i prakse, kao i naglašavanje važnih problema u domaćoj hidrotehnici i vodoprivredi. Tu su, naravno, i važni doprinosi naših kolega iz dijaspore koji ukazuju na pojedine pravce naučnog i tehnološkog razvoja u hidrotehnici, i koji se sve više okreću urbanim sredinama i njihovim (ne samo) hidrotehničkim problemima. Mi smo im posebno zahvalni što su našli vremena da dva dana u Vršcu budu sa nama. Takođe, u zborniku ćete naći značajne radove naših doajena i srednje generacije čija je odgovornost da prošire i prenesu znanja iz ove dve fundamentalne discipline. Međutim, u zborniku ćete naći i rezultate istraživanja mlade generacije koji su danas upućeni da svoj kvalitet i kompetencije dokazuju na globalnom nivou kroz objavljivanje u međunarodnim časopisima. I u toj grupi ima veoma vrednih i inovativnih radova, što nam uliva nadu da će se u ovim oblastima ostvariti kontinuitet i napredak.

U periodu od prethodnog savetovanja do sada, napustili su nas, prof. Kosta Đonin, prof. Stevan Bruk i prof. Milorad Miloradov, dugodišnji članovi SDHI, i po mnogo čemu izuzetni.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

Na njih i na njihov veliki doprinos istraživanjima u oblasti voda, na Savetovanju su nas podsetili njihovi bliski saradnici i prijatelji, koji su pripremili kratke tekstove o njima.

Zahvaljujem se kolegici Jasni Plavšić, predsednici Srpskog društva za hidrologiju, i kolegi Radimiru Kaporu, na izvanrednom doprinosu u organizovanju i realizaciji ovog savetovanja. Njima uz rame, izdvojio bih i kolege iz Instituta „Jaroslav Černi“, Marinu Babić Mladenović i Stevana Prohasku, za njihov doprinos temama, Poplave 2014. godine i Klimatske promene. Zbog svega ovoga se nadamo da će ovaj zbornik mnogima biti zanimljivo štivo za čitanje.

Beograd, oktobar 2015.

Prof. dr Marko Ivetić
Predsednik SDHI

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.
Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

ZBORNİK RADOVA

**17. naučnog savetovanja
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i
Srpskog društva za hidrologiju**

Vršac, 5-6. oktobar 2015.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

UTICAJ SISTEMA NAPERA NA UZVODNO USPORAVANJE TOKA

Miodrag Jovanović¹

APSTRAKT. Jedna od hidrauličkih posledica izgradnje napera je povećanje otpora tečenju i usporavanje toka uzvodno od napera. Ova pojava je eksperimentalno istraživana u literaturi [1, 2] i predložen je odgovarajući 1D računski model. Kako takav model može imati veliku praktičnu primenljivost u projektovanju napera, od velikog je interesa da se oceni njegova pouzdanost. U tu svrhu su pomoću softvera Telemac3D obavljene numeričke simulacije kako laboratorijskog eksperimenta, tako i strujanja na hipotetičkom „kanalu prototipu”, čije su dimenzije 100 puta uvećane u odnosu na dimenzije laboratorijskog kanala. Upoređenjem rezultata dobijenih pomoću eksperimenta, 1D modela i 3D modela, zaključeno je da se predloženi 1D model može preporučiti za korišćenje u praksi, pod uslovom da se sračunate denivelacije uvećaju za 20÷30%.

Ključne reči: naperi, uspor toka, hidraulički otpori, metoda konačnih elemenata, simulacija 3D strujanja

BACKWATER EFFECTS DUE TO A SYSTEM OF GROYNES

ABSTRACT. One of the hydraulic consequences of construction of groynes is an increase of the flow resistance and backwater effects upstream of the groynes. This phenomenon was experimentally investigated in literature [1, 2], and an appropriate 1D computational model was suggested. As such a model can have a significant practical applicability in design of groynes, it is of interest to estimate its reliability. By using the Telemac3D software, numerical simulations were performed, not only of the laboratory experiment, but also of flows in a hypothetical „prototype canal”, with size 100 times larger than the size of the laboratory canal. Comparison of results obtained by experiment, 1D and 3D models, led to the conclusion that the proposed 1D model can be recommended for use in practice, provided that the calculated backwater elevations are increased by 20÷30%.

Key words: groynes, backwater effects, flow resistance, finite-element method, 3D flow simulation

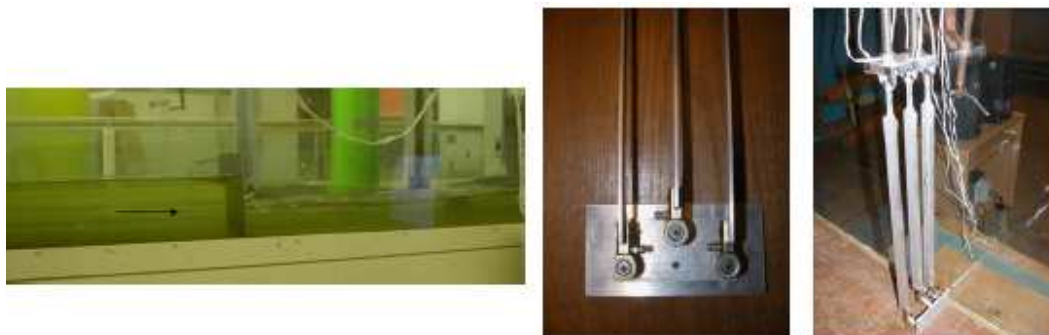
¹e-mail: mjovanov@grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Istraživanje opstrujavanja napera u uslovima nepokretnog i pokretnog dna je decenijama prisutno u svetskoj i domaćoj literaturi, na primer [4, 6, 7, 8, 9] itd. Medjutim, tek (relativno) nedavno su objavljeni rezultati eksperimentalnog izučavanja usporavanja toka pri raznim konfiguracijama sistema napera [1, 2]. Iz ovih istraživanja proizašao je predlog računskog 1D modela koji potencijalno može biti od velike koristi projektantima u praksi. Imajući u vidu da je ovaj model zasnovan na rezultatima laboratorijskih merenja na koje neizbežno utiču efekti razmere, cilj ovog rada je bio da se ispita pouzdanost predloženog 1D modela u uslovima kakvi se mogu očekivati na vodotocima u prirodi.

2 Laboratorijski eksperiment

Merenja su obavljenja u laboratoriji Univerziteta Saskačewan (Saskatchewan) u Kanadi, u kanalu dužine 10 m, širine 0,8 m, sa nagibom dna 0,001 [1]. Protok je meren elektromagnetnim uredjajem, a nivoi, mernom iglom, sa tačnošću 1%. Za regulaciju dubine (u ustaljenom režimu) korišćena je ustava na nizvodnom kraju kanala. Profili brzina su mereni mikrokriplom sa tačnošću od 1,5%. Modeli napera izradjeni su u vidu plastičnih ploča raznih dimenzija. Ploče su povezane sa uredjajem za merenje sile otpora (Slika 1). Procena je da tačnost merenja pomoću ovog uredjaja iznosi $\pm 2\%$. Za osrednjavanje sile otpora bilo je potrebno da svako merenje neprekidno traje bar 300 s.



Slika 1: Laboratorijska instalacija [1]; levo: kanal sa modelom usamljenog napera; u sredini: ploča (model napera) sa 3 konzolna nosača od aluminijuma; desno: konzolni nosači, svaki sa po 2 merne trake. Sila na ploču jednaka je zbiru reaktivnih sila, koje daju 3 momenta na gornjim krajevima nosača, a naponi usled ovih momenata se mere pomoću 6 mernih traka povezanih sa sistemom za akviziciju podataka.

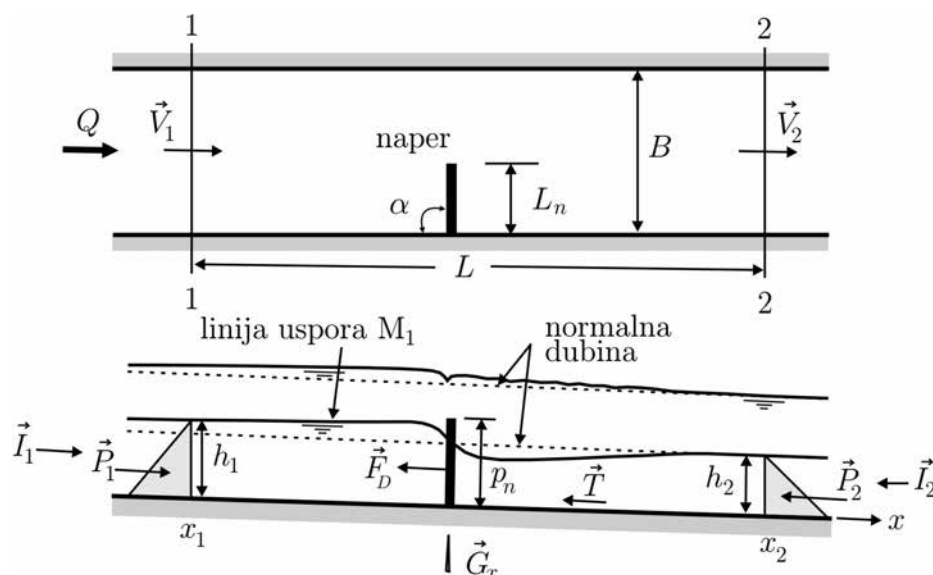
Figure 1: Laboratory installation [1]; left: flume with the model of a single groyne; in the middle: drag force measurement apparatus – plate (groyne model) with 3 aluminum cantilevered bars; right: strain gauges fixed to the bars (2 per each bar). The drag force exerted on the plate is equal to the sum of the reaction forces exerted at the ends of the bars, creating moments, i.e. strains, which were detected using 6 strain gauges connected to a data acquisition system.

U slučaju nepotopljenog opstrujavanja ploča postavljene upravno na zid kanala, merenjem je obuhvaćen opseg Frudovog broja $0,25 \div 0,55$, stepena suženja u kanalu $L_n/B = 0,12 \div 0,50$ i stepena potopljenosti $h_1/L_n = 0,12 \div 1,62$, gde je L_n – dužina ploče-napera, B – širina kanala, a h_1 – dubina uspora, merena 0,5 m uzvodno od napera.

Eksperimentalno utvrđene zavisnosti sile otpora od bezdimenzionih geometrijskih i hidrauličkih parametara sastavni su deo predloženog računskog modela koji se opisuje u nastavku.

3 Računski 1D model

Ovaj model je zasnovan na dve pretpostavke [1]: (i) strujanje je linijsko (1D), ustaljeno i jednoliko, u mirnom režimu i (ii) korito je prizmatično i pravolinijsko, bez izraženih sekundarnih strujanja. Navedene pretpostavke uslovljene su potrebom da eksperimentalni rad bude što lakši i kontrolabilniji, a računski model, što jednostavniji za primenu u praksi. Polazi se od jednačine bilansa sila koje deluju na fluid unutar nepokretne kontrolne zapremine u čijem se središtu nalazi naper (Slika 2).



Slika 2: Shematski prikaz usamljenog napera u koritu pravougaonog poprečnog preseka; gore: izgled u osnovi; dole: uzdužni profil sa linijama nivoa pri (ne)potopljenom opstrujavanju i silama u pravcu toka koje deluju na fluid unutar nepokretne kontrolne zapremine između preseka 1-1 i 2-2.

Figure 2: Scheme of a single groyne in a channel with rectangular cross-section; above: plan; below: longitudinal section with (un)submerged groyne flow profiles, and forces acting in the flow direction, on fluid within a stationary control volume between channel sections 1-1 and 2-2.

Ravnoteža sila u pravcu toka (x) definisana je izrazom:

$$P_1 - P_2 - F_D - T + G_x = I_2 - I_1, \quad (1)$$

gde su: P_1 , P_2 – sile pritiska, F_D – sila kojom kontura deluje na fluid (u slučaju prizmatičnog korita jednaka je reakciji sile kojom tok deluje na naper), T – sila trenja, G_x – komponenta težine vode u pravcu x , $I_1 = \rho \cdot Q \cdot V_1$, $I_2 = \rho \cdot Q \cdot V_2$ – inercijalne sile, ρ – gustina vode, Q – protok, V_1 i V_2 – srednje profilske brzine.

Poznato je da je u uslovima jednolikog tečenja sila trenja uravnotežena sa komponentom težine fluida u pravcu toka: $T = G_x$. Može se smatrati da ova premisa važi i u slučaju lokalno blago poremećenog (nejednolikog) toka u mirnom režimu.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI and SDH - Vršac, Serbia

U slučaju pravougaonog poprečnog preseka korita, iz (1) sledi:

$$F_D = P_1 - P_2 - I_2 + I_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot B \cdot h_1^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot B \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 - \rho \cdot Q \cdot V_2, \quad (2)$$

gde je: B – širina korita, h_1 – dubina uspora uzvodno od napera, a h_2 – dubina nizvodno od napera, jednaka normalnoj dubini. Sila otpora kojom naper deluje na tok jednaka je u opštem slučaju:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot A_n \cdot V_n^2, \quad (3)$$

gde je: C_D – koeficijent sile otpora, V_n – prosečna brzina onog dela toka koji „udara” naper, A_n – projekcija konture napera na vertikalnu ravan. U slučaju neprelivenog napera: $A_n = L_n \cdot h_1$, a u slučaju da je naper preliven: $A_n = L_n \cdot p_n$ (Slika 2). U opštem slučaju je: $V_n = \theta \cdot V_1$, gde je: V_1 – srednja profilska brzina neporemećenog toka uzvodno od napera, a faktor $\theta=1 \div 1,2$.

Kombinujući jednačine (2) i (3), uz jednačinu kontinuiteta, može se izvesti izraz [1]:

$$2 \text{Fr}_1 \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3 - [2 \text{Fr}_1 - C_D \cdot A_r \cdot \theta^2 \cdot \text{Fr}_1 + 1] \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^2 + 1 = 0, \quad (4)$$

gde je: $\text{Fr}_1 = V_1^2 / (g h_1)$ – Frudov broj, a $A_r = A_n / (h_1 B)$ – stepen suženja („blokiranja”) proticajnog profila.

Za zadate vrednosti protoka, nagiba dna, širine i rapavosti korita (na osnovu kojih se može sračunati normalna dubina h_2), kao i poznate vrednosti koeficijenta C_D , nelinearna jednačina (4) se iterativno rešava po nepoznatoj dubini h_1 , koja određuje veličinu uspora izazvanog prisustvom usamljenog napera u rečnom koritu.

Vrednosti koeficijenta C_D su eksperimentalno utvrđene, polazeći od opšte zavisnosti:

$$C_D = f_1 \left(\text{Re}_1, \text{Fr}_1, A_r, \frac{p_n}{L_n}, \frac{h_1}{p_n}, \alpha \right), \quad (5)$$

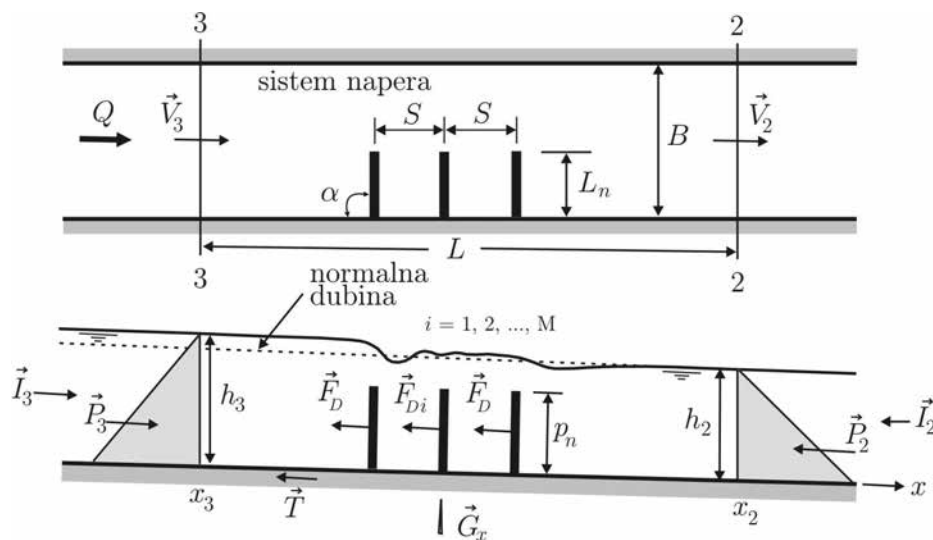
gde je: $\text{Re}_1 = V_1 \cdot h_1 / \nu$ – Rejnoldsov broj, $\text{Fr} = V_1^2 / (g h_1)$ – Frudov broj, α – ugao napera u odnosu na osovину toka (Slika 2), p_n / L_n – faktor izduženosti napera i h_1 / p_n – faktor potopljenosti napera.

Uticao viskoznosti je od sporednog značaja, pa se Rejnoldsov broj može izostaviti. Ako se razmatra strujanje oko nepotopljenog napera, otpada parametar p_n / L_n , stepen suženja proticajnog profila postaje: $A_r = L_n / B$, dok se, umesto odnosa h_1 / p_n , u izraz (5) može uvrstiti odnos h_1 / L_n . Na osnovu ispitivanja koja su detaljno opisana u literaturi [1], izvedene su sledeće empirijske zavisnosti za koeficijent otpora usamljenog upravnog napera, u strujnom polju, koje, dovoljno daleko uzvodno i nizvodno od napera, ima jednolik karakter:

$$C_D = \begin{cases} 2,02 \left(1 - \frac{L_n}{B} \right)^{-3,83} \cdot \left(\frac{h_1}{L_n} \right)^{0,40} & \text{– nepotopljen naper} \\ 1,62 (1 - A_r)^{-2,40} \left(\frac{p_n}{L_n} \right)^{-0,32} \cdot \left(\frac{h_1}{p_n} \right)^{-0,19} & \text{– potopljen naper} \end{cases} \quad (6)$$

Primetiti da u empirijskim izrazima (6) vrednost koeficijenta C_D zavisi od dubine h_1 , što znači da se pri iterativnom rešavanju jednačine (4) po h_1 , vrednost koeficijenta C_D mora korigovati u svakom računskom koraku.

Razmatranje uticaja usamljenog napera na usporenje rečnog toka može se ekstrapolovati na sistem napera. Generalno, može se očekivati da će sistem napera, pri istoj geometriji korita i istom protoku, izazvati veći uspor od usamljenog napera, jer suženje glavnog strujnog polja i poremećaj toka zahvata dužu deonicu. To znači da će uzvodna dubina h_3 na Slici 3 biti veća od odgovarajuće dubine h_1 na Slici 2, dok su nizvodne (normalne) dubine h_2 jednake u oba slučaja.



Slika 3: Shematski prikaz sistema napera u koritu pravougaonog poprečnog preseka; gore: izgled u osnovi; dole: uzdužni profil sa silama koje deluju na fluid unutar kontrolne zapremine između preseka 3-3 i 2-2.

Figure 3: Scheme of a groyne field in a channel of rectangular cross-sections; above: plan; below: longitudinal section with forces acting on the fluid within a control volume between channel sections 3-3 and 2-2.

Polazna pretpostavka je da za sistem geometrijski jednakih napera važi princip aditivnosti sile F_D [2], tako da za kontrolnu zapreminu između profila „3” i „2” na Slici 3 važi jednačina ravnoteže sila:

$$P_3 - P_2 - \sum_{i=1}^{i=M} F_{D_i} - T + G_x + I_3 - I_2 = 0, \quad (7)$$

gde su: $P_3 = 1/2 \rho \cdot g \cdot h_3^2 \cdot B$ i $P_2 = 1/2 \rho \cdot g \cdot h_2^2 \cdot B$ – sile pritiska u koritu pravougaonog poprečnog preseka, $I_3 = \rho \cdot B \cdot h_3 \cdot V_3^2$; $I_2 = \rho \cdot B \cdot h_2 \cdot V_2^2$ – inercijalne sile, a $\sum_{i=1}^{i=M} F_{D_i} = F_{D_1} + \dots + F_{D_i} \dots + F_{D_M}$ – ukupna sila otpora sistema od M napera. Ako se sila otpora svakog napera (F_{D_i}) iz sistema normira u odnosu na silu otpora odgovarajućeg usamljenog napera (F_D), dobija se *relativna sila otpora*:

$$\eta_i = \frac{F_{D_i}}{F_D}, \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI and SDH - Vršac, Serbia 2015.

pa je shodno tome, *ukupna relativna sila otpora* jednaka:

$$\eta_t = \frac{\sum_{i=1}^{i=M} F_D}{F_D} = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M. \quad (9)$$

To znači da se u jednačini (7) ukupni otpor može prikazati u obliku:

$$\sum_{i=1}^{i=M} F_D = F_D (\eta_1 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M) = F_D \cdot \eta_t = \frac{1}{2} \rho \cdot \eta_t \cdot C_D \cdot A_n (\theta \cdot V_1)^2, \quad (10)$$

gde je: η_t – empirijski parametar, a C_D – koeficijent otpora usamljenog napera, prethodno definisan jednačinom (6).

Kombinacijom jednačine bilansa sila za sistem napera (7) i jednačine za usamljeni naper (1), pretpostavljajući da je zbog jednolikog tečenja $G_x - T \approx 0$ i imajući u vidu da je iz jednačine kontinuiteta: $V_3 = V_1 (h_1/h_3)$, može se izvesti ovakav izraz [2]:

$$\left(\frac{h_3}{h_1} \right)^3 - \{ 2 Fr_1 + 1 + C_D \cdot A_r \cdot \theta^2 (1 - \eta_t) Fr_1 \} \left(\frac{h_3}{h_1} \right) + 2 Fr_1 = 0. \quad (11)$$

Jednacina (11) se rešava po (h_3/h_1) , što je u skladu sa definicijom ukupne relativne sile otpora kao odnosa ukupne sile otpora sistema napera i sile otpora fiktivnog usamljenog napera. Rešavanje podrazumeva određivanje dubine uspora usled usamljenog napera h_1 iz jednačine (4), kao i odgovarajuće vrednosti koeficijenta C_D iz jednačine (6).

Kada je u pitanju jedan naper: $\eta_t=1$, jednačina (11) daje $h_3 = h_1$, što znači da se (11) svodi na (4). To potvrđuje da jednačina (11) predstavlja ekstrapolaciju jednačine (4) na više napera, definišući stanje toka sa sistemom napera *relativno* u odnosu na stanje sa jednim naperom.

Vrednosti parametra η_t je utvrđena eksperimentalno, u obliku:

$$\eta_t = f \left(\frac{S}{L_n}, \frac{h_2}{p_n}, M \right), \quad (12)$$

gde je, pred ranije definisanih oznaka, S – razmak napera, a M – broj napera u sistemu. Na osnovu laboratorijskih ispitivanja sa brojem napera $M=2-7$, ustanovljena je ovakva zavisnost [2]:

$$\eta_t = \begin{cases} \left(\frac{S}{L_n} \right)^{0,09} & \text{– nepotopljeni naperi} \\ 0,78 \cdot M^{0,38} \left(\frac{h_2}{p_n} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{S}{L_n} \right)^{0,11} & \text{– potopljeni naperi.} \end{cases} \quad (13)$$

Može se primetiti da kod potopljenih napera, više faktora (broj, razmak i stepen potopljenosti) utiče na ukupnu silu otpora. Kod nepotopljenih napera, broj napera (M) nema uticaja, već je samo njihov relativni razmak od značaja.

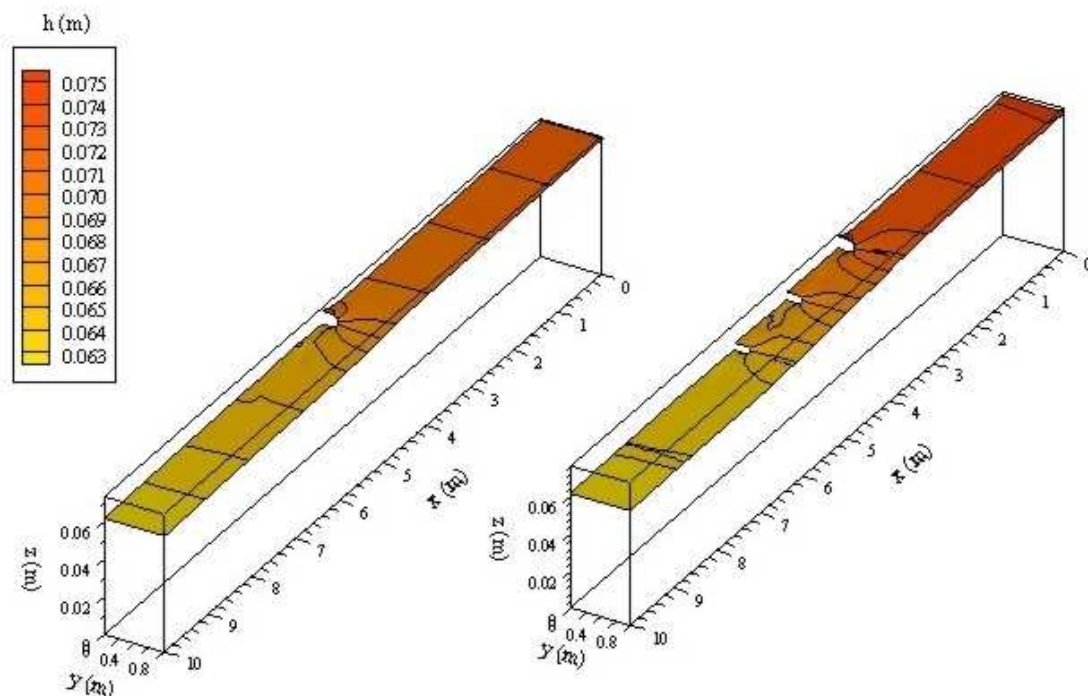
Poređenjem denivelacija sračunatih pomoću (11) i izmerenih na fizičkom modelu, autori ovog istraživanja su ustanovili da računске denivelacije treba povećati za 19÷23% da bi rezultati proračuna i merenja bili u saglasnosti [2].

4 Provera pomoću 3D modela

Smisao provere pomoću numeričkog 3D modela je u tome što on omogućava proračun sila pritiska i inercijalnih sila *integracijom po poprečnim presecima stvarnog rasporeda dubine, pritiska i brzine*, a ne pomoću osrednjenih vrednosti, kao u predloženom 1D modelu. Pored toga, primena 3D modela omogućava da se pouzdano sračunaju vrednosti komponente sile težine fluida unutar kontrolne zapremine i sile trenja, kako bi se proverila opravdanost njihovog zanemarenja u 1D modelu. Svi proračuni obavljani su pomoću softverskog sistema Telemac3D, zasnovanog na metodi konačnih elemenata [3, 10].

4.1 Numerička simulacija laboratorijskog eksperimenta

Ustaljeno nepotopljeno opstrujavanje usamljenog upravnog napera, kao i sistema od tri upravna napera, računato je pomoću 3D modela za protok od $0,021 \text{ m}^3/\text{s}$ (Slika 4). Izabrani su naperi dužine $L_n = 0,2 \text{ m}$ ($L_n/B = 0,25$), sa razmakom napera u sistemu: $S=1,2 \text{ m}$ ($S/L_n=6$). Pretpostavljajući da je rapavost dna kanala $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, primenom 1D modela dobijena je normalna dubina $h_2=0,062 \text{ m}$ ($Fr=0,27$).



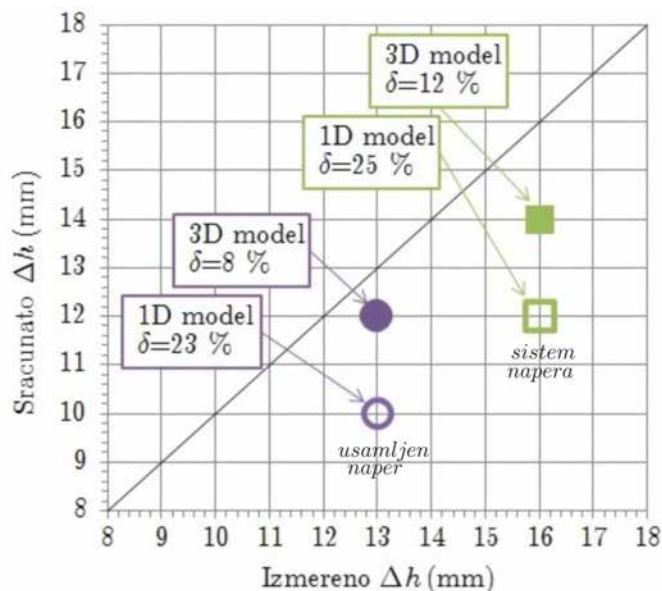
Slika 4: Numerička simulacija laboratorijskog eksperimenta [1, 2] pomoću 3D modela; u slučaju usamljenog napera, računaska mreža se sastojala od 11420 elemenata dužine $2,5 \div 5 \text{ cm}$ (čvorova 5991), a u slučaju sistema napera, od 15041. elementa (čvorova 7861). Rezultati su dobijeni na 5 nivoa po dubini. Svaki simulacioni period je iznosio 3600 s, sa računskim korakom od 2 s.

Figure 4: Numerical simulation of laboratory experiment using the 3D model; for a single groyne, the computational mesh consisted of 11420 elements $2,5 \div 5 \text{ cm}$ long (5991 nodes), while in the case of a system of groynes, it consisted of 15041 elements (7861 nodes). Results were obtained for 5 levels over depth. Each simulation period was 3600 s, with computational step of 2 s.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI and SDH - Vršac, Serbia 2015.

Sračunate visine uspora za usamljen naper: $h_1=0,072$ m, a za sistem napera: $h_3=0,074$ m, daju denivelacije (u odnosu na nizvodnu, normalnu dubinu): $\Delta h=0,010$ m za usamljen naper, odnosno $0,012$ m za sistem napera.

Poređenje izmerenih i sračunatih denivelacija dato je na Slici 5. Može se konstatovati da 3D model daje denivelacije koje su bliže izmerenim denivelacijama. Međutim, ovo treba prihvatiti sa rezervom, jer se radi o veoma malim dubinama, gde razlike od 1 mm značajno utiču na krajnji zaključak. Pri tome treba imati u vidu i činjenicu da je za dubinu reda veličine 10 cm, greška merenja ± 1 mm.



Slika 5: Poređenje izmerenih i sračunatih denivelacija; veličina δ predstavlja relativno odstupanje računске vrednosti od izmerene vrednosti. Razlike rezultata 1D i 3D modela su u proseku 15%.

Figure 5: Comparison of measured and calculated backwater elevations; symbol δ represents the relative difference between the calculated and measured values. Disagreement between results obtained by the 1D model and the 3D model is 15% on the average.

Slaganje računskih i izmerenih sila otpora (F_D) prikazano je u Tabeli 1, iz koje se vidi da 3D model daje nešto tačnije vrednosti. Sile otpora su računane na osnovu rezultata hidrauličkih proračuna, primenom izraza (2), odnosno (7).

Tabela 1: Odstupanja računskih od izmerenih vrednosti sile otpora.

Table 1: Calculated versus measured drag forces

1D model		3D model	
1 naper	3 napera	1 naper	3 napera
19,0%	19,5%	14,6%	15,0%

Iako prikazani rezultati generalno potvrđuju zaključak autora 1D modela da on daje usporne nivoe koji su za 23% niži od izmerenih nivoea [2], oslanjanje samo na simulaciju laboratorijskog eksperiment nije dovoljno za ocenu kvaliteta predložnog modela.

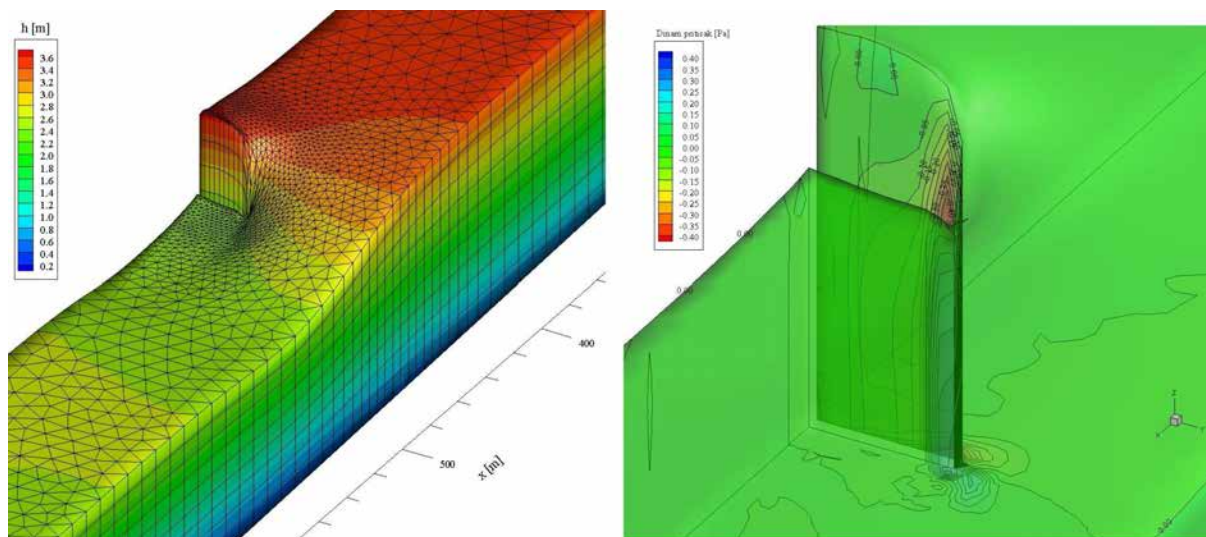
Osnovni razlog je neizvesnost vrednosti koeficijenta otpora C_D , koje su utvrdjene na fizičkom modelu relativno malih dimenzija, gde, usled efekata razmere, struktura turbulentnog toka nije ista kao u prirodi. Pored toga, tu su i neizvesnosti koje su posledica

uprošćenja unetih u računski model pretpostavkama da je tečenje linijsko i jednoliko, a raspored pritiska, hidrostatički. Iz navedenih razloga je odlučeno da se provera 1D modela obavi pomoću numeričkih eksperimenata na zamišljenom „kanalu-prototipu”, u geometrijskim i hidrauličkim uslovima kakvi se mogu očekivati u prirodi.

4.2 Numeričke simulacije 3D strujanja u prirodnim uslovima

Zamišljeni „kanal-prototip” je uvećan 100 puta u odnosu na laboratorijski kanal (razmera $L_*=100$), tako da mu je dužina 1000 m, a širina 80 m. Nagib dna je 0,001. Usvojena je rapavost $n=0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ($n_p \approx n_m \cdot L_*^{1/6}$). Razmatrana su dva slučaja: (i) kanal sa usamljenim upravnim naperom i (ii) kanal sa sistemom od 3 upravna napera. U oba slučaja su naperi iste dužine: $L_n=20 \text{ m}$ ($L_n/B=0,25$). U sistemu napera, usvojen je razmak: $S=120 \text{ m}$ ($S/L_n=6$). Razmatran je samo slučaj nepotopljenog opstrujavanja napera pri protocima: 100, 200, 300, 500, 1000 i 2000 m^3/s . Ovi protoci su korišćeni kao uzvodni granični uslov, a odgovarajuće normalne dubine, kao nizvodni granični uslov. Svaka numerička 3D simulacija obuhvatila je period od 1 h=3600 s u kome je uspostavljen ustaljen režim strujanja. Duž toka je korišćen najjednostavniji model turbulencije na bazi vrtložne viskoznosti, a po dubini, model na bazi dužine mešanja [10].

Usamljeni naper. Simulacije strujanja oko usamljenog napera imale su za cilj proveru empirijske funkcije koeficijenta C_D , kao ključnog parametra 1D modela. Proračun je obavljen za protok 500 m^3/s . Na Slici 6 prikazan je raspored dubine i pritiska oko napera, a na Slici 7, odgovarajući raspored brzina i strujnica.

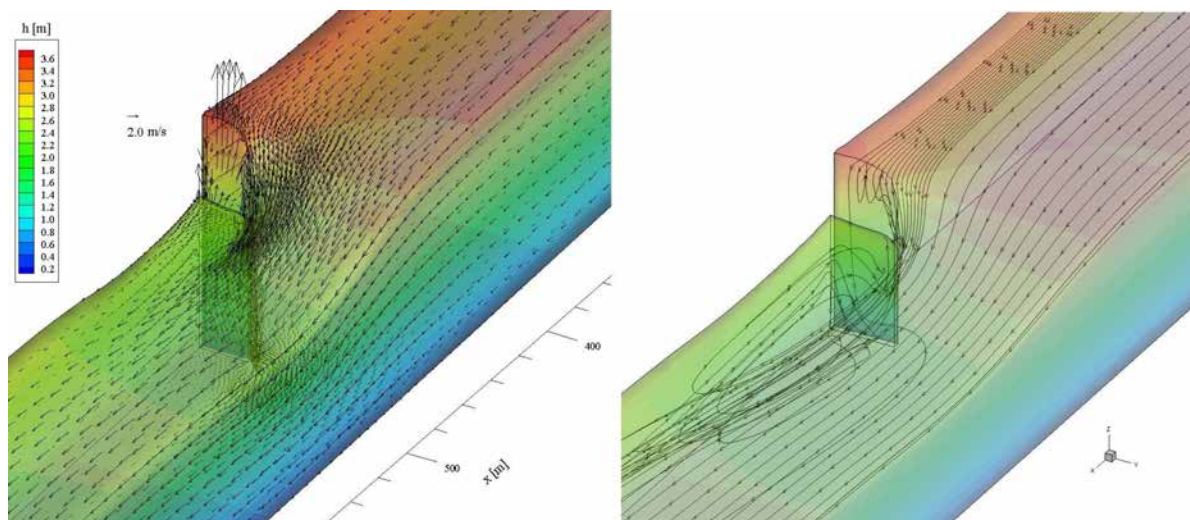


Slika 6: Rezultati proračuna prostornog (3D) strujanja oko usamljnog napera; levo: raspored dubine sa preklopljenom računskom mrežom (3912 elemenata, 2093 čvorova, 10 nivoa po dubini); desno: raspored pritiska pokazuje da je odstupanje od hidrostatičkog rasporeda prisutno samo u užoj zoni oko napera.

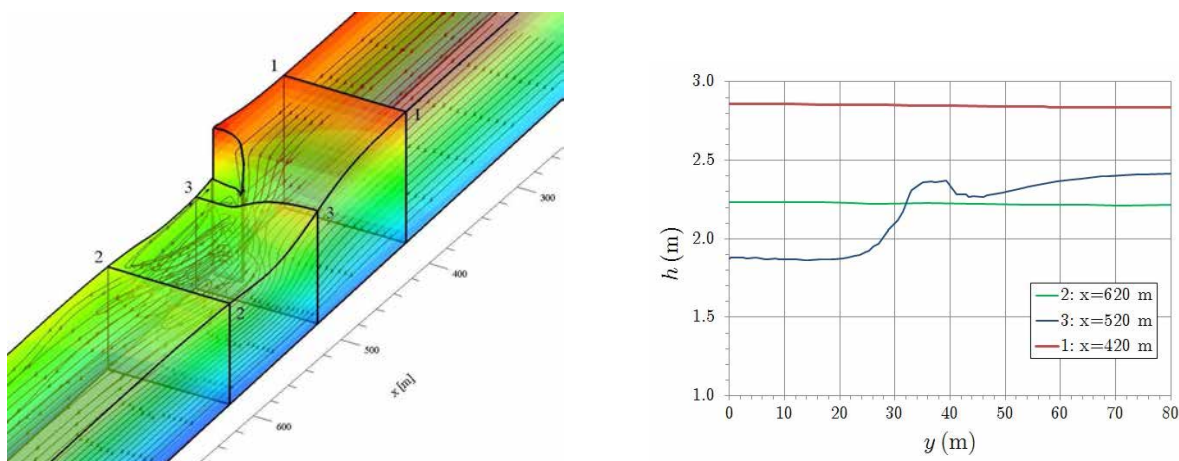
Figure 6: Numerical simulation of the 3D flow around a single groyne; left: water depth distribution with overlapped computational mesh (3912 elements, 2093 nodes, 10 levels over depth); right: pressure distribution shows that deviation from the hydrostatic pressure distribution is present only in the vicinity of the groyne.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI and SDH - Vršac, Serbia 2015.

Integriranjem brzina i pritiska po graničnim presecima kontrolnih zapremina prikazanim na Slici 8, sračunate su vrednosti sila pritiska i inercijalnih sila. Sračunata je i komponenta težine fluida, kao i sila trenja, na osnovu rasporeda smičuće brzine (Slika 9).



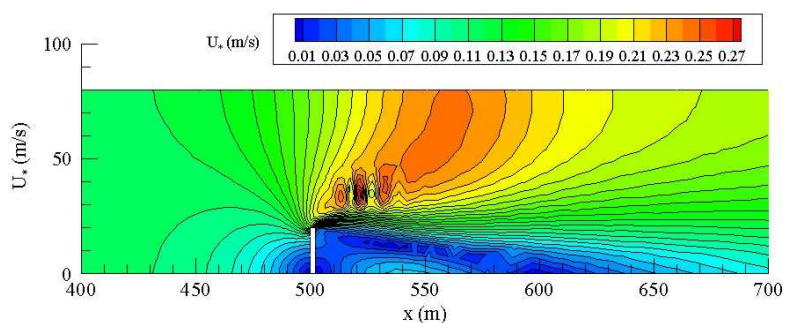
Slika 7: *Levo: raspored brzine; desno: strujnice*
Figure 7: *Left: distribution of velocity; right: streamlines*



Slika 8: *Levo: kontrolne zapremine; desno: raspored dubine u poprečim presecima.*
Figure 8: *Left: the control volumes; right: the water depth in cross-sections.*

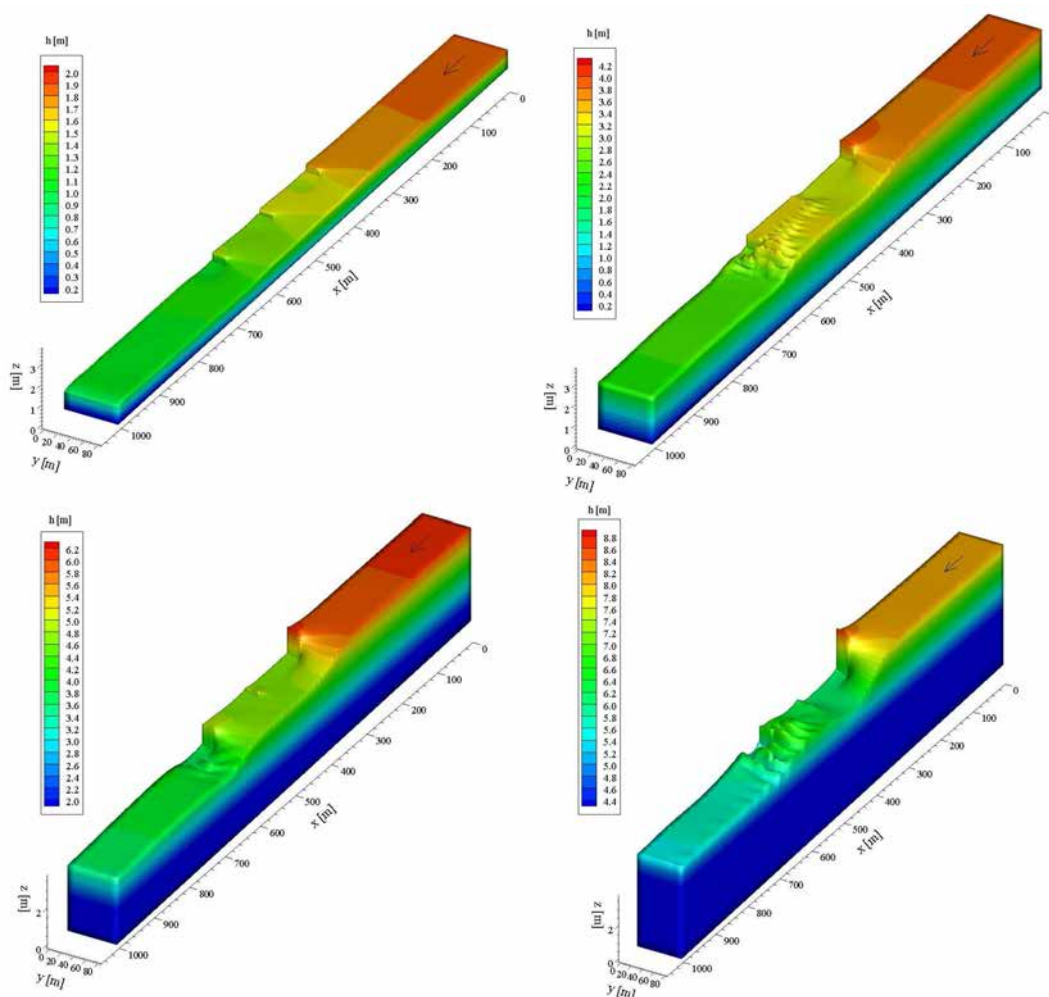
Zatim je iz jednačine (2) određena vrednost intenziteta sile otpora F_D , a iz (3), vrednost koeficijenta otpora $C_D=3,8$. Prema empirijskom izrazu koji je „ugradjen” u 1D model, ta vrednost iznosi: 2,7, što daje relativno odstupanje od 29%. Razlog za ovako značajno odstupanje treba tražiti, pre svega, u činjenici da je intenzitet turbulencije u prirodnim uslovima značajno veći negu u laboratorijskom kanalu; vrednost Rejnoldsovog broja na fizičkom modelu je oko 2400, a u „kanalu-prototipu”, 6200 (2,6 puta veća)², što upućuje na zaključak da se u prirodnim uslovima mogu čekivati značajno veći otpori od onih koje prognozira predloženi 1D model.

²Ova činjenica otvara pitanje opravdanosti korišćenja istog modela turbulencije, ili istih vrednosti parametara modela, za tokove tako različitih razmera.



Slika 9: Raspored smičuće brzine oko usamljenog napera
 Figure 9: Shear velocity distribution around a single groyne

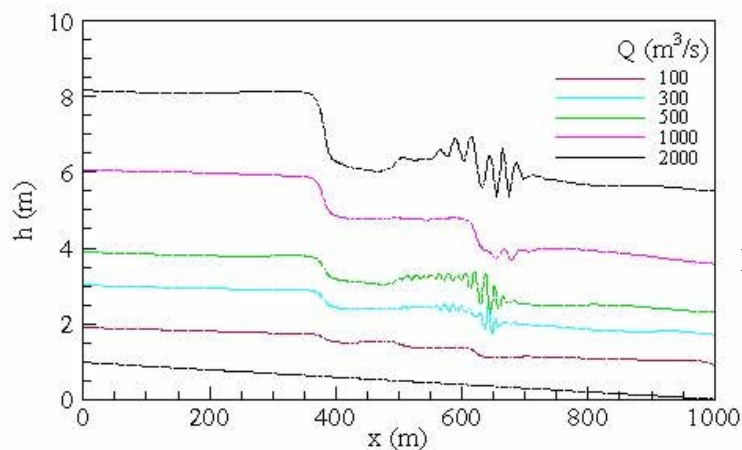
Sistem napera. Proračuni sa sistemom napera su poslužili za proveru veličine uspora. Na Slici 10 prikazane površine nivoa vode u zavisnosti od protoka.



Slika 10: Računske površine nivoa u slučaju sistema od 3 napera; s leva u desno i odogona dole: $Q = 100, 500, 1000$ i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. (Korišćena je mreža od 10869 elemenata i 5650 čvorova, sa 10 nivoa po dubini toka).

Figure 10: Calculated water surfaces in case of a system with 3 groynes; from left to right, and from top to bottom: $Q = 100, 500, 1000$ i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. (Computational mesh consisted of 10869 elements and 5650 nodes, with 10 levels over depth).

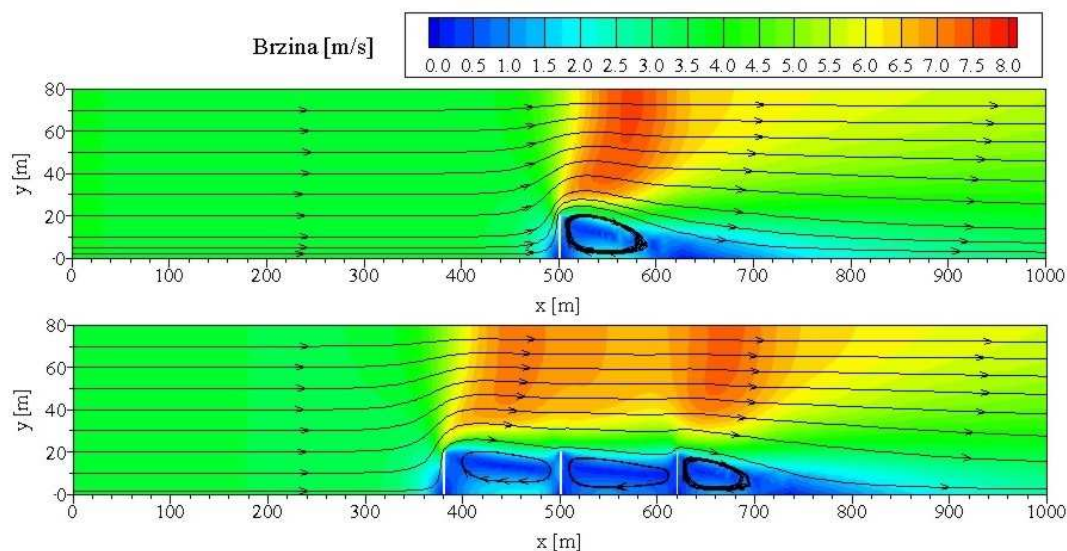
Na Slici 11, prikazani su karakteristični uzdužni profili nivoa po sredini kanala ($y=40$ m).



Slika 11: *Linije nivoa*
Figure 11: *Longitudinal profiles*

Može se primetiti da je pri relativno malom protoku od $100 \text{ m}^3/\text{s}$ površina vode samo blago poremećena oko napera, po čemu je slična onoj na fizičkom modelu; sa porastom protoka, poremećaji na površini postaju sve veći, jer uticaj suženja korita biva sve izraženiji. Pri protoku od $500 \text{ m}^3/\text{s}$, na nizvodnom kraju naperskog sistema javljaju se površinski stojeći talasi, dok pri ekstremno velikim protocima (1000 i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$), depresija iza uzvodnog napera u sistemu postaje sve izraženija, a nizvodni naperi deluju kao celina, sa smanjenjem strujanja u međunaperskim poljima.

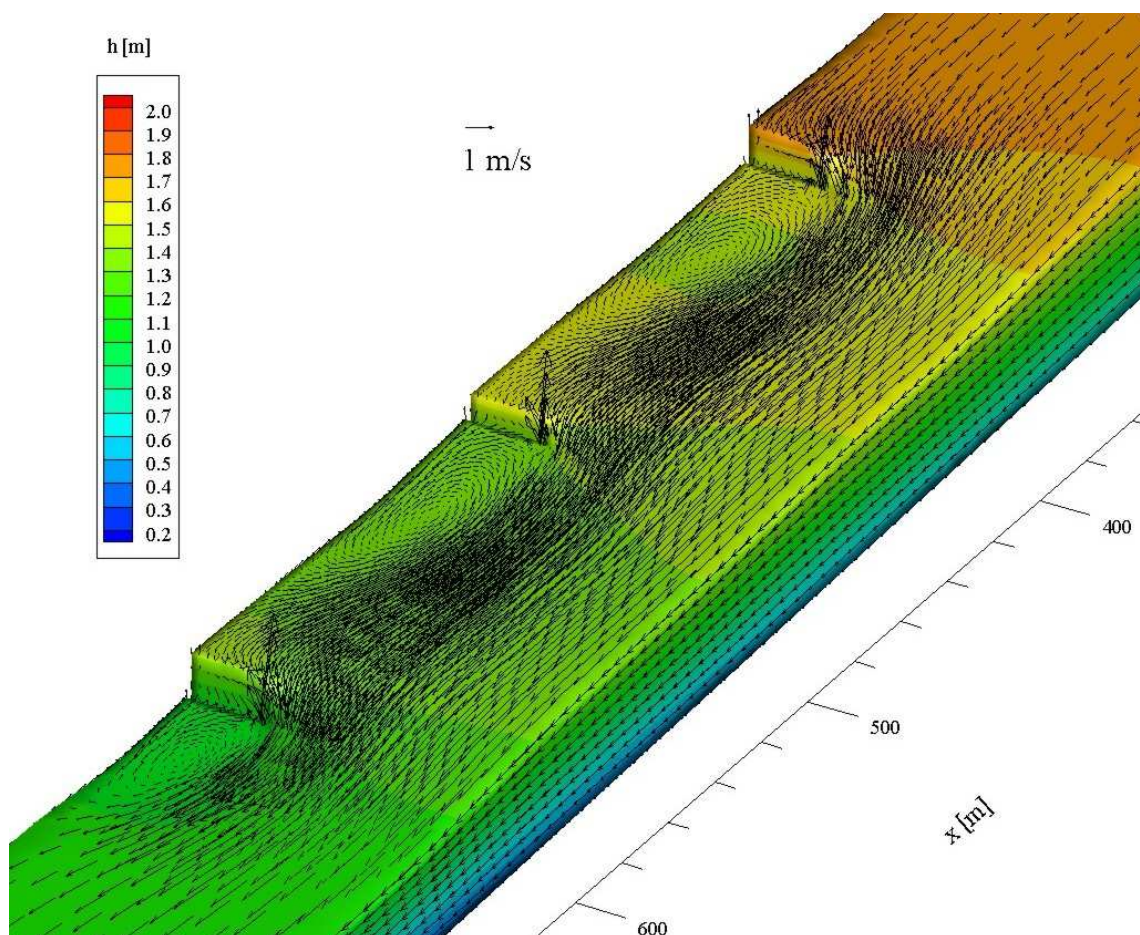
Uticaj sistema napera na strujanje može se veoma dobro uočiti poredjenjem sa usamljenim naperom u istim geometrijskim i hidrauličkim uslovima (Slika 12). Može se primetiti da usamljeni naper hidraulički deluje kao kratko, lokalno suženje, a sistem napera, kao dugačko suženje u kome vladaju povećane brzine toka.



Slika 12: *Ravanski (2D) prikaz strujnica i rasporeda intenziteta brzine oko usamljenog napera i sistema napera pri protoku od $2000 \text{ m}^3/\text{s}$*

Figure 12: *2D display of streamlines and velocity intensity distribution around a single groyne and a groyne field at a discharge of $2000 \text{ m}^3/\text{s}$*

Struktura turbulentnog toka oko niza napera može se analizirati prikazom polja brzine (Slika 13) i rasporedom strujnica (Slike 14).

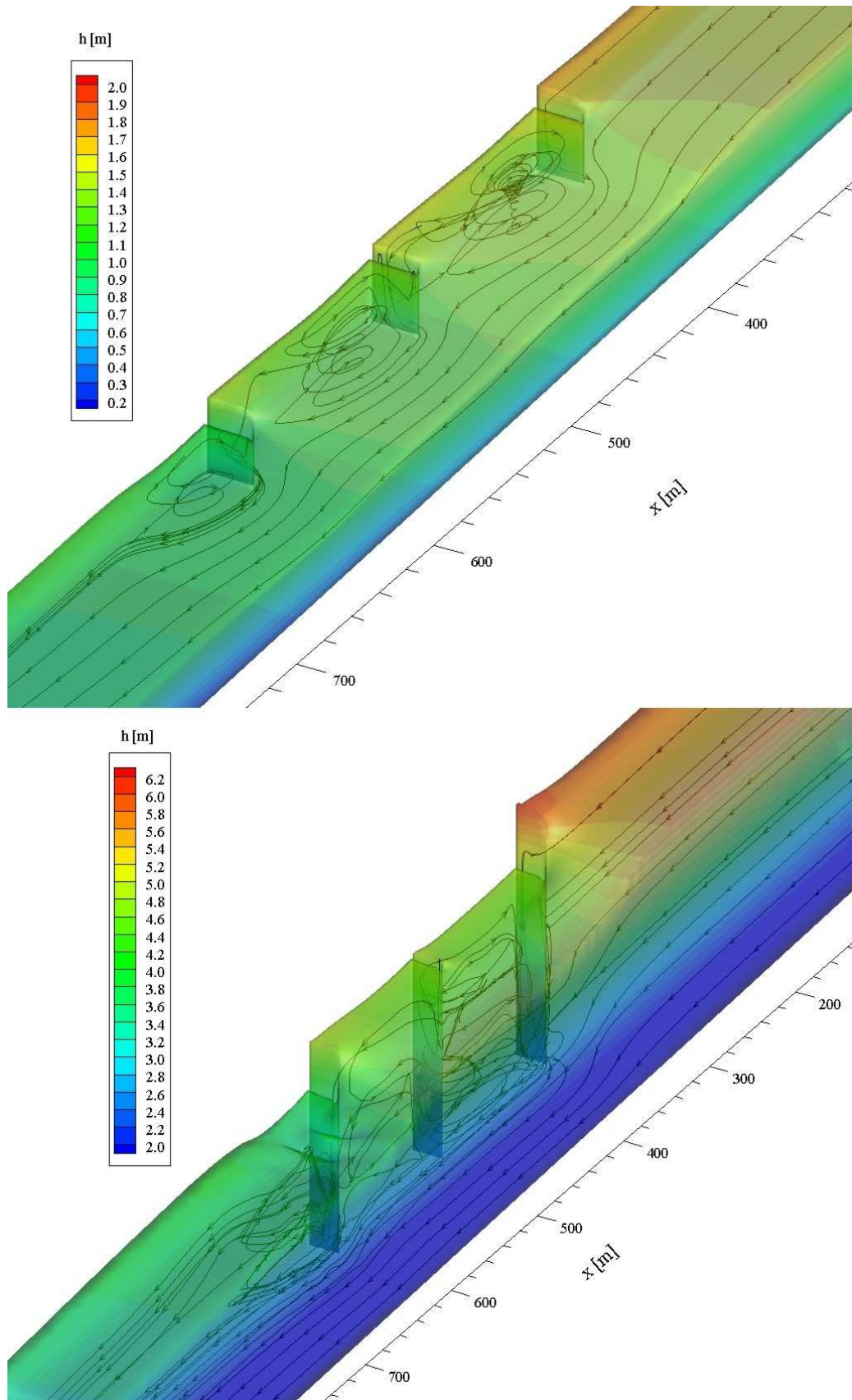


Slika 13: Polje brzine pri protoku od $100 \text{ m}^3/\text{s}$.
 Figure 13: Velocity field at a discharge of $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

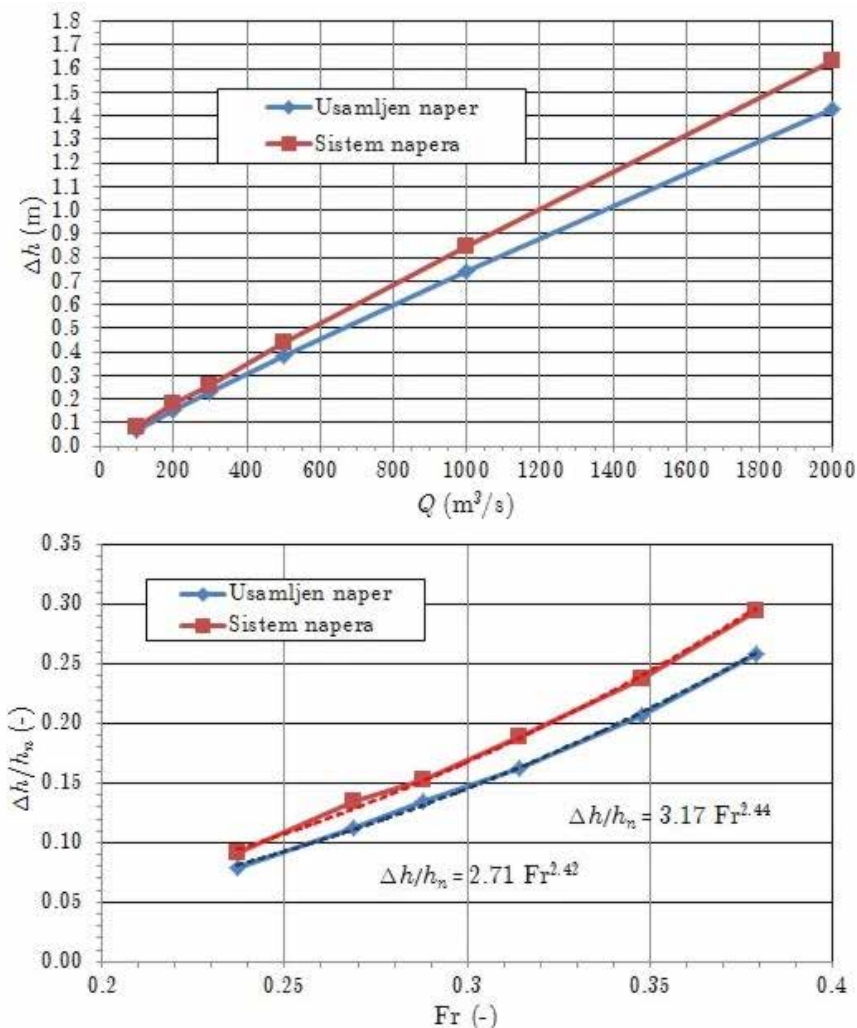
Može se primetiti da se pri malim protocima i brzinama toka ($100 \text{ m}^3/\text{s}$), u međunapernim poljima je dominantan primarni vrtlog sa vertikalnom osovinom (tipično recirkulaciono strujanje), dok je pri velikim protocima i brzinama ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$), turbulentna struktura toka postaje veoma složena, mnoštvom superponirajućih vrtloga sa vertikalnim i horizontalnim osovinama (Slika 14).

Preporuka. Upoređenjem rezultata koji su dobijeni za „kanal-prototip” pomoću 1D modela i 3D modela konstantovano je da 1D model daje denivelacije koje su za $20 \div 30\%$ manje od onih koje daje 3D model. Imajući ovo u vidu, predloženi 1D model se može koristiti u praksi za brzu procenu denivelacije, uz odgovarajuću korekciju rezultata.

Tako je za nepotopljeno opstrujavanje napera najpre definisana računaska zavisnost denivelacije od protoka, a zatim je ova zavisnost uopštena kao zavisnost relativne denivelacije (u odnosu na normalnu dubinu) u funkciji Fr broja (Slika 15). Pri tome, važno je ponoviti da kod neprelivnih napera, denivelacija i sila otpora ne zavise od broja napera (M) u sistemu, već isključivo od dužine i razmaka napera (odnosa S/L_n).



Slika 14: *Strujnice i dubine pri protocima 100 i 1000 m³/s.*
Figure 14: *Streamlines and water depths at discharges of 100 and 1000 m³/s.*



Slika 15: Računske zavisnosti za brzu procenu denivelacije.

Figure 15: Computational relationships for quick backwater assessment.

5 Primena 1D modela

Upotrebljivost predloženog 1D modela se ogleda u mogućnosti brzog variranja projektnog rešenja, što se ilustruje jednim primerom.

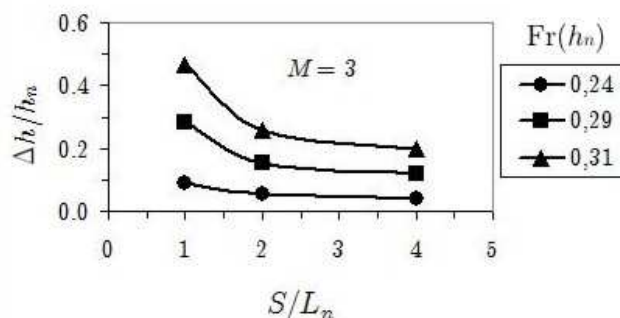
Neka se sistem od 3 upravna napera, dužine $L_n=25$ m, nalazi u rečnom koritu shematizovanog pravougaonog poprečnog preseka širine $B=80$ m ($L_n/B=0,3$), uzdužnog nagiba 0,001 i konstantne rapavosti $n=0,020$ $m^{-1/3}s$. Razmak napera je $S=50$ m ($S/L_n=2$). Ispitati uticaj protoka na veličinu uspora i silu otpora. Rezultati proračuna dati su u Tabeli 2.

Tabela 2: Računska dubina uspora uzvodno od sistema napera.

Table 2: Calculated backwater due to a system of groynes.

Q [m ³ /s]	$h_2 = h_n$ [m]	h_2/p_n [-]	h_1 [m]	h_1/L_n [-]	h_3 [m]	$\Delta h =$ $h_3 - h_2$ [m]	V_1 [m/s]	Fr_1 [-]	C_D [-]	F_D [kN]	$\sum F_D$ [kN]
100	0,88	0,29	0,96	0,04	0,96	0,09	1,304	0,181	2,302	47	50
300	1,71	0,57	1,96	0,08	1,97	0,26	1,917	0,191	3,062	275	293
500	2,33	0,78	2,75	0,11	2,77	0,44	2,275	0,192	3,507	623	664

Ako se ovaj primer iskoristi da bi se ispitaio uticaj pojedinih parametara na veličinu uspora, pa se pri istom stepenu suženja korita ($L_n/B=0,3$), varira razmak napera $S = 25, 50, 100$ m ($S/L_n=1,2,4$), dobijaju se rezultati prikazani na Slici 16.



Slika 16: Uticaj razmaka nepotopljenih napera na relativnu denivelaciju; broj napera nije bitan, pri istom stepenu suženja korita, denivelacija raste sa protokom (Fr brojem), a smanjuje se sa povećanjem razmaka napera.

Figure 16: Effect of spacing of unsubmerged groynes on the relative backwater magnitude; the number of groynes is irrelevant, at the same extent of channel constriction, backwater increases with discharge (Fr number), and decreases as the groyne spacing increases.

Na sličan način se vrlo brzo može ispitati i uticaj dužine napera (odnosno, stepena suženja korita L_n/B) na veličinu uspora.

6 Zaključci

1. Realativno jednostavan 1D računski model koji je predložen u literaturi [1, 2] pogodan je za procenu veličine uspora uzvodno od sistema napera u fazi projektovanja, kada je potrebno izabrati hidraulički najpovoljniju konfiguraciju napera za dati projektni protok, ili, kada je, za već izgrađeni sistem napera, potrebno proceniti njegov uticaj na usporavanje toka, što je važno u analizi evakuacije velikih voda.
2. Veličinu uspora koja se dobija primenom predloženog 1D modela treba uvećati za 20÷30%.
3. Kod nepotopljenog opstrujavanja sistema napera, uzvodno usporavanje toka presudno zavisi od stepena suženja korita. Pri datom suženju korita, veličina uspora raste sa protokom, a smanjuje se sa povećanjem razmaka napera, dok broj napera u sistemu nije od velikog uticaja.
4. Korišćenje prostornog 3D modela je relativno zahtevno, ali omogućava ne samo pouzdanu procenu usporavanja toka uzvodno od sistema napera, već i simulaciju strujanja u međunaperskim poljima, što otvara mogućnost procene brzine zasipanja ovih polja. Za predviđanje složenih strujanja i morfoloških promena u koritu sa gradjevinama, primena 2D i 3D modela treba da bude deo svakodnevne inženjerske prakse.

Literatura

- [1] Azinfar, H., Kells, J., (2009), *Flow resistance due to a single spur dike in an open channel*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 47, No 6, pp. 755-763.
- [2] Azinfar, H., Kells, J., (2011), *Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike field*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No 2, pp. 248-256.
- [3] Hervouet, J-M., (2007), *Hydrodynamics of Free Surface Flows – modelling with the finite element method*, Wiley, Chichester, England.
- [4] Ishii, C., Asada, H, Kishi, T., (1983), *Shape of Separation Region Behind a Groyne of Non-Overflow Type in Rivers*, Proceedings of the XX. IAHR Congress, Vol. II, Moscow.
- [5] Jansen, P.Ph., et al., (1979), *Principles of River Engineering*, Pitman.
- [6] Jovanović, M., (2012), *Numerička hidraulika u projektovanju regulacionih gradjevina – naperi sa krilima*, 16. Savetovanje SDHI i SDH, Donji Milanovac, str. 701-716.
- [7] Mayerle, R., Toro, F.M., Wang, S.S.Y., (1995), *Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes*, Journal of hydraulic research, Vol. 33, No 2, pp. 243-255.
- [8] Ouillon, S., Dartus, D. (1997) *Three-Dimensional Computation of Flow Around Groyne*, Journal of hydraulic engineering, Vol. 123, No 11, pp. 962-970
- [9] Safarzadeh, A., et al., (2010), *Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne*, River flow 2010 – Dittrich, Koll, Aberle, Geisenhainer (eds), Bundesanstalt für Wasserbau.
- [10] Telemac Modelling System V6.2, (2014), Telemac2D and Telemac3D documentation.

Флувијална ерозија на Јужној и Великој Морави

Слободан Петковић¹
Милан Малешев²
Вања Дамјановић³

АПСТРАКТ: У раду се разматра флувијална ерозија на Јужној и Великој Морави. Овај феномен се уочава генерално дуж целе дужине водотока и манифестује се променама речне трасе и продубљењем речног корита. С друге стране, флувијална ерозија се манифестује и локално, у оштрим кривинама речне трасе, у виду рушења речних обала. У току 2015 године, ерозија конкавних обала је опажена на неколико потеза Јужне и Велике Мораве. У раду је приказана анализа рушења обала у зависности од основних хидролошких, хидрауличких, морфолошких и псамолошких параметара водотока и гранулометријске структуре речних обала.

Кључне речи: ерозија обала, хидраулика, морфологија, гранулометријска структура

Fluvial erosion on Južna Morava and Velika Morava Rivers

ABSTRACT: Fluvial erosion on Južna and Velika Morava rivers is considered in this paper. This phenomenon is observed generally along the entire length of the rivers, with the change of the river alignment and deepening of river bed. On the other hand, the fluvial erosion is expressed as local phenomenon, in the sharp bends, resulting with bank erosion. During the 2015. the erosion of concave bands is observed on several reaches of Južna and Velika Morava rivers. Analysis of the bank erosion, related to the hydrological, hydraulic, morphological parameters of the rivers and the structure of the banks is presented in this paper.

Key words: bank erosion, hydraulics, morphology, grain-size distribution

¹ Проф. др Слободан Петковић, научни саветник, Институт „Јарослав Черни“, spetkovic@ikomline.net

² Милан Малешев, дипл. инж. грађ, Институт „Јарослав Черни“

³ Вања Дамјановић, дипл. инж. грађ, Институт „Јарослав Черни“

1 Увод

Алувијални водотоци као што су Јужна и Велика Морава имају корита формирана у сопственом наносу, тј. у алувијалним наслагама образованим у дугорочном процесу геоморфолошке генезе водотока. Структура материјала у речном кориту и приобаљу врло је слична структури речног наноса који долази из слива. Отуда је речно корито подложно перманентним морфолошким променама, услед интеракције морфолошких, хидрауличких и псамолошких фактора.

На Јужној и Великој Морави морфолошки процеси имају сличне карактеристике. Основна карактеристика ових процеса огледа се у великом интензитету морфолошких промена дуж водотока и разноврсности форми у речном кориту. Нарочито су карактеристичне велике и учестале промене речне трасе, које се одвијају преко механизма рушења речних обала. Рушење речних обала је углавном концентрисано у конкавним кривинама трасе корита.

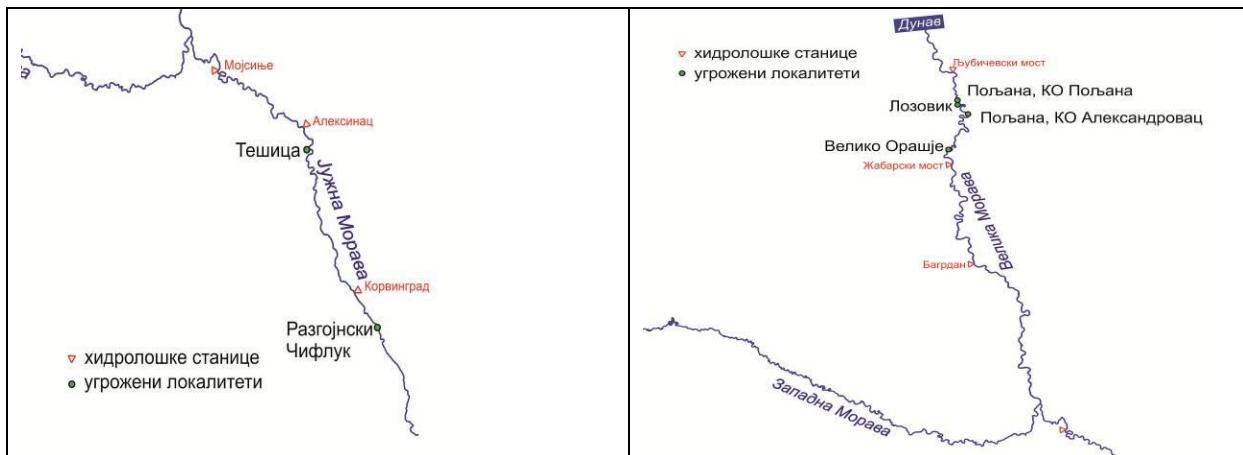
Морфолошке промене нису само манифестација природних речних процеса, већ одражавању и вештачке интервенције у водотоку. У том оквиру, треба истаћи утицај регулационих радова - изградње одбрамбених насипа и речних грађевина, као и просецања меандара. Поред регулационих радова, други антропогени фактор морфолошких процеса представља експлоатација материјала из речног корита и приобаља. Утицај регулационих радова и багеровање материјала из речног корита је на неким деоницама водотока врло значајан. Отуда се може рећи да су морфолошки процеси на Јужној и Великој Морави проследица интеракције природних и антропогених чинилаца.

На Јужној и Великој Морави су се у јануару, фебруару и марту 2015. године јавиле велике воде, које су изазвале значајна оштећења обала у зони заштитних водних објеката. Ова оштећења су повећала ризик од изливања и плављења штићених приобаља, па чак и рушења стамбених и објеката у насељима у приобаљу Јужне Мораве (Разгојнски Ћифлук, Тешица) и Велике Мораве (Лозовик, Велико Орашје, Пољана). Отуда је било неопходно предузимање хитних интервенција на овим локалитетима, које би обухватиле две категорија мера :

- мере за хитну санацију рушевних обала,
- мере којима се постиже дугорочна стабилизација речне трасе и контрола флувијалне ерозије на нестабилним деоницама.

Међутим, пре предузимања техничких мера санације рушевних обала, неопходна је анализа узрока рушења обала, која би обухватила све најважније факторе флувијалне ерозије – хидролошке, хидрауличке, псамолошке, као и гранулометријску структуру обала.

На слици 1 приказани су локалитети рушевних обала, као и распоред водомерних станица дуж водотока.



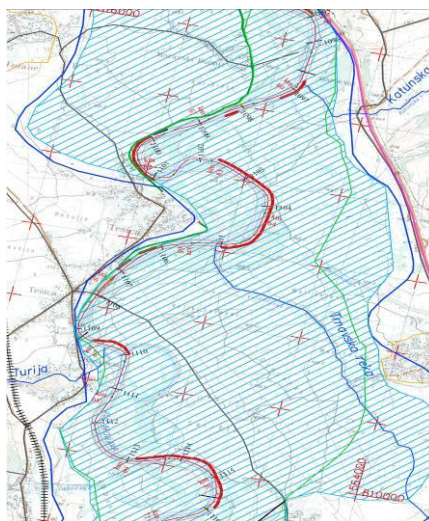
Слика 1. Локалитети рушевних обала и распоред водомерних станица дуж водотока
Figure 1. Disposition of eroded banks and hydrometric stations along the rivers

2 Приказ резултата теренских истражних радова на рушевним обалама

На слици 2 приказан је пример деонице Јужне Мораве код села Тешице, са распоредом рушевних обала.

Теренски истражни радови су обухватили детаљан обилазак терена и рекогносцирање стања корита, картирање рушевних обала на угроженим деоницама (дефинисање положаја и гранулометријског састава слојева), геодетска снимања речног корита и обала, као и захватање узорака наноса из корита и обала, са гранулометријском анализом.

На основу теренске идентификације рушевних обала дуж Јужне и Велике Мораве, детерминисане су њихове основне карактеристике (табела 1).

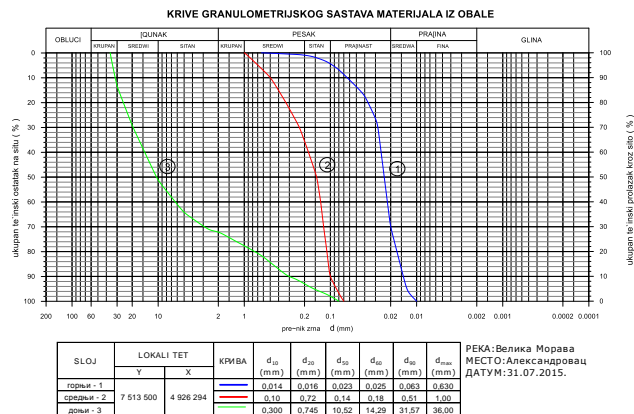
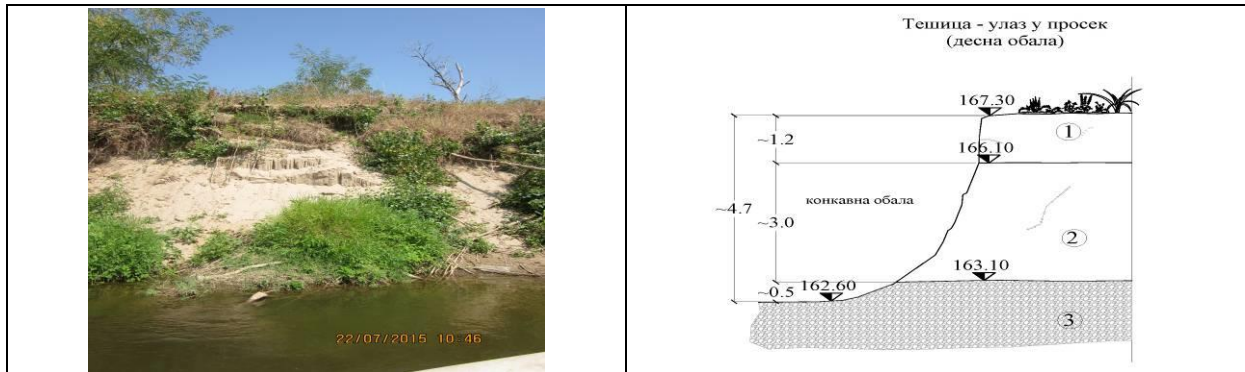


Слика 2. Ситуациони приказ рушевних обала код села Тешице
Figure 2. Disposition of eroded banks in the reach Tešica

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Табела 1. Положај и карактеристике рушевних обала
Table 1. Characteristics of eroded banks

Водоток	Назив локалитета	Стационажа (km)	Угрожено насеље	Вегетација на обали пре рушења	Обала
Јужна Морава	Тешица	62	Тешица	Узан шумски појас Насеље Тешица	лева
Јужна Морава	Разгојнски Чифлук	116	Разгојнски Чифлук	Узан шумски појас Насеље Р. Чифлук	лева
Велика Морава	Пољана 1.	31-33	Пољана	Пољопривредно земљиште	десна
Велика Морава	Лозовик	33 - 35	Лозовик и Милошевац	Пољопривредно земљиште	лева
Велика Морава	Пољана 2.	41- 42	Александровац	Пољопривредно земљиште	десна
Велика Морава	Велико Орашје	65	Велико Орашје	Узан шумски појас Пољопривредно земљиште	лева



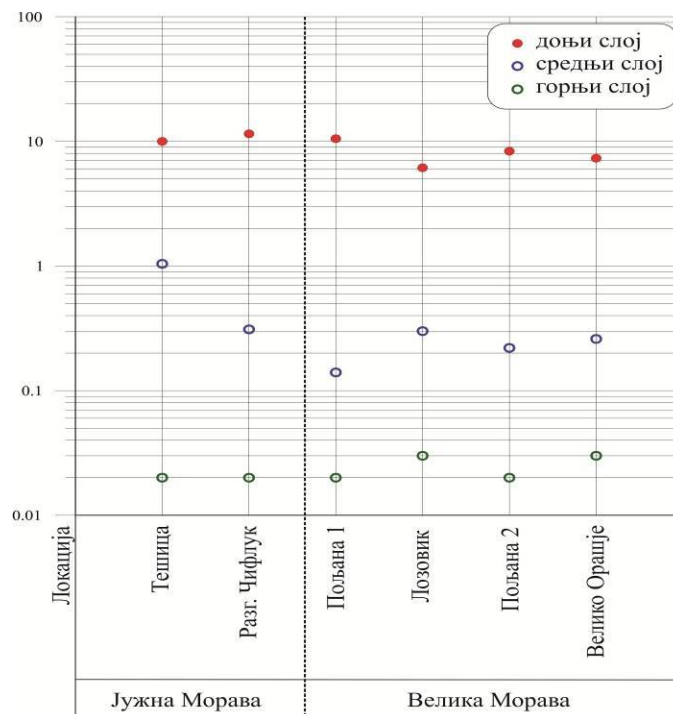
Слика 3. Резултати теренских истраживања на локалитету рушевне обале код села Тешице

Figure 3. Results of the field investigation of eroded bank at Tešica

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

На слици 3 приказани су резултати теренских истраживања на локалитету рушевне обале код села Тешице. Може се констатовати слојевита структура обале : горњи слој је од кохерентног материјала (прашинастог песка и прашине), средњи слој је од песка, док је доњи слој састављен од шљунка.

Као што је истакнуто, теренска истраживања су обухватила и анализу гранулометријске структуре обала, у сва три слоја. Варијације средњег пречника зрна наноса D_{50} су приказани на слици 4, по локалитетима и по слојевима. Може се закључити да је изражена врло јасна диференцијација слојева. Доњи слој на свим локалитетима има шљунковиту структуру, са распоном D_{50} од 6 -11 mm, средњи слој има дијапазон D_{50} од 0.2 -1 mm, док је највиши слој састављен од врло ситног кохерентног материјала (прашинастог песка и прашине), са D_{50} од 0.02 – 0.03 mm. Посебно треба истаћи да нема сигнификантних разлика у структури слојева између Јужне и Велике Мораве.



Слика 4. Гранулометријска структура (D_{50}) слојева на рушевним обалама
Figure 4. Grain-size distribution of layers on the eroded banks

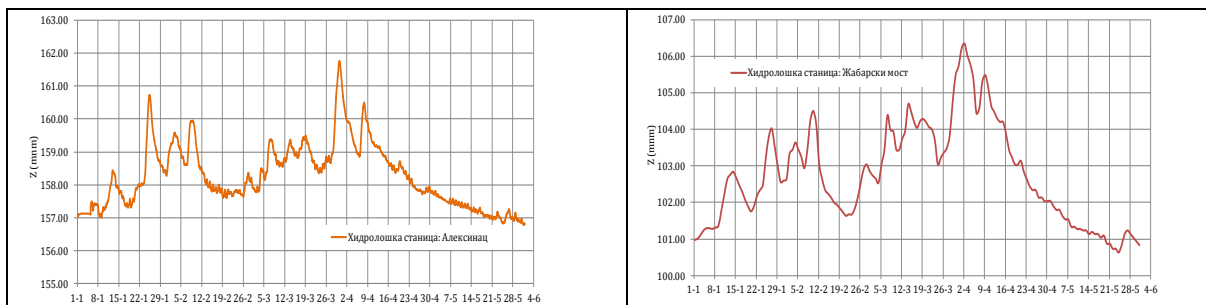
3 Хидролошки и хидраулички фактори рушења обала

На рушења обала Јужне и Велике Мораве, у току 2015. године, у највећој мери су утицали хидролошки фактори. На слици 5 су приказани нивограми Јужне Мораве (на водомерној станици Алексинач) и Велике Мораве (на водомерној станици Жабарски мост), у периоду од јануара до јуна 2015. године. Може се констатовати изразита сличност ових нивограма, са неколико таласа већих вода, од којих је највећи забележен почетком априла 2015. године.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Максимални проток Јужне Мораве, на сектору на коме су регистрована рушења обала, био је $1120 \text{ m}^3/\text{s}$, са повратним периодом од око 10 година. На Великој Морави је максимални проток у процесу рушења обала износио је око $1700 \text{ m}^3/\text{s}$, са повратним периодом око 7 година.

На основу упоређења нивограма Јужне и Велике Мораве се може констатовати да је пораст нивоа Јужне Мораве почетком априла износио око 2,80 m, у интервалу од 4 дана, док је на Великој Морави пораст нивоа у највећем таласу износио 3,40 m, у интервалу од 7 дана. То значи да је динамика великих вода бржа на Јужној Морави, што је и логично, имајући у виду величину и карактер водотока.



Слика 5. Нивограми Јужне Мораве на в.ст. Алексинач и Велике Мораве на в. ст. Жабарски мост у периоду 1.1.2015-31.5.2015. године
Figure 5. Variation of the water level on two hydrometric stations in the period january- june 2015.

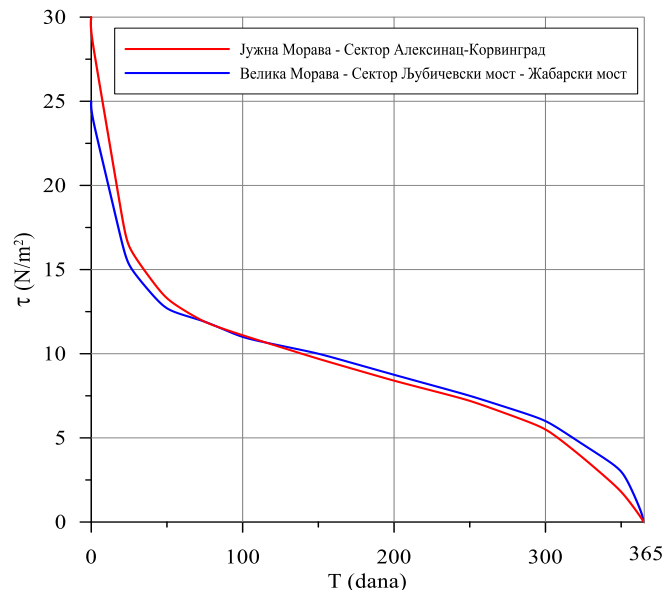
Основни закључак који произлази из хидролошке анализе се односи на чињеницу да су се рушења обала Јужне и Велике Мораве, у току 2015. године, нису десила при екстремно великим водама, имајући у виду пробалистички ранг максималних протицаја, са повратним периодом од 7-10 година. То значи се рушења обала Јужне и Велике Мораве дешавају у ширем хидролошком дијапазону. Другим речима, неопходна је контрола стања обала ових река после сваке веће воде.

Хидраулички фактори рушења обала Јужне и Велике Мораве се могу анализирати на основу разматрања хидрауличких параметара везаних за вучени нанос, имајући у виду да до рушења долази услед ерозије подножја обала, формираних у слоју шљунка. То значи да основни хидраулички фактор транспорта вученог наноса – вучна сила тока, има значајну улогу у процесу рушења обала. Отуда се као индикатор хидрауличких услова у том процесу може усвојити крива трајања интензитета вучне силе на посматраним секторима водотока.

На слици 6 приказане су упоредо криве трајања интензитета вучне силе На Јужној и Великој Морави. На Јужној Морави, криве репрезентују сектор између водомерних станица Алексинач и Корвинград, а на Великој Морави сектор између водомерних станица Љубичевски мост и Жабарски мост (где је дошло до највећих рушења обала). Може се констатовати да су ове криве сличне, али се разлике јављају у дијапазонима екстремно великих и врло малих вода. У првом дијапазону, вредности вучних сила су веће на Јужној Морави, док су у дијапазону малих вода веће на Великој Морави. Овај однос је логичан, јер су при малим водама дубине тока на Јужној Морави екстремно

мале, што условљава мале величине вучних сила. С друге стране, при великим водама долази до изражаја бујични карактер Јужне Мораве, са већим вредностима вучних сила.

С обзиром да криве трајања интензитета вучне силе генерално репрезентују хидрауличке услове водотока за транспорт вученог наноса, односно, покретање крупнијих фракција материјала са речног дна, њихово упоређење на Јужној и Великој Морави показује да нема сигнификантне разлике између ова два водотока. То значи да је врло сличан потенцијал ова два водотока за флувијалну ерозију и рушење речних обала.



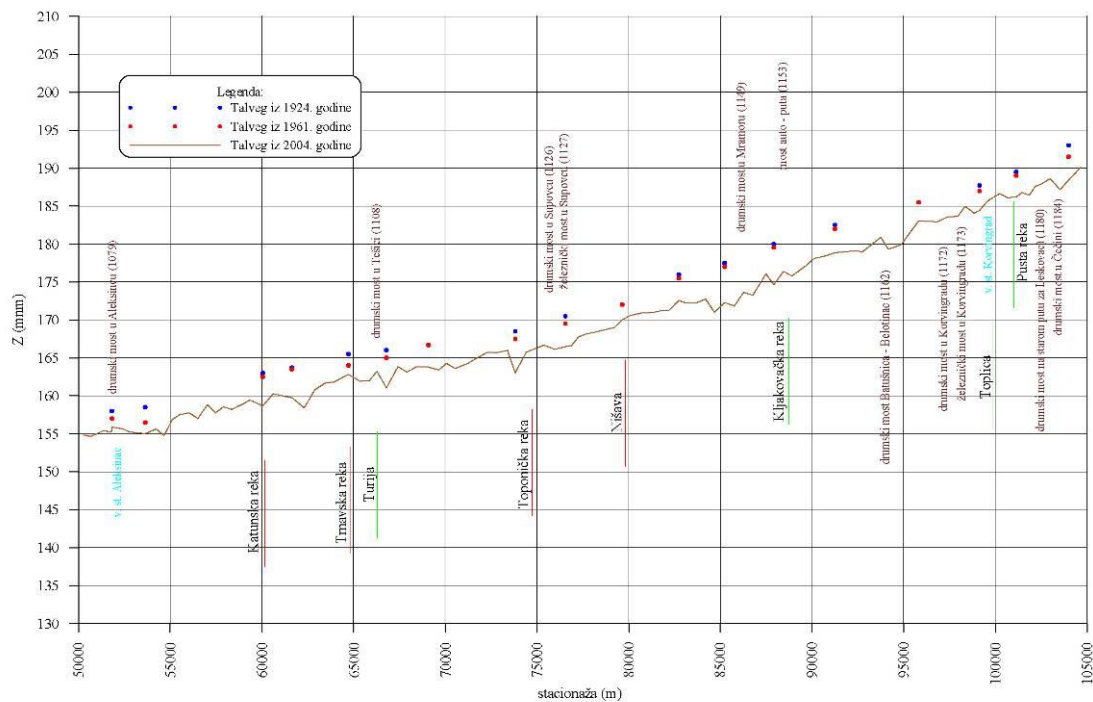
Слика 6. Криве трајања интензитета вучне силе На Јужној и Великој Морави
Figure 6. Duration curve of the tractive force on Južna and Velika Morava

4 Анализа узрока рушења обала дуж Јужне и Велике Мораве

Корито Јужне Мораве формирано је у речној долини, одређених геоморфолошких карактеристика, које су условиле уздужни профил речног корита. Према томе, уздужни пад речног корита је диктиран геоморфолошким факторима. Међутим, то не значи да је тиме фиксиран и висински положај речног корита дуж корита водотока. Линија талвега је променљива у времену, услед промене положаја речног корита у плану и вертикалних осцилација речног дна, које настају у току морфолошко-псамолошких процеса. Посматрајући у једном дужем временском периоду, промене висинског положаја речног дна кореспондирају циклусима ерозије и засипања речног корита, који резултирају из односа транспорта наноса из слива и транспортне способности тока за нанос.

Уздужни профил корита Јужне Мораве, од састава са Западном Моравом до Грделице приказан је по деоницама водотока, на слици 7. На дијаграму су приказане континуалне линије талвега на целој дужини водотока, за три временска пресека (1924, 1961. и 2004. године). На основу упоређења талвега из три временска пресека, дуж посматраног сектора Јужне Мораве, може се закључити да је дуж целог посматраног сектора од км 0 – км 146 дошло је до генералног продубљења речног корита.

Као што је истакнуто, алувијални водотоци као што су Јужна и Велика Морава имају корита формирана у сопственом наносу, због чега су подложна перманентним морфолошким променама, услед интеракције морфолошких, хидрауличких и псамолошких фактора. Рушења конкавних обала ових река одвијају се у перманентним морфолошким процесима, који се не могу никада зауставити рационалним техничким мерама (не узимајући у обзир нереалну изградњу обалоутврда на целој дужини водотока). Једини рационални приступ овој проблематици састоји се у праћењу и контроли морфолошких промена, као и благовременим мањим интервенцијама на локалитетима потенцијалне деградације речних обала. У том оквиру, посебан значај има анализа узрока рушења обала која су регистрована у непосредној прошлости.



Слика 7. Упоредне линије талвега корита Јужне Мораве у периоду 1924 – 2004.

Figure 7. Comparison of talwegs of Južna Morava, in the period 1924 – 2004.

Као што је истакнуто, у току 2015. године су евидентирана рушења обала Јужне Мораве на 2 локалитета, а на Великој Морави на 4 локалитета. У табели 2. приказане су морфолошке карактеристике рушевних обала, детерминисане на основу геодетских снимања.

Из табеле 2 се може закључити да се рушевне обале налазе у дијапазону радијуса кривине конкавне обале од 250 – 700 метара, док су дужине кривина у опсегу од 450 – 2200 метара. Висина конкавне обале варира од 4.8 – 6.8 метара.

У склопу анализе узрока рушења обала, најпре се поставља питање да ли постоје одређене законитости у овом процесу и да ли се могу уочити неке корелације морфолошких параметара (радијуса и дужине кривине, висине обала) са параметрима деформације обала (дужине рушевних обала и померања линије обала услед рушења).

У теорији речне хидраулике и морфологије, разматран је и проблем рушења обала. У том оквиру, истичу се истраживања групе енглеских аутора (Hey, Bathurst, Thorne, 1982.) За анализу рушења обала на Јужној и Великој Морави посебно је инресантно разматрање ерозије „сложених обала“ (composite banks). У највећем броју случајева, сложене обале се састоје од горњег слоја кохерентног материјала и доњег слоја шљунка (као и у случају Јужне и велике Мораве). У анализи овог феномена (Thorne, 1982) се истиче као најважнији фактор у том процесу однос масе материјала који доспева до подножја обале, услед рушења обале, према динамици покретања и транспорта материјала речним током. Од односа прилива наноса услед рушења обале и одношења материјала речним током зависи геометрија обале (форма и нагиб косине).

Табела 2. Морфолошке карактеристике рушевних обала
Table 2. Morphological characteristics of eroded banks

Водоток	Локалитет	Радијус кривине конкавне обале	Дужина кривине	Дужина рушевне обале	Висина обале	Померање високе обале	Кубатура еродираниог материјала
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ³)
Јужна Морава	Тешица	250	1200	200	4,8	max 20	13.000
Јужна Морава	Разгојнски Чифлук	300	450	130	4,8	max 25	8.000
Велика Морава	Пољана 1.	550	1700	1500	5,0	max 40	95.000
Велика Морава	Лозовик	500	2000	1700		max 25	170.000
Велика Морава	Пољана 2.	700	2200	2000	6,8	max 70	200.000
Велика Морава	Велико Орашје	350	1000	500		max 20	5.000

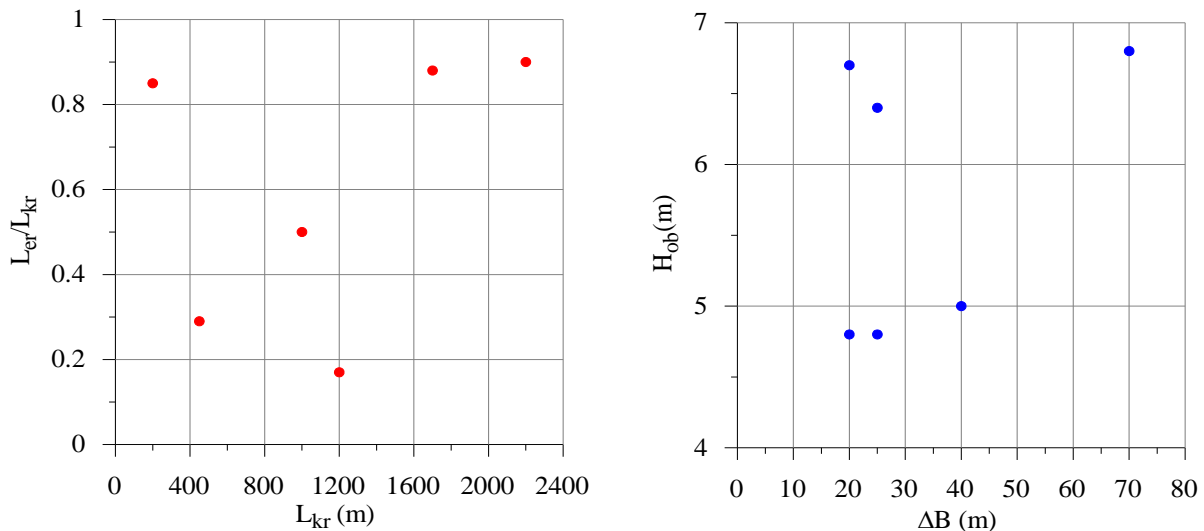
Са практичног аспекта, од интереса би било истраживање одређених морфолошких законитости процеса рушења речних обала. Међутим, за то био потребна много већа база података о рушевних обалама на Јужној и Великој Морави. Подаци за 6 рушевних обала, регистрованих у 2015. години, су сигурно недовољни за озбиљнију морфолошку анализу. Ипак, извршен је покушај интерпретације ових података, у циљу провере евентуалних законитости процеса рушења речних обала. У том смислу, анализиране су корелације основних морфолошких параметара- дужине рушевних обала (**Ler**), дужине кривина (**Lkr**), висине конкавне обале (**Hob**) и померање обала у процесу рушења (**Δ B**) (табела 2). Поред ових параметара, у анализи су коришћени још неки „изведени параметри“ (табела 3): бездиминзионални односи између дужине рушевне обале и укупне дужине конкавне кривине (**Ler/Lkr**), као и односа дебљине горњег и средњег слоја (**(Hg + Hs)**) према укупној висини обале (**Hob**).

Поменути основни и изведени морфолошки параметри интерпретирани су у форми корелативних веза. На слици 8 приказани су корелациони дијаграми : (**Ler/Lkr**) са **Lkr** и **Hob** са **Δ B**.

Из слике 8 се може констатовати само наговештај неких морфолошких законитости процеса рушења обала :

- захваћеност конкавне обале ерозијом (**Ler/Lkr**) се повећава са укупном дужином кривине (**Lkr**),
- померање обале у процесу рушења (**ΔB**) се повећава са висином обале (**Hob**).

Као што је истакнуто, за утврђивање поузданијих корелативних веза између морфолошких параметара процеса рушења речних обала неходна је много већа база података о рушевних обалама на Јужној и Великој Морави, али дијаграми на слици 8 ипак индицирају неке закључке.



Слика 8. Корелације морфолошких параметара
Figure 8. Correlations of morphological parameters

Табела 3. Изведени параметри рушевних обала
Table 3. Derived parameters of eroded banks

Водоток	Назив локалитета	Дужина кривине Lkr	Дужина рушевне обале Ler	Ler ----- Lkr	Висина обале Hob	Дебљина гор. сред. слоја (Hg + Hs)	(Hg+Hs) Hob
		(m)	(m)		(m)	(m)	
Јужна Морава	Тешица	1200	200	0,17	4,8	4,2	0,87
Јужна Морава	Разгојнски Чифлук	450	130	0,29	4,8	4,0	0,83
Велика Морава	Пољана 1.	1700	1500	0,88	5,0	4,5	0,90
Велика Морава	Лозовик	2000	1700	0,85	6,4	4,1	0,64
Велика Морава	Пољана 2.	2200	2000	0,90	6,8	6,0	0,88
Велика Морава	Велико Орашје	1000	500	0,50	6,7	4,0	0,60

5 Закључци

- Флувијална ерозија на Јужној и Великој Морави се јавља генерално дуж целе дужине водотока и манифестује се променама речне трасе и продубљењем речног корита. С друге стране, флувијална ерозија се манифестује и локално, у оштрим кривинама речне трасе, у виду рушења речних обала. Продубљење корита је проузроковано променом биланса речног наноса у сливу и водотоку. Смањење ерозионе продукције наноса, услед биолошких, биотехничких мера, условило је редукују улаза наноса у водоток, тако да се јавио вишак транспортног капацитета тока и опште ерозије корита. Ерозија подножја конкавних кривина је битно допринела рушењу обала.
- Дуж тока Јужне и Велике Мораве постоји велики број рушевних обала, које се региструју сваке године на другим локалитетима. У току 2015. године евидентирана су 6 локалитета интензивног рушења обала – два на Јужној и четири на Великој Морави. Међутим, рушења конкавних обала речних кривина на овим локалитетима се разликују по фазама овог процеса – на неким потезима је евидентна почетна фаза рушења (када је ерозија захватила само један део конкавне кривине), док је на другим скоро цела кривина нападнута флувијалном ерозијом.
- Хидролошки фактори рушења обала у току 2015. године су врло слични на Јужној и Великој Морави. Осмотрено је неколико таласа већих вода, од којих је највећи забележен почетком априла 2015. године. Основни закључак који произлази из хидролошке анализе се односи на чињеницу да су се рушења обала Јужне и Велике Мораве, у току 2015. године, нису десила при екстремно великим водама, имајући у виду пробалистички ранг максималних протицаја, са повратним периодом од 7 -10 година. То значи се рушења обала Јужне и Велике Мораве дешавају у ширем хидролошком дијапазону. Другим речима, неопходна је контрола стања обала ових река после сваке веће воде.
- Хидраулички фактори рушења обала Јужне и Велике Мораве се углавном односе на параметаре везане за вучени нанос, имајући у виду да до рушења долази услед ерозије подножја обала, формираних у слоју шљунка. То значи да основни хидраулички фактор транспорта вученог наноса – вучна сила тока, има значајну улогу у процесу рушења обала. Отуда се као индикатор хидрауличких услова у том процесу може усвојити крива трајања интензитета вучне силе на посматраним секторима водотока. На основу упоређења ових кривих за Јужну и Велику Мораву евидентна је њихова сличност, при чему се разлике јављају у дијапазонима екстремно великих и врло малих вода. У првом дијапазону, вредности вучних сила су веће на Јужној Морави, док су у дијапазону малих вода веће на Великој Морави. Овај однос је логичан, јер су при малим водама дубине тока на Јужној Морави екстремно мале, што условљава мале величине вучних сила. С друге стране, при великим водама долази до изражаја бујични карактер Јужне Мораве, са већим вредностима вучних сила.
- На свим локалитетима је утврђена слојевита структура обале : горњи слој је од кохерентног материјала (прашинастог песка и прашине), средњи слој је од песка, док је доњи слој састављен од шљунка, при чему нема сигнификантних

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

разлика у структури слојева између Јужне и Велике Мораве. Гранулометријка испитивања су показала врло јасну диференцијацију слојева. Доњи слој на свим локалитетима има шљунковиту структуру, са распоном D_{50} од 6 -11 mm, средњи слој има дијапазон D_{50} од 0.2 -1 mm, док је највиши слој састављен од врло ситног кохерентног материјала (прашинастог песка и прашине), са D_{50} од 0.02 – 0.03 mm.

- За истраживање одређених морфолошких законитости процеса рушења речних обала била би потребна много већа база података о рушевних обалама на Јужној и Великој Морави. Подаци за 6 рушевних обала, регистрованих у 2015. години, су сигурно недовољни за озбиљнију морфолошку анализу. Ипак, извршен је покушај интерпретације ових података, у циљу провере евентуалних законитости процеса рушења речних обала. У том смислу, анализиране су корелације основних морфолошких параметара, који индицирају само наговештај неких морфолошких законитости процеса рушења обала.

Литература

1. Petković, S, N. Dragović, S. Marković (1999): Erosion and sedimentation problems in Serbia. Hydrological sciences journal.
2. Petković, S. (1995): Geneza i transport nanosa u slivu Južne Morave. Šumarski fakultet Beograd.
3. Hey R.D, Bathurst J.C., Thorne C.R.: Gravel-bed Rivers, John Wiley and Sons, 1982.
4. Thorne C.R.: Bank Erosion, in: Gravel-bed Rivers, John Wiley and Sons, 1982.

О утицају подводних каскада на неке хидродинамичке показатеље течења на речним ушћима

Дејана Ђорђевић¹
Иван Стојнић²

САЖЕТАК: На речним ушћима се услед исталожавања крупног наноса који пристиже коритом притоке стварају подводне каскаде због којих је дно притоке издигнуто изнад дна реке. У раду се помоћу модела просторног течења испитује како присуство и висина каскаде утичу на: 1) количину кретања коју притока у различитим хидрауличким условима уноси у реку и 2) вредности параметара помоћу којих се у моделима линијског течења обухвата њен утицај. Испитивањима су обухваћене четири висине каскаде (Δz_p), укључујући и случај када нема каскаде: $\Delta z_p / h_n = \{0,00; 0,10; 0,25; 0,50\}$ и три односа протока реком узводно и низводно од ушћа: $D_R = \{0,250; 0,583; 0,750\}$. Резултати су показали да са повећањем висине каскаде распоред угла скретања тока у низводном пресеку притоке постаје равномернији, а његово одступање од угла улива све мање, као и да се коришћењем средње вредности угла скретања тока прецењује вредност компоненте силе инерције притоке која улази у динамичку једначину на ушћима без каскаде и са каскадом највеће висине ($\Delta z_p = 0,50 h_n$).

Кључне речи: речно ушће, подводна каскада, просторно течење, расподела количине кретања, угао скретања тока δ ,

Effects of a bed step on some hydrodynamic properties of flow in river confluences

ABSTRACT: In many cases a river confluence is characterised by a development of an avalanche face (bed step) at a tributary entrance to a confluence. The development is caused by a deposition of coarser sediments that are arriving from the tributary channel and it results in bed elevation discordance between the lateral and main channels. The paper aims at studying effects of a bed step on: 1) a momentum transfer from a tributary to the main channel under different hydrological scenarios and 2) values of parameters in 1D confluence models. Four characteristic values of the bed elevation discordance ratio $\Delta z_p / h_n = \{0,00; 0,10; 0,25; 0,50\}$, including the concordant beds' case, are considered for the following discharge ratio values between the main river channels upstream and downstream of a confluence: $D_R = \{0,250; 0,583; 0,750\}$. It is shown that: 1) the flow deflection at the tributary entrance to the confluence reduces with an increase in the bed step height and 2) the component of a tributary force of inertia, which acts in the direction of the main channel flow, is overestimated in a concordant beds' confluence and a discordant beds' confluence with the maximal bed step height ($\Delta z_p = 0,50 h_n$), when calculated using an average flow deflection angle value.

Keywords: river confluence, bed step, 3D flow, momentum distribution, flow deflection angle

¹ Др Дејана Ђорђевић, дипл. грађ. инж., доцент, dejana@grf.bg.ac.rs, Грађевински факултет Универзитета у Београду

² Иван Стојнић, мастер инж. грађевинарства, демонстратор, Грађевински факултет Универзитета у Београду

1 Увод

Издизање дна притоке изнад дна матичне реке је, како су показала обимна снимања речног дна средином 1980их [8], честа појава на речним ушћима. Дно притоке постепено се издиже услед таложења крупнијег наноса који доноси притока и продубљивања дна матичне реке на ушћу, које је последица сложеног међудејства турбулентног тока и речног дна. Издизањем речног дна притоке у односу на дно матичне реке, стварају се подводне каскаде које додатно усложњавају струјну слику на речним ушћима. Постојање каскада у речном дну утиче, између осталог, на расподелу количине кретања која се кроз низводни пресек притоке уноси у реку. Са повећањем висине каскаде мења се релативни однос компонената количине кретања $\{m_u, m_v, m_w\}$ у укупној количини кретања притоке mV која се уноси у реку, односно компонената силе инерције $\{I_{Px}, I_{Py}, I_{Pz}\}$ у укупној сили инерције притоке $I_p = \sqrt{I_{Px}^2 + I_{Py}^2 + I_{Pz}^2}$.

Познавање компоненте силе инерције притоке која делује у правцу осовине тока матичне реке важно је за обухватање ушћа као унутрашњег граничног услова у моделима линијског течења. Имајући у виду да се за хидрауличке прорачуне на дугачким речним деоницама у инжењерској пракси још увек користе модели линијског течења, у овом раду се испитује како присуство подводних каскада утиче на вредности параметара постојећих линијских модела ушћа помоћу којих се у динамичкој једначини рачуна ова компонента силе инерције. За сада постоји неколико модела ушћа од којих се ни један не користи у комерцијалним програмима за прорачун линијског течења. Предложени модели добијени су комбинацијом теоријских разматрања и лабораторијских огледа изведених на моделима ушћа без издигнутог дна. Сви модели, сем модела Рамамуртија и ост. [11] и Шабајека и ост. [12], за прорачун компоненте силе инерције притоке која делује у правцу осовине главне реке, користе средњу вредност угла скретања тока $\bar{\delta}$ у низводном пресеку притоке (слика 1). Реч је о углу скретања тока у хоризонталној равни. Модели се разликују према начину процене тог угла. Хагеров модел [15] и модел Гурама и ост. [1] средњу вредност угла $\bar{\delta}$ доводе у везу са углом улива α преко коефицијента неравномерности угла скретања тока σ : $\bar{\delta} = \sigma \alpha$, док су Хсу и ост. ту вредност одредили на основу детаљних мерења компонената брзина у хоризонталној равни у низводном пресеку притоке. Вредност коефицијента/параметра σ према Хагеру [15] износи $8/9$, а према Гураму и ост. $0,85$. Ове две вредности коефицијента неравномерности σ разликују се због разлика у начину процене угла $\bar{\delta}$. У Хагеровом моделу из 1987. године [14] коришћени су резултати мерења брзине у једној тачки низводног пресека притоке, а у Гурамовом моделу, на основу мерења у неколико тачака по ширини пресека на једној дубини $(0,5h)$. Иако су Хагерова лабораторијска испитивања на ушћу са углом улива од 90° из 1989 године [16] указала на промену вредности параметра σ са променом односа протока реке и притоке, овој чињеници тада није посвећена велика пажња, тако да предложена вредност $8/9$ није мењана. Претходна истраживања првог аутора [3, 6 и 7], заснована на коришћењу модела просторног течења, показала су да се на разматраном ушћу ($\alpha = \text{const}$) вредност параметра σ мења са променом вредности односа сила инерције притоке и реке (M_R) и да, за дато M_R , вредност овог параметра зависи од угла улива α .

У овом раду се, на примеру Шумејтовог лабораторијског модела ушћа без издигнутог дна, са углом улива од 90° [13] (слика 2), разматра утицај присуства и висине

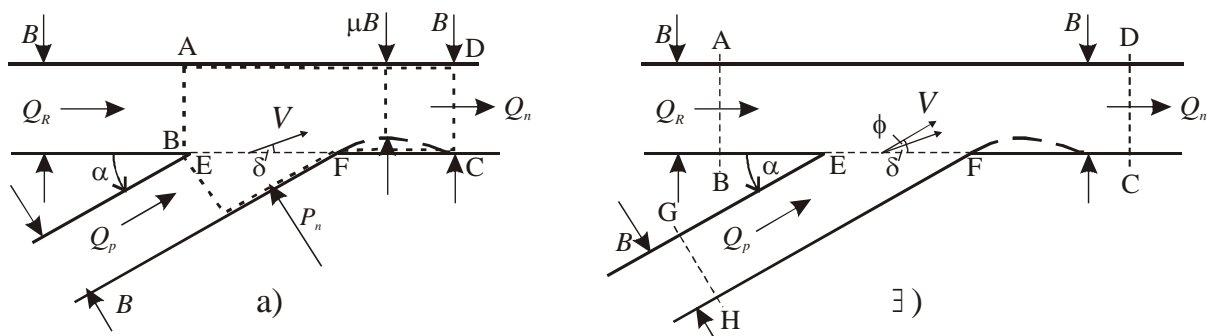
подводне каскаде на: 1) средњу вредност угла скретања тока $\bar{\delta}$, односно вредност параметра σ и 2) вредност компоненте силе инерције притоке у правцу осовине реке, односно њен удео у укупној сили инерције притоке. Вредност компоненте у правцу осовине тока матичне реке, добијена интеграцијом одговарајуће компоненте количине кретања у низводном пресеку притоке, упоредиће се са вредношћу $I_p \cos \bar{\delta}$, која се користи у моделима линијског течења. Утицаји присуства и висине подводне каскаде испитују се при различитим вредностима односа протока реком и притоком. Разматрају се четири вредности односа висине подводне каскаде Δz_p и дубине воде у реци на ушћу h_n : $\Delta z_p / h_n = \{0,00; 0,10; 0,25; 0,50\}$ и три вредности $D_R = Q_R / Q_n = \{0,250; 0,583; 0,750\}$ где је Q_R проток реком узводно од ушћа, а Q_n укупни проток низводно од ушћа. Вредност $\Delta z_p / h_n = 0,00$ одговара ушћу без подводне каскаде на којем су дна сва три корита (притоке, реке узводно и низводно од ушћа) у истом нивоу, док је $\Delta z_p / h_n = 0,50$ највећа осматрана вредност на речним ушћима. Изабране вредности D_R обухватају три могућа сценарија на ушћу: 1) доминацију притоке над реком ($D_R = 0,250$), 2) равноправан утицај притоке и реке ($D_R = 0,583$) и 3) доминацију реке над притоком ($D_R = 0,750$).

Сва разматрања заснована су на резултатима прорачуна просторног течења добијеним применом нумеричког модела SSIIM2 [9 и 10] који је претходно детаљно проверен коришћењем резултата лабораторијских огледа и теренских мерења. Поређења са резултатима Шумејтових огледа показала су да модел верно описује течење у низводном пресеку притоке (сви резултати налазе се унутар интервала поверења са прагом значајности 0,05) и да се може применити за процену параметара линијских модела [7].

2 Математички и нумерички модели

2.1 Линијски модели ушћа

Линијски (или аналитички) модели ушћа изведени су за случај када дна сва три корита (притоке и реке узводно и низводно од ушћа) леже у истој равни. Помоћу ових модела могу да се одреде дубине воде у пресецима узводно од ушћа. Модели су добијени применом закона одржања количине кретања на запремину флуида смештену између



Слика 1. Контролне запремине за обухватање ушћа у моделима линијског течења;
 а) Хагеров модел [15, 16] и модел Гурама и ост. [1] и б) Хсуов модел [17]

Figure 1. Control volumes for a junction in 1D-flow models; a) models of Hager [15, 16] and Gurrum et al. [1] and б) model of Hsu et al. [17]

попречних пресека који са узводне и низводне стране ограничавају ушће. На слици 1 приказане су, примера ради, контролне запремине у Хагеровом моделу и моделу Гурама и ост. (слика 1а) и у моделу Хсуа и ост. (слика 1б) на којима се види да се у овим линијским моделима утицај притоке обухвата водећи рачуна о углу скретања тока δ (у хоризонталној равни) у низводном пресеку притоке. Детаљан преглед и оцена линијских модела ушћа могу се наћи у радовима [4 и 7]. У свим моделима, изузев модела Шабајека и ост., претпоставља се да су дубине у оба узводна пресека једнаке ($h_P = h_R$). Због ограниченог простора, овде се наводе само изрази Хагеровог модела и модела Гурама и ост. уз напомену да је модел Хсуа и ост. по структури израза врло сличан моделу Гурама и ост. У Хагеровом моделу средња вредност угла δ користи се за прорачун коефицијента сужења тока μ услед одвајања граничне струјнице од низводног темена ушћа (слика 1а):

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1 + \sqrt{(1-q)(2-q) \left(1 - \frac{2}{3} \cos \bar{\delta} - \frac{1}{3} \cos^2 \bar{\delta}\right) + \frac{1}{9} \cos^2 \bar{\delta}}}{1 + \frac{1}{3} \cos \bar{\delta}} \quad (1)$$

где је $q = Q_R / Q_n$. С обзиром на то да губитак енергије између сваког од два узводна и низводног пресека зависи од степена сужења тока, јасна је зависност дубина (нивоа) узводно од ушћа од угла скретања тока $\bar{\delta}$.

У Гурамовом моделу дубине узводно од ушћа рачунају се решавањем следеће једначине:

$$Z^3 - Z(2 + F_{Rn})^2 + F_{Rn}^2 [(1-q)^2 + q \cos \bar{\delta}] = 0 \quad (2)$$

где је Z однос дубина из пресека узводно и низводно од ушћа (h_P / h_n), q је однос протока притоке и укупног протока низводно од ушћа (Q_P / Q_n), а $F_{Rn} = Q_n / (gBh_n)^{1/2}$, Фрудов број низводно од ушћа. И овде се види да угао скретања тока притоке на ушћу утиче на дубине тока у узводним пресецима.

2.2 Математички и нумерички модели просторног течења

За моделирање устаљеног просторног течења користи се модел састављен од једначине одржања масе и Рејнолдсових једначина за нестишљив флуид, а за моделирање напона турбуленције из Рејнолдсових једначина, стандардни k - ϵ модел турбуленције. С обзиром на то да је реч о стандардним једначинама које се могу наћи у књигама из механике флуида (нпр. у [14] или у [10]), оне се овде, због ограниченог простора, не наводе. За процену утицаја притоке од значаја су они чланови из Рејнолдсових једначина који описују проток количине кретања ($\rho u_j dV$) кроз границе елементарне запремине [3, 6 и 7]. О њима ће детаљније бити речи у тачки 5 приликом тумачења резултата.

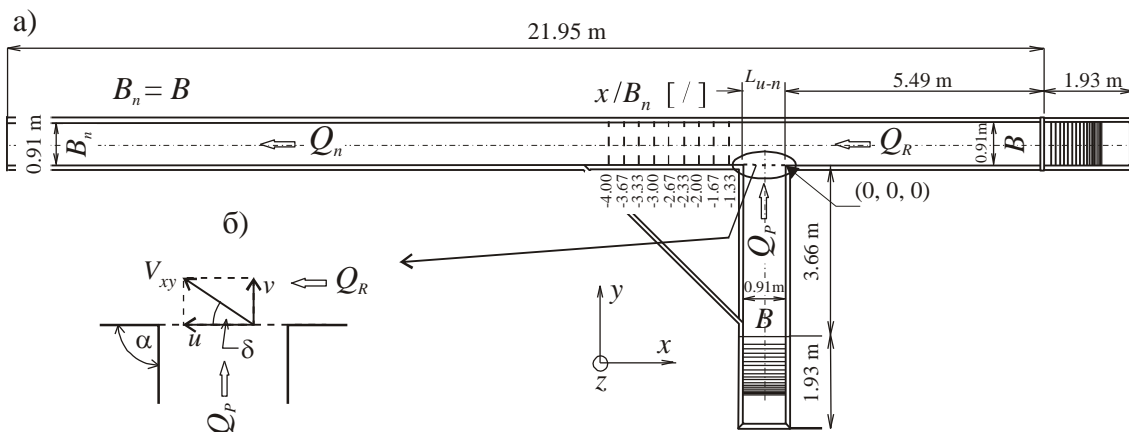
У овом раду је за нумеричко решавање једначина математичког модела коришћен модел SSIIM2 [9, 10] који се заснива на методи коначних запремина. Овај модел омогућава да се рачунска област представи неструктурираном, вишеделном просторном мрежом, што је погодно за моделирање течења у гранатој мрежи токова као што је то

случај на речним ушћима. Решење које ће истовремено задовољити једначину одржања масе и Рејнолдсове једначине добија се итеративно применом SIMPLE поступка [9, 10]. Због великих градијената зависно променљивих у зони ушћа, конвективни чланови у Рејнолдсовим једначинама представљени су узводним разликама другог реда тачности [3, 5 и 6]. Слободна површина у моделу SSIM2 може се представити само у виду тзв. „крутог поклопца”.

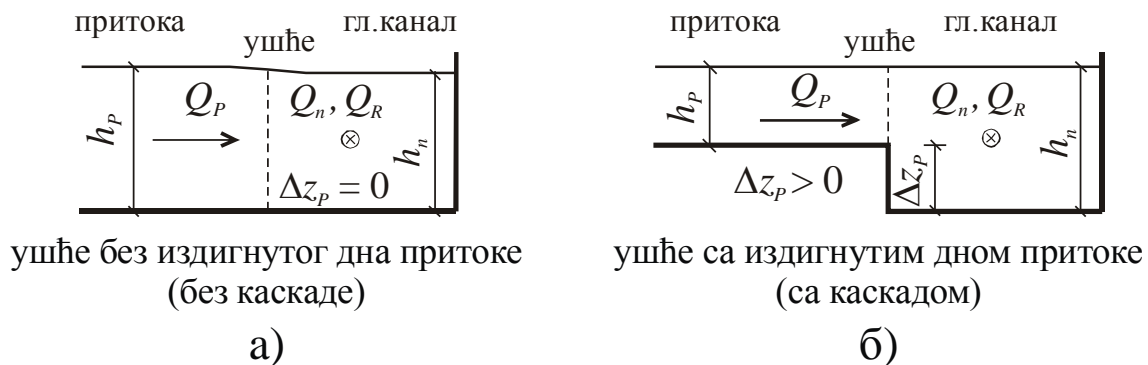
У контролним запреминама уз чврсту границу све зависно променљиве одређују се коришћењем „закона зида”. Начин одређивања зависно променљивих на отвореним границама зависи од врсте границе (слободна површина или пресек кроз који вода улази у разматрану област струјања или из ње излази). На границама кроз које вода улази у ову област, задају се протоци, док се на излазној граници задаје ниво, а остале зависно променљиве рачунају из услова да је градијент тих величина у правцу управном на ту границу једнак нули. Слободна површина је граница на којој су градијенти компонената брзине у хоризонталној равни (u и v) и расипања кинетичке енергије турбуленције (ϵ) једнаки нули, док се компонента брзине у вертикалном правцу (w) одређује из услова да је проток кроз слободну површину једнак нули. Вредност кинетичке енергије турбуленције (k) једнака је половини срачунате вредности на дну [9].

3 Поставка нумеричких огледа

Утицај подводне каскаде на споју притоке и реке испитан је за ушће са углом улива од 90° . Геометрија ушћа у основи преузета је из Шумејтових огледа [13] (слика 2а). Реч је о ушћу добијеном спајањем два канала правоугаоног попречног пресека једнаких ширина ($B = 0,91 \text{ m}$) са хоризонталним дном. Осим оригиналне поставке са истим kotaма дна оба канала ($\Delta z_P / h_n = 0,00$, слика 3а), размотрена су и три хипотетичка случаја са следећим



Слика 2. а) Основа Шумејтовог [13] лабораторијског модела ушћа са углом улива од 90° и б) угао скретања тока притоке (δ) у хоризонталној равни на ушћу
 Figure 2. a) Plan view of Shumate's [13] laboratory model of a 90° straight-channels' confluence and б) flow deflection angle on the horizontal plane at a tributary entrance to the confluence



Слика 3. Схематски прикази ушћа: а) без каскаде и б) са каскадом у дну на споју корита притоке и корита матичне реке

Figure 3. Definition sketch for the: a) concordant and б) discordant beds' confluences

вредностима степена издигнутости дна притоке у односу на дно главног канала (реке): $\Delta z_p / h_n = \{0,10; 0,25; 0,50\}$ (слика 3б).

Као што је поменуто у уводу, размотрена су три могућа сценарија на ушћу: 1) доминација притоке над реком, 2) равноправан утицај два сустичућа тока и 3) доминација реке над притоком. С обзиром на то да су Шумејтовим огледима обухваћена сва три сценарија, у нумеричким огледима коришћене су одговарајуће вредности протока из ових лабораторијских огледа. Укупан проток низводно од ушћа у свим огледима износио је $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$, а вредности односа протока главним каналом (реком) узводно од ушћа (Q_R) и протока низводно од ушћа (Q_n) за поменута три случаја износиле су, редом: $D_R = Q_R / Q_n = \{0,250; 0,583; 0,750\}$. Као и у Шумејтовим огледима, посматрано је устаљено, мирно течење, са дубином у низводном пресеку главног канала од $0,296 \text{ m}$. Са четири геометрије и три хидрауличко-хидролошка сценарија, испитано је укупно дванаест могућих комбинација.

4 Нумеричко моделирање

Рачунска област у свих дванаест разматраних комбинација обухватила је пуне дужине оба канала, чиме је избегнут евентуалан утицај граничних услова на течење у области хидродинамичког утицаја ушћа. За представљање ове гранате рачунске области коришћена је дводелна просторна рачунска мрежа у којој сваки део (блок) представља ортогоналну, структурирану мрежу. Главни канал замењен је блоком 1. Величина овог блока у свим варијантама геометрије је иста – мрежа има 838 запремина по дужини и 38 по ширини канала, и 20 запремина по дубини тока. Величина блока 2, којим је замењен бочни канал, мењана је по дубини у зависности од степена издигнутости дна притоке (табела 1), док је број контролних запремина по дужини и ширини канала увек био исти (183 по дужини и 38 по ширини). Ове димензије рачунске мреже усвојене су на основу анализе осетљивости резултата на густину рачунске мреже. Анализа се заснива на процени нумеричке неизвесности помоћу тзв. „показатеља конвергенције мреже”. Резултати ове анализе налазе се у [5].

Табела 1. Величина мреже у блоку 2 за разматране конфигурације дна на ушћу
 Table 1. Grid sizes in the block 2 for analysed confluence layouts

Огледна поставка	$\Delta z_p / h_n$ [/]	величина мреже у блоку 2	опис
1	0,00	183 × 38 × 21	ушће без каскаде у дну
2	0,10	183 × 38 × 19	ушће са каскадом у дну
3	0,25	183 × 38 × 16	
4	0,50	183 × 38 × 11	

5 Резултати и њихово тумачење

Средње вредности угла скретања притоке у хоризонталној равни $\bar{\delta}$ и вредности силе инерције притоке I_p и њених компонената I_{px} , I_{py} и I_{pz} , процењене су на основу срачунатих распореда компонената брзине u , v и w у низводном пресеку притоке.

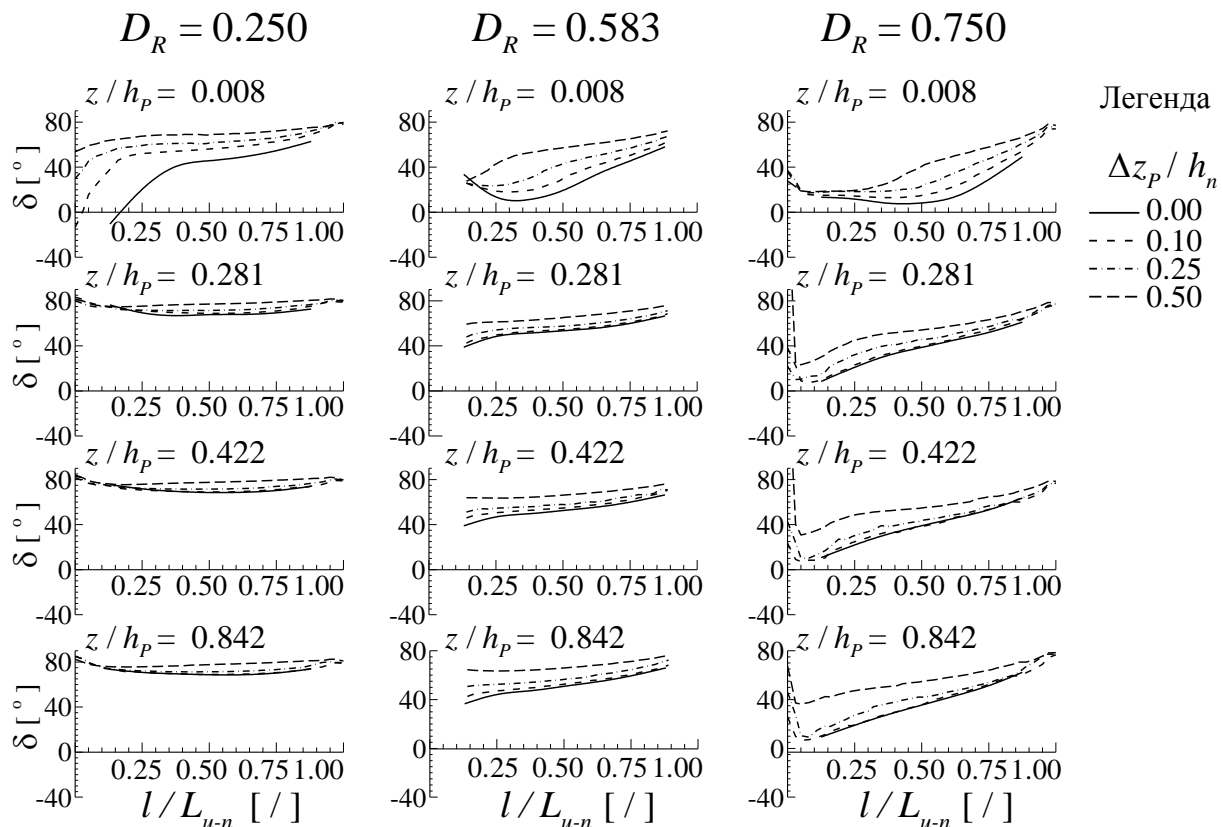
5.1 Средња вредност угла скретања тока и коефицијент неравномерности σ

Угао скретања тока у хоризонталној равни дефинисан је односом компонената брзине у тој равни ($\delta = \arctg(v/u)$, слика 2б). Неравномерност распореда ове две компоненте брзине по ширини попречног пресека и по дубини тока одражава се и на распоред угла δ (слика 4). Средња вредност угла ($\bar{\delta}$) добија се интеграцијом распореда овог угла по попречном пресеку. Запажа се да за дату вредност односа протока D_R повећање висине подводне каскаде Δz_p , односно степена издигнутости дна притоке изнад дна реке $\Delta z_p / h_n$ утиче на смањење одступања угла δ (слика 4), а самим тим и његове средње вредности $\bar{\delta}$ од угла улива α (слика 5а). Ово је сасвим очекивано, јер се при истом протоку са повећањем висине каскаде повећавају брзина и количина кретања притоке, па се притока више опире промени правца под утицајем центрипеталне силе и силе инерције реке. Најмање одступање од угла улива остварује се у условима доминације притоке над реком. На више од 85% дубине тока одступање при $\Delta z_p / h_n = 0,50$ износи 13° што је за 10° или 11% мање у односу на ушће без каскаде (слика 4, колона $D_R = 0,250$). Ефекат присуства подводне каскаде највећи је у случају доминације реке над притоком, јер се тада вредност угла δ у близини узводног темена ушћа, где су одступања од угла улива највећа, повећава око 5 пута (са $\approx 7^\circ$ на ушћу без каскаде, повећава се на $\approx 37^\circ$ на ушћу са каскадом која заузима 50% низводне дубине – слика 4, колона $D_R = 0,750$).

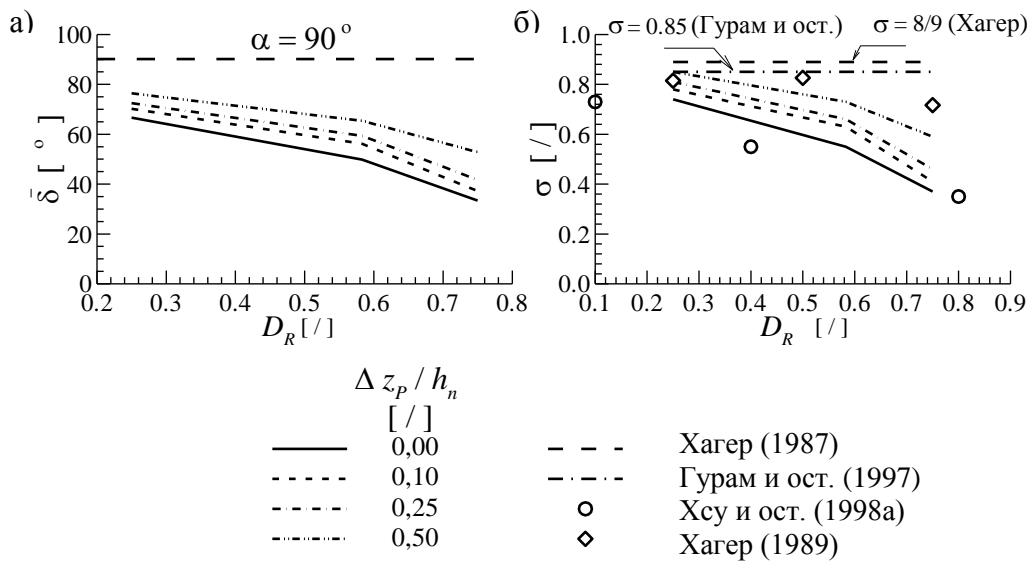
Последице присуства подводне каскаде на средњу вредност угла $\bar{\delta}$ у попречном пресеку су следеће. Каскада која заузима 10% дубине тока на ушћу, у зависности од вредности D_R смањује скретање тока притоке у низводном пресеку за 7 – 17%, она која заузима 25% дубине смањује скретање за 15 – 26%, а код каскаде која заузима 50% дубине, то смањење је између 35% и 43%. При томе доња вредност овог интервала одговара доминацији притоке над реком ($D_R = 0,250$), а горња, доминацији реке над притоком ($D_R = 0,750$).

Из дефиниције коефицијента неравномерности угла скретања тока на ушћу ($\sigma = \bar{\delta} / \alpha$), следи да се његова вредност мења на исти начин као и средња вредност угла δ (слика 5б) – неравномерност распореда угла δ смањује се са повећањем висине подводне каскаде и утицаја притоке. Уочава се да су независно од присуства или одсуства подводне каскаде

ове вредности мање од константне вредности које је првобитно предложио Хагер (8/9), а коју су касније кориговали Гурам и ост. (0,85), као и од вредности до којих је дошао Хагер накнадним истраживањима [16] у којима је мерењима обухватио пет тачака по ширини низводног пресека на дубини $0,5h$. И Хагер и Гурам и ост. су, усвајањем референтне равни на половини дубине ($z / h_p = 0,50$) занемарили део тока при дну ($z / h_p \leq 0,15$) у којем су промене угла δ по ширини тока најизраженије (слика 4) и на тај начин преценили вредност угла $\bar{\delta}$. У разматраном случају, проценат повећања у односу на вредност добијену осредњавањем по попречном пресеку креће се од 15% за Гурама и ост. и 20% за Хагера када је $D_R = 0,250$, до преко 100% (130% за Гурама и ост. и 140% за Хагера) када је $D_R = 0,750$. На ушћу без каскаде вредности коефицијента σ веће су од оних које су добили Хсу и ост. у својим огледима за око 15%, али се и једне и друге налазе у границама интервала поверења од 0,05 [7].



Слика 4. Утицај степена издигнутости дна притоке $\Delta z_p / h_n$ и односа протока D_R на распоред угла скретања тока δ у низводном пресеку притоке (z / h_p је бездимензионално вертикално растојање од дна притоке)
 Figure 4. Effects of bed elevation discordance ratio $\Delta z_p / h_n$ and discharge ratio value D_R on the δ -angle distributions at the tributary entrance to the confluence (z / h_p is a non-dimensional vertical distance from the bottom of the tributary)

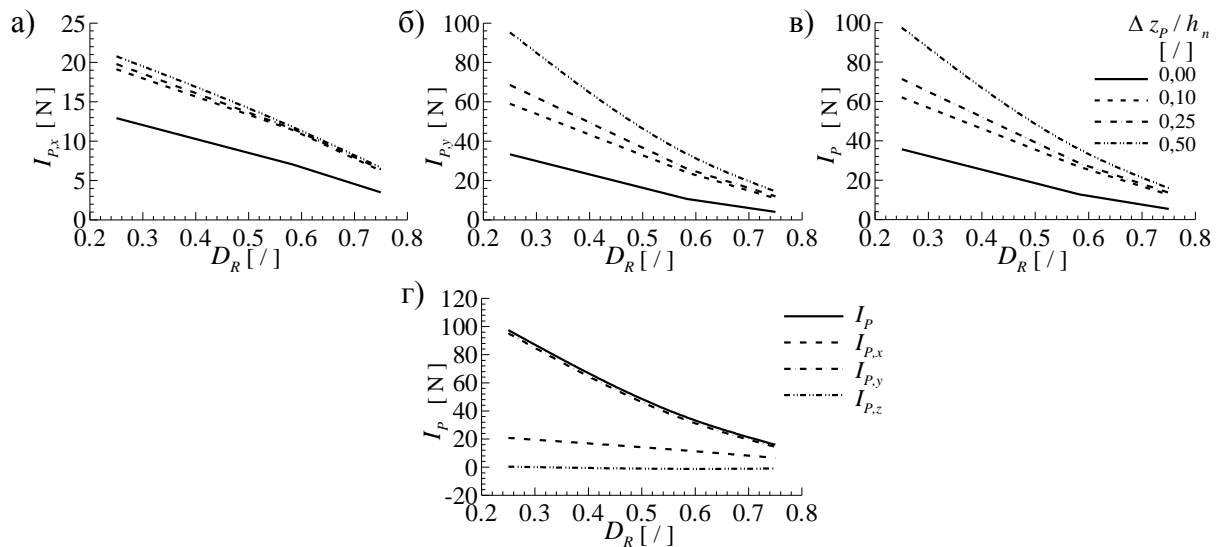


Слика 5. Утицај односа протока D_R и степена издигнутости дна притоке $\Delta z_P / h_n$ на а) средњу вредност угла скретања тока $\bar{\delta}$ на ушћу и б) коефицијент неравномерности σ
 Figure 5. Effects of discharge ratio D_R and bed elevation discordance ratio $\Delta z_P / h_n$ on the а) average value $\bar{\delta}$ of the flow deflection angle at the tributary entrance to the confluence and б) correction coefficient σ

5.2 Сила инерције у низводном пресеку притоке

С обзиром на то да сила инерције представља интеграл протицаја количине кретања кроз разматрани попречни пресек, компоненте силе инерције у низводном пресеку притоке одређене су интеграцијом одговарајућих чланова из Рејнолдсових једначина. Интензитет укупне силе инерције тада је једнак $I_P = \sqrt{I_{P_x}^2 + I_{P_y}^2 + I_{P_z}^2}$. Пошто је у разматраном случају нормала низводног пресека усмерена у правцу осе y (слика 2), то значи да се количина кретања проноси само компонентом брзине v и да у свакој од три Рејнолдсове једначине само по један члан описује унос количине кретања из притоке у реку. У једначини за правац x то је члан $\rho v u dA_y$, у једначини за правац y , члан $\rho v v dA_y$, а у једначини за правац z , члан $\rho v w dA_y$. Интеграцијом ових чланова по површини низводног попречног пресека A_y , добијају се, редом, вредности компонената силе инерције притоке I_{P_x} , I_{P_y} , и I_{P_z} . Компоненте силе инерције у хоризонталној равни I_{P_x} и I_{P_y} и укупна сила инерције I_P приказане су на слици 6. Види се да интензитети свих сила при датој вредности D_R расту са повећањем висине каскаде. За моделе линијског течења од значаја је компонента I_{P_x} . Са повећањем висине каскаде и доминације реке њена апсолутна вредност повећава се за 1,5 до 1,9 пута (слика 6а), али се вредност односа I_{P_x} / I_P смањује са 36% (за ушће без каскаде) на 21% (за каскаду висине $\Delta z_P = 0,50 h_n$) када доминира притока ($D_R = 0,250$), односно са 65% на 42%, када доминира река ($D_R = 0,750$).

Када се за процену утицаја притоке користи средња вредност угла скретања тока $\bar{\delta}$, јављају се одступања у односу на вредност I_{P_x} добијену интеграцијом компоненте количине кретања $\rho v u dA_y$. Одступања су највећа на ушћима без каскаде на којима се вредност ове



Слика 6. Утицај односа протока D_R и степена издигнутости дна притоке $\Delta z_P / h_n$ на: а) компоненту силе инерције притоке у правцу осовине реке $I_{P,x}$, б) компоненту силе инерције притоке управну на осовину реке $I_{P,y}$ и в) резултујућу силу инерције притоке I_P ; г) утицај односа протока D_R на укупну силу инерције и њене компоненте при $\Delta z_P / h_n = 0,50$

Figure 6. Effects of discharge ratio D_R and bed elevation discordance ratio $\Delta z_P / h_n$ on the а) component of the force of inertia in the main river direction $I_{P,x}$, б) component of the force of inertia perpendicular to the main river direction $I_{P,y}$ and в) total force of inertia of the tributary I_P ; г) effect of discharge ratio D_R on the total force of inertia and its components for $\Delta z_P / h_n = 0,50$

силе прецењује 40–70%. На ушћима са каскадом висине $\Delta z_P \leq 0,25h_n$ вредности силе се прецењују 5–10% када је $D_R = 0,250$, а потцењују од 2–17% када је $D_R \geq 0,583$. При висини каскаде $\Delta z_P = 0,50h_n$, вредност силе се опет прецењује за 12–22%, зависно од вредности D_R .

6 Закључци

У овом раду спроведен је низ нумеричких огледа коришћењем модела просторног течења са циљем да се утврди како присуство и висина подводне каскаде на ушћу притоке у реку утичу на вредности параметара којима се у линијским моделима ушћа обухвата утицај притоке. Реч је о моделу који је претходно детаљно проверен коришћењем резултата лабораторијских огледа и теренских мерења. Утицај подводне каскаде испитан је за три карактеристична хидролошко-хидрауличка сценарија која се могу јавити на ушћу. Поређењем резултата за различите геометрије дна и различите сценарије утврђено је следеће.

1. Присуство подводних каскада за последицу има дубље продирање притоке у корито реке, јер се смањује одступање угла скретања тока од угла улива.

2. Распоред угла скретања тока у низводном пресеку притоке са повећањем висине каскаде постаје равномернији (за дату вредност односа протока D_R повећава се вредност параметра σ).
3. На разматраном ушћу (са каскадом или без ње) распоред угла скретања тока са повећањем утицаја реке ($D_R > 0,50$) постаје неравномернији, а вредност параметра σ се смањује.
4. Удео компоненте силе инерције $I_{P,x}$ у укупној сили инерције I_P смањује се са повећањем висине каскаде. Процент смањења расте са повећањем утицаја реке.
5. Коришћењем средње вредности угла скретања тока на ушћу $\bar{\delta}$ или одговарајуће вредности коефицијента неравномерности овог угла (σ), утицај притоке у линијском моделу ушћа се прецењује и до 70% када каскаде нема, односно до 25% када је $\Delta z_P = 0,50h_n$. За каскаде чије се висине крећу између $0,10h_n$ и $0,25h_n$ вредности силе се прецењују 5–10% када је $D_R = 0,250$, а потцењују од 2–17% када је $D_R \geq 0,583$.

Литература

1. Gurram, S.K., Karki, K.S., and Hager, W.H., (1997) *Subcritical junction flow*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 123, 5, 447-455.
2. Gurram, S. K. and Karki, S. K., (2000) *Discussion of Subcritical open-channel junction flow*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 126, 1, 87-89.
3. Ђорђевић, Д., (2011), *Нумеричка анализа речних ушћа применом нумеричких модела*, докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 382 стр.
4. Ђорђевић, Д., (2011), *Преглед и оцена аналитичких модела ушћа*, Водопривреда, Vol. 43, No.252-254 (2011/4-6), стр.117-126.
5. Ђорђевић, Д., (2013), *Numerical study of 3D flow at right-angled confluences with and without upstream planform curvature*, J. Hydroinformatics, IWA, 15, 4, 1073-1088.
6. Ђорђевић, Д., (2013), *Просторно течење на речним ушћима – утицајни чиниоци*, монографија, Задужбина Андрејевић, 131 стр.
7. Ђорђевић, Д., (2014), *Can a 3D-numerical model be used as a substitute to a physical model in estimating parameters of 1D confluence models?*, Proc. 3rd IAHR Europe Congress, Porto, 158-167.
8. Kennedy, B., (1984), *On Playfair's law of accordant junctions*, Earth Surf. Proc and Landforms, Vol. 9, pp 153-157.
9. Olsen, N.R., (2000) *CFD Algorithms for Hydraulic Engineering*, Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
10. Olsen, N.R., (2012) *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multi-block option – User's Manual*, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
11. Ramamurthy, A. S., Carballada, L.B. and Tran, D. M., (1988), *Combining open channel flow at right angled junctions*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 114, 12, 1449-1460.
12. Shabayek, S., Steffler, P., and Hicks, F. 2002. *Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 128(9): 821-828.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

13. Shumate, E.D., (1998), *Experimental description of flow at an open-channel junction*, Unpublished Master thesis, Univ. of Iowa, Iowa, 150 p.
14. Hajdin, G. (1983), *Mehanika fluida*, IRO Građevinska knjiga, Beograd
15. Hager, W. H., (1987), *Discussion of Separation zone at open-channel junctions*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 113, 4, 539-543.
16. Hager, W. H., (1989), *Transitional flow in channel junctions*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 115, 2, 243-259.
17. Hsu, C.C., Wu, F.S. and Lee, W.J., (1998a), *Flow at 90° equal-width open-channel junction*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 124, 2, 186-191.
18. Hsu, C.C., Lee, W.J. and Chang, C.H., (1998b), *Subcritical open-channel junction flow*, J. Hydraul. Eng., ASCE, 124, 8, 847-855.

Раванско 2Д течење у доводном каналу Барачка испред ЦС Бездан II на Дунаву

Бела Варга¹
Матија Стипић²
Срђан Колаковић³

АПСТРАКТ: У раду је приказано моделирање раванских отворених токова са конкретним примером. За нумеричку методу решавања Сент Венантових једначина неустаљеног течења примењена је метода коначних елемената (МКЕ). Прорачуни су урађени помоћу програмског пакета Телемак 2Д, који је заснован на МКЕ и користи методу етапног решавања. У раду је приказана симулација течења у доводном каналу Барачка, из Дунава до црпне станице Бездан 2, за различите услове течења. Модел је најпре калибрисан са мереним подацима, а затим употребљен за проверу течења у доводном каналу и наструјавању ка реконструисаној ЦС Бездан 2.

Кључне речи: Телемак 2Д, моделирање отворених токова, Blue Kenue.

2D flow in the feed channel Baračka in front of PS Bezdan II on the Danube

ABSTRACT: The thesis describes the principle of numerical modeling of open planar flows. For the numerical method for solving differential equations, the finite element method (FEM) was chosen, because it's more suitable for the case of planar open flows. The calculations were done by using the Telemac 2D software, which is based on the (FEM) and uses the fractional-step method, which has an advantage over the other models in terms of calculation stability and the accuracy of the results. The aim of this thesis is to show on a particular example (Case Study-CS-Baračka Bezdan 2) the performance of the Blue Kenue and the Telemac-2D softwares.

Keywords: Telemac 2D, Hydraulic modelling of open flows, Blue Kenue, Bezdan, Baracka.

¹ Бела Варга, Маст.инж. грађ., Техничка школа „Милева Анштајн“ у Новом Саду, Гагаринова 1, varga.bela@yahoo.com

² Доц др Матија Стипић, дипл.инж.грађ., АД“ВОЈВОДИНАПРОЈЕКТ“ Нови Сад, Булевар Краља Петра I бр. 17, matija@vojvodinaprojekt.rs

³ Проф др Срђан Колаковић, дипл.инж.грађ., Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, kolak@uns.ac.rs

1 Увод

Нумеричко моделирање раванских токова је од великог значаја за хидротехничку праксу. Сложена природа турбулентног течења у отвореним токовима захтева примену комплексних рачунских поступака у моделирању ових токова. Многи токови се не могу описати линијским моделима због специфичних морфолошких услова који намећу равански карактер течења. Поред тога, решавање неких проблема захтева ниво детаљности који се не може постићи без примене раванских и просторних модела. Метода коначних елемената (МКЕ), као и Метода коначних разлика (МКР), омогућава приближно решавање граничних и/или почетних проблема који се срећу у областима хидротехнике [2], [3].

МКР се базира на математичкој дискретизацији диференцијалних једначина превођењем на једначине са коначним разликама. Ефикасност методе се смањује са сложености унутрашњих веза посматраног система. Код течења у отвореним токовима МКЕ има предност због лакшег и тачнијег обухватања геометријски сложених рачунских области, као и могућности лаког локалног повећања густине рачунске мреже у зонама од интереса.

Данас су на располагању разни комерцијални или слободни софтверски пакети за прорачун раванских (2Д) отворених токова. Један од таквих система је Телемак-2Д, заснован на методи коначних елемената, чији је развој започет пре тридесет година у окриљу Француске електропривреде, а данас је проширен и на друге истраживачке и академске центре широм света. Модел Телемак-2Д је специфичан и по томе што користи методу етапног решавања (енг. *fractional step method*), што му даје предности у односу на друге моделе у погледу стабилности прорачуна и тачности резултата.

У раду је приказан конкретан пример примене течења у доводном каналу Барачка, од Дунава до ЦС Бездан II. Показане су перформансе програмских пакета Блу Кену [6] и Телемак-2Д [7]. Потом, узимајући у обзир калибрацију мерених података на терену са резултатима прорачуна, помоћу програмског пакета Телемак-2Д (у комбинацији са „Blue Kenue“) [4] предложена су три могућа решења за повећање капацитета и побољшање рада ЦС Бездан II, са првобитних $8 \text{ m}^3/\text{s}$ на $20 \text{ m}^3/\text{s}$ [1].

2 Студија случаја Барачка - ЦС Бездан II

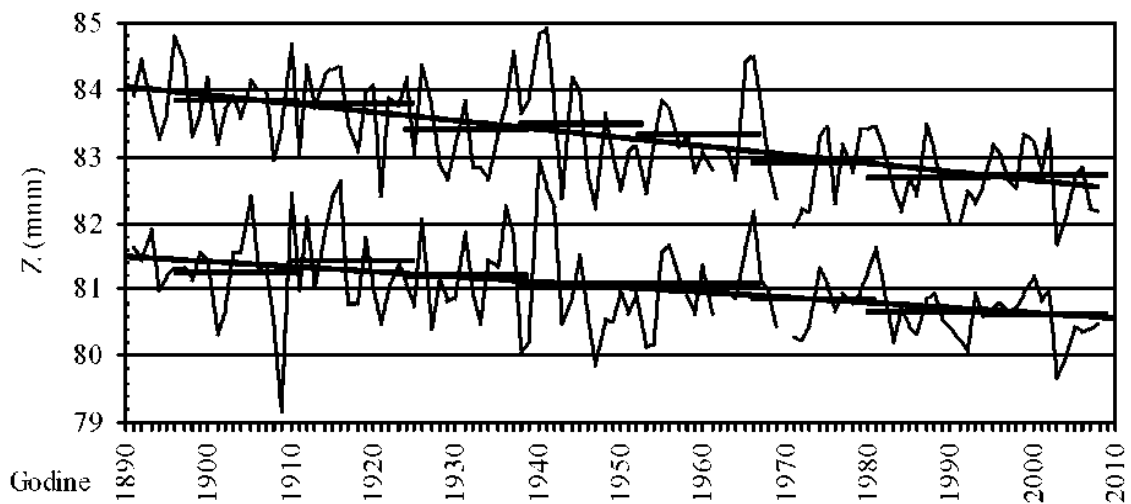
Један од основних предуслова за пуну функционалност и задовољење потреба свих корисника вишенаменског хидросистема Дунав-Тиса-Дунав (ХС ДТД) је континуално обезбеђивање довољних количина воде. Део хидросистема који се простире на подручју Бачке снабдева се водом преко два водозахвата на Дунаву: Бездан и Богојево. При томе се, како по историјском значају, тако и по количинама упуштене воде у хидросистем, издваја водозахват код Бездана. Рад овог водозахвата, односно могућност за упуштање одређених количина воде у Основну каналску мрежу хидросистема директно су условљени водостајима Дунава.

Кроз историју водозахвата канала тако и данас, водостаји Дунава у зони Бездана имају изузетну важност и могу да представљају значајно ограничење при снабдевању водом вишенаменског хидросистема Дунав-Тиса-Дунав. Појава и трајање карактеристичних водостаја и њихове промене на ЦС Бездан II разматрани су у вишегодишњем периоду. Добијени резултати указују да долази до све учесталије појаве ниских водостаја (слика 2) и до њиховог значајно дужег трајања.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 1. Слика са „Гоогле Мапс“ интернет апликације о локацији канала
Figure 1. Image from „Google Maps“ app. of the channel location



Слика 2. Минимални и средњи годишњи водостаји Дунава и 14-тогодишње просечне вредности; ЦС Бездан, 1891-2008.
Figure 2. Minimal and year average water levels of Dunav river and 14 year average values; PS Bezdán, 1891-2008.

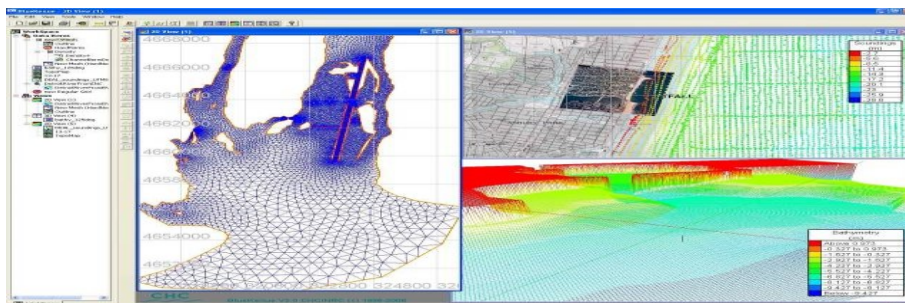
Основни разлог проблема у раду водозавата код Бездана био је тај што су ниски водостаји и засипање Дунава делимично или потпуно искључили могућност снабдевања водом канала између Дунава и Тисе. Узрок томе су хидролошке и морфолошке промене (и природне и антропогене) уз изражено померање трасе речног тока, продубљење ерозионе базе и снижење водостаја Дунава у протеклих нешто преко 200 година.

Спроведене анализе, на једноставан али недвосмислен начин, јасно упућују на то да је дошло до значајних промена у режиму минималних и средњих водостаја Дунава на ЦС Бездан II. Приметан је опадајући тренд ових водостаја. Посебно неповољну околност представља све дуже трајање нижих водостаја Дунава током године, пре свега у летњем и зимском периоду. Последице оваквог стања манифестују се у све израженијим потешкоћама око захватања воде из Дунава за потребе ХС ДТД, уз могуће очекивање даљег, још већег, заштравања овог проблема у наредном периоду.

3 Методологија

3.1 Блу Кену

Блу Кену је апликација изграђена на „EnSim“ технологији која обезбеђује алате за припрему и анализу нумеричких модела података посебно у области хидраулике. Он је првобитно замишљен као пост-процесор (алат за накнадну обраду) за ТЕЛЕМАК породицу модела развијених од стране националне лабораторије за хидраулику Француске Електропривреде. Блу Кену такође обезбеђује увоз / извоз (енг. import/export) интерфејса за податке из ADCIRC, SMS, INRS Eau HydroSim и ТриГрид Мешера (слика 3).



Слика 3. Припрема података у Блу Кену-у
Figure 3. Data preparation in Blue Kenue

3.2 Телемак-2Д

Телемак-2Д решава једначине отворених токова осредњене по дубини које су прво настале од Бери Д Сен Венана (1871 г.). Главни резултати на сваком чвору рачунарске мреже су дубина воде и компоненте осредњених брзина по дубини. Главна примена пакета Телемак-2Д је у хидраулици отворених токова (поморских или речних).

Телемак-2Д је развијен од стране националне лабораторије за хидраулику и за животну средину (ЛНХЕ), са стране дирекције за истраживање и развој француског електричног одбора (ЕДФ-Р&Д) у сарадњи са другим истраживачким институтима. Као претходне верзије програма, верзија 6.0 је у складу са процедуром осигурања квалитета (од сад у тексту “ПОК”) ЕДФ-а за научне и техничке програме. Ово поставља правила

за развој и проверу квалитета производа у свим фазама. Конкретно, програм покривен ПОК-ом праћен је валидационим документима који описују област коришћења софтвера са низом тест-случајева. Овај документ може да се користи за одређивање перформанси и ограничења софтвера и дефинисања области примене. Тест случајеви се такође користе за развој софтвера и проверавају се сваки пут кад је нова верзија произведена.

3.2.1 Основне једначине

Нумерички модели који се данас користе у речној хидраулици су веома сложени, јер везују хидродинамику тока са морфодинамиком речног корита. То значи да имају два комплементарна модула - један за прорачун хидрауличких карактеристика тока и други, за прорачун проноса наноса и деформације речног корита. У зависности од односа временских размера хидрауличких и морфолошких процеса, ови модули могу бити функционално повезани (“купловани”) у сваком рачунском кораку, или се модул за прорачун морфологије корита може активирати после одређеног броја рачунских корака хидрауличког модула.

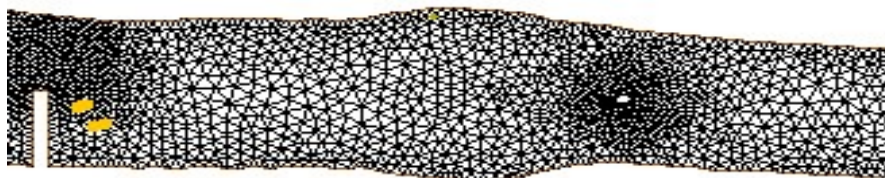
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \bar{U} * \text{grad}(h) + h * \text{div}(\bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{U} * \text{grad}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \text{div}(v_t * h * \text{grad}(u)) + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{U} * \text{grad}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \text{div}(v_t * h * \text{grad}(v)) + f_y \quad (3)$$

где је: t - време, x, y - просторне координате, h - дубина, Z - кота нивоа, u, v -компоненте по дубини осредњене брзине U , v_t - турбулентна вискозност, g - гравитационо убрзање, а f_x, f_y - изворни/понорни чланови, који обухватају разне утицаје: трења на дну, ветра на површини, запреминских сила (на пример, центрифугалне силе).

Наведене једначине (1-3) подразумевају да је флуид нестишљив и да је распоред притиска по вертикали хидростатички. За прорачун транспорта трасера, систему једначина придружује се одговарајућа транспортна једначина, а за финије моделирање турбуленције тока у хоризонталној равни један од четири модела турбуленције (у конкретном случају коришћен је “Елдер модел турбуленције” пошто боље презентује векторе брзине и боље репрезентује дисперзију).



Слика 4. Приказ триангулације терена
Figure 4. An example of terrain triangulation

Систем једначина решава се нумерички, уз одговарајуће почетне и граничне услове. Нумеричко решавање подразумева дискретизацију рачунске области. Дискретизација се може обављати и методом коначних елемената (МКЕ), која, када су у питању области сложене геометрије (слика 4) има предност у односу на друге методе структуриране дискретизације.

Нумеричко решавање система једначина засновано је на техници „етапног решавања“ (енг. фракционал степ метод). Реч је о раздвајању диференцијалних оператора који фигуришу у основним једначинама и формирању редукованих једначина које описују само поједине физичке процесе, као што су конвекција (адвекција) и дифузија. Сукцесивно - етапно решавање редукованих једначина даје могућност да се у свакој етапи примени оптимални нумерички поступак. Полази се од доминантног процеса – конвекције и решава се најпре конвективно поље брзине, а затим се то поље коригује због дифузионих утицаја. На крају се, прорачуном дубине/коте нивоа, уз услов одржања масе, долази до коначног решења.

Етапно решавање се симболички може приказати расчлањењем дискретизованог извода по времену:

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{f^{k+1} - f^D}{\Delta t} + \frac{f^D - f^C}{\Delta t} + \frac{f^C - f^k}{\Delta t} \quad (4)$$

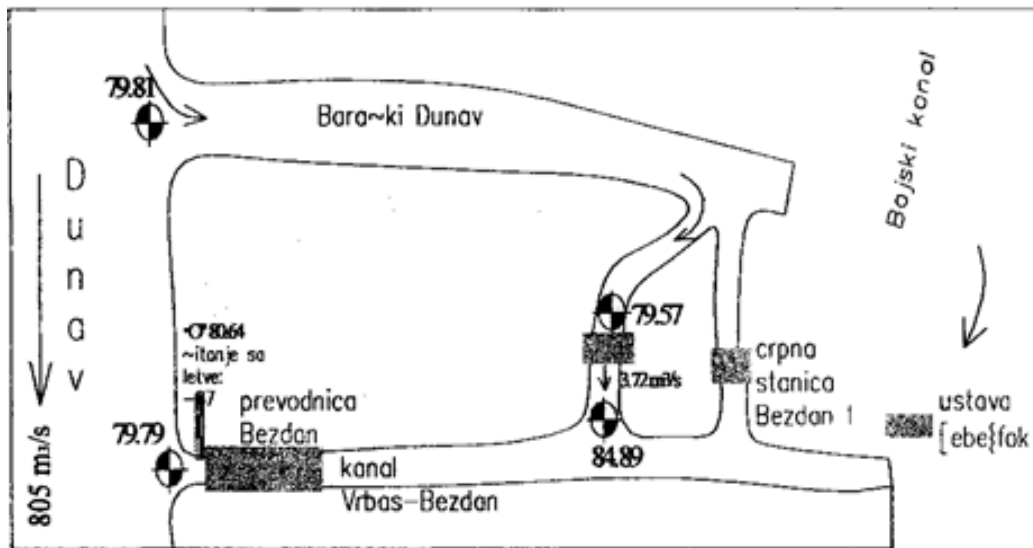
где је: $f = [h, u, v, \dots]$ - општа променљива, C - ознака етапе конвекције, D - ознака етапе дифузије, f^k - позната вредност променљиве f у тренутку k , а f^{k+1} - тражена вредност f у тренутку $k + 1$.

Свака етапа има своје нумеричке специфичности. У првој етапи се конвективно поље брзине рачуна помоћу експлицитне или имплицитне варијанте методе карактеристика, која је оптимална метода за решавање хиперболичких проблема. У другој етапи се решава систем једначина без конвективних чланова. Овај систем описује простирање таласа, дифузију и утицај изворних чланова. Проблем је параболично-елиптичног типа и решава се техником МКЕ; временска дискретизација елиминира нелинеарне чланове из једначина, а варијациона формулација МКЕ, уз временску и просторну дискретизацију, трансформише диференцијалне једначине континуума у дискретан систем алгебарских једначина по непознатим h , u и v . Овај систем се итеративно решава неком методом из класе метода коњугованих градијената.

3.3 Калибрација модела

У другој половини августа и почетком септембра 2003. као последица незапамћене суше, на Дунаву су се појавили изузетно ниски водостаји. Тако је 11.9.2003. на водомерној станици Бездан измерено -87 цм (“0” водомера 80.64 мм), што представља апсолутни минимални водостај који је икада до сада забележен. Кота од -87 цм је прочитана на лимниграфу Републичког хидрометеоролошког завода. Као контрола, у исто време и на истом месту, геодетским мерењем је добијена кота нивоа воде Дунава од 79.79 мм. У том периоду канал Врбас-Бездан се снабдевао помоћу црпне станице Бездан 2.

Истовремено са геодетским мерењем нивоа воде урађено је и хидрометријско мерење протицаја воде, како би се утврдио капацитет пумпне станице при најнеповољнијим условима рада. Један пумпни агрегат је радио са протоком од 3.72 м³/с, при воденом огледалу испред ЦС II од 79.57 мм [5].



Слика 5. Ситуација на Бездану за време апсолутно минималног водостаја на Дунаву
 Figure 5. Situation on Bezdán channel when the water levels in Dunav river are absolutely minimal

4 Анализа резултата

Прорачуном помоћу Telemak-2Д софтвера су потврђене измерене вредности и то да је при протицају од $3.72 \text{ m}^3/\text{s}$ ка ЦС Бездан II, средња вредност коте слободне површине воденог огледала у рачунатим тачкама испред црпне станице 79.58 мнм. У односу на измерене податке на терену (кота воденог огледала је 79.57 мнм), уочава се да је средња грешка у границама од ± 1 цм.

Урађеним анализама и прорачунима понуђена су три решења за повећање капацитета и побољшање рада ЦС Бездан II:

1. Измуљење доводног канала до ЦС Бездан II са понуђеним режимима рада ЦС при различитим нивоа Дунава а за следеће граничне услове:

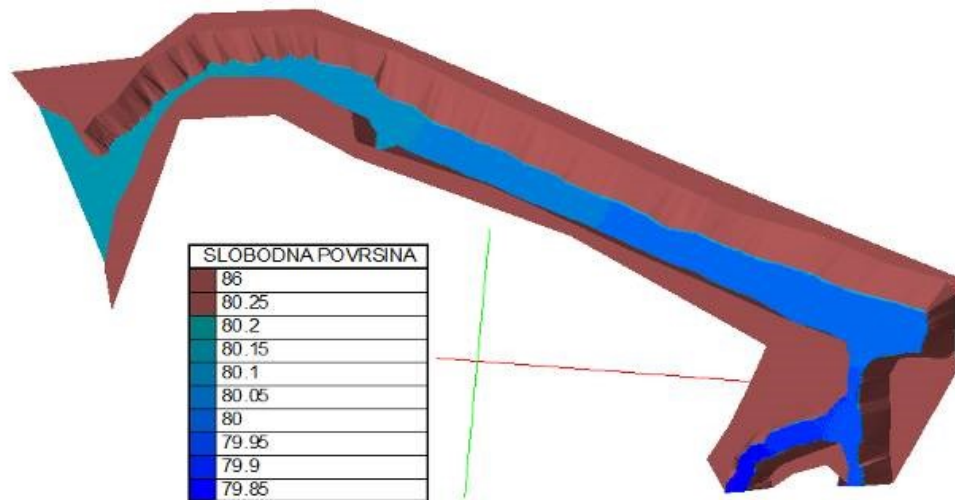
– 1 пумпни агрегат ($4 \text{ m}^3/\text{s}$) може да функционише када је кота воденог огледала Дунава на месту споја са Барачком изнад 79.73 мнм и кота воденог огледала Барачке испред ЦС изнад 79.55 мнм,

– 2 агрегата ($8 \text{ m}^3/\text{s}$) могу да функционишу ако је кота воденог огледала Дунава код улива у Барачку изнад 79.98 мнм и кота воденог огледала Барачке испред ЦС изнад 79.73 мнм,

– 3 агрегата ($12 \text{ m}^3/\text{s}$) могу да функционишу ако је кота воденог огледала Дунава код улива у Барачку изнад 80.19 мнм и кота воденог огледала Барачке испред ЦС изнад 79.85 мнм (Слика 6.).

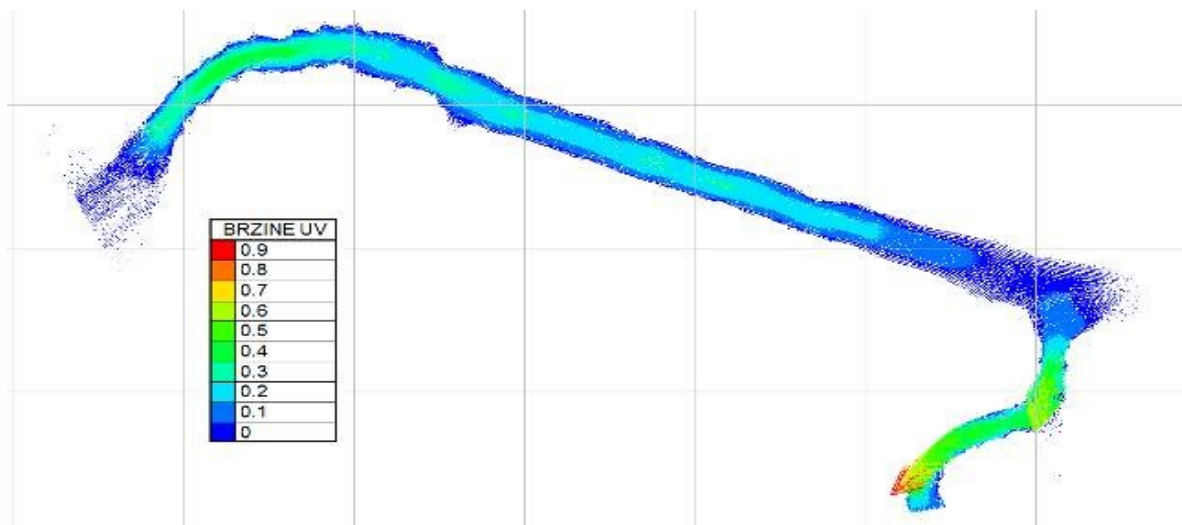
Помоћу програмског пакета Блу Кену је установљено да у основном доводном каналу до ЦС Бездан II постоји јака турбуленција са рециркулацијом воде због облика канала (које из птичје перспективе личи на обрнуто латинично слово С). У анализама приказаних примера ископа канала примећено је да доводни канал до ЦС има већу пропусну моћ ако су струјнице које су усмерене ка ЦС паралелне.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 6. Приказ Слободне површине водног огледала при протицају од $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$ и коти Дунава пред Барачку од 80.19 мнм

Figure 6. Display of water surface levels in Baračka when the water flow is at $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$ and the level of Dunav river in front of Baračka is 80.19 amsl

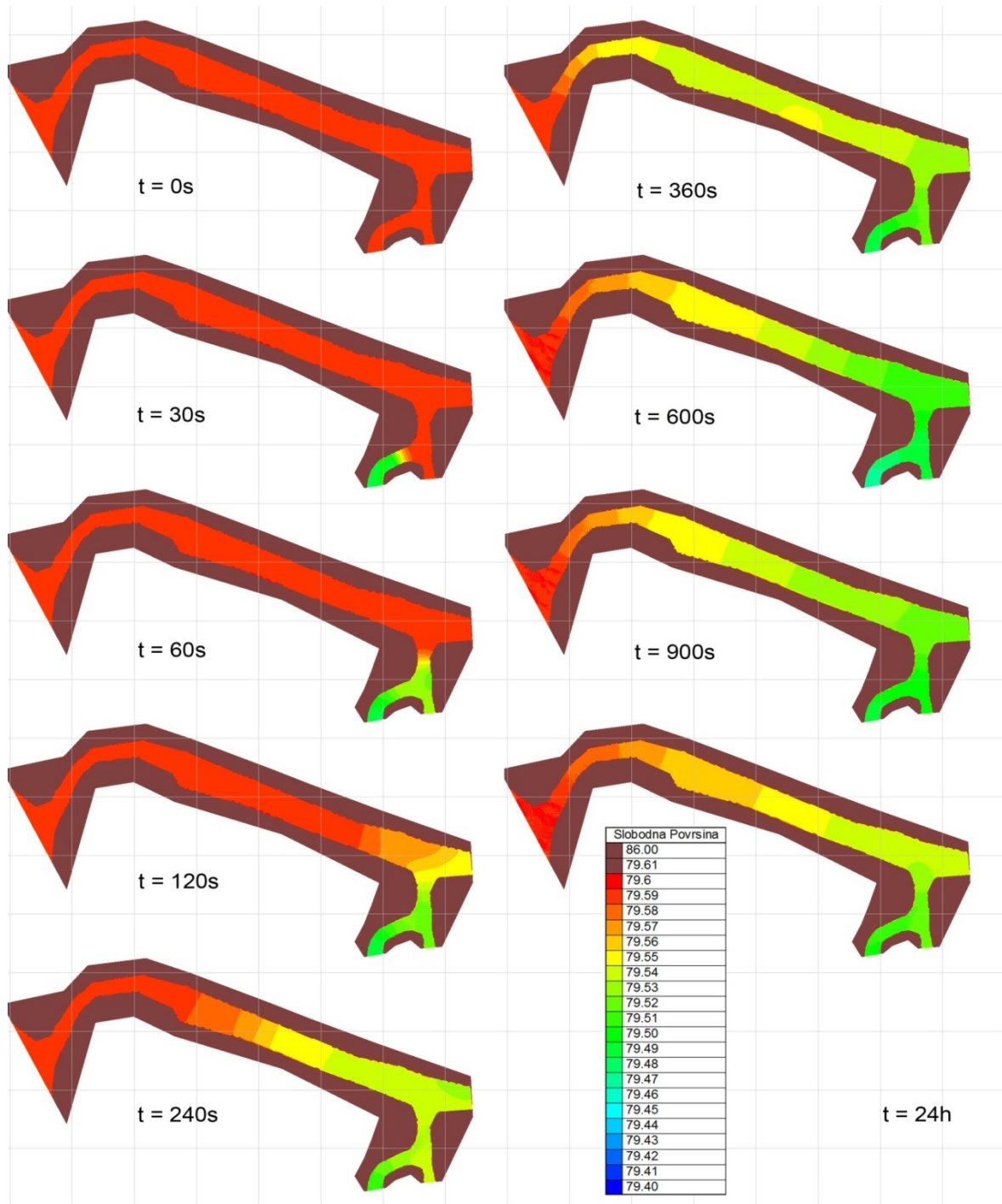


Слика 7. Приказ вектора брзина при протицају од $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$ и коти Дунава пред Барачку од 80.19 мнм

Figure 7. Display of velocity vectors when the water flow is at $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$ and the level of Dunav river in front of Baračka is 80.19 amsl

2. Ископ доводног канала Барачка, да омогући течење од $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ка црпној станици Бездан II:

Барачку треба проширити од око 18% у сегментима где се улива у Дунав, а доводни канал до црпне станице треба проширити од око 50%, док дно канала треба спустити на коту од 77.70 мнм, са бочним нагибима корита од 1:3 у Барачкој и 1:1 у доводном каналу до ЦС.

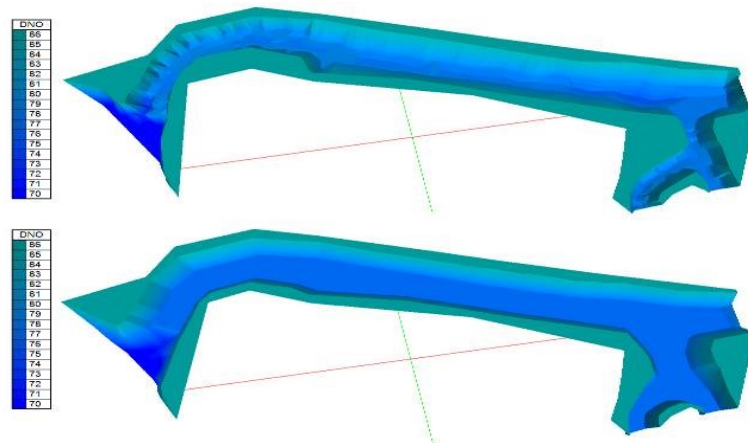


Слика 8. Развијање слободне површине водног огледала од укључења црпне станице до устаљеног стања

Figure 8. Changes of water levels in Varaška channel during time until reaching steady state

3. Ископ доводног канала-Барачке да може да пропусти проток $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ка црпној станици Бездан II и $15 \text{ m}^3/\text{s}$ на црпној станици Бездан I (планирана реконструкција):

Барачку треба проширити од око 60% у сегментима где се улива у Дунав а доводни канал до црпне станице треба проширити од око 150% његове тренутне ширине да би могао да омогући проток од $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Коту дна канала треба спустити на 77.50 мм, са бочним нагибима корита од 1:3 у Барачкој и 1:1 у доводном каналу до ЦС.



Слика 9. Приказ дна корита Барачке пре и после реконструкције
Figure 9. Display of the Baračka channel basin before and after the reconstruction

5 Закључак

МКР се базира на дискретизацији непрекидне области, тако да се вредности зависно променљивих разматрају само у низу дискретних тачака, док МКЕ на дељењу континуума на велики број елемената једноставног облика. Ова друга постиже боље поклапање граница физичког и рачунског домена кад је реч о дигитализовању дна речног корита.

Нумерички модел раванског (2Д) течења представља моћно оруђе за анализу хидродинамике речних токова. Гледајући разлику између вредности мерених на терену и резултата прорачуна, осредњена грешка је у границама од ± 1 цм. Добро слагање резултата у тест примеру потврђује ваљаност методологије уграђене у програмском пакету Телемак-2Д и препоручује се за коришћење. Нумеричке симулације, обављене помоћу одговарајућег и добро калибрисаног модела, за низ одабраних почетних и граничних услова, омогућавају проверу пројектних решења.

Приказани резултати добро илуструју како се ефикасно могу проверити и упоредити пројектна решења (облик попречног пресека, ширина и дубина ископаног канала, бочни нагиби корита, итд.), у циљу постизања жељених хидрауличко-морфолошких ефеката уз најмање трошкове изградње.

Литература

1. Бела, В.: Примена МКЕ и ТЕЛЕМАК 2Д у неустаљеном течењу у отвореним токовима, Мастер рад, Факултет техничких наука у Новом Саду, 2012.
2. Blue Kenue Reference manual, Canadian Hydraulics Centre, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada, 2011.
3. Јовановић, М.Б.: Нумеричка хидраулика у пројектовању регулационих грађевина: напери са крилима, 16.Саветовање СДХИ И СДХ – Доњи Милановац, Србија, 2012.
4. Јовановић, М.Б.: Основе Нумеричког Моделирања Раванских Отворених Токова, Грађевински Факултет, 1998.
5. Ланг, П.: Telemac-2D Software v6.0 User Manual, Telemac Modelling System (e-book), 2010.
6. Рајић, Д., Буза, К.: Доводни канал за црпну станицу Бездан 2 (Елаборат), Воде Војводине.
7. Hydrodynamic model of St. Clair River with Telemac-2D, Canadian Hydraulics Centre, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada, 2009.

Нумеричко моделирање бурног течења у проводнику са хоризонталном кривином

Милена Лучић¹
Љубодраг Савић²
Радомир Капор³
Никола Младеновић⁴

АПСТРАКТ: Нумеричко моделирање бурног течења у затвореном проводнику са хоризонталном кривином представља наставак испитивања која су урађена на физичком моделу. Основни циљ примене нумеричког модела је да се прошири опсег испитивања, односно да се испитају другачије карактеристике кривине, као и услови течења у проводнику, који због ограничености капацитета лабораторије, нису могли да се испитају на физичком моделу. На тај начин су проверени општи закључци до којих се дошло током моделских испитивања, али и применљивост предложених емпиријских израза за настанак одређеног типа течења у проводнику. Нумерички модел је формиран у оквиру програмског пакета Fluent (Ansys-Fluid Dynamic).

Кључне речи: буран ток, хоризонтална кривина, затворени проводник, нумерички модел

Numerical modeling of supercritical flow in closed conduit with horizontal bend

ABSTRACT: Numerical modeling of supercritical flow in closed conduit bend is a continuation of the scale model experiments. The main goal of application of numerical model is to extend the range of investigation and to simulate conditions that could not be examined on scale model due to the limited capacity of the laboratory installation. Using the results of the numerical modeling, general conclusions and suggested empirical relationships (based on the scale model experiments) for the onset of a certain type of flow in the conduit, are checked. Numerical model is prepared using software package Fluent (Ansys-Fluid Dynamic).

Keywords: supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, numerical model

¹ Милена Лучић, дипл. инж, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Бул. Михаила Пупина 12, 11070 Београд, milenakolarevic@yahoo.com

² Др Љубодраг Савић, редовни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

³ Др Радомир Капор, ванредни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁴ Др Никола Младеновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд, nmladenovic@mas.bg.ac.rs

1 Увод

У затвореном проводнику са хоризонталном кривином при бурном току настаје сложено струјање, чије су карактеристике испитане на хидрауличком моделу и анализирани у радовима [3] и [4]. За проширење опсега испитивања, односно за испитивање другачијих карактеристика кривине и услова течења у проводнику, који због ограничености капацитета лабораторијске инсталације нису могли да се испитају на хидрауличком моделу, коришћен је нумерички модел. Испитивања на њему се надовезују на испитивања на физичком моделу, која су приказана у литератури [4].

Прво су упоређени резултати нумеричких прорачуна са извршеним опитима на физичком моделу, а затим је испитан и шири опсег закривљености, већи пречници проводника и „силвитији“ услови течења. Проверена је применљивост предложених израза из литературе [4] за настанак одређеног типа течења у проводнику и за ове случајеве и изведени су закључци.

2 Испитивања на физичком моделу и закључци спроведене анализе

Хидраулички модел за испитивање бурног течења у кривини проводника кружног попречног пресека је направљен у лабораторији Института за Хидротехнику и водно-еколошко инжењерство (Грађевински факултет, Београд). На њему је анализиран облик струјне слике која се остварује у проводнику при одређеним условима, па је усвојена класификација на четири основна типа течења [3], [4]:

1. Течење без окретања млаза, код кога долази до повећања нивоа воде дуж конкавне стране кривине, али он не досеже до врха проводника.
2. Прелазно течење, код кога максимална дубина на конкавној страни досеже до врха проводника, али само мали део млаза прелази на супротну страну.
3. Хеликоидно течење, у случају да се млаз са конкавне стране кривине потпуно окрене по обиму проводника и споји са током на конвексној страни.
4. Загушење тока, код кога је при окретању млаза по обиму проводника цео попречни пресек испуњен мешавином воде и ваздуха, не остављајући простор за струјање ваздуха кроз његов средишњи део.

Моделским испитивањима је обухваћено 14 различитих диспозиција проводника, које су одређене комбинацијом закривљености и скретног угла [3], [4]. Испитане су три закривљености кривине ($D/R = 1/2, 1/3, 1/4$) и четири скретна угла ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60°). Анализа је проширена и на веће скретне углове (75° и 90°), али само за закривљеност $D/R = 1/3$.

Циљ моделских испитивања је био да се одреде услови при којима настаје течење одређеног типа. Под условима се овде подразумевају и геометријске карактеристике кривине (закривљеност и скретни угао), као и услови течења непосредно узводно од кривине (релативна дубина, h_0/D , и Фрудов број (односно, формално гледано, корен из Фрудовог броја), $Fr_0 = v_0/\sqrt{g A_0/B_0}$).

На основу резултата моделских испитивања, предложени су емпиријски изрази, којима се у зависности од горе наведених величина дефинишу границе настанка хели-

коидног течења и загушења тока. Детаљна анализа моделских испитивања и приказ општих облика зависности се налазе у литератури [3].

2 Нумерички модел

Нумерички модел се заснива на решавању парцијалних диференцијалних једначина просторног струјања воде и ваздуха, којима се описује разматрано течење у проводнику. Примењен је комерцијални програмски пакет Fluent (Ansys-Fluid Dynamic), који користи методу коначних запремина за решавање ових једначина.

2.1 Карактеристике нумеричког модела

С обзиром да при анализираном течењу кроз проводник струје и вода и ваздух, нумеричка симулација је такође урађена за двофазно течење. Коришћен је VOF (Volume of Fluid) модел, који се препоручује за моделирање сложених струјања код отворених токова. Рачунска област се састоји од ћелија (контролних запремина), од којих је свака испуњена неком од фаза, или комбинацијом фаза, као што је случај у зони слободне површине воде.

Турбуленција је моделирана Рејнолдсовим напонским моделом (RSM – Reynolds Stress Model), који подразумева решавање 7 додатних једначина. Усвојене су препоручене вредности параметара којима се моделира турбуленција [1].

Још један веома важан аспект анализираног проблема је моделирање интеракције између воде и ваздуха у проводнику. Коришћена је QUICK нумеричка схема за просторну дискретизацију и одређивање запреминских удела воде и ваздуха у мешавини у рачунском домену. QUICK схема је другог реда тачности и представља комбинацију разлика другог реда уназад и централних разлика, са задатим тежинским фактором [1].

Усвојена је апсолутна храпавост проводника од $k = 0,0015 \text{ mm}$.

2.2 Гранични и почетни услови

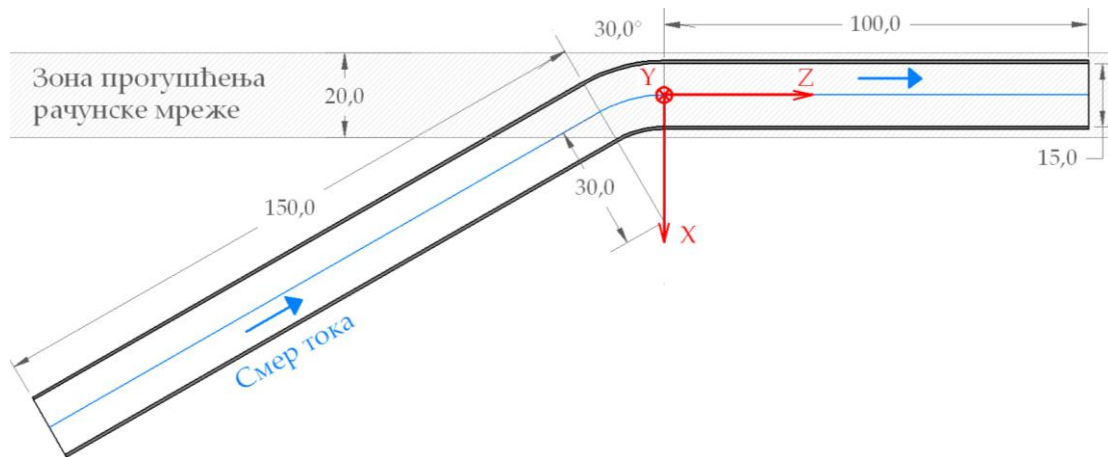
С обзиром да се моделира бурно течење, задаје се ниво слободне површине воде и масени проток воде и ваздуха, на узводном крају проводника. На низводном крају проводника не постоји додатни гранични услов који утиче на формирање струјне слике, па је на овом месту задато слободно истицање. Непознате величине на низводном крају се одређују екстраполацијом одговарајућих величина из унутрашњег дела домена.

Моделира се устаљено течење. Прорачун се врши итеративно, па претпостављена струјна слика у проводнику на почетку прорачуна представља прву итерацију, односно почетно стање. Када разлике између одговарајућих величина у „суседним“ итерацијама постану довољно мале, сматра се да је постигнута конвергенција, па актуелна струјна слика у проводнику представља стање на моделу, односно решење задатог проблема.

При промени граничних услова на истој диспозицији проводника, крајња струјна слика на симулацији са најсличнијим граничним условима је коришћена као почетно стање за нову, са циљем да се добије решење са што мањим бројем итерација.

3 Поређење резултата нумеричких симулација са течењем на моделу

Формирањем нумеричког модела истих геометријских карактеристика, као за физички модел који је испитан у лабораторији, омогућено је њихово поређење. Пречник проводника износи, $D = 15$ cm, а остале карактеристичне величине су приказане на Слици 1. Да би се олакшало праћење анализе резултата нумеричких прорачуна, на истој слици је приказана и оријентација координатног система за анализирану диспозицију проводника.

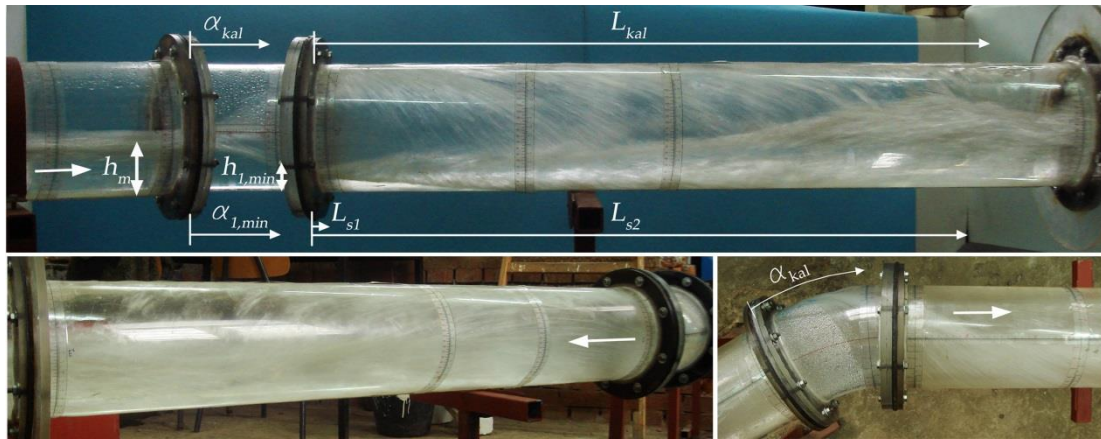


Слика 1. Оријентација координатног система на нумеричком моделу, са скретним углом од $\alpha = 30^\circ$ и закривљеношћу $D/R = 1/2$
 Figure 1. Orientation of coordinate system on the numerical model with deflection angle $\alpha = 30^\circ$ and curvature $D/R = 1/2$

Поређење резултата нумеричке симулације са мерењима на физичком моделу је приказано у наставку. За поређење је изабран опит на диспозицији проводника са закривљеношћу $D/R = 1/2$ и скретним углом од 30° при коме се остварило хеликоидно течење. На нумеричком моделу су задати исти услови течења (дубина и проток воде на узводном крају проводника) као на физичком моделу. На основу претпоставке да је средња брзина ваздуха једнака средњој брзини воде, одређен је масени проток ваздуха на узводном крају проводника.

Нумерички модел се састоји од 217.500 прорачунских ћелија. Мрежа је прогушћена у зони кривине и низводно од ње (Слика 1), као и у зони граничног слоја уз чврсту границу, јер се на тим местима очекују најзначајније промене вредности рачунских величина.

На следећој слици су приказане фотографије физичког модела са ознакама величина које су мерене, а у Табели 1 вредности измерених величина.



Слика 2. Хеликоидно течење на моделу $D/R = 1/2$ и $\alpha = 30^\circ$
 Figure 2. Helical flow for $D/R = 1/2$ and $\alpha = 30^\circ$

Табела 1. Карактеристичне величине мерене на физичком моделу
 Table 1. Characteristic values measured in the scale model

Тип течења	Q_w	h_m	α_{kal}	$\alpha_{1,min}$	$h_{1,min}$	L_{s1}	L_{s2}	L_{kal}
	l/s	cm	°	°	cm	cm	cm	cm
Хеликоидно	16,64	6,0	27	29	3,0	2	80	85

где је: Q_w – проток воде кроз проводник, h_m – дубина мешавине непосредно узводно од кривине, α_{kal} – угао од почетка кривине до места на коме млаз дотиче теме проводника, $\alpha_{1,min}$ – угао од почетка кривине до места појаве првог минимума (конвексна страна), $h_{1,min}$ – први минимум (минимална дубина на конвексној страни), L_{s1} – растојање од краја кривине до места где се окренути ток спаја са током на конвексној страни кривине, L_{s2} – растојање од краја кривине до низводног краја спајања окренутог млаза са током на супротној страни проводника, L_{kal} – растојање од краја кривине до места на коме се завршава течење млаза по темену проводника.

У Табели 2 су приказане карактеристичне величине добијене применом нумеричког модела, а у Табели 3 и одговарајуће графичке представе течења у проводнику на нумеричком моделу, уз поређење резултата са опитом на физичком моделу.

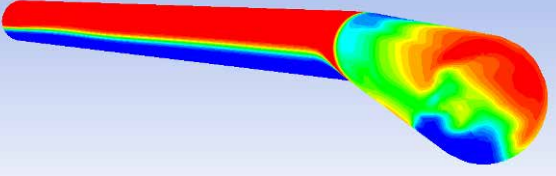
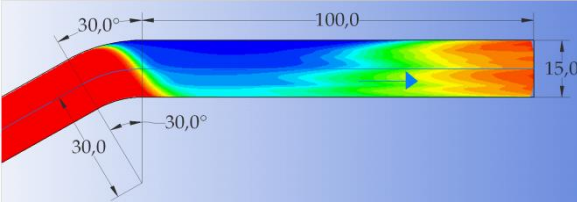
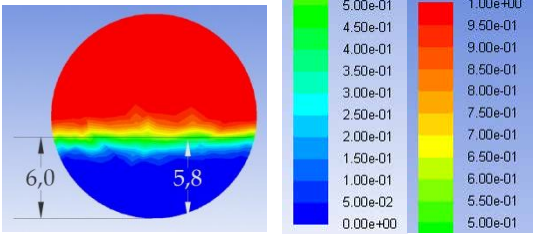
Табела 2. Карактеристичне величине добијене применом нумеричког модела
 Table 2. Characteristic values obtained on the numerical model

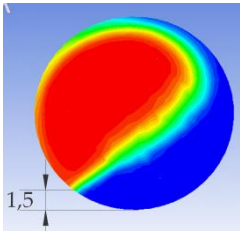
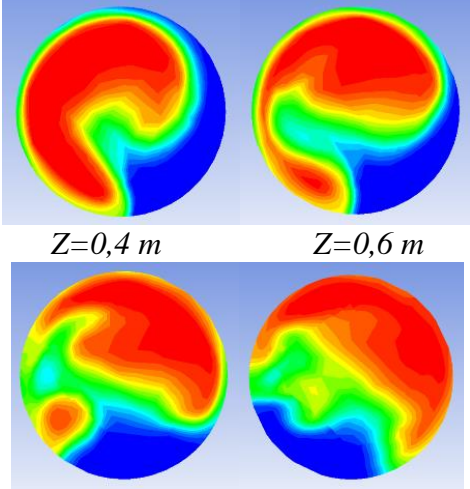
Тип течења	Q_w	$h_m^{50\%}$	$\alpha_{kal}^{50\%}$	$l_{1,min}^{50\%}$	$h_{1,min}^{50\%}$	L_{s1}	L_{s2}	L_{kal}
	l/s	cm	°	cm	cm	cm	cm	cm
Хеликоидно	16,64	5,8	30	5	1,5	5	85	100

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

где је: $h_m^{50\%}$ – дубина мешавине непосредно узводно од кривине за концентрацију ваздуха у мешавини од 50%, $\alpha_{kal}^{50\%}$ – угао од почетка кривине до места на коме млаз са концентрацијом ваздуха у мешавини од 50% дотиче теме проводника, $l_{1,min}^{50\%}$ – растојање од краја кривине до места на коме млаз са концентрацијом ваздуха у мешавини од 50% формира први минимум (конвексна страна), $h_{1,min}^{50\%}$ – први минимум за концентрацију ваздуха у мешавини од 50% (минимална дубина на конвексној страни).

Табела 3. Приказ резултата нумеричког прорачуна и поређење са одговарајућим опитом на физичком моделу
Table 3. Results of the numerical calculation (simulation) and comparison with corresponding experiment on the scale model

 <p><i>Концентрације ваздуха у мешавини (поглед са конвексне стране проводника)</i></p>	<p>Млаз се потпуно окренуо по обиму проводника. Први минимум се формира на конвексној страни, а „размотавање“ млаза се дешава тек на низводном крају проводника.</p>
 <p><i>Концентрације ваздуха у мешавини у највишим пропрачунским ћелијама (на калоти проводника)</i></p>	<p>Млаз са учешћем ваздуха од 50% дотиче теме проводника при углу од 30°, што се слаже са мерењима. Струјна слика у зона окретања млаза по обиму проводника одговара течењу на физичком моделу. На физичком моделу је измерено да млаз клизи по темену цеви на дужини од 85 cm, што је нешто краће у односу на резултате нумеричке симулације, где млаз клизи до самог краја цеви.</p>
 <p><i>Концентрација ваздуха у мешавини у попречном пресеку проводника непосредно узводно од кривине</i></p>	<p>Дубина мешавине за концентрацију ваздуха од 60% одговара мерењима на физичком моделу. За концентрацију ваздуха од 50%, дубина мешавине износи 5,8 cm.</p>

 <p style="text-align: center;">$Z=0,05\text{ m}$</p> <p style="text-align: center;"><i>Концентрација ваздуха у мешавини у попречном пресеку проводника низводно од кривине</i></p>	<p>Минимална дубина износи 1,5 cm (за концентрацију ваздуха у мешавини од 50%), што је мање него што је измерено на физичком моделу.</p> <p>На физичком моделу се минимум јавља при углу од 29° од почетка кривине, док је на нумеричком нешто низводније.</p> <p>На овом месту се окренути ток спаја са млазом на супротној страни проводника, што се добро слаже са физичким моделом.</p>
 <p style="text-align: center;">$Z=0,4\text{ m}$ $Z=0,6\text{ m}$</p> <p style="text-align: center;">$Z=0,8\text{ m}$ $Z=1,0\text{ m}$</p> <p style="text-align: center;"><i>Концентрација ваздуха у мешавини у попречним пресецима проводника низводно од кривине</i></p>	<p>На попречним пресецима проводника низводно од кривине се види како се млаз потпуно окренуо по његовом обиму, остављајући простор у средишњем делу за слободно струјање ваздуха ($Z = 0,4\text{ m}$ и $Z = 0,6\text{ m}$). У последња два пресека ($Z = 0,8\text{ m}$ и $Z = 1,0\text{ m}$), млаз се „размотава“, па ваздух струји кроз горњи део проводника, чиме се успоставља класично течење са слободном површином.</p>

На основу приказане анализе резултата нумеричке симулације и поређења са опитом на физичком моделу, може се рећи да се резултати модела сасвим добро слажу. Присутна су одступања по питању величине и локације првог минимума, али она нису значајна.

4 Проширење опсега испитивања на нумеричком моделу

С обзиром на добро слагање резултата нумеричког и физичког модела, на нумеричком моделу су анализирани диспозиције проводника (мања закривљеност, већи пречници) и услови течења (већи Фрудови бројеви) који нису испитани на физичком моделу, како би се проверили закључци из литературе [4] и проширио опсег истраживања.

4.1 Утицај пречника проводника

На физичком моделу је, због ограничености капацитета лабораторије, испитан релативно мали пречник проводника (15 cm), на основу кога су дефинисани изрази за настанак хеликоидног течења и загушења тока [4]. При течењу у проводнику већих димензија, очекује се и веће увлачење ваздуха у ток и значајније „бубрење“ млаза. Да би се проверила применљивост предложених израза на овакве случајеве, на нумеричком моделу су испитани и већи пречници проводника.

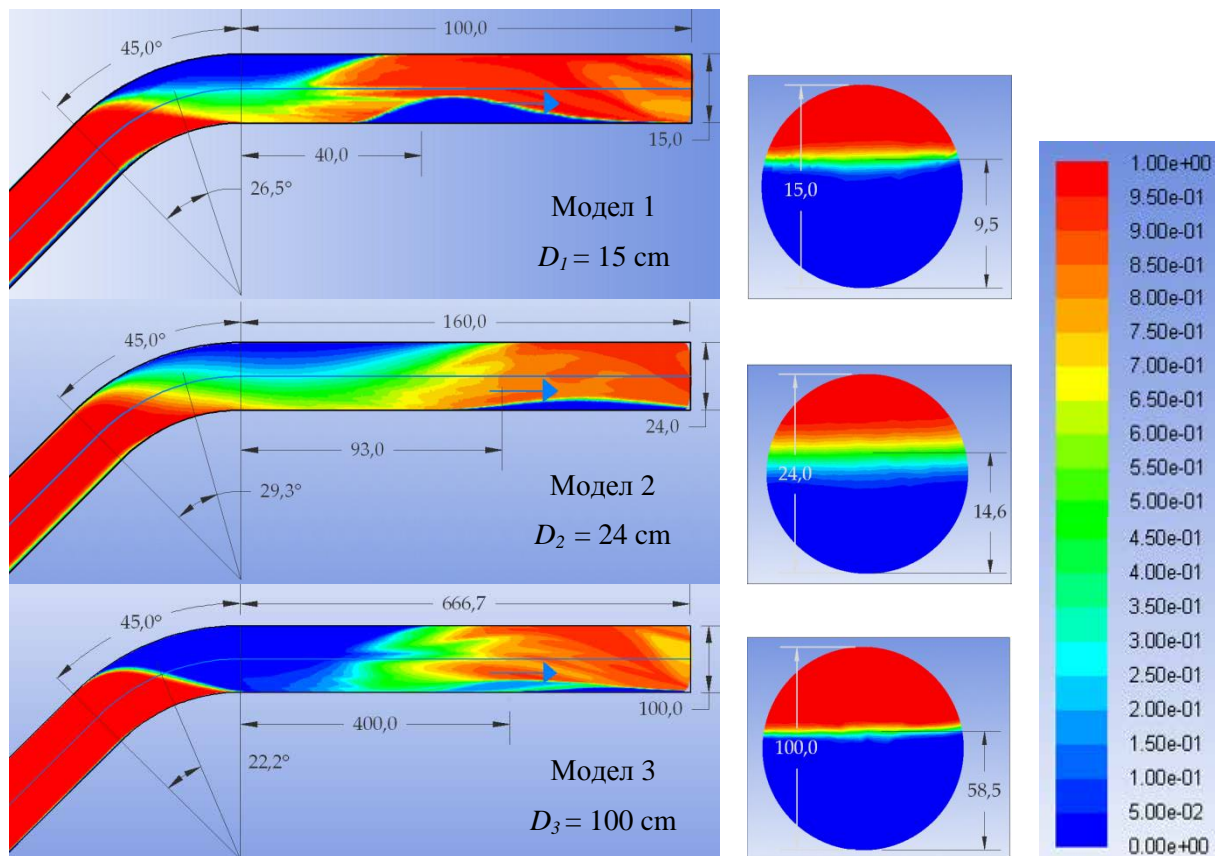
Поред проводника са пречником од $D_1 = 15$ cm, испитани су и пречници: $D_2 = 24$ cm (јер је проводник тих димензија анализиран у литератури [2]), као и $D_3 = 100$ cm. Утицај даљег повећања пречника на течење у проводнику није анализиран, јер би то захтевало формирање нумеричког модела са изузетно великим бројем ћелија, што није било могуће са расположивом рачунарском опремом.

Сви нумерички модели су направљени за диспозицију проводника са скретним углом од 45° и закривљеношћу $D/R = 1/3$. Праволинијска деоница узводно кривине је дужине $10 D$, а низводна $20 D/3$. Модел са пречником $D_1 = 15$ cm се састоји од 1.330.700 ћелија, са пречником $D_2 = 24$ cm од 1.990.000, док модел са највећим пречником, $D_3 = 100$ cm, има 2.700.000 ћелија. Према томе, модел са највећим пречником има најгрубљу мрежу дискретизације, али на расположивим рачунарима, није било могуће њено даље прогушћење.

На свим моделима су задати узводни гранични услови (релативна дубина воде, $h_{1,uz}/D_1 = h_{2,uz}/D_2 = h_{3,uz}/D_3$, и Фрудов број, $Fr_{1,uz} = Fr_{2,uz} = Fr_{3,uz}$), при којима се на моделу са најмањим пречником остварило хеликоидно течење. Упоређени су попречни пресеци проводника непосредно узводно од кривине и струјна слика дуж проводника. Да би се лакше уочиле сличности и разлике између резултата три разматрана модела, визуелно су сведени на исту вредност пречника, али су дужине исправно котиране.

На Слици 3 се види да је на свим разматраним моделима успостављено хеликоидно течење, мада су присутне разлике, како у попречном пресеку непосредно узводно од кривине, тако и у највишим прорачунским ћелијама домена (на калоти проводника).

Разлике између релативних дубина непосредно узводно од кривине нису велике, али је евидентна разлика између ширина зона мешања воде и ваздуха. Ова зона је најужа на моделу са најмањим пречником, што је очекивано. Са повећањем димензија проводника ($D_2 = 24$ cm), интензивира се увлачења ваздуха у ток, па је и зона мешања све ширира. Међутим, за проводник са највећим пречником, зона мешања је (у релативном смислу, тј., у односу на пречник проводника) најужа, што је последица недовољне густине рачунске мреже. При погледу на стање у највишим прорачунским ћелијама проводника такође се уочава најинтензивније увлачење ваздуха на Моделу 2 ($D_2 = 24$ cm). Зона у којој млаз дотиче теме проводника је најшира, па је за одређивање његове тачне локације значајно на коју се концентрацију ваздуха у мешавини односи. Место на коме млаз дотиче теме проводника се мало разликује између разматраних модела, док се место настанка другог максимума (конвексна страна) помера низводно са повећањем пречника проводника. Релативна дужина на којој окренути млаз клизи по калоти цеви је најкраћа на Моделу 1, док на преостала два има сличну вредност.



Слика 3. Концентрације ваздуха у мешавини у највишим прорачунским ћелијама и у попречним пресецима проводника непосредно узводно од кривине за моделе са различитим пречницима

Figure 3. Concentration of air in the mixture in the highest cells and in the cross sections of the conduit just upstream from the bend for models with different diameters

Модел са највећим пречником проводника има најгрубљу мрежу просторне дискретизације, па мешање воде и ваздуха није изражено. На моделу са најмањим пречником је супротна ситуација. Модел је релативно малих димензија, па иако је број прорачунских ћелија релативно велики, мешање воде и ваздуха није изражено. Модел 2 је релативно велики, па физички долази до мешања воде и ваздуха, а пошто је и број прорачунских ћелија релативно велики, на овом моделу долази до најинтензивнијег мешања.

На основу приказаног је очигледно да вредност пречника проводника битно утиче на количину увученог ваздуха у ток, а релативно мало на формирање струјне слике у проводнику. Иако су присутне одређене разлике између резултата три модела, оне не доводе у питање закључке анализе испитивања на физичком моделу [4], везане за настанак хеликоидног струјања, као и применљивост предложених израза.

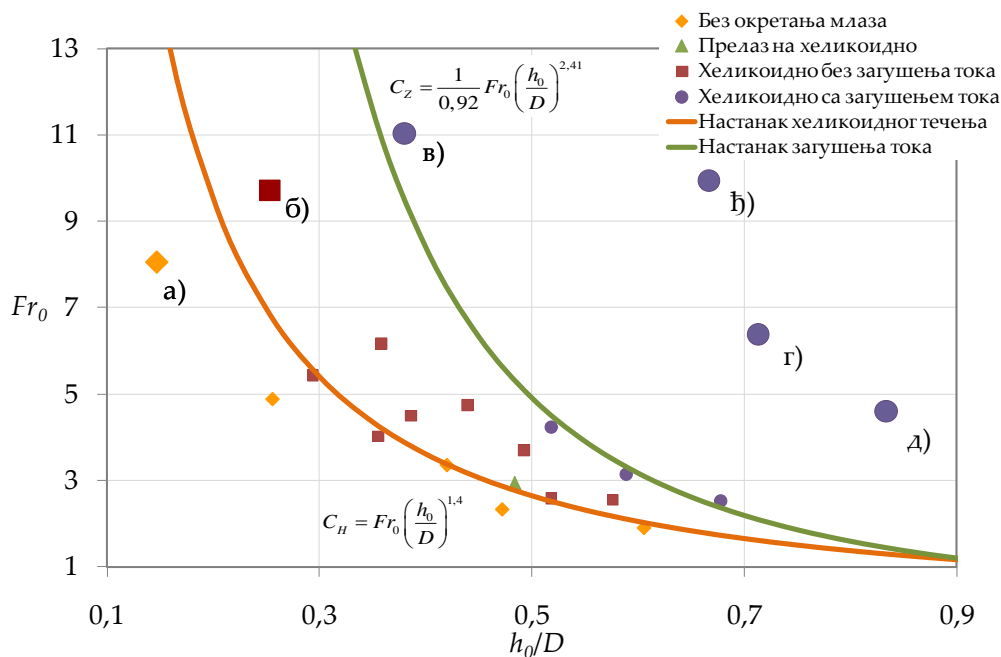
4.2 Провера предложених израза за веће Фрудове бројеве

С обзиром да због ограничености капацитета лабораторије није било могуће испитати шири опсег Фрудових бројева, то је урађено на нумеричком моделу.

Испитивања су урађена на моделу пречника 15 cm, са скретним углом кривине од 45° и закривљеношћу $D/R = 1/3$. Овај модел се састоји од 280.000 ћелија. Нумерички прорачуни су обухватили распон Фрудових бројева непосредно узводно од кривине, $Fr_0 = v_0 / \sqrt{g A_0 / B_0}$, од 4,6 до 11,03.

Урађено је укупно 6 прорачуна. Услови течења за три прорачуна су задати тако да се у свакој зони карактеристичног типа течења (течење без окретања млаза, хеликоидно течење, загушење тока) нађе по један прорачун. Поред тога, испитани су и случајеви при којима се остварују велике релативне дубине узводно од кривине, али и велики Фрудови бројеви, па се налазе дубоко у зони загушења тока. Због ограничености капацитета лабораторије овакве услове није било могуће остварити на физичком моделу.

Резултати прорачуна су приказани на истом дијаграму на коме су представљени и опити са физичког модела, као и границе настанка хеликоидног течења и загушења тока које су дефинисане на основу њих [4]. Сваки од четири усвојена типа течења је приказан другачијим ознакама. Резултати прорачуна су приказани крупнијим симболима.



Слика 4. Поређење резултата прорачуна са предложеним границама настанка хеликоидног течења и загушења тока, јед. (1) и (2) ($D/R = 1/3$, $\alpha = 45^\circ$)

Figure 4. Results of the numerical calculation compared with the suggested limit-curves for onset of the helical and choking flow, eq. (1) and (2) ($D/R = 1/3$, $\alpha = 45^\circ$)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Границе настанка хеликоидног течења и загушења тока за анализиране карактеристике кривине су одређене на основу општих израза из литературе [4]:

$$C_H^{45,1/3} = Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{1,40} \quad (1)$$

$$C_Z^{45,1/3} = \frac{1}{0,92} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{2,41} \quad (2)$$

На претходном дијаграму се види да су се резултати свих прорачуна нашли у одговарајућим областима. Прва три (а), б) и в)) потврђују применљивост предложених израза за границе настанка хеликоидног течења и загушења тока при већим вредностима Фрудовог броја, док се друга три (г), д) и ђ)) налазе дубоко у зони загушења тока.

4.3 Провера предложених израза за мању закривљеност

На нумеричком моделу је испитан и проводник са мањом закривљеношћу, како би се проверила применљивост предложених израза за настанак хеликоидног течења и загушења тока и за шири спектар карактеристика кривине.

Испитани скретни угао кривине износи 45° , а закривљеност $D/R = 1/10$. Модел се састоји од 300.000 ћелија, а апсолутна хрпаовост проводника износи 0,0015 mm.

Границе настанка хеликоидног течења и загушења тока су одређене на основу општих израза из литературе [4], који су за усвојене карактеристике кривине дати у облику:

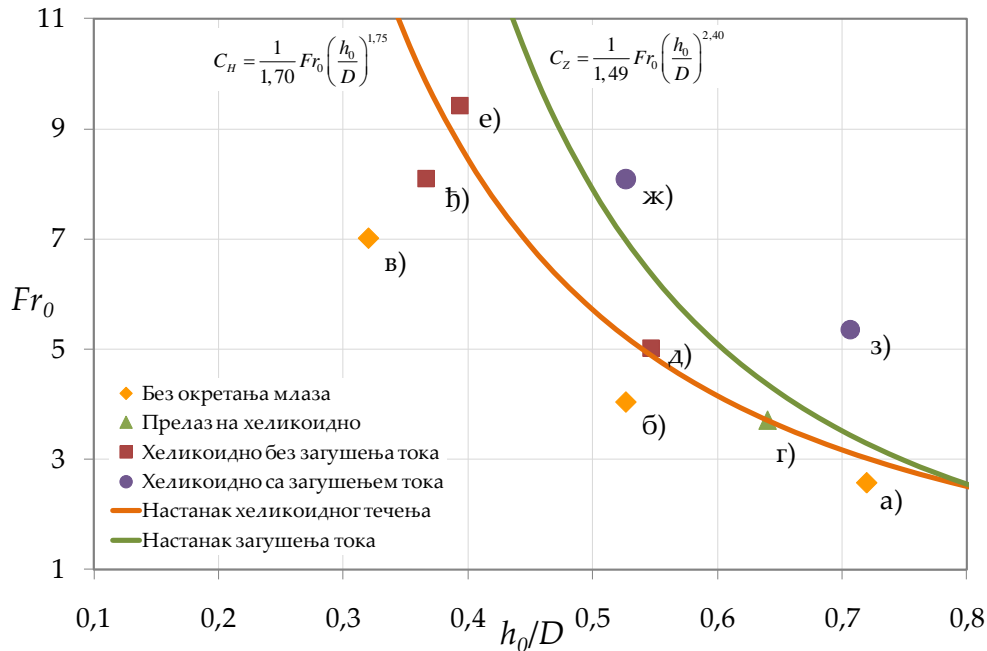
$$C_H^{45,1/10} = \frac{1}{1,70} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{1,75} \quad (3)$$

$$C_Z^{45,1/10} = \frac{1}{1,49} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{2,40} \quad (4)$$

На моделу је урађено девет прорачуна, чији су резултати упоређени са дефинисаним границама настанка хеликоидног течења и загушења тока (јед. (3) и (4)), на основу чега су донети закључци.

На Слици 5 се види да се резултати прорачуна углавном налазе у одговарајућим областима дефинисаним границама настанка хеликоидног течења и загушења тока. Изузетак је случај ђ) који се нашао испод границе настанка хеликоидног течења, односно у области где се очекује појава течења без окретања млаза. Када би се овај резултат узео у обзир, границу настанка хеликоидног течења требало би померити мало на ниже, али само у зони мањих релативних дубина.

Дефинисана граница настанка загушења тока одговара извршеним нумеричким симулацијама.



Слика 5. Поређење резултата прорачуна са границама настанка хеликоидног течења и загушења тока, јед. (3) и (4) ($D/R = 1/10$, $\alpha = 45^\circ$).

Figure 5. Results of the numerical calculation compared with the suggested limit-curves for onset of the helical and choking flow, eq. (3) and (4) ($D/R = 1/10$, $\alpha = 45^\circ$)

5 Закључна разматрања

У раду је приказано да се адекватним нумеричким моделом у оквиру програмског пакета Fluent (Ansys - Fluid Dynamic) може успешно моделирати бурно течење у затвореном проводнику са хоризонталном кривином. Као резултат нумеричких симулација, добија се веродостојна слика течења воде и ваздуха.

Применом нумеричког модела је потврђена применљивост израза из литературе [4] за настанак хеликоидног течења и загушења тока и на проводнике већих пречника, мање закривљености, али и при „силовитијим“ условима течења од испитаних на физичком моделу.

Захвалност

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 „Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и морфодинамичких параметара река и водних акумулација“ и пројекта ТР 35043.

Литература

1. *ANSYS Fluent Theory Guide*. (2013).
2. Gisonni, C., Hager, W., H., (2000), Bend Flow in Bottom Outlets, материјал са интернета.
3. Коларевић, М., (2015), *Бурно течење у кривинама евакуационих објеката*, Докторска дисертација, Универзитет у Београду - Грађевински факултет.
4. Лучић, М., Савић, Љ., Капор, Р., Младеновић, Н. (2015), *Бурно течење у хоризонталној кривини затвореног проводника*, 17. Саветовање СДХИ и СДХ, Вршац, Србија.

Model za brze proračune ravanskog plavljenja

Dragan Savić¹
Slobodan Djordjević²
Albert Chen³
Michel Guidolin⁴

APSTRAKT: Modeli ravanskog (2D) tečenja za potrebe analiza poplava su obično zasnovani na rešavanju jednačina hidraulike i zahtevaju ogromne računarske resurse da bi se primenili na većim površinama, pogotovo u gradskim sredinama gde je neophodna visoka rezolucija. Uprošćeni dvodimenzionalni model razvijen korišćenjem Cellular Automata pristupa je u ovom radu primenjen u paralelnom hardveru da bi se unapredila brzina proračuna. Za testiranje efikasnosti i tačnosti novog modela korišćeno je analitičko rešenje, kao i nekoliko realnih primera problema modeliranja poplava. Rezultati su upoređeni sa onim koji su dobijeni korišćenjem komercijalnog softverskog paketa široko rasprostranjenog u upotrebi u Velikoj Britaniji. Poređenja su pokazala da se rezultati uprošćenog modela po pitanju dubina i brzina vode dobro slažu sa rezultatima profesionalnog softvera. Prednost uprošćenog modela je u tome što su rezultati ostvareni mnogo brže i uz korišćenje mnogo manje komputerske memorije, što je naročito važno za analizu velikih poplavnih područja. Na realnom primeru iz prakse ovaj uprošćeni model je pokazao da je čak osam puta brži od profesionalnog softvera. Brzina i tačnost novog modela takođe pokazuju da je najbolje da se ovakav softver koristi kada je potrebno da se analiza poplava uradi u kratkom vremenskom roku, kao kod analize rizika gde obično treba da se uradi veliki broj simulacija, i kada se radi o velikom plavnom području.

Ključne reči: ravansko tečenje, poplave, dvodimenzionalni model, cellular automata

Two-dimensional cellular automata model for superfast flood simulations

ABSTRACT: To achieve fast flood modelling for large-scale problems, a two-dimensional cellular automata based model was developed. This model employs simple transition rules and a weight-based system to approximate a fully-dynamic 2D model that requires significant computational resources, especially in urban flood modelling where high model resolution is necessary. The simplified feature of cellular automata allows implementation in parallelised environments, resulting in significantly improved computational efficiency. The model has been tested using an analytical solution and real-world case studies and the outputs were compared to those from a widely-used commercial physically-based hydraulic model. Results show that the simplified model is capable of simulating water depth and velocity with reasonably good agreement with the benchmark model, using a fraction of the computational time and memory. In the case of the real world example, the proposed model run times are up to 8 times faster. The rapid and accurate attributes of the model have demonstrated its applicability for quick flood analysis in large modelling systems.

Keywords: two-dimensional flow, flood, two-dimensional flow, cellular automata

¹ Professor Dragan Savić, Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, Velika Britanija

² Professor Slobodan Djordjević, Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, Velika Britanija

³ Dr. Albert Chen, Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, Velika Britanija

⁴ Dr. Michele Guidolin, Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, Velika Britanija

1 Introduction

The demand for performing two-dimensional (2D) flood modelling for extremely large spatial scale problems (large extent, fine grid resolution, or a large number of simulations) is growing in the flood risk management industry. The problems include flood risk assessment for up to continental size domains, flood simulations with high resolution terrain data (e.g., to reflect micro-features in urban environment), uncertainty analysis with a large number of input parameter combinations and the analysis of flood risk for future development and climate change scenarios. All of these need fast models that can run simulations accurately and efficiently.

1.1 2D Flood Models using Shallow Water Equations

Typical physically-based 2D flood models solve the Shallow Water Equations (SWEs), requiring high computational resources. Many of these models have been developed to obtain better performance, while maintaining the required accuracy, by reducing the complexity of the SWEs. This complexity reduction is usually achieved by approximating or neglecting less significant terms of the equations (Hunter et al., 2007; Yen and Tsai, 2001). The JFLOW model (Bradbrook et al., 2004), Urban Inundation Model (UIM) (Chen et al., 2007), and the diffusive version of LISFLOOD-FP (Hunter et al., 2005) solve the 2D diffusion wave equations that neglect the inertial (local acceleration) and advection (convective acceleration) terms (Yen and Tsai, 2001). The inertial version of LISFLOOD-FP (Bates et al., 2010) solves the SWEs without the advection term. In either version of LISFLOOD-FP the flow is decoupled in the Cartesian directions. Other models use the full SWEs but focus on the use of multi resolution grids or irregular mesh and rely on highly optimised code to achieve high performance, like InfoWorks ICM (Innovyze, 2012) and MIKE FLOOD (DHI software, 2014; Hénonin et al., 2013). These last two models are commercial packages, and the code applied in the optimisation techniques is not in the public domain.

Many of these physically based models have benefited from parallelised computation, due to the recent advancement in parallel computing techniques and easy-to-access parallel capable hardware. For example, InfoWorks ICM (Innovyze, 2012), JFLOW-GPU (Lamb et al., 2009), and the Finite volume SWEs model of Smith et al. (2013) use the massive parallel computational power of Graphics Processing Units (GPUs) in modern graphics cards to reduce the computation time. LISFLOOD-FP uses the OpenMP (Neal et al., 2009) and the MPI libraries (Neal et al., 2010) to take advantage of multi-core CPUs (MCs). To increase performance, other 2D models, such as the FloodMap-Parallel model (Yu, 2010) and CityCAT urban flood model (Glenis et al., 2013), have taken advantage of remote distributed computers or Cloud computing. However, these physically based models might not always be able to take full advantage of modern highly parallel computing techniques, like GPU computation, due to their need for inherently sequential computations.

1.2 2D Flood Modelling using Cellular Automata

In recent years, a number of studies have focused on developing simple 2D flood models using the cellular automata (CA) approach instead of solving the SWEs. The CA technique offers a versatile method for modelling complex physical systems using simple operations (Wolfram, 1984). This simplification dramatically reduces the computational load of a CA

model compared with a physically based model. A CA model usually consists of five essential features: a set of cells that represent discretised space each of which has a state, a distribution of neighbouring cells, a discrete time step, and a set of transition rules (Itami, 1994). The CA approach used in this work differs from the related lattice-Boltzmann method (Chen and Doolen, 1998) which uses simple operations to compute the micro scale particles interaction to model the macro scale flow behaviour.

CA based models have been successfully used to simulate many types of water related problems. Thomas and Nicholas (2002) applied a CA model to simulate braided river flow by routing the flow from the cell under consideration into five downstream cells. Coulthard et al. (2007) developed the CA Evolutionary Slope and River (CAESAR) model to simulate the sediment evolution in rivers. Krupka et al. (2007) adopted a concept similar to CA that uses three states of a cell (dry, active and inactive) to develop a rapid inundation model. While not being CA based, the RSFM direct (Lhomme et al., 2008) and ISIS Fast (Halcrow Group Ltd, 2014) models use mass balance approach to spread flood volume to the linked depressions on the floodplain. However, these models can only determine the final inundation extent because of the lack of time variation modelling.

Austin et al. (2013, 2014) developed a series of CA models (CA1D, BCA1D, etc.), that simulate sewer network flow using various transition rules and demonstrated that these simplified CA models are capable of producing reliable results, compared with traditional 1D hydraulic models, with a lower computational cost. These models were developed as the 1D part of the Cellular Automata Dual-DraInagE Simulation (CADDIES, 2015) project.

In terms of existing CA based 2D flood models, Dottori and Todini (2010, 2011) developed a CA model, which is similar to the storage cell models, such as LISFLOOD-FP. It employs Manning's equation for the computation of interfacial discharges between computing cells. Ghimire et al. (2013) developed the first version of the CADDIES-2D model (CA2D) that differed in its approach by evaluating the volume transferred between cells using a ranking system instead of directly solving the Manning's equation. However this equation was still solved for each time step, for each interfacial direction to limit the velocity. If the computed velocity was too high, the intercellular transfer volumes were recomputed. This model achieved high performance thanks also to the use of the massive parallelism of the GPU (Ghimire et al., 2013; Guidolin et al., 2012).

Both Dottori and Todini's, and Ghimire et al.'s CA models solve the Manning's equation for each direction of the cellular interfaces. The Manning's equation is relatively computationally expensive because it includes a power operation and a square root operation, which are slower to calculate by a processor than solving simpler operations. While in modern architecture, like GPU, the quantity of memory used by a model has a larger impact on the execution time than in the past, reducing the number of expensive operations can still significantly reduce the computation time.

The main idea of this work is to present a new CA2D model derived from Ghimire et al. (2013), which adopts a weight based system to further simplify the transition rules determining the flow movement and to minimise the need for solving complex and computationally expensive equations. The aim is not to replace complex physically based models, but to achieve high performance while maintaining adequate accuracy for rapid flood analysis in large-scale applications.

The new model was applied to five different problems: the analytical solution proposed by Hunter et al. (2005), three examples from the Environment Agency (EA) benchmarking

tests for 2D flood modelling (Néelz and Pender, 2013), and one real world case study in the area of Torquay in the UK. The results of the three 2D benchmarking test cases and the Torquay test case were compared with that of the widely used commercial model InfoWorks ICM 3.0 (Innovyze, 2012) to assess the performance and accuracy of the new CA model.

2 2D Cellular Automate Model

The proposed model attempts to reduce the necessity for physically-based equations and complex mathematical operations on the transition rules used to simulate an inundation event. This model, which is also a part of the CADDIES 2D family, but improves upon the methodology used in the CA2D model (Ghimire et al., 2013) is referred to as the Weighted Cellular Automata 2D (WCA2D). The WCA2D model is a diffusive-like model that ignores inertia terms and momentum conservation. The model has been designed to work with various general grids, (e.g., rectangular, hexagonal or triangular grid) with different neighbourhood types (e.g., the five cells of the von-Neumann (VN) neighbourhood or the nine cells of the Moore neighbourhood). The major features of this new model are:

1. The ratios of water transferred from the central cell to the downstream neighbour cells (intercellular-volume) are calculated using a quick weight-based system;
2. The volume of water transferred between the central cell and the neighbour cells is limited by the Manning's formula and the critical flow equation.
3. Both the adaptive time step and the velocity are evaluated within a larger updated time step to speed up the simulation.

The pseudo-code of the main algorithm of the model is given in Figure 1, where $t(s)$ is the simulation time, Δt (s) is the adaptive time step, and Δt_u (s) is the fixed update time step.

2.1 Intercellular-volume computation

CA2D (Ghimire et al. 2013) used a ranking technique to compute the volume of water transferring from the central cell to the neighbourhood, called intercellular-volume. This technique worked by sorting the water levels of the cells in the neighbourhood (central cell included) in ascending order. The cells ranked lower than the central cell were recipients of an intercellular-volume from the central cell. The volumes of water transferring at various interfaces were computed on a lower-cell-fill-first basis. The cell with the lowest rank received water until it reached the same level of the second ranked cells; then these two cells received water until they reached the level of the third ranked cells, and so on until there was no water left for distribution in the central cell or all cells had the same water level.

This process had two drawbacks: 1) it was prone to water level oscillations between time steps, and 2) a sorting algorithm was executed for each cell. The sorting algorithm is a computationally intensive process to execute because it generally needs $m \log(m)$ steps and at worst m^2 steps, where m is the number of cells in the neighbourhood. Although the sorting algorithm had little computational cost when considering only a single cell with a limited number of neighbourhood cells, the algorithm was executed for each cell at every time step, which affects the total run-time of the model significantly. The previous version of CA2D used a non-dimensional flow relaxation parameter, θ , which was determined empirically, to reduce the oscillations that result in instability (Ghimire et al., 2013).

Initialise variables, cell mask and boundary conditions

- 1) Start time loop
 - a. Update simulation time: $t + \Delta t$
 - b. For each cell compute the volume of water to transfer, i.e., intercellular-volume
 - c. Update the water depth (intercellular-volume/rain/etc.) for the update step
 - d. If the simulation time reaches the next update timing $t + \Delta t_u$
 - i. Compute the velocity vectors
 - ii. Compute the next Δt in each cell for the update step Δt_u .
 - iii. Retrieve the minimum Δt for the whole computing domain
 - iv. Check water volume balance

Figure 1. The pseudo code of the WCA2D model

The new WCA2D model overcomes these two drawbacks by using a simplified weighting process which is composed of four steps: 1) identify the downstream neighbour cells; 2) compute the specific weight of each downstream cell based on the available storage volume; 3) compute the total amount of volume that will leave the central cell; and 4) for each downstream cell, set the eventual intercellular-volume which depends on the previously computed weight and total amount of volume transferred. When compared with CA2D, internal tests show that the new model has reduced oscillation, better accuracy and faster calculations (without using very small time step to ensure stable results).

In the first step of the model, a downstream cell is identified by using the water level differences between the central cell and the neighbour cells. A positive water level difference greater than a small tolerance τ indicates that the downstream cell will receive an outflow; a difference less than τ indicates that the cell will be ignored. The next step starts with finding the volume differences between the downstream cells and the central cell, i.e., each positive difference greater than τ in water level is multiplied by the area of the respective neighbour cell. During this step, the minimum, maximum, and the total volume differences are evaluated. In this work, the volume difference is also called the available storage volume, which is the space in a neighbour cell that is available to receive water from the central cell. This is identified by the following equations:

$$\Delta l_{0,i} = l_o - l_i \quad \forall i \in \{1 \dots m\}. \quad (1)$$

$$\Delta V_{0,i} = A_i \max\{\Delta l_{0,i}, 0\} \quad \forall i \in \{1 \dots m\}. \quad (2)$$

$$\Delta V_{min} = \min \left\{ \Delta V_{0,i} \mid \begin{matrix} \Delta l_{0,i} > \tau \\ i=1..m \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

$$\Delta V_{max} = \max \left\{ \Delta V_{0,i} \mid i=1..m \right\} \quad (4)$$

$$\Delta V_{tot} = \sum_{i=1}^m \Delta V_{0,i} \quad (5)$$

where m is the number of cells in the neighbourhood, i is the index of the neighbour cell analysed, l_0 (m) is the water level in the central cell, l_i (m) is the water level of the neighbour cell analysed, $\Delta l_{0,i}$ (m) is the difference in water level between the central cell and the neighbour cell analysed, A_i (m²) is the area of the i^{th} neighbour cell, $\Delta V_{0,i}$ (m³) is the available storage volume between the central cell and the i^{th} neighbour cell, ΔV_{min} (m³) is the minimum available storage volume of the downstream cells, ΔV_{max} (m³) is the maximum available storage volume of the downstream cells, and ΔV_{tot} (m³) is the total available storage volume. In all of these and the following equations, variables without a superscript are considered to be at time t .

The weight of the downstream cell i is given by the ratio between the available storage volume $\Delta V_{0,i}$ and the total available storage volume of all the downstream cells ΔV_{tot} . This weight represents the fraction of total intercellular-volume, i.e. the total volume to leave the central cell, which the neighbour cell will receive. As it is defined, the downstream cells could reach a higher water level than the central cell, which causes oscillations. To minimise oscillations, the central cell is considered to retain a fraction of the total intercellular-volume transferred. This is achieved by adding the minimum available storage volume to the total available storage volume, i.e., this minimum represents the weight of the central cell, for weight computing. Figure 2 shows an example of how the weights are computed. This step is described by the following equation:

$$w_i = \frac{\Delta V_{0,i}}{\Delta V_{tot} + \Delta V_{min}}, w_0 = \frac{\Delta V_{min}}{\Delta V_{tot} + \Delta V_{min}} \quad \forall i \in \{1 \dots m\}. \quad (6)$$

where, w_i is the weight of the i^{th} cell. The total intercellular-volume, i.e., the volume of water that leaves the central cell, differs from the total available storage volume and it is calculated by Eq. 11 which takes the minimal value between three different terms.

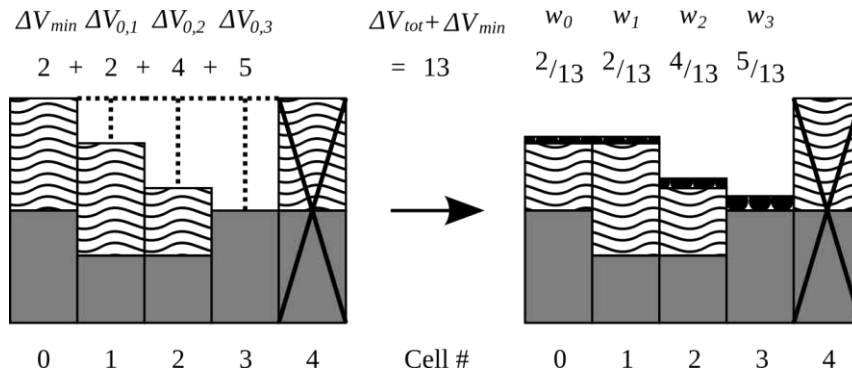


Figure 2. Example of intercellular-volume computation. The dark shading represents the ground level in a cell, the wave pattern represents the amount of water available in a cell. In the first term of Eq. 6, the total intercellular-volume is limited by the amount of water that exists in the central cell. In the second term of the equation, a physically based limitation is imposed on the total intercellular-volume by using the critical flow equation and the Manning's formula:

$$v_{crt} = \sqrt{gd} \quad (7)$$

$$v_{man} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

where g (m s^{-2}) is the gravitational acceleration, d (m) is the water depth in the cell, v_{crt} (m s^{-1}) is the critical flow velocity, n is the Manning's roughness coefficient ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$), R (m) is the hydraulic radius and S is the absolute value of the hydraulic gradient (-), v_{man} (ms^{-1}) is the cross-sectional average velocity.

Considering a typical square grid approach, the critical flow condition equation and the Manning's formula would be computed, on average, twice per central cell visited, with the outflow in each Cartesian direction. These equations are computationally expensive since they use the less efficient power and square root operations. By reducing the number of times Eqs. (7) and (8) are computed, the model performance can be significantly improved. The WCA2D uses, Eqs. (7) and (8) to calculate the maximum permissible intercellular velocity from the central cell into a neighbour cell, and thus the maximum intercellular-volume. The neighbour cell to receive this maximum volume of water is the cell with the largest weight. Therefore, the total intercellular-volume is limited by the value derived from the maximum individual intercellular-volume divided by the maximum weight. The intercellular-volume of the other downstream cells, i.e., with smaller weights, is limited by the ratio between their individual weights and the maximum weight. Thus, Eqs. (7) and (8) are computed only once per central cell visited using this weighting system.

In the third term of Eq. 11, the total intercellular volume to leave the central cell is limited by the minimum available storage volume ΔV_{min} plus the total intercellular-volume I_{tot} that left the cell at the time step t , which is determined during the previous time step iteration. The minimum volume ΔV_{min} is used to limit oscillations that may occur when a neighbour cell receives water from more than one cell, which results in the water level being higher than the central cell's in the next time step. The value I_{tot} is used to avoid large differences in the total amount of transferred volume between steps and it is computed using Eq. 11. The total intercellular-volume is computed using the following equations:

$$v_M = \min \left\{ \sqrt{d_0 g}, \frac{1}{n} d_0^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\Delta l_{0,M}}{\Delta x_{0,M}}} \right\} \quad (9)$$

$$I_M = v_M d_0 \Delta t \Delta e_M \quad (10)$$

$$I_{tot}^{t+\Delta t} = \min(d_0 A_0, I_M / w_M, \Delta V_{min} + I_{tot}) \quad (11)$$

where, M is the index of the neighbour cell with the largest weight, v_M (m/s) is the maximum permissible intercellular velocity from the central cell into the neighbour cell with the largest weight, $\Delta l_{0,M}$ (m) is the difference in water level between the central cell and the cell with the largest weight (this might not be the maximum difference in water level between all the downstream cells), $\Delta x_{0,M}$ (m) is the distance between the centre of the central cell and the centre of cell with the largest weight, d_0 (m) is the water depth in the central cell, I_M (m^3) is the maximum intercellular-volume achievable into the neighbour cell with the largest weight, Δt (s) is the time step, Δe_M (m) is the length of a cell edge with the largest weight, A_0 (m^2) is the area of the central cell, w_M is the maximum computed weight in the neighbourhood, and $I_{tot}^{t+\Delta t}$ (m^3) is the total intercellular-volume that will leave the central cell at time $t + \Delta t$.

The final step is to compute the intercellular-volume of each downstream cell, by multiplying the weight of the cell with the total volume of water transferred. This is achieved by the following equation, where $I_i^{t+\Delta t}$ (m^3) is the intercellular-volume of the i^{th} cell at time $t + \Delta t$:

$$I_i^{t+\Delta t} = w_i I_{tot}^{t+\Delta t} \quad \forall i \in \{1 \dots m\}. \quad (12)$$

2.2 Depth updating and total intercellular-volume computation

In the WCA2D model, the updating of the water depth is achieved by simply subtracting the intercellular-volume of the neighbour cells from the water depth of the previous time step. Given that the total intercellular-volume from a cell is limited by the amount of water available in the cell itself as in the first term of Eq. (11), the total mass within the computing domain is always conserved between time steps. Furthermore, the water depth of the next time step is updated with any lateral inflow or outflow (e.g., rainfall and infiltration). The following equation is used to update the water depth:

$$d_o^{t+\Delta t} = d_o^t - \frac{\sum_{i=1}^m I_i^{t+\Delta t}}{A_0} + \frac{\Delta V_0^{in}}{A_0} - \frac{\Delta V_0^{out}}{A_0} \quad (13)$$

where m is the number of cells in the neighbourhood, $I_i^{t+\Delta t}$ (m^3) is the intercellular-volume of the i^{th} cell, A_0 (m^2) is the area of the central cell, ΔV_0^{in} is a lateral input volume of water into the central cell (e.g., precipitation, inflow from upstream catchments, or backflow from downstream boundaries), ΔV_0^{out} is an eventual output volume of water from the central cell (for example from infiltration or lateral outflow), d_o^t (m) is the water depth of the central cell at time t , $d_o^{t+\Delta t}$ (m) is the updated water depth of the central cell at the new simulation time.

2.3 Velocity and time step calculation

As shown in the main algorithm of Figure 1, the velocity and the time step are computed only every update step Δt_u . However, they are considered instant values since they are calculated using the information from the last iteration at time t . The velocity is calculated using the intercellular velocity of the time $t + \Delta t$ which is computed using the following equation:

$$v_i^{t+\Delta t} = \frac{I_i^{t+\Delta t}}{d_{0,i}^{t+\Delta t} \Delta e_i \Delta t} \quad \forall i \in \{1 \dots m\}. \quad (14)$$

where $I_i^{t+\Delta t}$ (m^3) is the intercellular-volume transferred to the i^{th} cell at the new simulation time, Δe_i (m) is the length of the i^{th} cell edge, $d_{0,i}^{t+\Delta t}$ (m) is the arithmetic average between the water depth of the central cell and i^{th} cell at the new simulation time, Δt (s) is the time step.

The velocity vector in polar coordinates (magnitude and angle) at the new simulation time is computed using the following equations:

$$a = \sum_{i=1}^m v_i^{t+\Delta t} \cos \phi_i, \quad b = \sum_{i=1}^m v_i^{t+\Delta t} \sin \phi_i \quad (15)$$

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t} = (r, \theta) = \left(\sqrt{a^2 + b^2}, \tan^{-1} \frac{b}{a} \right) \quad (16)$$

where, m is the number of cells in the neighbourhood, $v_i^{t+\Delta t}$ (m/s) is the intercellular velocity between the central cell and the i^{th} cell, ϕ_i is the angle between the centroid of the central cell and the centroid of the i^{th} cell, a and b are the components of the velocity polar vector, \mathbf{v} is the velocity polar vector, r is the magnitude of the vector and θ is the polar angle.

Once the velocity is determined, as in the pseudo-code of the main algorithm shown in Figure 1, the adaptive time step Δt is changed for the computing iterations for the next update step Δt_u , instead of after each iteration (as in the previous version of CA2D). Given that the WCA2D is a diffusive-like model, the time step Δt is calculated by computing on each cell of the grid the adaptive time step using the formula provided by Hunter et al. (2005):

$$\Delta t = \frac{\Delta x^2}{4} \min\left(\frac{2n}{R^{5/3}} S^{1/2}\right), S > \sigma \quad (17)$$

The time step provided by this formula has shown stable results for diffusive-like problems; however it implies that the time-step reduces quadratically when the cell size decreases. Furthermore, as observed by Hunter et al. (2005), when the slope between two cells tends to be zero, the time step is driven to zero. The analytical solution case study, section 4.1, and empirical tests performed show that the WCA2D is less sensitive to the size of time step than a simple diffusive-like model that uses the Manning's formula to compute the intercellular-volume in each direction. Thus, if the free surface slope between two cells is less than a slope tolerance σ , the constraint in Eq. (17) does not apply.

The use of an update step Δt_u in the WCA2D model has improved the performance not only because the heavy computation of the polar velocity is performed less frequently, but also because the update of the time step is kept to a minimum. This reduced update of time step has a large performance advantage when the computation is executed on the GPU of a graphics card. When Eq. (17) is calculated in every cell of the grid, then the minimum Δt needs to be retrieved and broadcasted to the global domain, which leads to a bottleneck in the parallel performance of the GPU computation since it is an inherently sequential process. Thus the use of the update step minimises this performance bottleneck.

2.4 Implementation

The WCA2D model has been implemented using the CADDIES Application Programming Interface (API) framework (Guidolin et al., 2012) that defines a set of methods, data structures and variables to be used as the standard for developing parallel CA algorithms. The main idea of the CADDIES API is that a developer needs to write the code of the CA model only once. After that, the CADDIES API gives the flexibility to produce the same CA model for any type of CA grid, square/hexagonal/triangular grid, and to use different high performance acceleration techniques without changing the code or with minimum effort.

The WCA2D model has been designed to work on grids with different cells and neighbourhood types. However, in this work, the model was implemented using only a square cell grid with a von-Neumann neighbourhood. Furthermore, thanks to the CADDIES API, the WCA2D can be executed on a multi-core CPU only using OpenMP library (Dagum and Menon, 1998) and in both multi-core CPU and graphics card GPU using the OpenCL library (Munshi et al, 2011). The implementation of the WCA2D model used in this paper, called CADDIES-caflood, are publicly available using an open source license in the website of the Centre for Water Systems at: <http://cws.exeter.ac.uk>.

3 Test cases

The model developed in this work has been applied to four different case studies: the analytical solution proposed by Hunter et al. (2005), and three test cases from the EA benchmarking tests for 2D flood modelling (Néelz and Pender, 2013). The WCA2D results of the EA benchmarking test cases were directly compared to the results obtained by using the commercial software InfoWorks ICM 3.0 (referred to as IW in later text for simplification; Innovyze, 2012). The IW software is widely used in the water industry in the UK, as well as being one of the 2D hydraulic models used in the EA benchmarking exercise (Néelz and Pender, 2013). InfoWorks utilises a finite volume numerical scheme to solve the full SWEs. Given that IW software is widely used and that it was designed to achieve fast computations using the latest GPU technology, it was considered a good benchmark to test the accuracy and performance of the new model. However, unlike the WCA2D, the IW software uses an irregular triangular mesh grid and computes the inertial term of the SWEs. Thus, some discrepancies between the results of the IW and the WCA2D were expected.

All these simulations were performed on a high-performance desktop machine with an Intel Core i7-4770K CPU having four physical cores at 3.50GHz, 32GB of main memory and a Tesla K20c graphics card with 2496 CUDA cores and 5GB of video memory

3.1 Analytical solution

To rigorously analyse the performance of an inundation model, Hunter et al. (2005) adopted a one-dimensional analytical solution where the full Saint-Venant equations can be simplified enough to produce an ordinary non-linear differential equation. This can be solved analytically at any point in space x and in time t over a horizontal plane:

$$d_{x,t} = \left[\frac{7}{3} (C - n^2 u^2 (x - ut)) \right]^{3/7} \quad (18)$$

where d (m) is the water depth, u (ms^{-1}) is the component of the depth-averaged velocity in the x direction, C is a constant of integration, which can be determined by referring to the initial condition of the problem.

Eq. (18) has been used extensively in the literature (Hunter et al, 2005; Bates et al., 2010; Dottori and Todini, 2011) to test the ability of different models to simulate correctly wave-propagation in absence of a bed slope term. In this test case, the parameters in Eq. (18) were $u = 1(\text{ms}^{-1})$ and $n = 0.03 (\text{m}^{-1/3}\text{s})$ for a total duration of 60 minutes.

3.2 Environment Agency benchmark test cases

The EA 2D benchmarking test cases have been applied to a number of 2D hydraulic models to test the models' capability and performance for simulating different hydraulic conditions. The detailed information about these test cases and the results obtained by various models analysed have been published in order to create a point of reference for evaluating various models (Néelz and Pender, 2013). The benchmarking test cases vary in complexity and nature, from the flooding of a simple disconnected water body to a dam break scenario. In this work, three test cases chosen are: Test 2 (EAT2), filling of floodplain depressions, Test 4 (EAT4), flood propagation over an extended floodplain, and Test 8a (EAT8a) runoff

produced by rainfall and a point source in a small urban area. The first two tests were chosen because they were designed to test the ability of a model to solve a specific type of problem. While being of a small spatial scale, EAT8a was chosen because it represents a typical urban flood scenario that the WCA2D model was designed to solve at larger spatial scale. All the other test cases are either more complex, i.e., where multiple problem types need to be solved, or the WCA2D model was not designed to solve. For example, Test 3 requires momentum conservation over a small obstruction.

3.3 Evaluation metric

For the test cases, the comparison between the base raster grid (converted from the IW results) and the tested raster grid (WCA2D results) is based on the Root Mean Square Error (RMSE). The metric has been selected from a wide range of measures, as suggested by Bennett et al. (2013).

4 Results and discussions

4.1 Analytical solution

Figure 2 (a) shows the analytical solution compared to the results obtained by the WCA2D model using two different grid resolutions, $\Delta x = 25\text{m}$ and $\Delta x = 10\text{m}$, where Eq. (17) was used to compute the time step Δt and the update step Δt_u was equal to 60s. Figure 2 (b) shows the enlarged-scale fronts of the results obtained by the WCA2D model, with $\Delta x = 10\text{m}$, when the update step Δt_u has different values, from 0.5s to 60s. Table 1 summarises the RMSE, the minimum time step Δt for all the results and the run-times obtained by the WCA2D model when executed on a GPU.

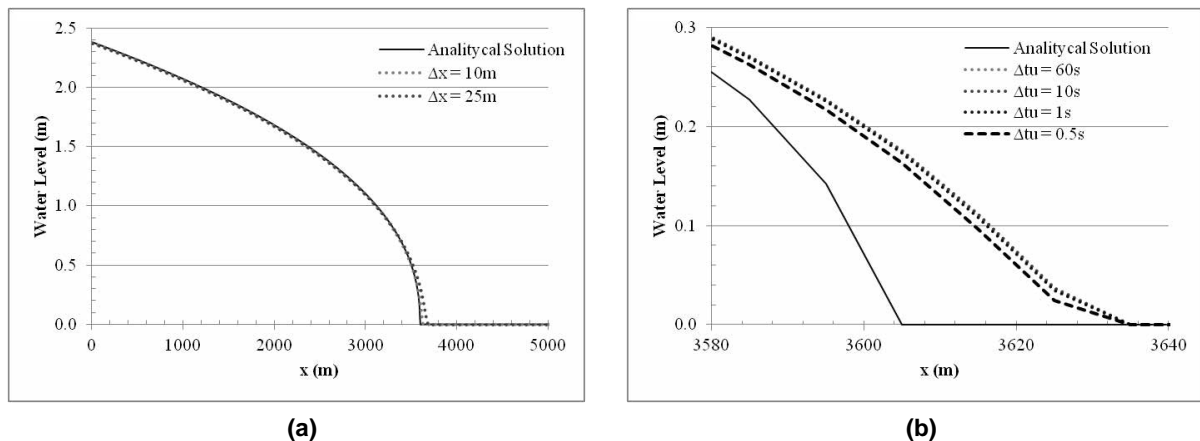


Figure 2. Comparison between analytical solution and the WCA2D model at $t=3600\text{s}$ for : (a) different grid resolutions; (b) different update step values at $\Delta x = 10\text{m}$.

As expected, the WCA2D is sensitive to the grid resolution as shown in Figure 2 (a) and Table 1. These results are equivalent to the results obtained by Bates et al. (2010) using the diffusive version of the LISFLOOD-FP. Figure 2 (b) and Table 1 show that the differences in the results are minimal for different values of the update step Δt_u . When Δt_u is greater than 1s, the differences are too small to be visible in Figure 2 (b). Thus the WCA2D model is

insensitive to the value of the update step chosen in this test case. However, Table 1 shows that this parameter has an impact on the run time of the model; the execution with $\Delta t_u = 60$ s is over 10% faster than the one with $\Delta t_u = 0.5$ s. The increase in run-time with would be even greater if the time step was updated after every iteration of the main loop.

Table 1. RMSE values and minimum time step of the WCA2D at different grid resolutions and update time step values.

Δx (m)	Δt_u	RMSE (m)	Min Δt (s)	Run time (s)
25	60	0.0313	0.038	3.99
10	60	0.0139	0.006	30.05
10	10	0.0141	0.006	30.59
10	1	0.0140	0.006	32.41
10	0.5	0.0136	0.006	34.47

The use of large values of the update step, Eq. (17) produces a time step Δt that is optimal for the first iteration after the update, but this Δt should become less optimal toward the later iterations. However, empirical experiments performed on the other test cases also show the solutions are insensitive to the update step if its value is maintained across different problems. To test the impact of using sub-optimal time step, the results of different versions of the WCA2D model using large fixed time step Δt , with $\Delta x = 10$ m, are compared with the analytical solution. The fixed Δt values used are 0.018s and 0.024s, which are respectively three and four times the minimum step as shown in Table 1.

The various versions of the WCA2D model tested differ on the operations used to compute the intercellular-volume step and they are: 1) the full WCA2D model; 2) the WCA2D model where the total volume to transfer from a cell is computed considering only the total amount of water available and the maximum flux calculated using Eq. (10), i.e., when the third term of the minimisation of Eq. (11) is removed; and 3) a simple diffusive-like model that uses the Manning’s formula to compute the intercellular-volume in each direction, similar to how the diffusive version of LISFLOOD-FP works.

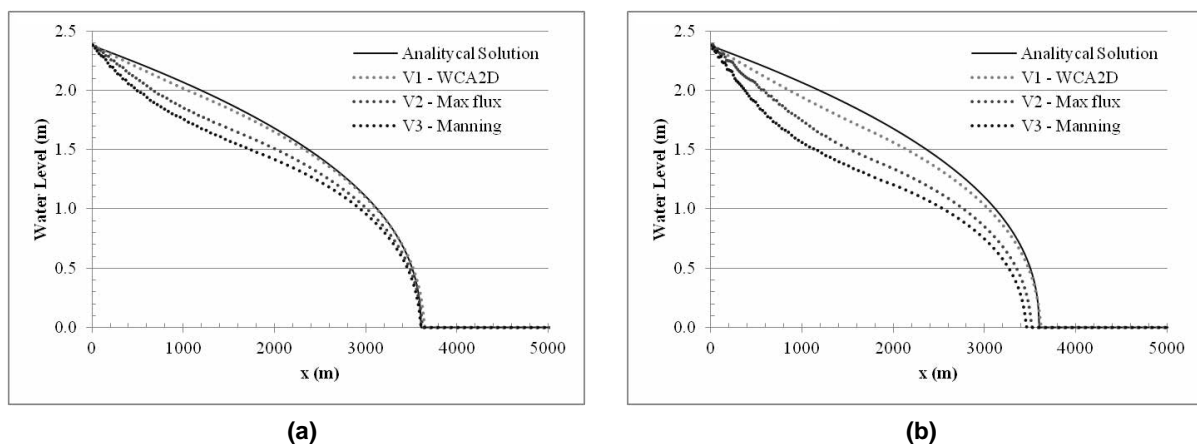


Figure 3. Comparison between analytical solution and various versions of the WCA2D at $t=3600$ s with $\Delta x = 10$ m using: (a) a fixed Δt of 0.018s; (b) a fixed Δt of 0.024s.

Figure 3 (a) and (b) show the results of the various versions at $\Delta t = 0.018s$ and $0.024s$, respectively. The version that uses the Manning's formula to compute the intercellular-volume largely under-predicts the flood wave volume and, in the case of the larger time step, under-predicts also the front location. The second version, which uses the weighted system and the maximum flux to compute the intercellular-volume, is shown to reduce the under-prediction; however, this is still significant. Figure 3 shows that the full WCA2D model under-predicted the flow wave volume, but only marginally, while using a time step that is three times larger than the minimum one given by Eq. (17). Furthermore, the WCA2D predicts the right front location also when the time step is four times larger. Figure 3 (b) shows also that with the larger time step there are no oscillations in the water level predicted by the WCA2D model, while the other two versions produced some small oscillations.

The weighting system of Eq. (6) was implemented in the WCA2D model to reduce the number of computational expensive operations performed, such as power and square root. Figure 3 shows that this weighting system has also the advantage of lower model sensitivity to the size of the time step in comparison to a diffusive model that uses Manning's formula to compute the intercellular-volume in each direction. Figure 3 also shows that by using the minimum positive transferrable volume ΔV_{min} plus the total intercellular-volume I_{tot} (that left the cell during the previous step) to compute the total volume to leave the central cell further lowers the sensitivity of the WCA2D to the size of the time step.

4.2 Environment Agency benchmark cases

Table 2 shows the parameters (Δt_u , σ) of various simulations used to solve the EA Benchmarks test cases. An important configuration step is to decide the value of slope tolerance σ for each test case. This value has a large impact on the final result and on the computation time of a simulation, since it influences the time step used during the simulation. In order to analyse this impact, for all these test cases, two values of σ are used that produce two types of results: 1) fine precision, but high run time, and 2) coarse precision, but fast run time. These values are evaluated empirically, but the coarse precision ones are determined as an order of magnitude lower than the average terrain slope of each case. The EAT4 test case is an exception of this rule due to the terrain being a horizontal plane.

Table 2. Information about the WCA2D simulations of the EA Benchmarks test cases

Parameters/ Test Case	EAT2		EAT4		EAT8a	
	# of data cells	10,000		80,000		97,000
Duration	48 hours		5 hours		5 hours	
Average slope	0.22%		0%		5.28%	
Update time step Δt_u	60 s		60 s		60 s	
Type of σ	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse
Value of σ	0.004%	0.022%	0.001%	0.01%	0.1%	0.528%
Mean time step Δt	1.28s	5.17s	0.036s	0.057s	0.043s	0.138s

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Figure 4 shows the DEM map with the output point locations for the three EA benchmarks test cases: (a) the map for the EAT2 problem with the upstream boundary condition (red line) and the ground elevation contour lines at every 0.05m; (b) the map for the EAT4 problem with the location of the inflow and the possible 10cm and 20cm contour lines at 1h (dashed) and 3h (solid); (c) the map for the EAT8a problem with the location of the inflow and purple lines for the outline of road and pavements (Néelz and Pender, 2013).

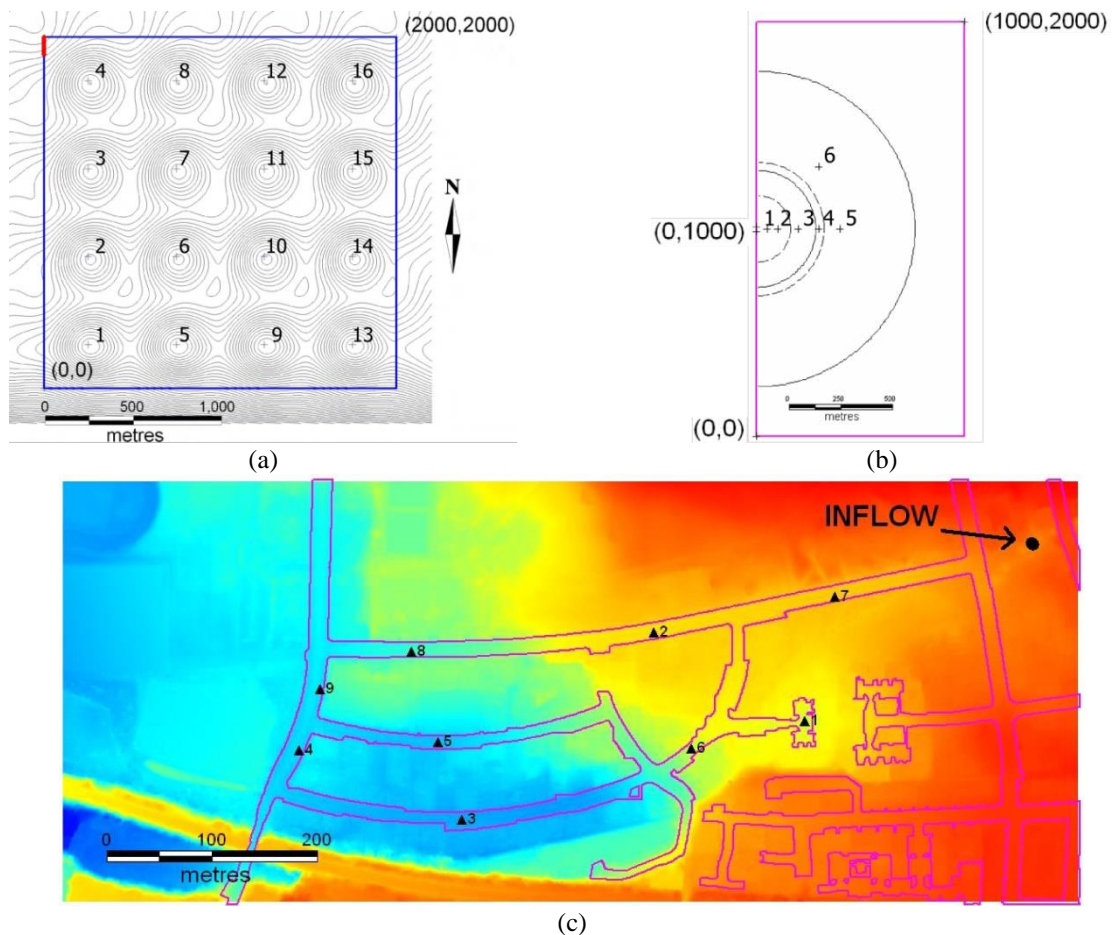


Figure 4. The DEM map of the EAT2 (a), EAT4 (b) and EAT8a (c) problems; figures taken from (Néelz and Pender, 2013)

The EAT2 test consists of a gently sloping squared area with a 4x4 matrix of $\sim 0.5\text{m}$ deep depressions. There is an inflow from the north-west corner which produces a low momentum flow. A constant Manning roughness $0.03 \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ was applied to the whole area and the DEM resolution is 20 meters. The original problem specifies 16 output points at the centre of the depressions.

Figure 5 shows the comparison of the water levels versus time at points 4, 7, 12, 10, 1, and 5, see Figure 4 (a); these are ordered by distance from the inflow source. The points on the left-hand side of the domain, 13-16, are not shown since they stayed dry for both models. There is a good agreement between the results of the WCA2D with slope tolerance $\sigma = 0.004\%$ and the IW, mainly in the shape of the hydrographs and in the maximum inundation values. Some discrepancies exist between the two models, mainly in terms of the arrival time

of the front at the location points far from the inflow source (1, 5 and 10) and in the maximum inundation value at point 5. The results of the WCA2D with the larger slope tolerance $\sigma = 0.022\%$ are still in good agreement with the IW. However, increasing the slope tolerance decreased the average time step and produced hydrographs with a slightly delayed arrival of the front at the points far from the inflow source. The maximum inundation values are similar to the ones found by the WCA2D using the smaller time steps; apart from the point 4 where the larger time step produced an imperceptible higher peak.

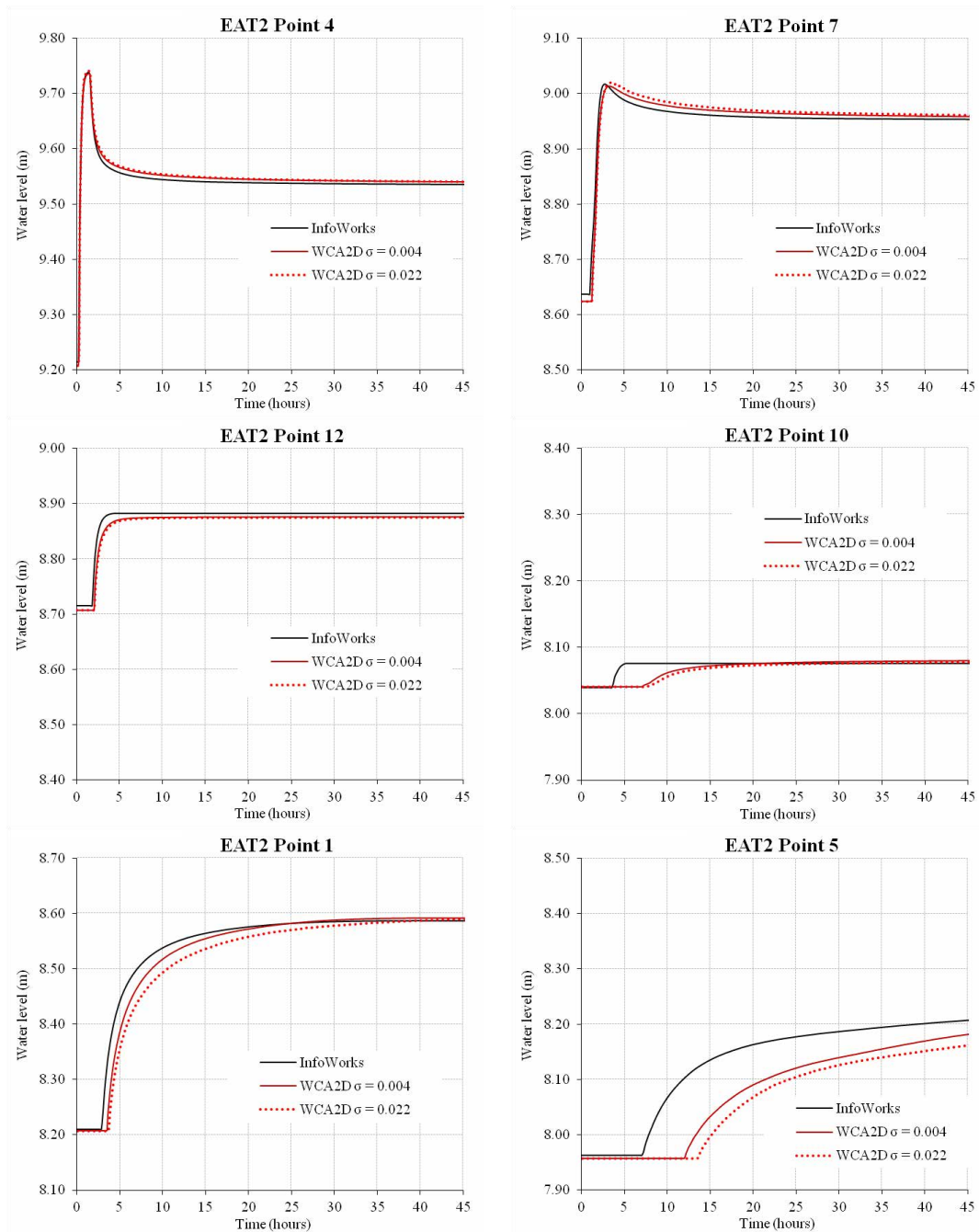


Figure 5. Temporal variation of water level for EAT2 at point 4, 7 (1st row), 12, 10 (2nd row), 1 and 5 (3th row); comparison between the WCA2D and the IW models

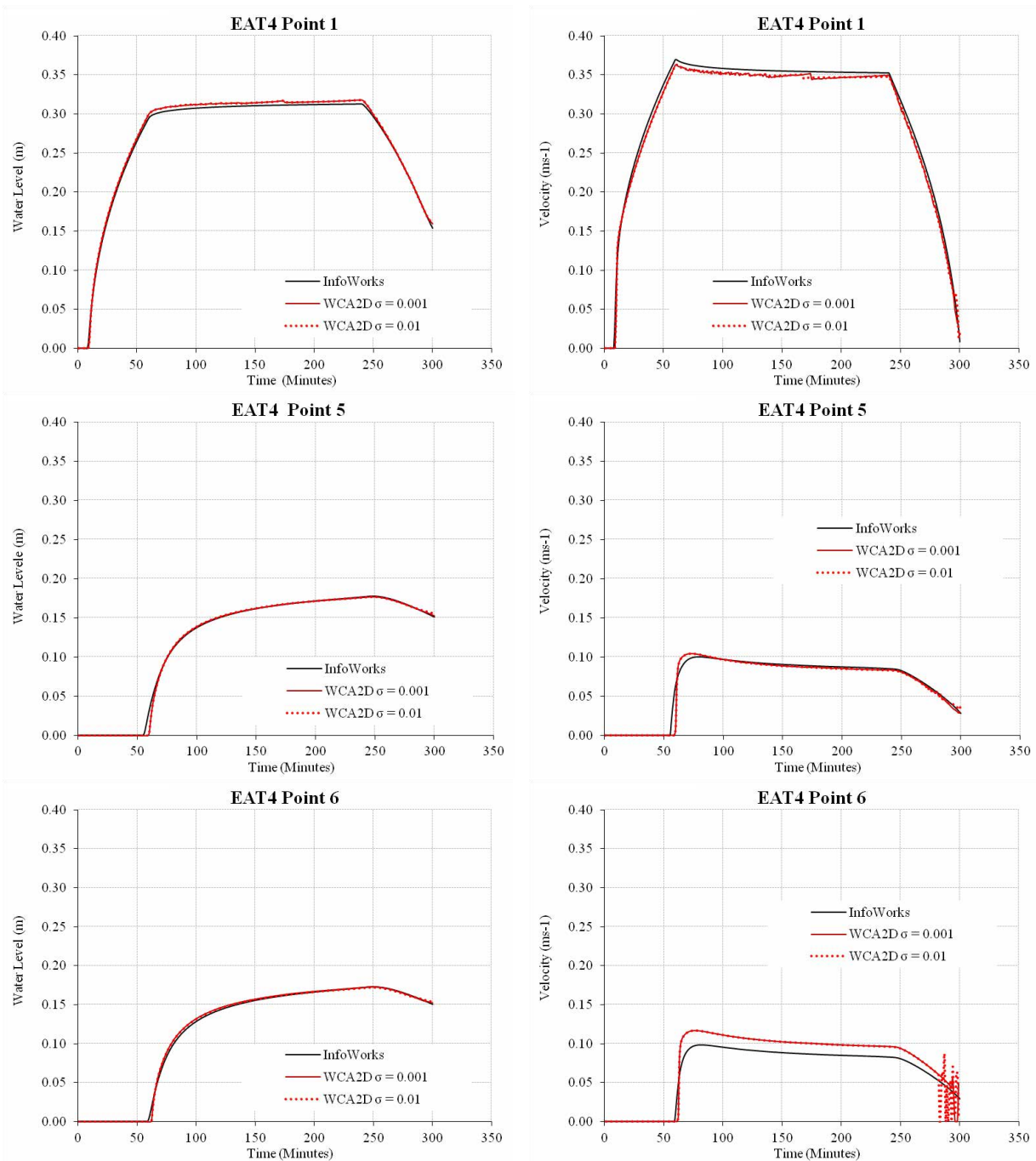


Figure 6. Temporal variation of water level (left column) and velocity (right column) for EAT4 at point 1 (1st row), 5 (2nd row) and 6 (3th row)

The EAT4 test consists of a flat floodplain and it is intended to test a case when a flood wave occurs following an embankment defence failure by breaching or overtopping. The boundary condition consists of an inflow from the central west border. A constant Manning roughness of $0.05 \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ was applied to the whole area and the DEM resolution is 5m. The original problem specifies 6 output points. Figure 6 shows the water levels versus time (left column) and velocity versus time (right column) at points 1, 5, and 6, see Figure 6 (b). The results

obtained by the WCA2D model with both values of slope tolerance are in good agreement with the IW results. However, there is a small discrepancy in water level compared with the IW results during the drying phase. The problem during the drying phase of the WCA2D model is more noticeable on the velocity plots where there are some small oscillations at points 1 and 5 and large oscillations at point 6. The problem during the drying phase is caused by the lack of momentum terms in the WCA2D and by the use of a non-optimal time step during this phase, i.e., it being too large. The points 5 and 6 in Figure 6 are at the same distance from the inflow location, thus the resulting hydrographs should be the same in Figure 6. The WCA2D model shows a small difference in the water levels between these two points (in the order of millimetres). This difference is more visible in the velocity plots. Thus, in the WCA2D model, there is a small asymmetry in the spread of the flow, which is due to the way that the intercellular-volume transfer is decoupled directionally.

The EAT8a test consists of an approximately 0.4 km by 0.96 km urban area in Glasgow, UK. The boundary conditions involve two sources, a uniformly distributed rainfall event and an inflow from a point source (sewer overflow) in the top left corner of Figure 4c; the catchment is 100% impervious. The DEM resolution was 2m and two Manning's roughness values were used: 0.02 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$) for road and pavement, 0.05 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$) elsewhere. The original problem specifies 9 output points. Figure 7 shows the water level (left column) and velocity hydrographs (right column) in the ponding area of point 1 and in the fast flow areas of points 2 and 6 located in the road, see Figure 6 (c). The water level results obtained by the WCA2D model with slope tolerance $\sigma = 0.1\%$ are in good agreement with the IW. In the fast flow areas of point 2 and 6, the WCA2D predicted a faster flood wave than the IW; this is more visible in the temporal plots of the velocity. Some very small oscillations are observed in the velocity predicted by the WCA2D in point 1. When a larger slope tolerance is used in the WCA2D, $\sigma = 0.528\%$, there are some small visible differences in the water level results; mainly at point 1 where the level was overpredicted after the peaks. In the case of the predicted velocities, the use of larger time steps caused some small extra oscillations during the drying phase as shown at point 2

In the case of the EAT8a, the run-times obtained by the WCA2D were slightly shorter than those obtained by the IW when the simulation was executed using a small tolerance value. When the WCA2D was executed using a large tolerance value the run times were significantly faster than the IW, over 4 times in the case of GPU execution. This test case represented a good indicator of the possible computational performance of the WCA2D model in a typical urban flood scenario even when the case study size is small.

Table 3 shows the run times for the three EA benchmark simulations for the two models on both MC and GPU executions. When compared to the IW, the WCA2D run times were shorter for the EAT2 benchmark (for both MC and GPU executions) and also when the fine tolerance was used. In the case of the EAT4, the computational performance obtained by the WCA2D was comparable to the IW when the GPU a large tolerance value were used; the MC performance of WCA2D was not as good as in the first test case due to the particular characteristics of the EAT4 problem, i.e., the entirely flat terrain and a fast moving front. The WCA2D is a diffusive-like model which ignores any inertia terms and momentum conservation. Thus it needs to use very small time steps to move enough water between cells through the flat plane to reproduce the front. This increase in the number of steps had a large impact on the computational performance of the model.

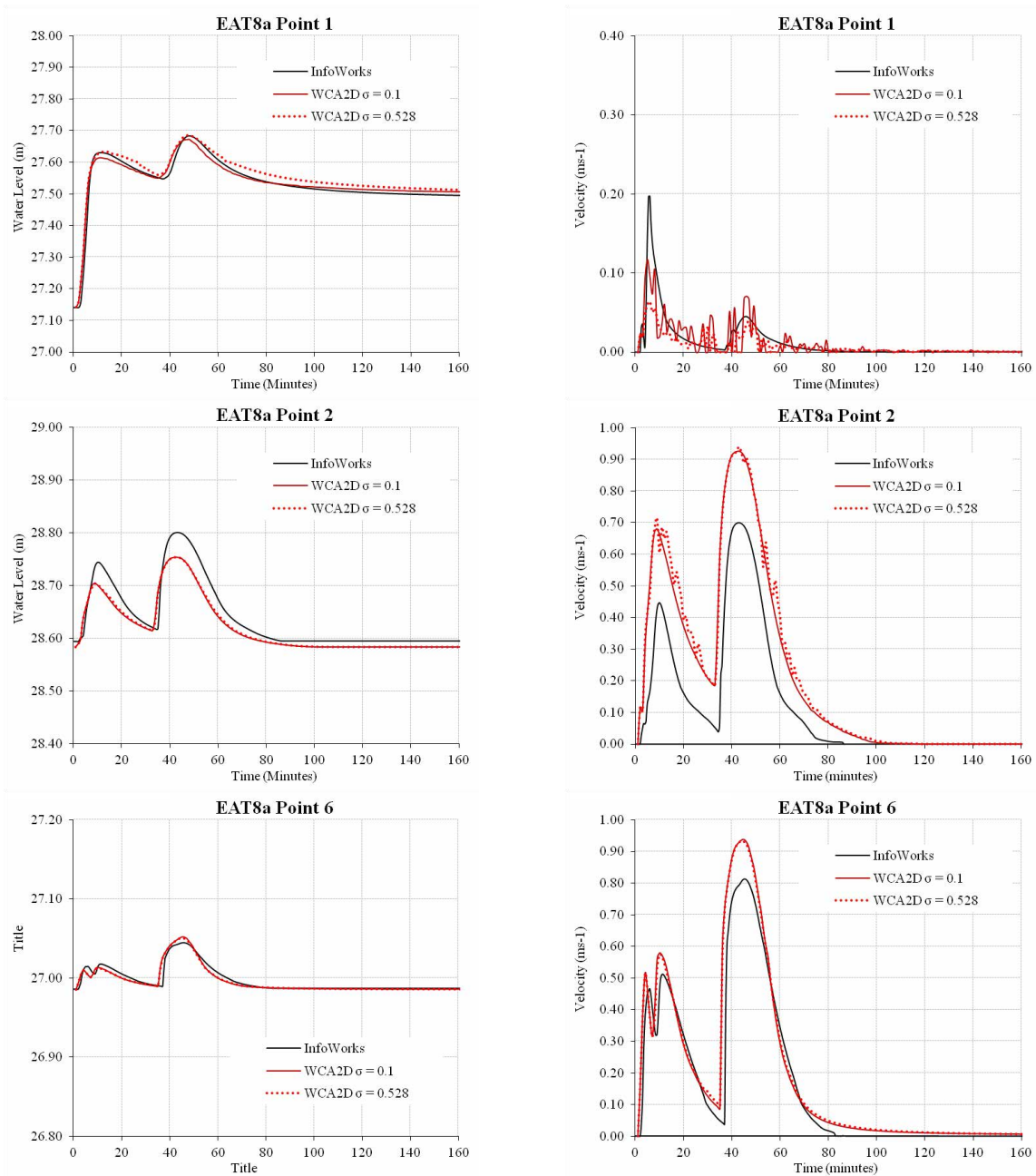


Figure 7. Temporal variation of water level (left column) and velocity (right column) for EAT8a at point 1 (1st row), 3 (2nd row), 2 (3th row) and 6 (4th row)

In the case of the EAT8a, the run-times obtained by the WCA2D were slightly shorter than those obtained by the IW when the simulation was executed using a small tolerance value. When the WCA2D was executed using a large tolerance value the run times were significantly faster than the IW, over 4 times in the case of GPU execution. This test case represented a good indicator of the possible computational performance of the WCA2D model in a typical urban flood scenario even when the case study size is small.

Table 3. Comparisons of the WCA2D run time for the EA test cases versus IW run time.

	Run Time (seconds)					
	EAT2		EAT4		EAT8a	
Computation type	MC	GPU	MC	GPU	MC	GPU
WCA2D Fine σ	15.3	4.7	590.1	38.0	390.4	37.4
WCA2D Coarse σ	4.5	2.2	312.3	23.8	124.2	12.5
IW	20.1	9.3	260.9	22.4	448.4	58.8

The previous test cases show that by using a large tolerance value σ , i.e., a large time step during the simulations, it is possible to achieve faster run times than the IW while experiencing only minor loss in the accuracy of the predicted water levels and velocities. The WCA2D model predicted slightly delayed front of the flood wave with no oscillations on the water level, but it exhibited small oscillations in the velocity during the drying phase.

5 Conclusions

This paper presents a new CADDIES 2D flood model WCA2D based on cellular automata that minimises the use of complex and time consuming equations in order to achieve fast computational performance without a significant sacrifice of accuracy. The new model was compared to an analytical solution and it has been applied to three test cases from the 2D benchmarking tests for 2D flood modelling proposed by the EA.

The comparison with the analytical solution shows that the WCA2D model produces accurate results which are in line with the ones obtained by other diffusive-like model like LISFLOOD-FP (Hunter et al., 2005). Furthermore, it shows that, thanks to the new weight system employed, the WCA2D model is less sensitive to the size of the time step in comparison to a diffusive-like model that uses the Manning's formula to compute the intercellular-volume in each Cartesian direction.

Numerical results obtained for the three 2D benchmarking test cases and for the real world case study were compared with those of a physically based model IW, which is an industry standard for 2D flood modelling, which computes the full SWEs on an irregular triangular mesh grid. The water level hydrographs obtained at various points for the three EA test cases show results consistent with the IW model. In the case of the temporal variation of the velocity, the WCA2D shows some small oscillation when the time step used is large. In the real-world case of Torquay, the depths at various points in time and the maximum inundation depths show a satisfactory agreement between the WCA2D and IW results. The comparison of the inundation extent predicted by the two models show that WCA2D model identify as flooded from between 70% and 90% of the area identified as flooded by IW; with the main differences arising on the sides of the flood channels. Furthermore, the numerical results show a very good agreement between WCA2D and IW in the case of the temporal variation of water level at various points of interest. Only the maximum velocity results predicted by WCA2D are less in agreement with the results predicted by IW.

The WCA2D run-times were compared to those obtained by IW. In the EAT4 case, due to the characteristics of the problem with a flat free surface gradient terrain and a fast moving

front, the run-times obtained by WCA2D using the multi core processor and a graphics card were slightly slower than the ones obtained by IW. The WCA2D model obtained shorter run-times in the EAT2 case and in the case of the urban flood modelling scenario of the EAT8a case.

This work showed that, while still in active development, the WCA2D model could be used to perform 2D flood simulations at a large scale due to its high computational performance and low memory requirement with a minimal compromise in accuracy.

The next fundamental step in the development of the WCA2D is to implement an inertial like effect. This model considers only the water surface slope and ignores any momentum of the flow; thus it suffer the same problem of other diffusive wave system models where the time step reduced quadratically with the decrease in distance between two adjacent cells. By adding an inertial like effect, the time step could be reducing linearly with the decrease of spatial resolution of the terrain modelled as showed by Bates et al. (2010) in LISFLOOD-FP. This would reduce significantly the run-times of the model at higher resolutions. One important research objective will be to transfer into an inertial like model, the advantages obtained by the WCA2D model, i.e., reduced sensitivity to the size of the time step, reduced use of computational intensive operations and the ability to highly parallelise the computation.

Further development steps could be to implement the model using different neighbourhood and cell types (hexagonal, triangular) to identify the grid characteristics that offer the best performance and accuracy and to implement a Building Coverage Ratio (BCR) technique (Chen et al., 2012) or a depth-area / depth-volume relationship technique (Vojinovic et al., 2013), which would allow to address urban features or high resolution features in a coarse grid resolution DEM.

Finally, the 2D model presented here for overland flood modelling will be integrated with the CADDIES 1D model for sewer network modelling developed by Austin et al. (2014), to produce a fast simplified dual-drainage model for urban flood modelling.

Aknowledgements

The authors would like to acknowledge the funding provided by the UK Engineering and Physical Sciences Research Council, grant EP/H015736/1 (Simplified Dual-Drainage Modelling for Flood Risk Assessment in Urban Areas). The authors would also like to thank the UK Environment Agency for the EA benchmarks datasets and the Torquay Council for the LIDAR datasets. Furthermore, the authors would like to thank Mike Gibson for the help given during the development of the OpenMP implementation of the CADDIES CA API and for the helpful comments about this document. Finally, the authors would like to acknowledge the support of NVIDIA Corporation with the donation of the Tesla K20c GPU used in this research and the support of Innovyze for the license of the InfoWorks ICM 3.0 software.

References

1. Austin, R., Chen, A.S., Savic, D.A., Djordjevic, S., 2013. Fast Simulation of Sewer Flow using Cellular Automata. NOVATECH 2013.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

2. Austin, R., Chen, A.S., Savić, D.A. and Djordjević, S. 2014. Quick and Accurate Cellular Automata Sewer Simulator. *Journal of Hydroinformatics* 16 (6): 1359. doi:10.2166/hydro.2014.070.
3. Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J., 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *J. Hydrol.* 387, 33–45. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.027
4. Bennett, N.D., Croke, B.F., Guariso, G., Guillaume, J.H., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T., Norton, J.P., Perrin, C., others, 2013. Characterising performance of environmental models. *Environ. Model. Softw.* 40, 1–20.
5. Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Waller, S.G., Bates, P.D., 2004. Two dimensional diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation. *Int. J. River Basin Manag.* 2, 211–223.
6. CADDIES. 2015. Cellular Automata Dual-Drainage Simulation [WWW Document], URL <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/resources/caddies-framework/> (accessed 01.03.15).
7. Chen, A.S., Djordjević, S., Leandro, J., Savić, D.A., 2007. The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks, in: NOVATECH 2007. Lyon, France, pp. 465–472.
8. Chen, A.S., Evans, B., Djordjević, S., Savić, D.A., 2012. A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *J. Hydrol.* 426–427, 1–16. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.007
9. Coulthard, T.J., Hicks, D.M., Van De Wiel, M.J., 2007. Cellular modelling of river catchments and reaches: Advantages, limitations and prospects. *Geomorphology* 90, 192–207. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.030
10. Dagum, L., Menon, R., 1998. OpenMP: an industry standard API for shared-memory programming. *Comput. Sci. Eng. IEEE* 5, 46–55.
11. DHI software, 2014. MIKE FLOOD [WWW Document]. URL <http://www.mikebydhi.com/products/mike-flood> (accessed 10.23.14).
12. Dottori, F., Todini, E., 2010. A 2D flood inundation model based on cellular automata approach, in: Proc. XVIII International Conference on Water Resources. In Carrera J (ed) Barcellona.
13. Dottori, F., Todini, E., 2011. Developments of a flood inundation model based on the cellular automata approach: Testing different methods to improve model performance. *Phys. Chem. Earth Parts ABC* 36, 266–280.
14. GDAL, 2013. Geospatial Data Abstraction Library [WWW Document]. URL <http://www.gdal.org/> (accessed 12.18.13).
15. Ghimire, B., Chen, A.S., Guidolin, M., Keedwell, E.C., Djordjević, S., Savić, D.A., 2013. Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *J. Hydroinformatics* 15, 676. doi:10.2166/hydro.2012.245
16. Glenis, V., McGough, A.S., Kutija, V., Kilsby, C., Woodman, S., 2013. Flood modelling for cities using Cloud computing. *J. Cloud Comput.* 2, 1–14. doi:10.1186/2192-113X-2-7
17. Guidolin, M., Duncan, A., Ghimire, B., Gibson, M., Keedwell, E., Chen, A.S., Djordjevic, S., Savić, D., 2012. CADDIES: A New Framework for Rapid Development of Parallel Cellular Automata Algorithms for Flood Simulation. Presented at the 10th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2012), IWA (International Water Association), Hamburg, Germany.
18. Halcrow Group Ltd. 2014. ISIS FAST [WWW Document], URL <http://www.isisuser.com/isis/isisfast.asp> (accessed 10.21.14).
19. Hénonin, J., Ma, H., Yang, Z.-Y., Hartnack, J., Havnø, K., Gourbesville, P., Mark, O., 2013. Citywide multi-grid urban flood modelling: the July 2012 flood in Beijing. *Urban Water J.* 1–15. doi:10.1080/1573062X.2013.851710

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

20. Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S., Wilson, M.D., 2007. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology* 90, 208–225. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.021
21. Hunter, N.M., Horritt, M.S., Bates, P.D., Wilson, M.D., Werner, M.G.F., 2005. An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Adv. Water Resour.* 28, 975–991. doi:10.1016/j.advwatres.2005.03.007
22. Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S., Wilson, M.D., 2007. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology* 90, 208–225. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.021
23. Innovyze, 2012. InfoWorks ICM Help v3.0.
24. Yen, B.C., Tsai, C.W.S., 2001. On noninertia wave versus diffusion wave in flood routing. *J. Hydrol.* 244, 97–104. doi:10.1016/S0022-1694(00)00422-4.
25. Itami, R.M., 1994. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. *Landsc. Urban Plan.* 30, 27–47.
26. Lhomme, J., Sayers, P. B., Gouldby, B. P., Samuels, P. G., Wills, M., Mulet-Marti, J. 2008, Recent Development and Application of a Rapid Flood Spreading Method, in FLOODrisk 2008, Keble College, Oxford, UK.
27. Krupka, M., Pender, G., Wallis, S., Sayers, P.B., Mulet-Marti, J., 2007. A rapid flood inundation model, in: PROCEEDINGS OF THE CONGRESS-INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. p. 28.
28. Lamb, R., Crossley, M., Waller, S., 2009. A fast two-dimensional floodplain inundation model. *Proc. ICE - Water Manag.* 162, 363–370. doi:10.1680/wama.2009.162.6.363
29. Munshi, A., others, 2011. The OpenCL specification version 1.1. Khronos OpenCL Work. Group.
30. Neal, J.C., Fewtrell, T.J., Bates, P.D., Wright, N.G., 2010. A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. *Environ. Model. Softw.* 25, 398–411. doi:10.1016/j.envsoft.2009.11.007
31. Neal, J., Fewtrell, T., Trigg, M., 2009. Parallelisation of storage cell flood models using OpenMP. *Environ. Model. Softw.* 24, 872–877.
32. Néelz, S., Pender, G., 2013. Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages. Environment Agency, Horison House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH.
33. Smith, L.S., Liang, Q., Paul F. Quinn, 2013. A flexible hydrodynamic modelling framework for GPUs and CPUs: Application to the Carlisle 2005 floods, in: Experience in Asia and Europe. Presented at the International Conference on Flood Resilience, Exeter, UK.
34. Thomas, R., Nicholas, A.P., 2002. Simulation of braided river flow using a new cellular routing scheme. *Geomorphology* 43, 179–195.
35. Vojinovic, Z., Seyoum, S., Salum, M.H., Price, R.K., Fikri, A.K., Abebe, Y., 2012. Modelling floods in urban areas and representation of buildings with a method based on adjusted conveyance and storage characteristics. *J. Hydroinformatics* In Press.
36. Wolfram, S., 1984. Cellular automata as models of complexity. *Nature* 311, 419–424.
37. Yu, D., 2010. Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition. *Environ. Model. Softw.* 25, 935–945. doi:10.1016/j.envsoft.2010.03.003

Procena karaktera strujanja u krivini zatvorenog provodnika pomoću SPH metode

Nikola Rosić¹
Ljubodrag Savić²
Dejana Đorđević³
Milena Lučić⁴

APSTRAKT: U radu se razmatra mogućnost primene SPH metode u modeliranju burnog tečenja u krivinama zatvorenog provodnika kružnog poprečnog preseka. Korišćen je programski kod DualSPHysics koji je dopunjen kako bi se zadali odgovarajući granični uslovi na uzvodnom kraju računске oblasti. Model je kalibrisan i verifikovan korišćenjem rezultata ispitivanja na fizičkom modelu. Rezultati pokazuju da se vrednost koeficijenta veštačke viskoznosti, koji se standardno koristi u SPH metodi kako bi se proračun stabilizovao na mestima naglih promena vrednosti fizičkih veličina, može podešavati kako bi se dobio odgovarajući karakter tečenja u krivini.

Ključne reči: SPH, tečenje sa slobodnom površinom, burno tečenje u krivini, granični uslovi

Estimation of flow type in closed conduit bends using SPH method

ABSTRACT: The paper discusses a capability of SPH method in modeling of supercritical flow in circular conduit bends. The DualSPHysics code is supplemented with algorithm for appropriate modelling of upstream boundary conditions at the upstream end of the computational domain. The model is calibrated against available experimental data. It is shown that appropriate choice of the artificial viscosity coefficient can lead to correct presentation of the bend flow type.

Keywords: SPH, free surface flow, supercritical bend flow, open boundary conditions

¹ Nikola Rosić, dipl. građ. inž., student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, nrosic@grf.bg.ac.rs

² Dr Ljubodrag Savić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

³ Dr Dejana, Đorđević, docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, dejana@grf.bg.ac.rs

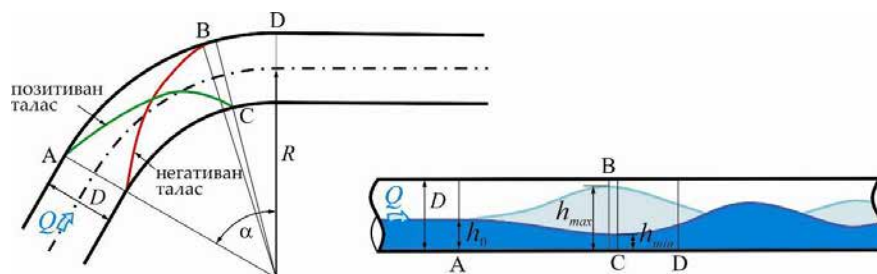
⁴ Milena Lučić, dipl. građ. inž., student doktorskih studija, Eneoprojekt Hidroinženjering a.d., Bul. Mihaila Pupina 12, 11070 Beograd, milenakolarevic@yahoo.com

1 Uvod

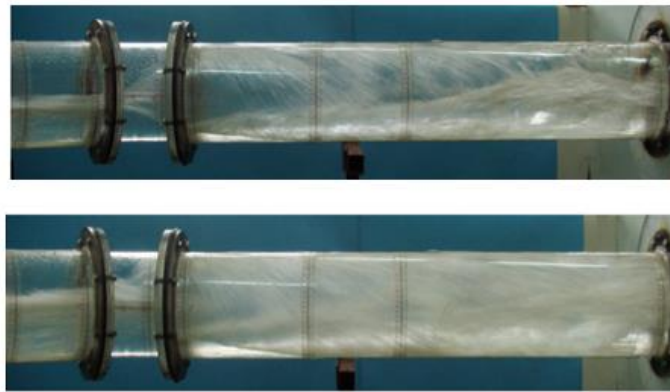
Metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) je najpoznatiji predstavnik numeričkih metoda za rešavanje jednačina kretanja fluida koje su zasnovane na praćenju fluidnih delića. S obzirom na to da se radi o znatno složenijem pristupu u analizi strujnog polja (Lagranžov pristup u odnosu na Ojlerov), SPH metod zahteva znatno veće angažovanje računarskih sredstava, u odnosu na konvencionalne metode. SPH metod je našao primenu u istraživanju pojava koje se ne mogu lako modelirati standardnim numeričkim metodama, ovde se pre svega misli na pojave koje uključuju nagle promene oblika slobodne površine. Kao prednosti u odnosu na konvencionalne metode mogu se izdvojiti sledeće osobine: (a) Primena SPH metode ne zahteva računsku mrežu, pa se komplikovane i fragmentirane oblasti strujanja (kao na primer kod lomećih talasa), kao i oblasti sa spajanjem i mešanjem tokova, relativno lako modeliraju; (b) svojstva fizičkog sistema u celini lako se utvrđuju praćenjem čestica; (c) konvekcija se direktno određuje bez numeričke difuzije; (d) korišćenjem *jednačine stanja* u matematičkom modelu se daje eksplicitni karakter proračunu jer se proračun pritiska „razdvaja“ od proračuna brzina što znatno pojednostavljuje računski algoritam; (e) eksplicitni računski algoritam omogućava jednostavnu primenu algoritama za paralelizaciju proračuna čime se numerički postupci mogu značajno ubrzati.

Cilj ovog rada je da se oceni mogućnost primene SPH metode u proceni karaktera tečenja u krivini zatvorenog provodnika kružnog preseka. U ovom radu su predstavljeni rezultati kalibracije SPH modela koji je opisan u radu sa prethodnog savetovanja SDHI [10]. Model koji je tom prilikom predstavljen, a čiji se detaljniji opis može naći u uputstvu za korišćenje programskog koda DualSPHysics odnosno u radovima ([1], [5] i [6]), je za potrebe ovog rada dopunjen implementacijom originalnog postupka za zadavanje graničnih uslova na „otvorenoj“ granici.

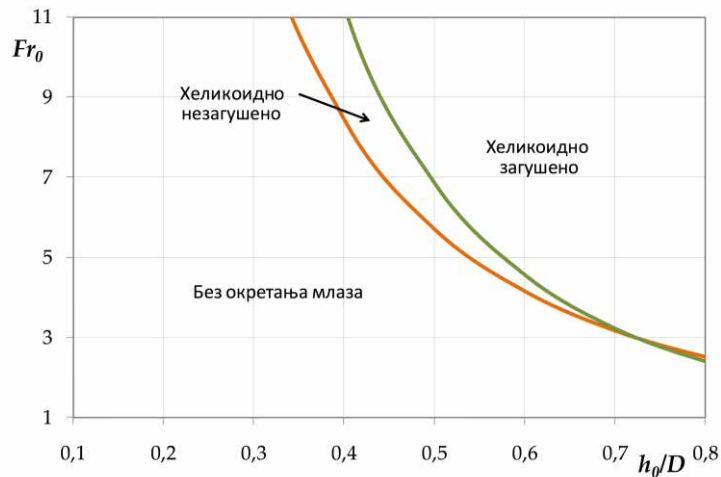
Analizira se tečenje koje je u burnom režimu uzvodno od krivine dok se u krivini usled promene geometrije čvrste granice može javiti tečenje sa okretanjem mlaza (slika 2) ili bez njegovog okretanja (slika 1). Pri odgovarajućim hidrauličkim uslovima može doći do pojave helikoidnog strujanja bez zagušenja (slika 2 - iznad), ili do neželjenog zagušenja toka u provodniku (slika 2 - ispod). Merenjima na modelu je utvrđeno ([4], [7], [8]) da se za zadate vrednosti skretnog ugla i zakrivljenosti krivine, karakter tečenja u krivini može proceniti na osnovu vrednosti Frudovog broja i relativne dubine uzvodno od krivine. Kao rezultat ispitivanja na fizičkom modelu dobijaju se funkcionalne zavisnosti koje utvrđuju potrebne (hidrauličke) uslove za helikoidno strujanje i za zagušenje toka (slika 3).



Slika 1. Pojava stojećih talasa u krivini cevi
 Figure 1. Standing waves in the pipe bend



Slika 2. Helikoidno tečenje bez i sa zagušenjem toka
 Figure 2. Helical flow in the pipe bend without (top) and with (bottom) choking



Slika 3. Primer funkcionalne zavisnosti koja određuje karakter tečenja u krivini [7]
 Figure 3. An example of limit curves for onset of helical and choking flows [7]

2 Numerički model

Osnovna karakteristika SPH metode je da se proračun vrednosti odgovarajućih fizičkih veličina vezuje za kvazi čestice kojima se diskretizuje fluidna sredina. Matematički model kojim se opisuje strujanje fluida zato čini sistem običnih diferencijalnih jednačina koje opisuju zakone održanja mase i količine kretanja (po potrebi i energije)⁵:

⁵ Predstavljen oblik jednačina strujanja se, u zavisnosti od načina modeliranja difuzionog člana, može odnositi na laminarne ili na turbulentne tokove.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \\ \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{P} + \mathbf{g} + \Theta \end{array} \right. , \quad (1)$$

gde su \mathbf{v} - vektor brzine, ρ - gustina, \mathbf{P} - pritisak, \mathbf{g} - gravitaciono ubrzanje i Θ - difuzioni član. Korišćenjem odgovarajućih pravila za predstavljanje funkcija u SPH metodi, prikazani izvodi se računaju za svaku česticu (i) korišćenjem težinske funkcije W na sledeći način:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla W_{ij} \\ \frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\sum_j m_j \left(\frac{\mathbf{P}_j}{\rho_j^2} + \frac{\mathbf{P}_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla W_{ij} + \mathbf{g} \end{array} \right. , \quad (2)$$

gde se oznaka j odnosi na sve čestice fluidne sredine koje se nalaze na rastojanju manjem od $2 \cdot h$ od čestice i (h je obično jednako $1,2 \cdot \Delta p_0$, gde je Δp_0 početno rastojanje između čestica), m_j označava masu čestice j a \mathbf{v}_{ij} je vektor relativne brzine čestice i u odnosu na česticu j . Član Π_{ij} se odnosi na difuzioni član Θ koji se u razmatranom računskom postupku izračunava preko izraza koji je predložio Monaghan [9], kako bi se u SPH postupak uvela veštačka viskoznost:

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} -\frac{\alpha \bar{c}_{ij} \mu_{ij}}{\bar{\rho}_{ij}} & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} < 0, \\ 0 & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} > 0, \end{cases} \quad (3)$$

gde su: \mathbf{r}_{ij} vektor relativnog položaja čestice i u odnosu na česticu j ; $\mu_{ij} = \frac{h \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{\mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} + 0.01 h^2}$;

$\bar{c}_{ij} = (c_i + c_j)/2$ (c je brzina prostiranja zvuka u fluidu i sračunava se na osnovu izraza (5) kao parcijalni izvod pritiska po gustini); α je parametar koji se određuje probanjem (uobičajene vrednosti su reda veličine 0,1). Kao težinska funkcija koristi se kubni polinom ($q = \frac{|\mathbf{r}_{ij}|}{h}$):

$$W_{ab}(q, h) = 1/(\pi h^3) \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} q^2 + \frac{3}{4} q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4} (2 - q)^3 & 1 \leq q \leq 2, \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

U razmatranoj varijanti SPH metode pritisak se računa iz *jednačine stanja*, pretpostavljajući da je fluid blago stišljiv. Na ovaj način pojednostavljuje se računski postupak, jer je proračun pritiska „razdvojen” od proračuna brzina i može se obaviti preko *jednačine stanja* (*Tait's equation*) na sledeći način:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (5)$$

gde je obično $\gamma = 7$, a $B = c_0^2 \rho_0 / \gamma$ uzimajući da je $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ dok je c_0 brzina prostiranja zvuka u vodi pri gustini ρ_0 . Vrednost brzine zvuka u fluidu se obično uzima da je manja od realne kako bi vrednost vremenskog računskog koraka bila prihvatljiva⁶.

Važno je primetiti da su međusobni doprinosi čestica u izrazima (2) jednaki, čime je zadovoljena konzervativnost količine kretanja. S obzirom na to da čestice tokom proračuna ne menjaju masu, problem održanja mase se svodi na zadržavanje čestica u računskoj oblasti.

Za vremensku integraciju sistema jednačina koristi se prediktor-korektor simplektička shema [9] po kojoj se promena položaja, brzine i gustine čestice određuje u tri etape.

Uzimajući da je $F_i = \frac{dv_i}{dt}$ i $D_i = \frac{d\rho_i}{dt}$, u prvoj etapi se računaju prediktor vrednosti (indeks p) u vremenskom trenutku $(n+1/2)\Delta t$:

$$v_i^{p,n+1/2} = v_i^n + \frac{\Delta t}{2} F_i^n; \rho_i^{p,n+1} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} D_i^n; r_i^{p,n+1} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} v_i^n. \quad (6)$$

U drugoj etapi se na osnovu predhodno sračunatih prediktor vrednosti računaju korigovane (korektor) vrednosti u istom vremenskom trenutku:

$$v_i^{n+1/2} = v_i^n + \frac{\Delta t}{2} F_i^{p,n+1/2}; \rho_i^{n+1/2} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} D_i^{p,n+1/2}; r_i^{n+1/2} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} v_i^{p,n+1/2}. \quad (7)$$

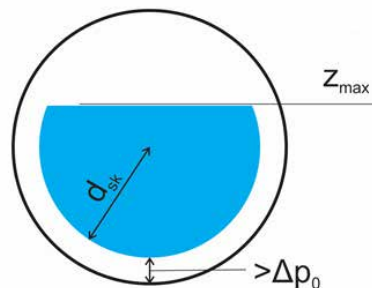
U poslednjoj etapi se računaju nepoznate vrednosti u $(n+1)\Delta t$ vremenskom trenutku:

$$v_i^{n+1} = 2v_i^{n+1/2} - v_i^n; \rho_i^{n+1} = 2\rho_i^{n+1/2} - \rho_i^n; r_i^{n+1} = 2r_i^{n+1/2} - r_i^n. \quad (8)$$

U korišćenoj varijanti SPH metode nepokretna granica (cev i rezervoar) se modelira korišćenjem nepokretnih čestica koje figurišu u izrazima za određivanje odgovarajućih izvoda čestica fluida koje se nalaze na rastojanju manjem od $2h$ od čvrste granice ([2]). Za ove nepokretne čestice se korišćenjem jednačine kontinuiteta računa izvod gustine pa samim tim, na osnovu jednačine stanja, i promena pritiska. Tako u slučajevima kada se čestice fluida približavaju česticama granice, raste vrednost pritiska koji se pridružuje tim česticama tj. povećava se odbojna sila između čestica čime se ostvaruje mehanizam koji sprečava čestice fluida da napuste cev.

⁶ Navedeno sledi iz *Kurantovog uslova* baziranog na brzini zvuka.

S obzirom da se analizira burno tečenje, granični uslovi se zadaju na uzvodnom kraju cevi. Zadavanje graničnih uslova na „otvorenoj granici“ kod modliranja prostornog tečenja SPH metodom za sada predstavlja problem ([11]) i autorima nije poznat ni jedan programski kod koji omogućava zadavanje ovog tipa graničnih uslova. Za svrhu obavljanja proračuna predstavljenih u ovom radu autori su koristili originalni postupak po kojem se na uzvodnom kraju računске oblasti generišu čestice fluida zadatog (jednakog) inteziteta i pravca brzine. Čestice fluida „ulaze“ u računsku oblast formirajući vodeni stub zadate visine. Kako se pokazalo, potreban uslov da ne dođe do numeričke nestabilnosti u zoni uzvodne granice je da čestice koje se generišu budu na određenom rastojanju od čvrste granice koje je veće od rastojanja Δp_0 . Postupak je ilustrovan na slici 4. Zadavanje graničnih uslova se praktično obavlja definisanjem inteziteta brzine, vrednosti prečnika d_{sk} i kote do koje se generišu čestice z_{max} . Najveća vrednost prečnika d_{sk} pri kojoj se ne javljaju numeričke nestabilnosti se određuje probanjem za svaki slučaj.



Slika 4. Raspored fluidnih delića na uzvodnoj granici (plava boja)
Figure 4. Cross-section beyond actual upstream boundary

3 Računski primer

3.1 Opis fizičkog modela

Ispitivanja tečenja sa slobodnom površinom na fizičkom modelu odvodnog tunela sa krivinom detaljno su opisana u ([7], [8]). Laboratorijska instalacija (slika 5) na kojoj je ispitivana opisana pojava sastojala se od uzvodnog rezervoara iz kojeg se upušta voda u provodnik kojeg čine prelazna deonica i kružna cev prečnika 15 cm. Kružna cev ima dve pravolinijske deonice između kojih je umetnuta horizontalna krivina. Pravolinijska deonica na uzvodnom kraju je dužine 245 cm, a na nizvodnom kraju 150 cm. Cirkulacija vode je obezbeđena pumpom koja vodu iz donjeg - nizvodnog rezervora (nije prikazan na slici) vraća u gornji - uzvodni rezervoar. Uzvodno od gornjeg rezervoara nalazi se Tompsonov preliv pomoću kojeg se meri protok na modelu. Oba bezdimenzionalna broja, Frudov broj ($F_r = Q / \sqrt{g D h_0^4}$, definisan prema radu [4]) i relativna dubina (h_0/D), određuju se u preseku na pravcu, udaljenom 50 cm uzvodno od početka krivine.

U sklopu istraživanja M. Kolarević i saradnika ([7] i [8]) ispitivano je više različitih slučajeva u kojima su varirani zakrivljenost i skretni ugao krivine. U numeričkim ogledima



Slika 5. Laboratorijska instalacija
Figure 5. Experimental setup

koji su predstavljeni u ovom radu razmatrana je jedna dispozicija instalacije sa zakrivljenošću krivine $D/R=1/3$ i skretnim uglom od 45° .

3.2 Postavka numeričkog modela

Kako bi se rezultati numeričkih oglada mogli uporediti sa merenjima na fizičkom modelu, potrebno je da se na usvojenoj granici računске oblasti zadaju vrednosti protoka i dubine koje odgovaraju izmerenim vrednostima. S obzirom da objašnjeni postupak zadavanja graničnog uslova zahteva da se čestice fluida odmaknu od zida cevi, na „otvorenoj“ granice nije moguće direktno zadavati vrednosti dubine. Zato se, kao „nova uzvodna granica“ računске oblasti mora izabrati poprečni presek dovoljno nizvodno tako da u njemu čestice fluida dodiruju zidove cevi. Kako je u ispitivanjima na fizičkom modelu karakterističan presek 50 cm uzvodno od krivine, na otvorenoj granici se probanjem dolazilo do kote z_{\max} za koju se dobija odgovarajuća dubina u ovom poprečnom preseku.

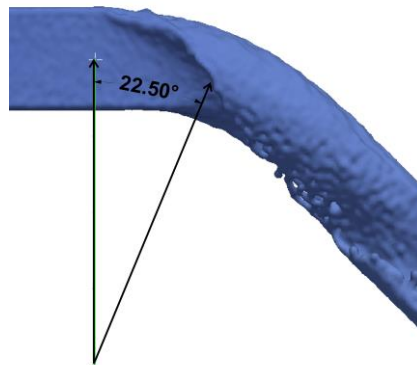
U svim numeričkim proračunima korišćen je Kurantov uslov za određivanje vremenskog koraka. Vrednost Kurantovog broja iznosila je 0,3. Vrednosti početnog rastojanja su varirane od 4,5 mm do 6,0 mm. Pored rastojanja između čestica, pokazalo se, da na rezultate proračuna najviše utiče promena vrednosti parametra α za sračunavanje veštače viskoznosti (izraz 3).

Programski kod DualSPHysics izmenjen je kako bi se omogućila izvedba opisanog postupka za zadavanje uzvodnog graničnog uslova. Izmenjeni kod predviđa da se sve čestice koje učestvuju u proračunu zadaju na početku proračuna. U početnom trenutku cev je prazna a čestice se, uzvodno od računске oblasti, „ređaju“ u vodeni stub čiji poprečni pesek odgovara preseku na „otvorenoj granici“. Dužina vodenog stuba se određuje na osnovu potrebnog trajanja simulacije koje se pak određuje iz uslova konvergencije proračunatih vrednosti odgovarajućih fizičkih veličina. U toku proračuna broj čestica se smanjuje kako iste na nizvodnoj granici napuštaju računsku oblast. Najveći broj čestica u jednoj simulaciji iznosio je približno 4,5 miliona i pri tome je proračun, obavljen na grafičkoj karti sa čipom GTX 970,

za 10 s simulacije, trajao približno 7 časova. Napominje se da autori ostavljaju otvoreno pitanje optimizacije izmenjenog dela koda koji se odnosi na zadavanje graničnih uslova. Ovde se pre svega misli na pitanje generisanja čestica u toku proračuna kako bi se smanjio broj čestica koji u istom trenutku učestvuju u proračunu.

3.3 Rezultati

Za kalibraciju numeričkog modela korišćeni su rezultati merenja iz oglada u kojem se javilo okretanje mlaza vode u krivini. Protok je u ogledu bio 22,4 l/s a dubina vode uzvodno od krivine 9 cm. Kriterijum za kalibraciju je bilo slaganje položaja preseka u kome mlaz koji se okreće u krivini dodiruje kalotu cevi. Na fizičkom modelu je izmereno da mlaz dodiruje teme provodnika na $22,5^\circ$ od početka krivine. Najbolje slaganje rezultata proračuna i merenja dobijeno je za vrednost parametara $\alpha = 0,000001$ i početno rastojanje između čestica 4,5 mm. Izgled proračunom dobijene slobodne površine u krivini, za ove vrednosti parametara, prikazan je na slikama 6 i 7. Na slici 8 je radi poređenja prikazan izgled fluidne struje na laboratorijskom eksperimentu.



Slika 6. Mesto gde mlaz koji se okreće dodiruje kalotu cevi
Figure 6. Location of the section where the wave reaches the pipe invert (top view)

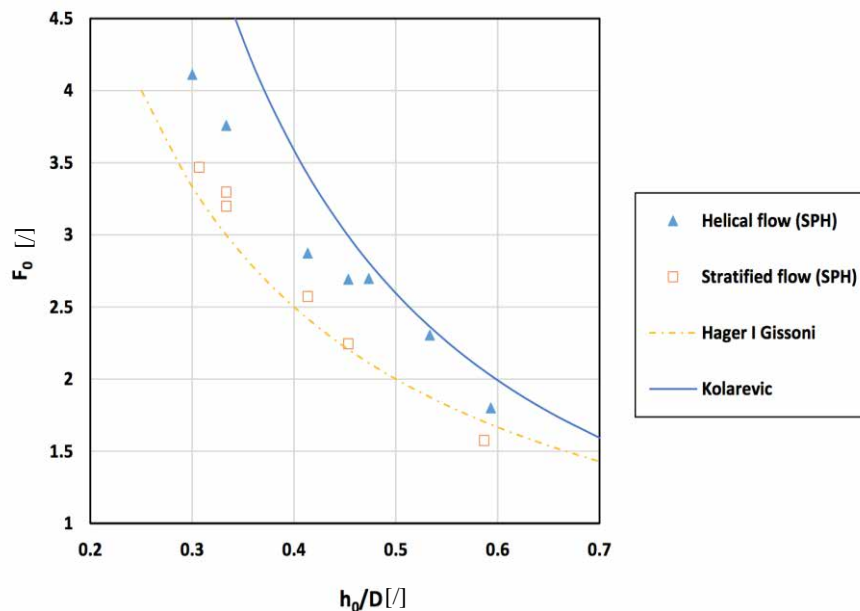


Slika 7. Izgled fluidne struje u krivini dobijen upotrebom SPH metode
Figure 7. Location of the section where the wave reaches the pipe invert (side view)



Slika 8. Helikoidno tečenje na fizičkom modelu
 Figure 8. Helical flow (physical model)

Kako bi se dao odgovor na pitanje da li se primenom SPH metode može predvideti karakter tečenja u krivini, izvršeno je nekoliko različitih numeričkih ogleda u kojima su varirane vrednosti protoka i dubine uzvodno od krivine. Cilj je bio da se dobije funkcionalna zavisnost koja određuje da li u krivini dolazi do okretanja mlaza. Numerički ogledi su obavljani sa vrednostima $\alpha=0,000001$ uzimajući da je početno rastojanje između čestica jednako 4,5 mm. Rezultati ove analize prikazani su na slici 9 gde su pored rezultata numeričkih ogleda (označeni tačkama) prikazane i zavisnosti iz literature ([7] i [4]). Isprekidanom linijom prikazana je zavisnost do koje su došli Hager i Gissoni dok je punom linijom prikazana zavisnost dobijena na osnovu merenja Kolarević i saradnika. Sa slike se može zaključiti da se dobijeni rezultati primene SPH metode „negde između” rezultata laboratorijskih ispitivanja. Treba naglasiti da je vrednost parametra α koja je usvojena na osnovu kalibracije ujedno i najmanja vrednost koja je korišćena. Povećanjem ove vrednosti u proračunima raste energetski gubitak u krivini (smanjuje se kapacitet odvodnog tunela) što praktično znači da se upotrebom standardnih vrednosti ovog koeficijenta u proračunu SPH metodom dobijaju rezultati koji su sa inženjerskog stanovišta na strani sigurnosti.



Slika 9. Zavisnosti za procenu karaktera tečenja
 Figure 9. Comparison between numerical and experimental results

4 Zaključak

U radu je uspešno primenjen SPH metod u modeliranju burnog tečenja u krivini zatvorenog provodnika kružnog preseka. Za tu svrhu bilo je potrebno modifikovati standardnu varijantu SPH metode kako bi se zadavali granični uslovi na „otvorenoj“ granici. Na osnovu poređenja rezultata upotrebe SPH metode i rezultata ispitivanja na fizičkim modelima može se izvesti zaključak da je pomoću SPH metodom moguće pouzdano proceniti karakter tečenja u krivini zatvorenog provodnika. Korišćenjem standardnih vrednosti koeficijenta veštačke viskoznosti dobijaju vrednosti koje su sa inženjerskog stanovišta na strani sigurnosti.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja na finansiranju projekata TR 37009 i TR37010.

Literatura

1. Crespo AJC, Domínguez JM, Barreiro A, Gómez-Gesteira M and Rogers BD. 2011. *GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods*. PLoS ONE 6 (6), e20685.
2. Dalrymple, R. A., Knio, O., 2001., *SPH Modelling of Water Waves*, Proc. Coastal Dynamics, Lund, pages 779-787.
3. Gingold R. A., and Monaghan J. J., 1977. *Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars*. Mon. Not. R. Astron. Soc., 181, 375–89
4. Gissoni, C., Hager, W., H., 2000., *Supercritical Flow in Bend Manhole*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 84.
5. Gómez-Gesteira M, Rogers BD, Crespo AJC, Dalrymple RA, Narayanaswamy M and Domínguez JM. 2012. *SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 1: Theory and Formulations*. Computers & Geosciences, 48, 289-299.
6. Gómez-Gesteira M, Crespo AJC, Rogers BD, Dalrymple RA, Domínguez JM and Barreiro A. 2012. *SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 2: Efficiency and test cases*. Computers & Geosciences, 48, 300-307.
7. Kolarević M., Savić Lj, Kapor R, Mladenović N., 2014., *Burno tečenje u krivini provodnika kružnog poprečnog preseka*, Vodoprivreda br. 261-263, st. 123-137.
8. Kolarević M., Savić Lj, Kapor R, Mladenović N., 2015., *Supercritical Flow in Circular Closed- conduit Bends*, Journal of Hydraulic Research, vol. 53 No. 1, 93-100.
9. Monaghan, J. J., 1994., *Simulating free surface flow with SPH*, Journal of Computational Physics, Elsevier, Vol. 110
10. Rosić, N., Kolarević, M. (2012), *Numeričko modeliranje tečenja sa slobodnom površinom pomoću metode SPH*, 16. Savetovanje SDHI., Donji Milanovac.
11. Vetsch, D., *Numerical simulation of sediment transport with meshfree methods*, 2012., PhD thesis, ETH Zurich.

Modeliranje neustaljenog strujanja u poroznoj sredini metodom konačnih elemenata

Damjan Ivetić¹
Nenad Jaćimović²
Dušan Prodanović³

APSTRAKT: Podzemne vode predstavljaju jedan od ključnih resursa za vodosnabdevanje. Matematičko modeliranje dinamike podzemnih voda je neophodno u cilju sprovođenja analiza kao što su bilansiranje raspoloživih količina ili transport zagađujućih materija. Neustaljeno strujanje vode u poroznoj sredini se matematički opisuje parabolikom, parcijalnom, diferencijalnom jednačinom drugog reda. Budući da se do analitičkog rešenja u opštem slučaju dosta teško dolazi, neophodno je pomoću neke numeričke metode doći do aproksimativnog rešenja. U ovom radu je predstavljeno postupak dobijanja numeričkog rešenja jednačine u dve dimenzije, metodom konačnih elemenata. Prednosti primene metode konačnih elemenata u numeričkom rešavanju diferencijalnih j-na su brojne, među kojima se ističu mogućnosti aproksimacije nepravilnih domena kao i diskretizacija domena mrežom promenljive gustine. Prikazan je način primene modela u sinergiji sa softverom AutoMesh 2D na primeru iz literature.

Ključne reči: Podzemne vode, Neustaljeno strujanje, Metoda konačnih elemenata

Finite element modelling of transient flow in porous media

ABSTRACT: Groundwater is one of the key resources used for the water distribution. Mathematical modelling of the groundwater dynamics is a necessity when analyses such as available water balancing or contaminant transport are performed. Transient water flow in porous media is mathematically described with a parabolic partial differential equation of second order. It is usually difficult to obtain an analytical solution, so some numerical method needs to be employed in order to obtain an approximate solution. In this paper, a procedure is presented for the derivation of the numerical solution of the 2D equation by employment of the finite element method. There are numerous advantages of the finite element method solutions of differential equations, amongst which stands out the possibility of the irregular domain approximation and variable density mesh discretization. Employment of the model in synergy with the AutoMesh2D software is presented on the literature example.

Keywords: Groundwater, Transient flow, Finite element method

¹ Mast. inž. Damjan Ivetić, asistent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, divetic@hikom.grf.bg.ac.rs

² Dr Nenad Jaćimović, docent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73

³ Dr Dušan Prodanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73

1 Uvod

Izučavanje kretanja i stanja vode koja se nalazi u poroznoj sredini zemljine kore, predstavlja važan deo delatnosti inženjera hidrotehnike širom sveta. Od ukupne količine slatke vode koja se nalazi na planeti Zemlji, čak preko 90%, čini voda koja se u različitim oblicima, kreće ili miruje u zemljištu. Sva voda koja se nalazi u ovom poroznom medijumu se klasifikuju kao podzemna. U mnogim državama podzemna skladišta vode (akviferi) predstavljaju glavna izvorišta za vodosnabdevanje. Pored ove, postoje i brojne sekundarne uloge podzemne vode (poljoprivredna, industrijska itd.) zbog kojih su kroz čovekovu istoriju one dobijale pažnju brojnih istraživača. Trenutno stanje podzemnih voda u svetu ukazuje na neodrživ način upravljanja ovim vrednim resursom. Antropogena eksploatacija podzemnih voda prevazilazi mogućnosti prirode da nadomesti preuzete količine.

Uspešno upravljanje postojećim količinama podzemnih voda je trajan, multidisciplinarni i složen proces koji obuhvata širok spektar delatnosti i uključuje različite profesije. Jedan od osnovnih segmenata ovog procesa je i modeliranje kretanja podzemnih voda u poroznim medijumima u prirodi. Brojne analize se zasnivaju upravo na rezultatima različitih modela koji se koriste u ove svrhe. Praktično je nemoguće uraditi bilo kakve ozbiljnije predikcije npr bilansiranja voda u podzemnim akviferima ili transporta zagađujućih materija bez „kvalitetnog“ modela strujanja fluida u poroznoj sredini. Kretanja fluidnih delića u poroznoj sredini matematički se opisuje parcijalnim diferencijalnim jednačinama drugog reda. Pošto se izuzev u retkim slučajevima, ove jednačine ne mogu analitički rešiti, neophodno je doći do aproksimativnog rešenja primenom neke numeričke metode. U ovom radu je predstavljeno rešenje parabolike parcijalne diferencijalne jednačine kojom se opisuje neustaljeno kretanje podzemne vode, primenom metode konačnih elemenata (MKE). Metoda konačnih elemenata, zbog brojnih prednosti koje poseduje, je verovatno najčešće korišćena numerička metoda za rešavanje diferencijalnih jednačina iz različitih sfera fizike [1][10][11]. Jednačine koje se rešavaju se dobijaju primenom Galjorkinovog principa težinskih reziduala.

U okviru istraživanja koja su prethodila ovom radu razvijen je numerički model koji je integrisan u program kodiran u okviru FORTRAN programskog okruženja. Kao rezultat istraživanja, dobijen je program *unsteady_seepg* koji se u kooperaciji sa slobodnim softverom razvijenim u Kini, AutoMesh2D, može koristiti sa analiziranjem neustaljenog 2D strujanja u poroznoj sredini. U radu je predstavljen postupak razvoja numeričkog modela za rešavanje jednačine kojom se opisuje neustaljeno strujanje vode u poroznoj sredini, sa primenom razvijenog modela na primerima iz literature.

2 Metodologija

U okviru ovog poglavlja su opisani najvažniji aspekti primene i razvijanja numeričkog modela za simuliranje neustaljenog strujanja u poroznoj sredini. Budući da je tema rada relativno kompleksna, pojedini delovi su ili ukratko opisani ili su u potpunosti izostavljeni. Svi ovi segmenti metodologije razvijanja numeričkog modela se mogu naći u navedenoj literaturi.

2.1 Matematički model

Osnovna jednačina neustaljenog strujanja u poroznoj sredini se dobija iz zakona održanja mase, koji se kombinuje sa Darsijevim zakonom (ovde se ne navodi izvođenje koje se može naći u literaturi [5][9]). Za slučaj 2D analize, sređivanjem se dobija sledeći oblik paraboličke parcijalne diferencijalne jednačine:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W \quad (1)$$

Sa S_s obeležena je specifična izdašnost koja je ustvari jednaka $(\alpha + n\beta)$, gde je α koeficijent stišljivosti tla, n poroznost tla a β koeficijent stišljivosti vode. Specifična izdašnost praktično predstavlja količinu vode koja se iscedi iz ili prihvati u jediničnu zapreminu akvifera usled jedinične promene nivoa podzemne vode i to kao posledica stišljivosti vode i skeleta podzemne sredine. Sa oznakom h je predstavljena pijezometarska kota fluida, dok K_x i K_y predstavljaju koeficijente filtracije u dva pravca x i y . Oznakom W je obeležen član koji predstavlja izvor odnosno ponor.

Uputno je napomenuti da se u slučaju strujanja sa slobodnom površinom (*phreatic aquifer*) za razliku od strujanja pod pritiskom (*confined aquifer*) specifična izdašnost S_s svodi samo na koeficijent poroznosti n , budući da je izdašnost povezana sa stišljivošću tla zanemaraljiva u odnosu na izdašnost koja je povezana sa pomeranjem nivoa podzemne vode.

2.2 Metoda konačnih elemenata

MKE je numerička metoda koja zajedno sa metodom konačnih razlika spada u grupu metoda *diskretne analize*. Zasniva se na fizičkoj diskretizaciji razmatranog domena u kojem se posmatra određeni fenomen. Osnovu za sva razmatranja predstavlja jedan deo celokupnog domena konačnih dimenzija, koji se naziva poddomen ili *konačni element*. U okviru svakog konačnog elementa se tačno rešenje diferencijalnih jednačina aproksimira linearnom kombinacijom probnih (trial) funkcija koje su najčešće polinomi. Ove probne funkcije su linearno nezavisne f-je koje zadovoljavaju granične uslove razmatranog problema. Nepoznati koeficijenti probnih funkcija se mogu odrediti nekom od metoda: Kolokaciona, Rajli-Ric ili Galjorkinova metoda ponderisanih reziduala. Rešanja koja važe za jedan konačni element se zatim grupišu kako bi se dobilo globalno rešenje odnosno rešenje za ceo domen. Ovo znači da se razmatrani domen kao kontinuum, zamenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih poddomena odnosno konačnih elemenata. Skup konačnih elemenata kojima je aproksimiran ceo domen se naziva *mreža konačnih elemenata*. Pretpostavlja se da su konačni elementi međusobno povezani u konačnom broju tačaka koje se usvajaju na konturama elemenata i u kojima se određuje rešenje. Ove tačke se nazivaju čvorovi ili čvorne tačke. Najbitnije prednosti aproksimacije domena konačnim brojem elemenata u odnosu na druge metode su:

- Precizna aproksimacija kompleksne geometrije
- Analiziranje heterogenih domena, odnosno različitih materijala sa različitim karakteristikama
- Jednostavan prikaz rešenja za celokupan domen
- Analiziranje lokalnih efekata unutar velikog domena

U nastavku se daje prikaz primene Galjorkinove metode ponderisanih reziduala konkretno na j-ni (1.) zajedno sa ostalim bitnim segmentima, u cilju razvijanja adekvatnog numeričkog modela.

2.3 Galjorkinova metoda ponderisanih rezultata

Kada se koristi MKE u dinamici fluida, u kompjuterskim programima se skoro redovno kombinuje sa Galjorkinovom metodom tako da su praktično postali sinonimi [9]. Galjorkin je formulisao metodu po kojoj rešenja jednačina koja definišu neki fizički proces koji se ispituje za svaki čvor mogu da se kombinuju kako bi se dobila najmanja moguća greška (rezidual) za celokupno (za ceo domen) rešenje. Princip težinskih ili ponderisanih reziduala se primenjuje direktno na diferencijalne jednačine koje opisuju problem. Rezidual ili ostatak, u svakoj tački domena predstavlja meru za koliko rešenje jednačine ne zadovoljava samu jednačinu. Ako se uprosečeni ponderisani rezidual svede na nulu, tada su dobijena rešenja ustvari „tačna“ rešenja sistema jednačina. Slikovitiji opis sledi kroz primer primene konkretno na neustaljenu j-nu filtracije. Prvi korak u primeni Galjorkinove metode na neustaljenu j-nu filtracije je definisanje aproksimativnog ili probnog rešenja $\bar{h}(x, y, t)$. Navedeno rešenje je predstavljeno kao suma proizvoda, gde je svaki član proizvod h_L u čvoru L i odgovarajuće *interpolacione* ili *bazne funkcije* $N_L(x, y)$:

$$\bar{h}(x, y, t) = \sum_{L=1}^{Np} h_L(t) N_L(x, y) \quad (2)$$

gde Np označava broj čvorova. Ovaj način predstavljenja aproksimativnog rešenja $\bar{h}(x, y, t)$ je iskorišćen da bi se jasno razgraničile promenljive po vremenu i po prostoru. Aproksimativno rešenje je ustvari predstavljeno kao linearna kombinacija interpolacionih f-ja. Ove funkcije se nazivaju interpolacionim zato što definišu aproksimativno rešenje nad celim domenom problema preko vrednosti nepoznate (pijezometarske kote) u čvorima mreže konačnih elemenata. Njihov oblik zavisi od tipa elemenata (trougao, četvorougao itd.) koji se koriste za diskretizovanje mreže. Za MKE u ovom radu korišćeni su pravilni četvorougao (*quadrilateral*) elementi gde je svaki element definisan pomoću četiri čvora. Budući da su elementi definisani na ovaj način standardni u primeni, detaljnije o njihovoj definiciji kao i o obliku interpolacionih funkcija može se naći u literaturi [1][5][9].

Sledeći korak je opisivanje ukupno Np uslova za definisanje Np vrednosti pijezometarskih kota. U metodi Galjorkina, Np uslova se dobija tako što se zahteva da jednačina kojom se definiše problem (u ovom slučaju j-na neustaljenu filtraciju), kada se pomnoži odnosno ponderiše sa svakom od Np interpolacionih funkcija, i integrali preko celog domena, bude jednaka nuli, odnosno:

$$\iint_D \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \right) + W - S_s \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \right) N_L(x, y) dx dy = 0 \quad (3)$$

gde je $L=1, 2, \dots, Np$, a integracija nad D predstavlja integraciju nad celokupnim domenom.

U rezidualnoj formulaciji jednačine neustaljenu filtracije (3) može se primetiti da se kod prva dva člana u zagradi javlja drugi izvod aproksimativnog rešenja $\bar{h}(x, y, t)$, samim tim

i interpolacione funkcije $N_L(x,y)$. Upravo zbog ove činjenice, određivanje vrednosti integrala reziduala može biti komplikovan ili čak nerešiv zadatak. Naime interpolaciona funkcija iako je kontinualna nad domenom D , njen prvi izvod nije obavezno takav. Zbog toga je neophodno pribeći primeni parcijalne integracije.

Za parcijalnu integraciju primenjuje se Gaus-Grinova ili Gaus-Ostrogradski teorema, kojom će se smanjiti red izvoda za jedan u problematičnim članovima j -ne (3). Konkretno, kada se navedena teorema primeni na jednačinu neustaljene filtracije, i ako se pretpostavi da se koeficijent filtracije ne menja po domenu (kasnije poddomenu odnosno konačnom elementu) dobija se njen sledeći oblik:

$$\iint_D \left(K_x \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \frac{\partial N_L}{\partial x} + K_y \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \frac{\partial N_L}{\partial y} \right) dx dy + \iint_D S_s \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} N_L dx dy = \iint_D W N_L dx dy + \int_{\Gamma} \left(K_x \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} n_y \right) N_L d\sigma \quad (4)$$

gde je Γ granica domena D , σ promenljiva koja predstavlja odstojanje duž granice u smeru suprotnom od kazaljke na satu, a n_x i n_y jedinični vektori normale na granicu Γ . Drugi član sa desne strane predstavlja fluks kroz granicu, i ako ne postoji granični uslov dat u vidu proticaja ovaj član je jednak nuli. Primećuje se da se sada ne pojavljuju više drugi izvodi promenljive h , već samo prvi izvodi čime je problem sa početka ovog poglavlja prevaziđen pa se može dalje pristupiti primeni metode konačnih elemenata u kombinaciji sa Galjorkinovom metodom.

2.5 Definisane sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina

Pokazano je kako se od jednačine (3) dolazi do jednačine (4) primenom pravila parcijalne integracije. Konkretno, j -na (4) predstavlja uslov, odnosno osnovu primene Galjorkinove metode, napisan za L -tu interpolacionu odnosno baznu funkciju, a to je da je ponderisani rezidual jednak nuli. Za svaki L -ti čvor mreže konačnih elemenata, postoji po jedna ovakva jednačina, formirajući sistem od N_p parcijalnih diferencijalnih j -na. Definiše se pravilo za ispisivanje jednačina u matričnoj notaciji radi bolje preglednosti: matrice se predstavljaju velikim slovima unutar uglastih zagrada $[X]$ a vektori, bilo kolone ili vrste, malim slovima unutar vitičastih zagrada $\{x\}$. Na ovaj način sistem od N_p parcijalnih diferencijalnih j -na se može predstaviti u matričnoj notaciji na sledeći način [2]:

$$[A]\{h\} + [B]\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\} = \{f\} \quad (5)$$

Gore prikazani članovi se mogu porediti sa j -nom (4) kako bi se stekao uvid o njihovom značenju. Matrica $[A]$ predstavlja matricu provodnosti (*conductance*). Naziv joj potiče od činjenice da su množioc članove ove matrice ustvari koeficijenti vodopropusnosti ili kako se u engleskoj terminologiji obično koristi hidrualičke provodnosti (*hydraulic conductivity*). Matrica $[A]$ je kvadratna matrica dimenzija $N_p * N_p$. Vektor kolona $\{h\}$ je dužine N_p i sačinjavaju ga pijeometarske kote u čvorovima L u nekom trenutku t , $h_L(t)$. Matrica $[B]$ je kao i matrica $[A]$ kvadratna matrica identičnih dimenzija, i naziva se matrica kapacitivnosti (*capacitance*). Unutar njenih članova se nalaze specifične izdašnosti materijala preko kojih je

obračunat kapacitet zemljišta da primi ili drenira „uskладиštene“ količine vode. Ova matrica je karakteristična za neustaljene uslove strujanja u poroznoj sredini. Sledeća je vektor kolona $\{\partial h/\partial t\}$ dužine N_p koja je sastavljena od izvoda po vremenu, pijezometarskih kota u čvoru L , $\partial h_L/\partial t$. Konačno, tu je i vektor kolona $\{f\}$ tzv vektor sila (*force*). On je sastavljen od izvornih članova kojima se opisuje izvor ili ponor, kao i od graničnih uslova datih u vidu fluksa. Kao što će se kasnije i ponoviti ukoliko ovakav granični uslov nije zadat ceo drugi integral sa desne strane jednačine (4) je jednak nuli.

Neophodno je definisati i postupak formiranja globalnog (celokupnog) sistema linearnih jednačina. Naime, filozofija kojom se ovaj postupak sprovodi je sledeća: integrali u jednačini (4) se određuju element po element, da bi se konačno oni sumirali nad celim domenom problema i na taj način dobile tzv globalne matrice sistema čijim rešavanjem dolazimo do nepoznatih pijezometarskih kota u čvorovima. Matematički se to može predstaviti na sledeći način:

$$\begin{aligned} & \sum_e \left\{ \iint_D \left(K_x \frac{\partial \bar{h}^e}{\partial x} \frac{\partial N_L}{\partial x} + K_y \frac{\partial \bar{h}^e}{\partial y} \frac{\partial N_L}{\partial y} \right) dx dy \right\} + \sum_e \left\{ \iint_D S_s \frac{\partial \bar{h}^e}{\partial t} N_L dx dy \right\} \\ & = \sum_e \left\{ \iint_D W N_L dx dy \right\} + \int_{\Gamma} \left(K_x \frac{\partial \bar{h}^e}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial \bar{h}^e}{\partial y} n_y \right) N_L d\sigma \end{aligned} \quad (6)$$

gde je $L = 1, 2, \dots, N_p$. Primećuje se da je sada umesto aproksimativnog rešenja $\bar{h}(x, y, t)$ u obrazcu sa leve strane $\bar{h}^e(x, y, t)$ da bi se pokazalo da je ovo aproksimacija po elementu.

2.6 Diskretizacija matrične diferencijalne jednačine konačnim razlikama

Prikazana matrična diferencijalna jednačina prvog reda (j-na 4) se mora diskretizovati kako bi se definisao konačni oblik sistema linearnih jednačina. Uobičajena je praksa, aproksimirati izvod pijezometarske kote po vremenu u matričnoj notaciji, nekom od metoda konačnih razlika. Hofman [8] predlaže da se primeni aproksimacija koja će biti najmanje istog reda tačnosti kao i što je metoda konačnih elemenata, odnosno najmanje drugog reda, budući da je to približna tačnost aproksimacije konačnim elementima. Neki drugi istraživači, smatraju da je aproksimacija prvog reda dovoljne tačnosti. Aproksimacija izvoda pijezometarskih kota po vremenu u matričnoj notaciji u opštem slučaju ima sledeći oblik:

$$\left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = \frac{1}{\Delta t} \left(\{h\}^{t+\Delta t} - \{h\}^t \right) \quad (7)$$

Indeksi iznad vektora pijezometarskih kota predstavljaju vremenski korak za koji se odnose ove vrednosti, dok je Δt vrednost vremenskog koraka. Aproksimacija izvoda iz j-ne (7) po vremenu konačnim razlikama prvog reda se može sprovesti na dva načina. U zavisnosti od odabira vremenskog trenutka u intervalu t i $t + \Delta t$, na kom će se odrediti član $[A]\{h\}$, zavisiće da li je jednačina eksplicitnog ili implicitnog oblika. Ukoliko se član $[A]\{h\}$ određuje u prošlom vremenskom trenutku t , dobija se eksplicitna šema odnosno izvod je aproksimiran razlikama unapred. Ako je navedeni član aproksimiran u vremenskom trenutku $t + \Delta t$, onda je

šema implicitna odnosno izvod je aproksimiran razlikama unazad. U tom slučaju dobija se sledeći oblik matrične jednačine:

$$\left([A] + \frac{1}{\Delta t} [B] \right) \{h\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [B] \{h\}^t + \{f\} \quad (8)$$

Važno je apostrofirati, da se bez obzira na način aproksimiranja izvoda po vremenu, matrice $[A]$ i $[B]$ formiraju samo jednom u toku proračuna i njihova vrednost se ne menja tokom celog proračuna, dok se j -na (8) rešava u svakom vremenskom koraku. Slično se može reći i za vektor sila $\{f\}$, samo ukoliko definisani granični uslovi u vidu fluksa zapremina ili izvorni/ponorni članovi ne menjaju svoj intenzitet u toku vremena.

2.7 Granični uslovi

Problematika strujanja vode u poroznoj sredini razlikuje dva tipična načina za zadavanje graničnih uticaja u zavisnosti od dispozicije modela odnosno od onoga što želimo da predstavimo u numeričkom modelu. Prvi slučaj je zadavanje graničnog uslova proticaja odnosno fluksa zapremina a drugi definisanje pijezometarske kote u graničnom čvoru. Posebno se tretiraju obe varijante što je neophodno imati u vidu pri korišćenju metode konačnih elemenata. Opširnije o načinima zadavanja graničnih uslova se može pronaći u [5].

U prvom slučaju, ukoliko je i čvor na granici preko koje je definisan normalan odnosno upravani fluks, tada se granični integral iz j -ne (6.), može napisati koristeći Darsijev zakon preko definisanog fluksa:

$$f_{L_i} = \iint_D W N_{L_i} dx dy + \int_{\Gamma} \left(K_x \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} n_y \right) N_{L_i} d\sigma \quad (9)$$

Konvencija o predznaku je takva da su proticaji q_1 i q_2 pozitivni ako predstavljaju doticaj u elementa a negativni ako obeležavaju oticaj iz elementa.

Sledeći slučaj je kada je u čvoru L , definisan granični uslov u vidu konstantne pijezometarske kote h_L . Ako je h_L poznato, onda L -ta jednačina u sistemu mora biti redundantna ili suvišna. Vrednost graničnog integrala iz jednačine (6.) ne postoji ako samo izbacimo L -tu jednačinu iz sistema. U preostalim jednačinama sistema predstavljenog j -nom 13. javljaće se članovi koji poseduju poznatu pijezometarsku kotu h_L . Na taj način prenosi se uticaj graničnog uslova u ostatak sistema jednačina.

2.8 Upotreba softvera AutoMesh 2D za generisanje mreže konačnih elemenata

Trenutno je na internetu dostupan značajan broj kako slobodnih tako i licenciranih softvera za generisanje mreže konačnih elemenata. Pored „standalone“ varijanti ovih softvera, brojni programski paketi sadrže integrisane funkcije koje mogu obaviti zadatak ili se takve funkcije mogu preuzeti sa zvaničnih foruma ili sajtova (npr MatLab). Autori su u ovoj analizi koristili Fortran programski jezik za razvijanje numeričkog modela, koji se odlikuje znatno većom brzinom izvršenja od npr MatLab-a kao i nažalost manje „user-friendly“ okruženjem. Zbog toga je neophodno koristiti eksterni generator mreže konačnih elemenata. Na internet stranici <http://www.automesh2d.com> dostupan je slobodni softver AutoMesh 2D koji je u potpunosti kompatibilan sa programom koji je razvijen u okviru istraživanja koja su pratila ovaj rad.

Navedeni softver omogućava korišćenje kako trougaonih tako i četvorougaoanih konačnih elemenata, kao i lako eksportovanje ključnih podataka o mreži (npr matrice povezanosti elemenata). Više o samom softveru i načinu njegove upotrebe se može pronaći u odgovarajućoj publikaciji [6].

3 Primer

Primer korišćen za verifikaciju numeričkog modela parcijalne diferencijalne j-ne (1), predstavljenog u ovom radu je preuzet iz stručne literature [5]. Mreža konačnih elemenata predstavljena na izvornim slikama je relativno retka odnosno gruba, pa je odmah ispod predstavljena i mreža konačnih elemenata formirana u AutoMesh2D softveru korišćena od strane autora koja je znatno gušća. U okviru spomenute literature od rezultata su prikazane samo vrednosti pijezometarskih kota u određenim vremenskim trenucima, dok su u ovom radu pored pijezometarskih kota prikazani i vektori brzina strujanja u poroznoj sredini dobijeni kao proizvod koeficijenta vodopropusnosti i gradijenata pada pijezometarskih kota.

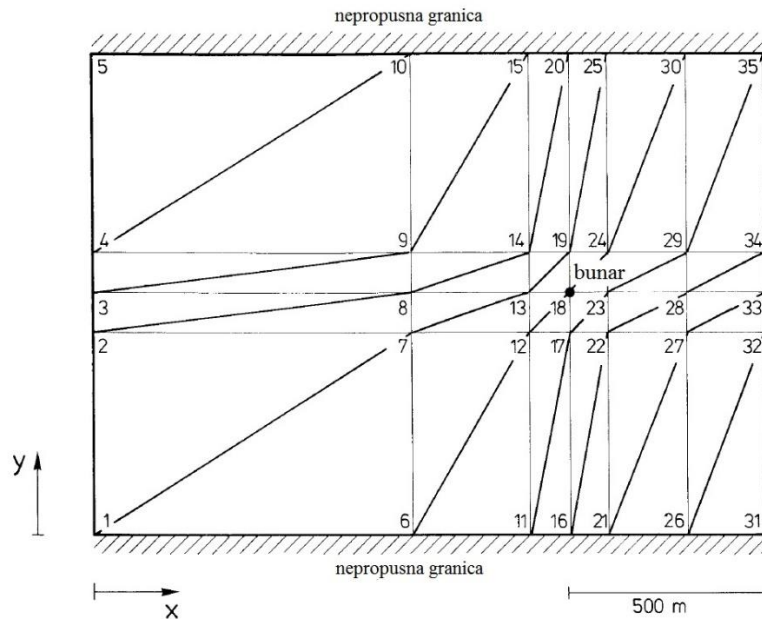
3.1 Usamljeni bunar u horizontalnoj ravni

Drugi primer, predstavlja nešto složeniji slučaj, zbog postojanja crpnog bunara. Naime, radi se o slučaju usamljenog bunara u akviferu koji je sa južne i severne strane oivičen nepropusnom granicom, a sa istočne i zapadne strane rezervoarima u kojima je fiksirana pijezometarska kota. Dispozicija problema, zajedno sa mrežom konačnih elemenata, korišćenoj u izvornoj literaturi je prikazana na slici 1 u horizontalnoj ravni. Domen je diskretizovan uz pomoć 24 trougaona konačna elementa definisana pomoću 35 čvornih tačaka. Koeficijent transmisivnosti je jednak u oba pravca i iznosi $T = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$. Budući da je ovde debljina sloja nepoznata i ne utiče na rezultate, koeficijent transmisivnosti se prosto koristi u svim prethodno spomenutim jednačinama umesto K . Specifična izdašnost je $S_s = 0.001$. Kapacitet crpnog bunara iznosi $W = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Preostali potrebni podaci su prikazani na slici 4. Na slici 2 je prikazana mreža konačnih elemenata korišćena za potrebe ovog rada koja se sastoji od 816 četvorougaoanih elemenata i 875 čvornih tačaka.

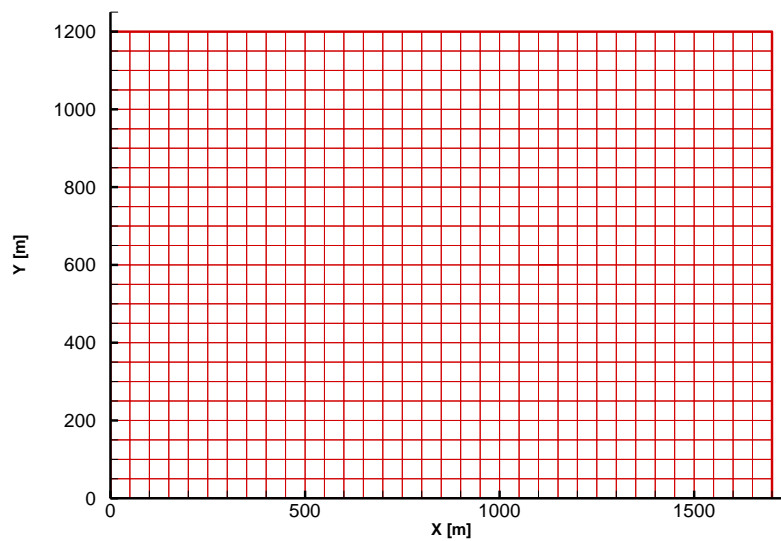
4 Rezultati i diskusija

Od rezultata analize, predstavljene su pijezometarske kote kao i vektori brzina filtracije za dva izabrana vremenska trenutka. Za vizuelizaciju rezultata korišćen je softver *Tecplot 10*. Predstavljeni rezultati (slike 3 i 4) se odnose na vremenske trenutke na $t_1 = 10000 \text{ s}$ i za $t_2 = 1000000000 \text{ s}$.

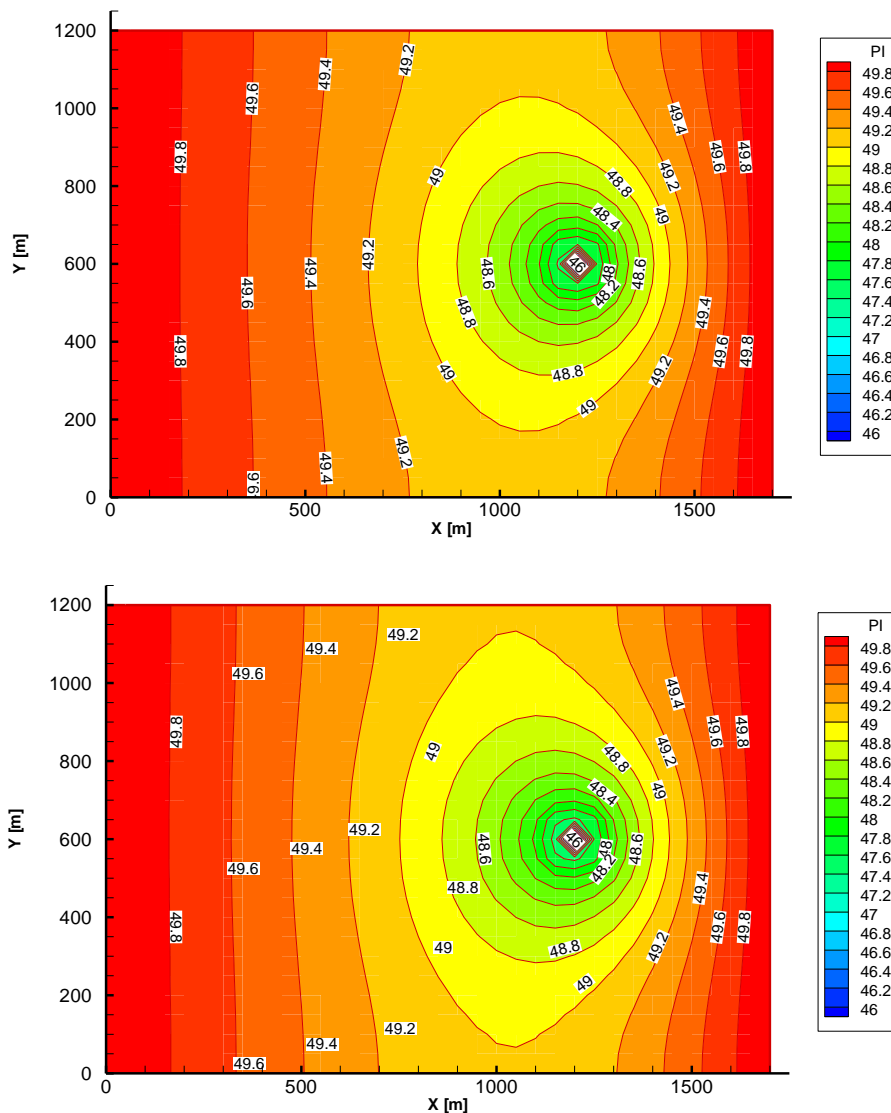
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Dispozicija problema i mreža konačnih elemenata za primer B; preuzeto iz [5]
Figure 1. Problem disposition and the finite element mesh for the example B; taken from [5]



Slika 2. Mreža konačnih elemenata za primer B dobijena primenom AutoMesh 2D
Figure 2. Finite element mesh for the example B obtained through the AutoMesh 2D



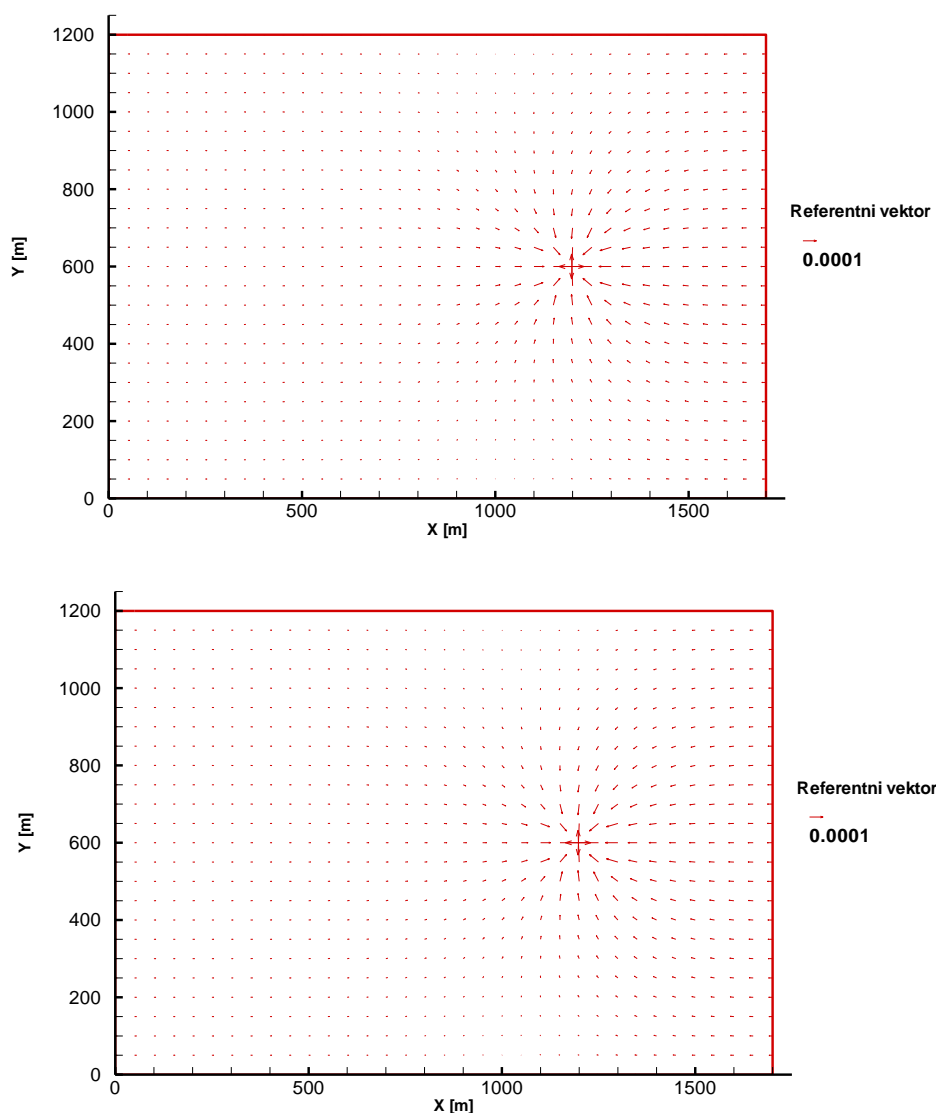
Slika 3. Sračunat raspored pijezometarskih kota za primer B: $t_1 = 10000s$ (gore) i $t_2 = 10^9s$ (dole)

Figure 3. Computed head distribution for the example B: $t_1 = 10000s$ (up) i $t_2 = 10^9s$ (down)

Poređenjem predstavljenih rezultata za određene vremenske trenutke sa rezultatima iz literature ustanovljeno je da postoji izvesno odstupanje. Npr ukoliko se razmatra čvor koji odgovara poziciji crpnog bunara (čvor 18 na slici 1), za vremenski trenutak t_2 , primenom programa *unsteady_seepg* razvijenog u okviru istraživanja koja su pratila ovaj rad, dobijena je vrednost pijezometarske kote od 45.74 m. Kinzelbach [5] u svojoj knjizi za isti čvor i mrežu prikazanu na slici 2 dobija vrednost pijezometarske kote od 47.07 m. Autoru se razlika od preko 1.3 m se na prvi pogled činila kao greška. Međutim kada je isti primer analiziran primenom mreže konačnih elemenata od 204 konačna elementa, dobijena je vrednost pijezometarske kote od 46.30 m. U odnosu na mrežu sa četiri puta više elemenata to je razlika od preko 0.5 m. Na osnovu dobijenih rezultata ustanovljeno je da su odstupanja rezultata

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

prouzrokovana znatno gušćim mrežama korišćenim u ispitivanjima iz ovog rada. Primenom gušćih mreža dobijene su znatno bolje aproksimacije „tačnog“ rešenja. Predstavljena činjenica ukazuje na potrebu primene mreža konačnih elemenata velike gustine kad god je to moguće, budući da razlike od preko 1 m u pjezometarskim kotama sigurno mogu znatno uticati na interpretaciju dobijenih rezultata. Dodatno, nakon objašnjenja uzroka pojave odstupanja vrednosti rezultata u odnosu na rezultate iz literature, može se konstatovati da je razvijeni numerički model verifikovan.



Slika 4. Sračunat raspored vektora brzina za primer B: $t_1 = 10000\text{s}$ (gore) i $t_2 = 10^9\text{s}$ (dole)
Figure 4. Computed velocity vector distribution for the example B: $t_1 = 10000\text{s}$ (up) i $t_2 = 10^9\text{s}$ (down)

5 Zaključak

Podzemne vode predstavljaju jedan od ključnih resursa za vodosnabdevanje. Matematičko modeliranje dinamike podzemnih voda je neophodno u cilju sprovođenja analiza kao što su npr bilansiranje raspoloživih količina ili transport zagađujućih materija. Neustaljeno strujanje vode u poroznoj sredini se matematički opisuje parabolikom, parcijalnom, diferencijalnom jednačinom drugog reda. Budući da se do analitičkog rešenja u opštem slučaju dosta teško dolazi, neophodno je pribеći nekom od numeričkih metoda za dobijanje aproksimativnog rešenja. U ovom radu je predstavljeno numeričko rešenje spomenute jednačine u dve dimenzije, metodom konačnih elemenata. Predstavljen je način kako se od početne parcijalne diferencijalne j-ne, primenom Galjorkinove metode i parcijalne integracije, dolazi do rezidualnog oblika jednačine. U radu je opisano kako se dolazi do globalnih matrica provodnosti i kapacitivnosti kao i vektora sila. Konačno nakon što se dobijena matrična diferencijalna jednačina diskretizuje u vremenu konačnim rezultatima dobija se sistem linearnih jednačina koji se može rešavati eksplicitno ili implicitno. Prikazana metodologija je primenjena u razvijanju numeričkog modela u FORTRAN okruženju.

Dva primera iz literature su iskorišćena za verifikaciju razvijenog programa. Numerički model je korišćen zajedno sa softverom AutoMesh2D koji se koristi za generisanje mreža konačnih elemenata. Predstavljeni su rezultati primene na predstavljenim primerima, gde je ustanovljeno da postoji izvesno odstupanje u odnosu na rezultate iz literature. Daljom analizom je pokazano da su odstupanja nastala zbog činjenice da je u analizama predstavljenim u ovom radu korišćena znatno gušća mreža konačnih elemenata. Samim tim predstavljeni rezultati su samo bolja aproksimacija tačnog rešenja.

Plan je da se u bliskoj budućnosti iskoristi numerički model dalje u kooperaciji sa modelom konvektivno-difuzne transportna jednačine, koji je i dalje u fazi razvoja. Jedan od neophodnih ulaznih podataka za ovaj budući model će biti vrednosti vektora brzina filtracija u čvorovima mreže, budući da je njime definisan konvektivni član transporta.

Literatura

1. Bathe, K.J., (1996), *Finite Element Procedures*, PRENTICE HALL, Upper Saddle River, New Jersey.
2. Durbin, T.J., (1978), *Calibration of a mathematical model of the Antelope Valley groundwater basin, California (Geological survey water-supply paper 2046)*, United States government printing office, Washington.
3. Jovanović, M., (2008), *Numeričke metode u hidrotehnici: Metoda konačnih elemenata – doktorski kurs*, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
4. Kapor, R., (2008), *Hidraulika*, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
5. Kinzelbach, W., (1986), *Groundwater modelling: an introduction with sample programs in BASIC*, Elsevier, Amsterdam.
6. Ma X.W., Zhao G.Q., Sun L., (2011), *AUTOMESH-2D/3D: robust automatic mesh generator for metal forming simulation*. Materials Research Innovations, 15(1), pp 482-486
7. McDermott, C., (2003), *Inside finite elements for outsiders*, Center for Applied Geology, Tubingen.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

8. Hoffman, J., (1992), *Numerical method for engineers and scientists 2nd ed.* Marcel Dekker, Inc., New York.
9. Wang, H.F., Anderson, M.P., (1982), *Introduction to groundwater modeling*, ACADEMIC PRESS, INC., San Diego.
10. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., (2000a), *The Finite Element Method Volume 1: The Basis*, Butterworth-Heinemann, 225 Wildwood Avenue, Woburn.
11. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., (2000b), *The Finite Element Method Volume 3: Fluid Dynamics*, Butterworth-Heinemann, 225 Wildwood Avenue, Woburn.

Poređenje metoda za proračun propagacije talasa za potrebe hidrološkog modeliranja

Žana Topalović¹

Marko Ivetić²

Jasna Plavšić³

APSTRAKT: U distribuiranim ili semi-distribuiranim hidrološkim modelima kao metode propagacije talasa u riječnim koritima najčešće se koriste približne hidrološke metode izvedene iz jednačine kontinuiteta. Cilj ovog rada je procjena greške koja se pravi ovim uprošćenjem da bi se dobio odgovor da li ima opravdanja za korišćenje jednostavnijih metoda za proračun propagacije talasa u riječnim dionicama hidrološkog modela ili bi trebalo ipak koristiti neki drugi matematički model. Analiza je sprovedena na primjeru riječne dionice Save. Porede se rezultati četiri različita matematička modela: Muskingum metoda iz grupe hidroloških približnih modela i ujedno vrlo često korišćena u hidrološkom modeliranju, kinematički i difuzioni talas iz grupe hidrauličkih približnih modela i dinamički talasa riješen metodom razdvajanja operatora. Metodom razdvajanja operatora pojednostavljuje se proračun kompleksnih jednačina kojima se opisuje model dinamičkog talasa što je vrlo pogodno u hidrološkom modeliranju te je iz tog razloga i odabrana. Algoritmi za proračun su napisani za programski jezik MATLAB® a rezultati simulacija su poređeni sa osmotrenim talasom na nizvodnoj stanici i to za kontinualnu višednevnu simulaciju i za jednu kratkotrajnu epizodu. Zaključuje se da pri kontinualnim simulacijama pojednostavljeni modeli za proračun propagacije talasa imaju opravdanje za primjenu, dok kod kraćih simulacija (epizoda) bi trebalo koristiti isključivo model dinamičkog talasa.

Ključne reči: propagacija talasa, hidrološki model, numeričke metode, razdvajanje operatora

Comparison of flood propagation methods for hydrological modeling

ABSTRACT: In a distributed or semi-distributed hydrological models flood wave propagation methods are commonly used as approximate hydrological methods derived from the continuity equation. Aim of this paper is to estimate the error made by this simplification and answer the question is there justification for use of simpler flood wave propagation methods in hydrological models, or one should use another mathematical model. The analysis is conducted on the Sava River example. Four different mathematical models are compared: Muskingum from the group of hydrological approximate flood wave propagation models also very often used in commercial hydrological models, kinematic and diffusion wave model from the group of hydraulic approximate flood wave propagation models and full dynamic wave model solved with the operator splitting method. Operator splitting method is chosen because significantly reduction of calculation of dynamic wave equations which is particularly convenient for the hydrological modeling. Algorithms for calculations are written for the MATLAB® programming language and results are compared with the downstream observed hydrograph for a) continuous several-days lasting simulation and b) short-term episode. Conclusion is that simplified models for flood propagation can be used for continuous simulations while for event simulation dynamic wave model should be used only.

Keywords: flood wave propagation, hydrological model, numerical methods, operator splitting

¹ Žana Topalović, dipl.inž.građ, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Stepe Stepanovica 77/III, Banja Luka, ztopalovic@aggfbl.org

² Prof. dr Marko Ivetić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 93, Beograd

³ Doc. dr Jasna Plavšić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 93, Beograd

1 Uvod

Proračun propagacije talasa kroz riječna korita je matematički model kojim se dobijaju promjene proticaja (brzine) i oblika poplavnog talasa za vrijeme njegovog prolaska kroz riječnu dionicu. Kod hidrološkog modeliranja, tendencija je da se ovaj proračun (*channel routing*) što više pojednostavi pa većina modela radi sa jednostavnim linearnim modelima propagacije talasa izvedenim iz jednačine kontinuiteta. Ovo ima opravdanje kod modeliranja malih slivova gdje pri oblikovanju izlaznog hidrograma dominira oticaj sa površine i pod-površine sliva. Međutim, kod velikih slivova upravo od proračuna propagacije talasa u vodotocima zavisi konačni oblik hidrograma, posebno ako postoji izlivanje iz korita što je slučaj kod poplava (K. Beven, 2001).

Gotovi hidrološki modeli, komercijalni ili nastali kao proizvod naučnog istraživanja, najčešće koriste jednostavne modele propagacije talasa u riječnim dionicama koje su veza susjednih slivova. Tako npr. široko zastupljeni besplatni softver Američke vojske HEC-HMS (Feldman, 2000) nudi Muskingum, Muskingum-Cunge ili kinematički model, HBV (Bergström, 1995; Seibert & Vis, 2012) Muskingum metod, Sacramento (Burnash, 1995) kinematički model, WMS modifikovanu att-kin metodu kinematičkog talasa. Model HydroGeoSphere (Therrien, 1992) propagaciju talasa računa sa modelom difuzionog talasa, Topmodel (K. J. Beven & Kirkby, 1979) posebnom funkcijom širine riječne mreže uz pretpostavku konstantne dubine u vodotoku dok jedino MIKE11 (DHI, 1992), pored Maskingum i Maskingum-Cunge metode nudi dinamički talas.

Većina softvera za modeliranje procesa padavine-oticač računa (efektivni) površinski oticaj i transformiše ga u npr. sintetički hidrogram oticaja koji predstavlja ulaz u riječnu dionicu. Na kraju dionice talas koji je „doputovao“ superponira se sa hidrogramom oticaja sa sljedećeg susjednog podsliva formirajući novi talas koji je ulaz u neku novu riječnu dionicu i tako do ušća. Greška maksimuma talasa ili vremena njegove pojave mogla bi napraviti popriličnu grešku u modeliranom proticaju, ali to su samo nagađanja koja treba uočiti, ako nije zanemarljivo, i kvantifikovati.

S tim u vezi, postavlja se pitanje da li bi se napravio iskorak ka modelu sa boljim performansama ukoliko bi „tačnije“ računao propagaciju talasa. Cilj ovog rada je upravo procjena greške koja se pravi uprošćenim metodama proračuna propagacije talasa na konkretnom primjeru da bi se dobio odgovor da li ima opravdanja koristiti jednostavne hidrološke metode propagacije ili bi trebalo koristiti neke druge, tačnije metode.

Na primjeru dionice rijeke Save dužine 25km između dvije vodomjerne stanice (VS) odabrane posebno zbog relativne blizine i nepostojanja pritoka na dionici. Na ovim stanicama je osmotren poplavni talas iz septembra 2010 godine sa mjerenjima na svaki sat. Za četiri različita matematička modela: Muskingum, kinematički, difuzioni i dinamički talas riješena pogodnim numeričkim metodama napisan je i pokrenut programski kod u MATLAB-u u cilju dobijanja nizvodnog talasa. Isti je poređen sa osmotrenim talasom na nizvodnoj stanici na osnovu čega je ustanovljena greška i izvedeni zaključci.

2 Modeli proračuna propagacije talasa

Još od XVII vijeka razvijaju se matematičke tehnike za proračun propagacije talasa u riječnim tokovima da bi 1871. Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant formulisao

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

osnovnu teoriju jednodimenzionalne analize propagacije talasa, danas poznate kao Saint-Venant jednačine. Njih čine jednačina održanja mase ili jednačina kontinuiteta i dinamička jednačina odnosno jednačina održanja količine kretanja. U zavisnosti od izbora promjenljivih, postoji nekoliko osnovnih oblika jednačina. Pri nepoznatom proticaju $Q(x,t)$ i dubini $h(x,t)$ jednodimenzionalne nekonzervativne Saint-Venant jednačine u pravcu toka x su (Ivetić, 2000):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gA(I_0 - I_{fx}) = 0 \quad (2)$$

gdje je B širina vodenog ogledala, q lateralni doticaj, A površina poprečnog presjeka korita,

$I_0 = \frac{\partial z}{\partial x}$ pad dna i $I_{fx} = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}}$ član trenja sa $R = \frac{A}{O}$ hidrauličkim radijusom.

Jednačina (1) predstavlja jednačinu kontinuiteta dok je (2) dinamička jednačina. Osnovne pretpostavke koje su uzete u obzir pri izvođenju prethodnih jednačina su:

- Tok je jednodimenzionalan tako da je brzina, po poprečnom presjeku, konstanta i nivo vode je horizontalan,
- Vertikalna komponenta ubrzanja je zanemarljiva pa nema promjene pritiska odnosno vlada hidrostatički pritisak po dubini toka,
- Trenje i turbulencija su uzete u obzir koristeći isti empirijski zakon kao kod ustaljenog tečenja (npr. Manningova jednačina).

Matematički modeli za proračun propagacije talasa se najčešće dijele na (Fread, 1985): empirijske modele bez zadržavanja zapremine, hidrološke približne modele bazirane na jednačini kontinuiteta, hidrauličke približne modele dobijene zanemarivanjem nekog od članova u dinamičkoj jednačini i kompletne jednačine tj. dinamički talas. Cunge (Cunge 1969) je pokazao da su hidrološki i hidraulički približni modeli ekvivalentni tako što je uz pretpostavku o jednoznačnoj vezi dubine i proticaja, što je klasični kinematički model, dobio Muskingum jednačinu koja je hidrološki približan model izveden iz jednačine kontinuiteta.

U narednom tekstu je kratki prikaz matematičkih modela propagacije talasa za četiri, u ovo radu, korišćene metode.

2.1 Muskingum metoda

Muskingum metoda spada u kategoriju približnih hidroloških modela izvedenih iz jednačine kontinuiteta (JK) kojom se uspostavlja veza između zapremine i oticaja. JK tada glasi:

$$U - I = \Delta S / \Delta t \quad (3)$$

gdje je U -ulazni proticaj, I -izlazni oticaj a ΔS -promjena zapremine za vrijeme $\Delta t = t_2 - t_1$. Pretpostavlja se veza između zapremine u riječnoj dionici sa ulaznim i izlaznim proticajem:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$S = K[X \cdot U + (1 - X)I] \quad (4)$$

K -zapreminska konstanta sa jedinicom vremena, X -je težinski koeficijent koji uzima vrijednost $0 \leq X \leq 1$.

Diskretizacijom jednačine (4) po vremenu preko centralne šeme konačnih razlika se dobija sljedeća jednačina za proračun izlaznog hidrograma:

$$I_2 = C_1 U_2 + C_2 U_1 + C_3 I_1 + C_4 \quad (5)$$

Koeficijenti u jednačini (5) su definisani sljedećim izrazima:

$$C_0 = K - KX + \Delta t / 2 \quad (6)$$

$$C_1 = [-(KX - \Delta t / 2)] / C_0 \quad (7)$$

$$C_2 = (KX + \frac{\Delta t}{2}) / C_0 \quad (8)$$

$$C_3 = (K - KX - \Delta t / 2) / C_0 \quad (9)$$

$$C_4 = (0.5(q_1 + q_2)\Delta x \Delta t) / C_0 \quad (10)$$

Veličina $0.5(q_1 + q_2)$ u jednačini (10) predstavlja bočni priliv doticaja duž dionice na rastojanjima Δx .

2.2 Kinematički model

Osnovna pretpostavka ovog modela je da su inercijalne i sile pritiska zanemarljive pa je težina fluida u ravnoteži sa trenjem. Time se odbacuju prva tri člana dinamičke jednačine (2) koja je u ovom slučaju:

$$I_{fx} = I_{0x} \quad (11)$$

Kinematički talas se rješava sa JK i Chezy-Manning-ovom jednačinom za jednoliko tečenje koje kad se uvrste u (1) i riješe daju konačni izraz:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{\alpha \beta Q^{\alpha-1}} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (12)$$

Parametri α i β definišu odnos proticaja Q i proticajne površine poprečnog presjeka korita A te se za poznate odnose proticaja i vodostaja kao i geometrije kanala mogu odrediti iz logaritamskog $A-Q$ dijagrama.

2.3 Difuzioni model

U difuzionom modelu, za razliku od kinematičkog, se obično računa sa silama pritiska pa se u dinamičkoj jednačini (2) zanemaruju prva dva člana. Međutim, ukoliko se želi

modelirati i povratno tečenje potrebno je uključiti i lokalni član ubrzanja čime se iz DJ izostavlja samo konvektivna komponenta ubrzanja. Tada DJ glasi, uz zamjenu $I_{fx} = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}}$:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - I_{0x} + \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} \right) = 0 \quad (13)$$

Uz JK ovakav model difuzionog talasa je jedan korak između klasičnog difuzionog modela i dinamičkog modela.

2.4 Dinamički model

Dinamički model su pune St Venant jednačine koje mogu da se riješe na mnogo načina. Jedan od pogodnih načina, po pitanju tačnosti i brzine proračuna, je metoda razdvajanja operatora (Ivetić, 2000). Osnovna ideja ove metode je razdvajanje drugog člana DJ $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$ na konvektivni (translacija) i difuzioni (ublažavanje) dio koji se sukcesivno rješava na polovinama vremenskog intervala. Dinamička jednačina tada postaje:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gA (I_0 - I_{fx}) = 0 \quad (14)$$

U prvom polovini vremenskog koraka rješava se JK i dio DJ koji utiče na ublažavanje. Njihovo rješenje predstavlja ulaz-poznate veličine za rješavanje drugog dijela DJ (translacija srednjom brzinom) na drugoj polovini Δt i JK na drugoj polovini intervala, što je ujedno konačno rješenje za taj vremenski korak.

Ovim se dobija pojednostavljenje rješenja parcijalne diferencijalne jednačine (PDJ) čije komplikovano rješenje razdvajanjem postaje zbirno rješenje dva jednostavnija pod-problema. Pomenuta šema je zapravo Strang-Marchuk šema razdvajanja operatora drugog reda koja je veoma popularna (Geiser, 2009) i u nekim specijalnim uslovima za razdvojene operatore može biti trećeg reda tačnosti i sa egzaktnim rješenjem (Strang, 1968).

3 Primjer primjene. Numeričko rješenje modela propagacije

3.1 Opis primjera i podaci

Numerički primjer koji treba da posluži za kvantifikaciju greške proračuna koja se pravi sa različitim matematičkim modelom je dionica rijeke Save u gornjem toku pri prolasku kroz Sloveniju, dužine 25km. Na uzvodnom kraju dionice nalazi se VS Litija a na nizvodnom Hrastnik. Duž dionice ne postoje značajnije pritoke a površina međusliva se procjenjuje na 355.4 km² (podaci iz Hidrometeorološkog Zavoda Republike Slovenije. Na ovim VS osmotren je poplavni talas iz septembra 2010 godine sa mjerenjima na svaki sat. Korito je prirodno, nepravilnog neprizmatičnog oblika poznatog samo u profilima VS, što je u praksi

pri hidrološkom modeliranju uglavnom slučaj. Na slici 1 prikazuje se mapa dionice sa uvećanim mjestima VS.



Slika 1. Google mapa dionice rijeke Save između stanica Litija (dole lijevo) i Hrastnik (dole desno)

Figure 1. Google map of Sava River reach between stations Litija (left) and Hrastnik (right)

Poprečni presjek korita je aproksimiran trapezom širine 42 m i srednjim nagibima obala 1:3. Pretpostavljen je konstantni pad dionice koji prema kotama dna na VS iznosi 1.4%. Veličina proticaja u toku osmotrenog poplavnog talasa je od 81-2156 m³/s. Pri ovim proticajima i usvojenom geometrijom kanala kritična dubina je 0.7-5.2m dok je normalna 1.4-8.8m što ukazuje na miran režim tečenja. Manning-ov koeficijent rapavosti je usvojen kao konstantan po čitavom obimu korita i duž dionice i iznosi $n = 0.035m^{-1/3}s$.

3.2 Numeričke šeme matematičkih modela propagacije

Muskingum model

Već je navedeno da je numerička šema za rješavanje Muskingum jednačine (5) centralna šema konačnih razlika kojom se diskretizuje samo po vremenu odnosno usvaja se neki vremenski korak Δt . Sa poznatim ulaznim hidrogramom U_i gdje je vremenski trenutak $j = (j-1) + \Delta t$ i sračunate koeficijente definisane jednačinama (6)-(9), izlazni (nizvodni) hidrogram se računa:

$$I_j = C_1 U_j + C_2 U_{j-1} + C_3 I_{j-1} \quad (15)$$

Bez lateralnog dotoka q koeficijent $C_4 = 0$.

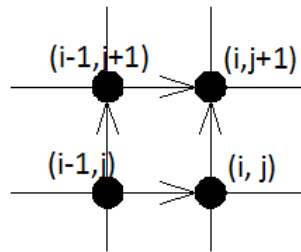
Stabilnost ove numeričke šeme je obezbijedena ako je ispunjen uslov (Xiaofang, Fanggui, & Mei, 2008):

$$\begin{aligned} X &\leq 0.5 \\ 1/2(1-X) &\leq K/\Delta t \leq 1/2X \end{aligned} \quad (16)$$

Za ovaj primjer usvojeni parametri modela su $X=0.3$ kao preporuka za prirodne vodotoke i odgovarajući parametar $K=1.6$ iz uslova stabilnosti.

Kinematički model

Usvojena numerička šema za rješavanje jednačine (12) je implicitna bezuslovno stabilna „kutija“ metoda (engl. *box*) ili metoda konačnih razlika sa četiri tačke (Lyngfelt, 1985; Miller, 1984) prikazana na slici 2.



Slika 2. Numerička šema proračuna kinematičkog talasa
Figure 2. Numerical scheme for kinematic wave solution

Prema ovoj šemi, nepoznati proticaj na mjestu i po dužini dionice i vremenu $j+1$ se računa iz jednačine:

$$Q_i^{j+1} = \frac{1}{1+C_r} (Q_i^j + Q_{i-1}^{j+1}) \quad (17)$$

Vrijednost $C_r = c \frac{\Delta t}{\Delta x}$ gdje je c brzina kinematičkog talasa $c = \frac{1}{\alpha\beta Q^{\alpha-1}}$. Koeficijenti α i β su procijenjeni prema poznatim krivama protoka i geometrije kanala i kasnije u modelu fino podešeni (kalibrisani) na vrijednosti $\alpha=0.55$ i $\beta=10$.

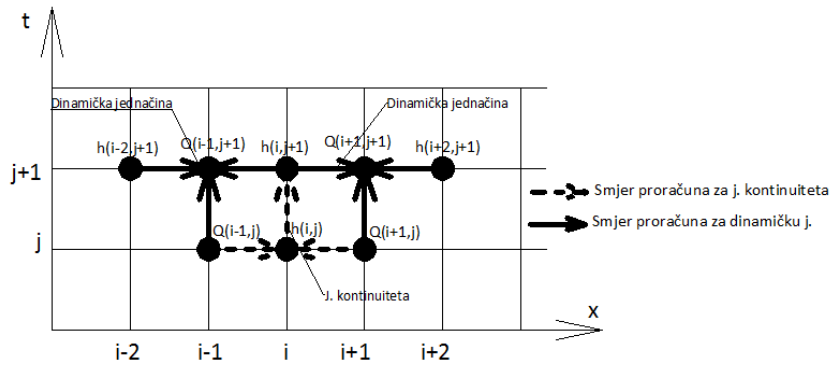
Difuzioni model

Jednačine ovog modela (1) i (13) su diskretizovane metodom konačnih razlika na smaknutoj mreži u pravcu toka uz prebacivanje proticaja iz člana trenja iz tekućeg vremenskog koraka j u naredni, koji se računa, $j+1$. Ovim šema postaje polu-implicitna i time dosta stabilnija. Konačne jednačine za proračun difuzionog modela sada glase:

$$h_i^{j+1} = h_i^j - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2\Delta x} \quad (18)$$

$$Q_{i+1}^{j+1} = \left[Q_{i+1}^j - g \cdot \Delta t \left(\frac{A_{i+2}^{j+1} + A_i^{j+1}}{2} \right) \left(\frac{h_{i+2}^{j+1} - h_i^{j+1}}{2\Delta x} - I_{0x} \right) \right] / \left(1 + g \Delta t \frac{n^2 |Q_{i+1}^j|}{\bar{K}} \right) \quad (19)$$

gdje je $\bar{K} = \left(\frac{A_{i+2}^{j+1} + A_i^{j+1}}{2} \right)^2 \left(\frac{R_{i+2}^{j+1} + R_i^{j+1}}{2} \right)^{4/3}$. Numerička šema je data na slici 3.



Slika 3. Numerička šema za proračun modela difuzionog talasa
Figure 3. Numerical scheme for difusion wave model solution

Stabilnost ove numeričke šeme je uslovljena Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) uslovom stabilnosti:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{|v| \pm \sqrt{gh}} \quad (20)$$

v -brzina tečenja, h -odgovarajuća dubina toka a Δt i Δx proračunski koraci po vremenu i duž toka, respektivno.

Dinamički model

Jednačine dinamičkog talasa (1) i (14) su diskretizovane takođe metodom konačnih razlika na smaknutoj mreži. Slično kao kod difuzione šeme i ova šema je postala polu-implicitna uvrštavanjem da je proticaj van zgrade za apsolutnu vrijednost u članu trenja iz tekućeg-računskog vremenskog trenutka. Sređivanjem jednačina i imajući u vidu Strang-Marchuk metod razdvajanja operatora na polovinama vremenskog intervala, konačne jednačine za proračun su:

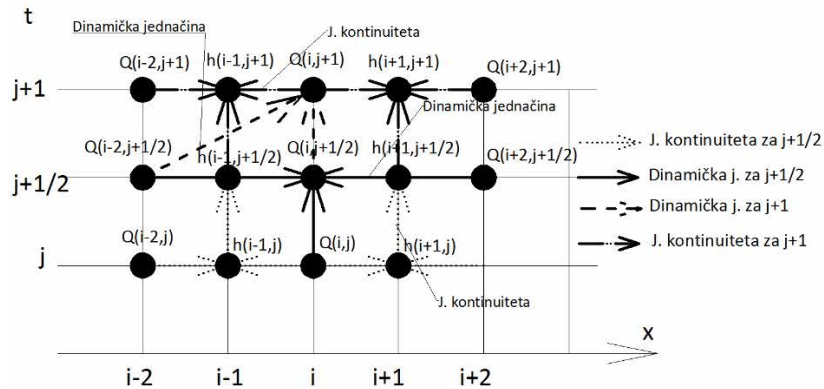
$$h_{i-1}^{j+1/2} = h_{i-1}^j - \frac{\Delta t / 2}{B \cdot 2\Delta x} (Q_i^j - Q_{i-2}^j) \quad (21)$$

$$Q_i^{j+1/2} = \frac{Q_i^j + \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{Q_i^j}{A_{i-1}^{j+1/2}} \right)^2 \frac{A_{i+1}^{j+1/2} - A_{i-1}^{j+1/2}}{2\Delta x} - g A_{i-1}^{j+1/2} \left(\frac{h_{i+1}^{j+1/2} - h_{i-1}^{j+1/2}}{2\Delta x} - I_{0x} \right) \right]}{1 + g \frac{\Delta t}{2} \frac{n^2 |Q_i^j|}{A_{i-1}^{j+1/2} (R_{i-1}^{j+1/2})^{4/3}}} \quad (22)$$

$$Q_i^{j+1} = Q_i^{j+1/2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \frac{Q_i^{j+1/2}}{A_{i-1}^{j+1/2}} (Q_i^{j+1/2} - Q_{i-2}^{j+1/2}) \quad (23)$$

$$h_{i-1}^{j+1} = h_{i-1}^{j+1/2} - \frac{\Delta t}{B \cdot 4\Delta x} (Q_i^{j+1} - Q_{i-2}^{j+1}) \quad (24)$$

Opisana numerička šema prikazuje se na slici 4.



Slika 4. Strang-Marchuk numerička šema za proračun modela dinamičkog talasa sa razdvojenim operatorima

Figure 4. Strang-Marchuk numerical scheme for dynamic wave model solution with operator splitting

Analizom stabilnosti ove numeričke šeme dobija se da je CFL uslov za prvu polovinu vremenskog koraka (Ivetić, 2000):

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta x} \leq \frac{1}{\sqrt{gh(1-F_r)}} \quad (25)$$

gdje je F_r Froudeov broj a za drugu polovinu je:

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta x} \leq \frac{1}{|v|} = \frac{1}{|Q/A|} \quad (26)$$

Poređenjem sa jednačinom (20) primjećuje se da su ovdje dozvoljeni vremenski koraci duži.

3.2 Početni i granični uslovi

Za proračun svake od gore navedenih numeričkih šema odnosno matematičkih modela potrebno je definisati početni uslov i jedan ili dva granična uslova da bi broj nepoznatih u jednačinama i broj jednačina bio jednak.

Kod Muskingum metode potrebno je definisati samo uzvodni granični uslov što je ulazni hidrogram osmotren na VS Litija. Za kinematički model pored uzvodnog graničnog uslova definiše se i početni uslov u trenutku $t=0$ što je početni proticaj $Q(t=0) = 97.1 \text{ m}^3 / \text{s}$ i odgovarajuća dubina $h(t=0) = 1.6 \text{ m}$ na svim mjestima i duž toka.

Za difuzioni i dinamički talas pored početnog i uzvodnog graničnog uslova potrebno je definisati i nizvodni granični uslov. Zbog smaknute mreže, nizvodni granični uslov se zadaje u presjeku gdje se računa dubina. Obzirom da su traženi rezultati proticaj na VS Hrastnik, dionica je za potrebe ova dva modela fiktivno produžena za dodatnih 4.5km tako da VS Hrastnik pada u presjek J gdje se računa proticaj. Na fiktivni krajnji presjek N gdje se računa dubina, „izmišljen“ je prag kao nizvodni granični uslov smatrajući da je dovoljno daleko od presjeka od interesa gdje se pregledaju rezultati. Uslijed praga kao kontrolnog presjeka gdje se javlja kritična dubina, veza proticaja i dubine je jednoznačna što nije slučaj kod difuzionog i dinamičkog talasa i stvarnih uslova toka u presjeku VS Hrastnik. Zahvaljujući ovome, iz energetske jednačine postavljene za krajnji presjek N i presjek praga:

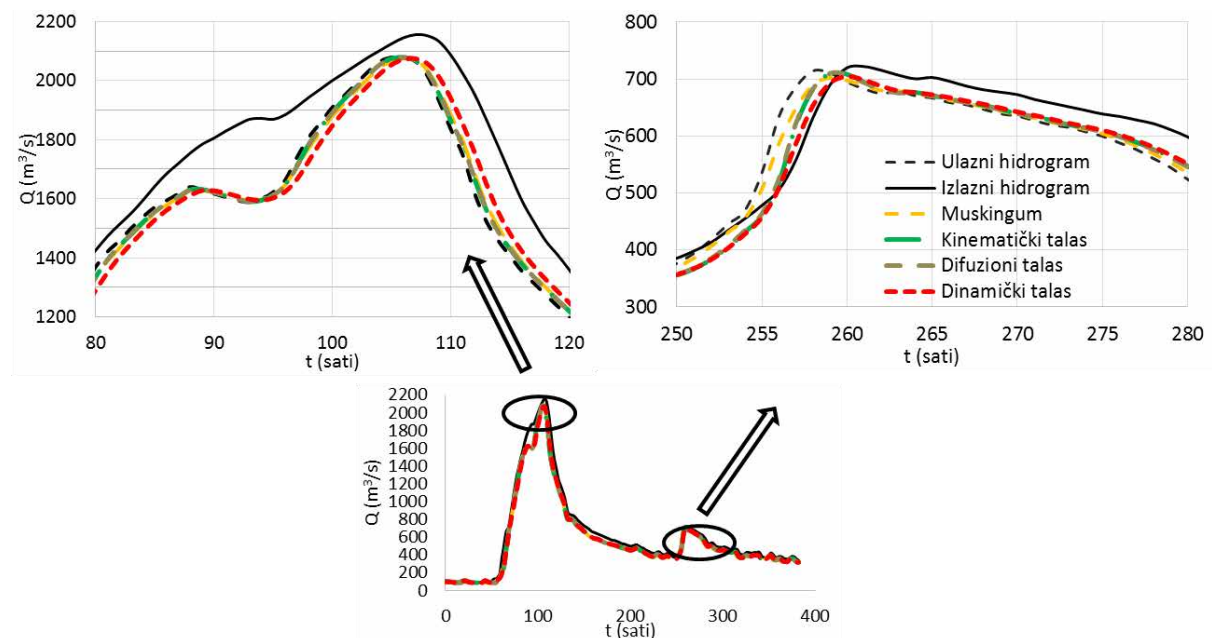
$$h_N + \frac{Q_{N-1}^2}{2gA_N^2} = p + h_{kr} + \frac{Q_{N-1}^2}{2gA_N^2}(1 + \xi) \quad (27)$$

može da se nađe veza proticaja i dubine koja će biti zapravo nizvodni granični uslov. Visina praga je podešena tako da približno odgovara važećoj krivoj proticaja na VS Hrastnik.

4 Rezultati i diskusija

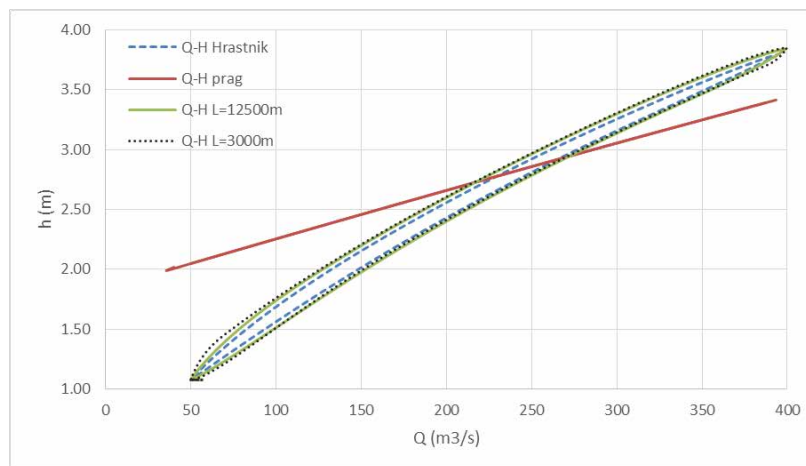
Prije simulacije sa izmjerenim hidrogramom, pravilnost proračuna napisanih kodova je provjerena sa jednim hipotetičkim oblika trapeza.

Rezultati proračuna sa ulaznim hidrogramom sa VS Litija su predstavljeni grafički na slici 5, i to pojedini karakteristični dijelovi hidrograma jer se na ukupnom, zbog dužine talasa od skoro 16 dana ne mogu primjetiti razlike.

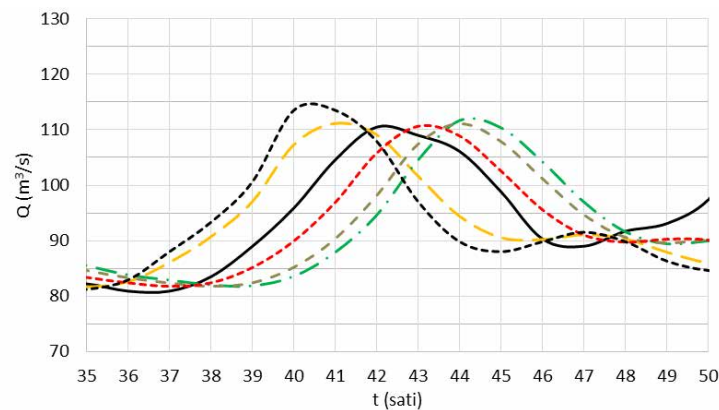


Slika 5. Rezultujući nizvodni hidrogrami-osmotreni i modelirani
Figure 5. Resulting downstream hydrographs-observed and simulated

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 6. Krive proticaja dobijene modelom dinamičkog talasa
Figure 6. Rating curves obtained form dynamic wave model



Slika 7. Poređenje metoda različitih modela propagacije za jedan manji talas
Figure 7. Comaprison of different propagation methods for one smaller wave

Najveće ublaženje se ostvaruje modelom dinamičkog talasa koji ujedno najbolje simulira vrijeme pojave maksimuma. Kroz pregled rezultata uočava se spora promjena oblika talasa duž čitave dionice što je očigledno karakteristika odabrane dionice. Takođe, osmotreni izlazni hidrogram na pojedinim dijelovima ima veće ordinate i vremenski je pomjeren ranije od ulaznog. Prvo može biti posljedica neuračunatog lateralnog dotoka dok je drugo greška vezana za krivu proticaju. Npr. kriva proticaja sa slike 6 dobijena simulacijom jednog manjeg talasa pokazuje nejednoznačnost veze proticaja i dubine koja se ne uračunava kod hidroloških mjerenja na vodomjernim stanicama.

Simulacijom modela za manji talas sva prednost dinamičkog modela je jasno uočljiva. Na slici 7 vidi se kašnjenje dinamičkog i kinematičkog talasa kao posljedica zanemarenih članova u dinamičkoj jednačini odnosno prerani maksimum koji se dobija Muskingum metodom.

Razlika dobijenih rezultata u odnosu na osmotreni hidrogram je ocijenjena sa nekoliko standardnih metoda ocjene greške između modeliranih i osmotrenih podataka. To su korijen srednje kvadratne greške $RMSE$, Nash-Sutcliff koeficijent efikasnosti modela NSE i srednje kvadratno odstupanje R^2 . Pored toga, upoređeno je vrijeme pojave maksimuma pojedine metode i osmotrenog hidrograma TTP . Pomenute mjere slaganja su sračunate za čitav talas

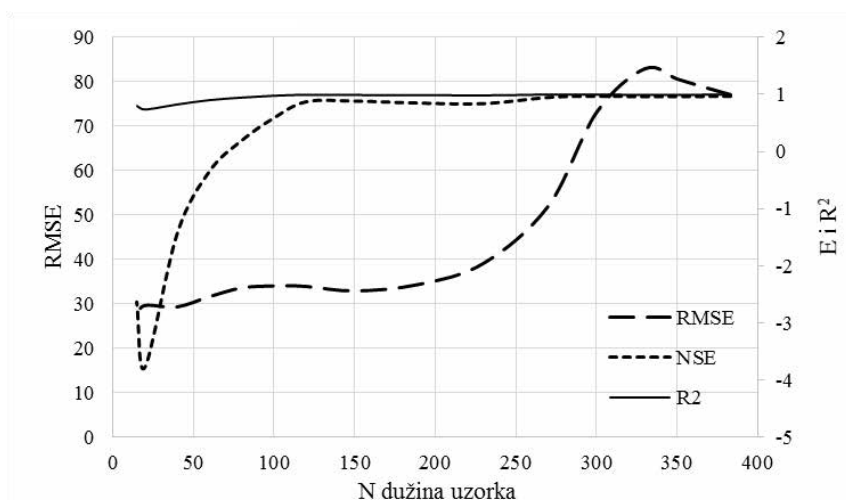
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

dužine 16 dana i za manji talas sa slike 7. Rezultati su prikazani u tabeli 1. Vrijednosti u zagradi su za kraći talas dok negativna vrijednost za TTP označava da je maksimum nastupio ranije.

Propagacijom poplavnog talasa iz septembra 2010 na rijeci Savi sa četiri odabrane metode dobijaju se nizvodni talasi sa neznatnim razlikama, sudeći po ocjenama greške iz tabele 1, gdje se veća prednost dinamičkog modela u odnosu na ostale vidi samo u tačnijem vremenu pojave maksimuma. Međutim, ocjene greške zavise od dužine uzorka za koji se računa, osim naravno za TTP koji zavisi od konvekcije talasa u zadatim uslovima toka i osobina kanala. Na slici 8 primjećuje se velika varijabilnost NSE i RMSE vrijednosti u zavisnosti od dužine uzorka za koji se računa sa tendencijom stabilizacije što je dužina uzorka veća. Naročito je to uočljivo kod NSE koji za manje uzorke uzima velike negativne vrijednosti što bi po definiciji trebalo da okarakteriše model nezadovoljavajućim. Jedino R^2 ostaje stabilna i vrlo malo promjenljiva u zavisnosti od dužine uzorka. Stoga, pri ocjeni greške modela za kraći talas ima smisla vrednovati samo rezultate R^2 i TTP koji su na strani dinamičkog modela.

Tabela 1. Greške modeliranih hidrograma za različite metode proračuna propagacije
Table 1. Modelled hydrograph errors for different propagation methods

Model	RMSE	NSE	R^2	TTP
Muskingum (K=1.6, X=0.3)	75.9 (10.2)	0.975 (0.005)	0.994 (0.665)	-1 (-1)
Kinematički talas $\alpha = 0.55; \beta = 10$	79.3 (12.7)	0.973 (-0.535)	0.992 (0.375)	-0.8 (2)
Difuzioni talas	79.0 (11.6)	0.973 (-0.278)	0.992 (0.543)	-1.1 (2.5)
Dinamički talas-metod razdvajanja operatora	77.2 (9.7)	0.975 (0.108)	0.994 (0.868)	-0.65 (1)



Slika 8. Zavisnost greške modela od dužine uzorka za primjer podataka na rijeci Savi i dinamičkog modela

Figure 8. Modelling error estimates and data length ratio for Sava River data example and dynamic wave model

5 Sažetak i zaključci. Preporuke za dalje istraživanje

U ovom radu odabrana su četiri modela propagacije talasa riješena odgovarajućim numeričkim šemama metode konačnih razlika za koje je napisan proračunski kod u MATLAB programskom jeziku. Na ovaj način, za primjer poplavnog talasa na rijeci Savi iz 2010 godine, dobijeni su hidrogrami oticaja u presjeku postojeće VS Hrastnik te upoređeni sa osmotrenim. Rezultati četiri modela: Muskingum, kinematički, difuzioni i dinamički talas, ukazuju da svaki od njih dovoljno dobro simulira izlazni hidrogram. Najveća greška zapravo potiče od činjenice da izlazni hidrogram „ide prije“ ulaznog. Veći proticaj u određenom vremenskom trenutku bi se mogao objasniti dotokom sa međusliva ili nekog manjeg povremenog potoka koji je u ovim proračunim azanemaren, međutim njegova vremenska pomjerenost u smislu da se desio prije ulaznog nije logična. Ovo vjerovatno potiče od greške u mjerenjima: osmatranja vodostaja, neadekvatna kriva proticaja ili greška obrađivača.

Ako se zanemari prethodno, dinamički model najbolje računa vrijeme pojave maksimuma u odnosu na ostale modele. Osim toga, pri dužoj simulaciji drugih prednosti nema. Poređenjem na manjem obimu podataka odnosno za kraći talas, razlike modela su uočljivije. Muskingum slabo modelira translaciju talasa, kinematički i difuzioni talas kasne dosta sa maksimumom dok je model dinamičkog talasa dosta bolji. Prema tome, pri kontinualnom (dužem) hidrološkom modeliranju izbor modela propagacije talasa neće mnogo promijeniti rezultate dok kod kraćeg (event) preporuka je koristiti dinamički talas.

Poređenje rezultata sofisticiranih matematičkih modela sa izmjerenim podacima u prirodi je potpuni izazov. Mjerenje podataka je jedna od velikih izvora greške koja može poprilično da osujeti rezultate poređenja i analiza ove vrste. Preporuka za dalje istraživanje je povezivanje modela propagacije sa hidrološkim modelom za proračun površinskog oticaja čime bi se dobila bolja slika kako pojedini model propagacije utiče na konačne rezultate. Takođe bi bilo poželjno proširiti istraživanje na više primjera: različitih vodotoka, dužina i veličina poplavnih talasa što očigledno ima uticaja na proračune.

Literatura

1. Bergström, S. (1995). The HBV model-its structure and application. In V. P. Singh (Ed.), *Computer models of watershed hydrology* (pp. 443–476). Colorado: Water Resources Publications.
2. Beven, K. (2001). *Rainfall-runoff modeling: The primer*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. <http://doi.org/ISBN-13 978-0-471-98553-2>
3. Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrologic Science Bulletin*, 24(1), 43–69.
4. Burnash, R. J. C. (1995). The NWS River Forecast System - catchment modeling. In V. P. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology* (pp. 311–366). Water Resources Publications.
5. DHI. (1992). MIKE 11 User Manual. Denmark: Danish Hydraulic Institute.
6. Feldman, A. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual. Davis: U.S. Army Corps of Engineers R&D Work unit #32444.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

7. Fread, D. L. (1985). Channel routing. In M. G. Anderson & T. P. Burt (Eds.), *Hydrological forecasting* (pp. 437–503). New Y: John Wiley & Sons Ltd.
8. Geiser, J. (2009). *Decomposition Methods for Differential Equations: Theory and Applications*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=j2dC7DhPsdgC&pgis=1>
9. Ivetić, M. V. (2000). *Računska hidraulika - Otvoreni tokovi*. Beograd: Građevinski fakultet.
10. Lyngfelt, S. (1985). *On urban runoff modelling*. Goteborg: Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology.
11. Miller, J. E. (1984). Basic Concepts of Kinematic-Wave Models. *U.S. Geological Survey*.
12. Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences, 16*(9), 3315–3325. <http://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
13. Strang, G. (1968). On the Construction and Comparison of Difference Schemes. *SIAM Journal on Numerical Analysis, 5*(3), 506–517. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/2949700?origin=JSTOR-pdf&seq=1#page_scan_tab_contents
14. Therrien, R. (1992). *Three-dimensional analysis of variably saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media*. University of Waterloo.
15. Xiaofang, R., Fanggui, L., & Mei, Y. (2008). Discussion of Muskingum method parameter X. *Water Science and Engineering, 1*(3), 16–23. <http://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2008.03.002>

Разматрање утицаја геометрије и хидрауличких отпора на основне одлике течења у кориту за велику воду

Иван Стојнић¹
Филип Мухић²
Дејана Ђорђевић³

САЖЕТАК: У раду је спроведен низ нумеричких огледа са циљем да се утврди како геометрија корита за велику воду (КВВ) и рапавост плавних површина утичу на размену количине кретања (РКК) између главног корита и плавних површина и њен удео у укупном „губитку” механичке енергије тока. У ту сврху коришћен је модел линијског устаљеног течења у КВВ воду који је заснован на РКК између главног корита и плавних површина. Испитивање је показало да се на плавним површинама, због уједначавања хидрауличких услова у попречном пресеку КВВ, удео РКК у укупном „губитку” енергије смањује са повећањем дубине независно од геометрије корита и рапавости плавних површина и да размена и њен удео постају већи у следећим случајевима: 1) када је главно корито дубље, 2) када се искључи једна плавна површина, и 3) када се повећа рапавост плавних површина. Промена удела РКК са повећањем дубине тока у главном кориту зависи само од рапавости плавних површина.

Кључне речи: корито за велику воду, размена количине кретања, „губитак” механичке енергије тока, ширина и рапавост плавне површине, однос дубине и ширине главног корита

Study of the influence of channel geometry and hydraulic resistance on flow characteristics in compound channels

ABSTRACT: A series of numerical experiments is conducted to determine how compound channel geometry and floodplain roughness affect both a momentum transfer between main channel and floodplains and its contribution to the total energy “loss”. To this aim, a 1D, exchange discharge model, which accounts for the momentum exchange between the main channel and floodplains, is used. It is found that the contribution of the momentum exchange to the total energy “loss” reduces on floodplains with the flow depth regardless of the compound channel geometry and floodplain roughness and that both, the momentum exchange and its contribution to the total energy “loss”, are increased in the following cases: 1) when the main channel aspect ratio decreases, 2) when compound channel is asymmetrical and 3) when the roughness of the floodplain increases. In the main channel, the variation in the momentum exchange contribution with the flow depth depends only on the floodplain roughness.

Keywords: compound channel, momentum exchange, energy “loss”, floodplain width and roughness, main channel aspect ratio

¹ Иван Стојнић, мастер инж. грађевинарства, демонстратор, Грађевински факултет Универзитета у Београду

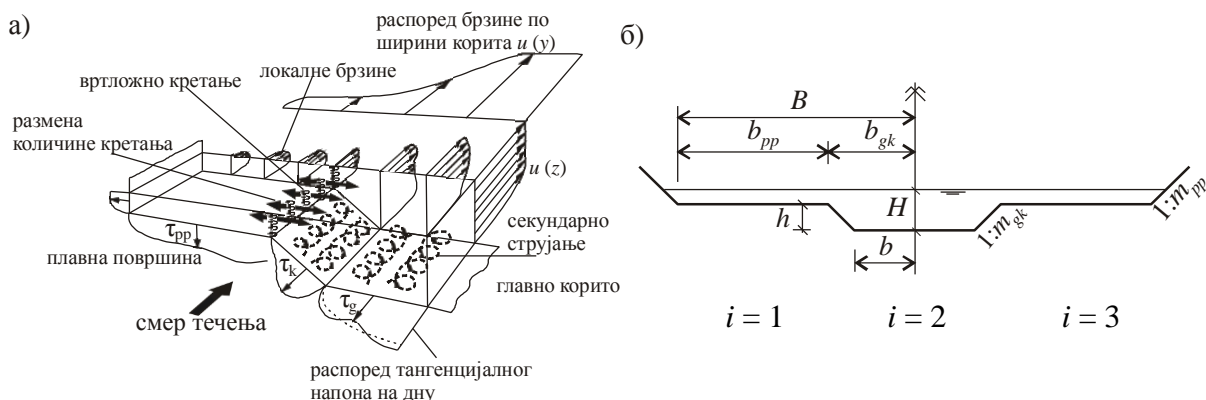
² Филип Мухић, дипл. грађ. инж., студент мастер студија, Грађевински факултет Универзитета у Београду

³ Др Дејана Ђорђевић, дипл. грађ. инж., доцент, dejana@grf.bg.ac.rs, Грађевински факултет Универзитета у Београду

1 Увод

Једна од главних одлика течења у кориту за велику воду, по којој се оно разликује од течења када се вода налази само у главном кориту, јесте размена количине кретања између бржег тока у главном кориту и споријег тока преко плавних површина (слика 1а). Успоравање тока на плавним површинама последица је наглог проширења корита и знатно веће рапавости плавних површина изазване присуством различитих врста растиња. То значи да се у кориту за велику воду енергија тока, осим за савлађивање отпора трења и облика, троши и на размену количине кретања између главног корита и плавних површина. За разлику од традиционалних, савремени модели линијског течења узимају у обзир ову размену и, као такви, пружају могућност да се процени удео размене количине кретања у укупном „губитку“ механичке енергије тока.

У овом раду се, помоћу једног таквог модела, испитује како геометрија сложеног корита и рапавост плавних површина утичу на размену количине кретања и њен удео у укупном „губитку“ енергије при различитим релативним дубинама воде на плавној површини. Реч је о тзв. моделу размене количине кретања (МРКК) који су крајем 1990их предложили Бузмар и Зек [2]. Модел је претходно проверен коришћењем резултата лабораторијских огледа [2, 3, 4 и 6]. Од геометријских карактеристика разматрају се утицај ширине корита за велику воду $2B/2b$ (где је $2B$ ширина корита за велику воду (КВВ) у нивоу обала, а $2b$ ширина у дну главног корита) и утицај облика главног корита који је одређен односом $2b/h$ (где је h дубина главног корита) – слика 1б. Када је реч о утицају рапавости плавних површина, разматрају се два случаја – један са непроменљивом рапавошћу ($n_{pp}(H - h) = \text{const}$, где је H дубина воде у главном кориту), који одговара случају стално потопљене ниске вегетације и други, са рапавошћу која се мења са променом дубине на плавној површини ($n_{pp} = f(H - h)$), који одговара дрвенастом и жбунастом растињу које штрчи изнад воде. У циљу сагледавања и рашчлањивања појединачних утицаја сваког од разматраних чинилаца, посматра се поједностављен случај течења у КВВ, а то је једнолико течење у симетричном, призматичном, двогубом трапезном кориту.



Слика 1. а) Просторно течење у КВВ [7] и б) геометрија КВВ
 Figure 1. а) Characteristics of overbank flow (after [7]) and б) geometry of compound channel

2 Математички модел

Математички модел линијског неустаљеног/устаљеног течења у КВВ, који су предложили Бузмар и Зек, сврстава се у групу тзв. физички заснованих модела. У њему се, приликом процене нагиба линије енергије, поред трења о чврсту границу, узимају у обзир и „губици” механичке енергије услед размене количине кретања између главног корита и плавне површине турбулентном дифузијом, као и они услед тзв. „геометријске” размене. „Губици” механичке енергије услед размене количине кретања турбулентном дифузијом последица су смицања између бржег тока у главном кориту и споријег тока на плавној површини, док су губици услед геометријске размене последица неприматичности корита. У циљу обухватања ових губитака, КВВ дели се вертикалним равнима на главно корито и плавне површине, а основне једначине исписују се за сваки део КВВ посебно. Утицај изостављеног суседног сегмента/суседних сегмената узима се у обзир увођењем додатних чланова у једначине. Тако се у једначину одржања масе уводи јединични бочни проток $q_b = q_{ul} + q_{izl}$ кроз граничну површину између сегмената, а у једначину одржања количине кретања, компонента протицаја количине кретања у правцу главног тока – $\rho q_{ul} u_b + \rho q_{izl} U$. Компонента бочног протока који улази у сегмент (бочни доток) означена је са q_{ul} , а компонента која из њега излази (бочно истицање), са q_{izl} . Брзина у суседном сегменту, којом се остварује унос количине кретања у правцу главног тока, означена је са u_b , док је U одговарајућа брзина у разматраном сегменту којом се „предаје” количина кретања суседном сегменту. Једначине одржања масе и количине кретања за сегменте $i = 1, 2, 3$ тада редом гласе:

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = q_{b_i} = q_{ul,i} - q_{izl,i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A_i U_i) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A_i U_i^2) + \rho g A_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} + \rho g A_i I_{tr,i} - \rho q_{ul,i} u_{b,i} + \rho q_{izl,i} U_i = 0 \quad (2)$$

Просторна координата x и време t у претходним једначинама представљају независно променљиве, ρ је густина воде, а g убрзање Земљине теже. Зависно променљиве величине су: површина разматраног дела попречног пресека A_i , која зависи од коте нивоа Z_i и проток кроз тај део попречног пресека Q_i . Средња брзина у том делу пресека је $U_i = Q_i / A_i$, а нагиб линије енергије услед трења, $I_{tr,i}$. Једначина одржања количине кретања може се, након одговарајућих трансформација и комбиновања са једначином одржања масе, превести у једначину одржања енергије. Она у условима устаљеног течења гласи:

$$-\frac{d}{dx} \left(Z_i + \frac{U_i^2}{2g} \right) = I_e = I_{tr,i} + \frac{q_{ul,i} (U_i - u_{b,i})}{g A_i} = I_{tr,i} + I_{rkk,i} = I_{tr,i} (1 + \chi_i), \quad i=1, 2, 3 \quad (3)$$

Други сабирак са десне стране знака једнакости представља „губитак” механичке енергије тока услед размене количине кретања између суседних сегмената. Њиме су обухваћени размена количине кретања турбулентном дифузијом и размена услед неприматичности корита. У МРКК са χ се обележава однос две компоненте нагиба

линије енергије ($I_{rkk} / I_{tr} = \chi$). Размена количине кретања турбулентном дифузијом моделира се на следећи начин:

$$q_{ul,i}^t (U_i - u_b) = \psi^t |U_i - u_b| (H - h_i) (U_i - u_b), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

а размена количине кретања услед непризматичности корита:

$$q_{ul,i}^s (U_i - u_b) = \psi^s \kappa_i \frac{dK_{pp}}{dx} \sqrt{I_{tr,pp}} (U_i - u_b), \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

У претходним изразима ψ^t и ψ^s представљају параметре модела чије се вредности подешавају поређењем да резултатима лабораторијских или теренских мерења, K_{pp} и $I_{tr,pp}$ су проточност плавне површине и нагиб линије енергије услед трења за плавну површину, а κ узима вредности из скупа $\{-1, 0, 1\}$ у зависности од тога који се сегмент КВВ посматра и да ли се КВВ сужава или шири (видети [2, 3, 4 и 6]).

У овом раду посматра се призматично корито ($q_{ul,i}^s = 0$), тако да губитак услед размене количине кретања обухвата само део који потиче од турбулентне дифузије.

3 Утицајни чиниоци

Течење у КВВ зависи од низа чинилаца који се, грубо, могу разврстати у неколико категорија. То су: геометријски, хидраулички, псамолошки и антропогени. У геометријске чиниоце убрајају се: ширина у дну главног корита $2b$ и његова дубина уз сваку од обала h_1 и h_3 , ширина КВВ у нивоу обала $2B$ (или ширина плавне површине $B - b - m_{gk} h_i$) – сви приказани на слици 1б, степен закривљености трасе главног корита и уздужни нагиб дна I_d . Од хидрауличких чинилаца то су протоци Q_{gk} и Q_{pp} или брзине V_{gk} и V_{pp} у главном кориту и на плавним површинама, дубина воде у главном кориту H , односно дубина воде на плавној површини $H - h_i$, $i = 1, 3$ и висина, распоред, густина и крутост елементарна рапавости на плавним површинама. У псамолошке се убрајају физичке особине наноса, а у антропогене, начин коришћења плавних површина. Као што је већ речено, у овом раду се посматрају само неки од геометријских и хидрауличких чинилаца и то у призматичном, праволинијском, симетричном/асиметричном каналу у условима једноликог течења. Без улажења у детаље димензионалне анализе, која превазилази обим овог рада, може се написати да је бездимензионална размена количине кретања између два сегмента корита за велику воду функција следећих бездимензионалних величина:

$$I_{rkk} = f \left(\frac{B}{b}, \frac{2b}{h}, \frac{H-h}{H}, \frac{n_{pp}}{n_{gk}}, Re, Fr \right) \quad (6)$$

од којих прве две одражавају утицај геометријских, а друге две, утицај хидрауличких чинилаца. Последње две су показатељи утицаја вискозности и гравитације. Првим чланом у изразу (6) обухвата се утицај ширине КВВ, односно ширине плавне површине, а другим, утицај облика попречног пресека главног корита на размену количине кретања (РКК)

између главног корита и плавних површина. Трећи члан представља релативну дубину воде на плавној површини, а четвртим се обухвата утицај рапавости плавних површина.

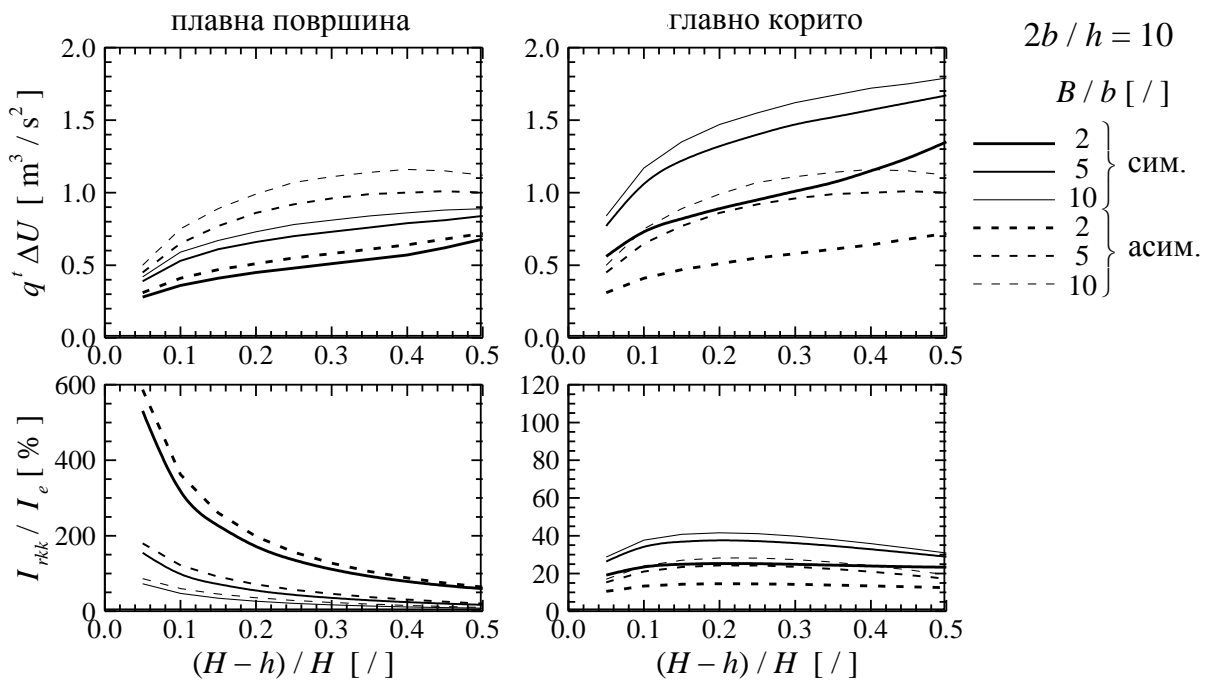
Ширина КВВ варираће се у широком распону вредности $B/b = \{2, 5, 10, 20, 40, 50, 75\}$. Разматрањима ће се обухватити два гранична случаја – случај КВВ ограничене ширине $B = 2b$ и хипотетички случај широке речне долине без објеката којима се ограничава КВВ ($B = 75b$) да би се утврдило да ли постоји вредност B/b при којој ширина плавне површине престаје да утиче на РКК. Истовремено ће се испитати и утицај искључења једне плавне површине (асиметрично КВВ). У свим анализираним случајевима главно корито је широко правоугаоно ($2b/h \geq 5$). С обзиром на то да вредност $2b/h$ дуж трасе корита може да се мења, у једној групи нумеричких огледа варираће се вредност овог односа у распону од 5 (што одговара доњој граници за категоризацију корита као широког правоугаоног) до 50 (што, нпр., одговара кориту реке Дунав у близини Београда), а разматрани скуп обухватиће следеће вредности $2b/h = \{5, 10, 20, 50, 75\}$. Утицај геометријских чинилаца сагледаће се у КВВ са „глатким” дном ($n_{pp} = n_{gk} = 0,010 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$). Имајући у виду да плавне површине покривају различите врсте растиња, испитивање утицаја рапавости плавних површина обухватиће два случаја. Први, са стално потопљеном вегетацијом (ливаде, ниске повртарске културе) у којем се претпоставља да се рапавост плавне површине не мења по дубини ($n_{pp}(H-h) = \text{const}$) и други, са дрвенастим и жбунастим растињем које штрчи изнад воде, када се рапавост мења по дубини ($n_{pp} = f(H-h)$). У случају променљиве рапавости претпоставља се да се она мења по закону утврђеном лабораторијским огледима [1], а у случају непроменљиве рапавости размотриће се следећи случајеви: $n_{pp}/n_{gk} \in [1,5; 5,0]$, при чему ће се вредност овог односа увећавати са кораком 0,5. У свим нумеричким огледима релативна дубина на плавној површини $(H-h)/H$ биће у распону од 0,05 до 0,50.

4 Нумерички огледи

Почетна геометрија главног корита у односу на коју су у нумеричким огледима вариране вредности испитиваних параметара подразумева ширину у дну главног корита од $2b = 50 \text{ m}$ и једнаку дубину корита уз сваку од обала $h_1 = h_3 = h = 5 \text{ m}$ (слика 16). Вредност Рејнолдсовог броја у свим огледима била је већа од 1×10^6 , а вредност Фрудовоог броја за цео пресек кретала се између 0,40 и 0,95 изузев у огледима у којима је $B/b = 2$. У том случају, вредности Фрудовоог броја биле су мало веће од 1,0.

Утицај ширине плавне површине испитан је за вредност параметра $2b/h = 10$ под претпоставком да је дно КВВ „глатко”. Огледима је обухваћен и случај искључења једне плавне површине (асиметрично корито). Резултати прорачуна приказани су на слици 2.

Може се приметити да и у симетричном и у асиметричном кориту РКК у оба смера – између главног корита и плавне површине $q'_{pp} \Delta U$ и између плавне површине и главног корита $q'_{gk} \Delta U$, монотонно расте са порастом вредности оба параметра – релативне дубине на плавној површини $(H-h)/H$ и релативне ширине плавне површине B/b (слика 2, први ред). Размена количине кретања на плавној површини код асиметричних корита већа је од размене у симетричним коритима за 7% до 45%, јер се искључењем једне плавне површине при истом нивоу воде повећава градијент брзине између главног корита и плавне површине. У симетричном кориту разлика брзина ΔU креће се



Слика 2. Утицај ширине плавне површине на размену количине кретања између суседних сегмената (први ред) и удео те размене у укупном „губитку” енергије (други ред) за симетрична и асиметрична КВВ са глатким плавним површинама

Figure 2. Effect of floodplain width on the: momentum exchange between adjacent compartments of a compound channel cross-section (first row) and its contribution to the total energy „loss” (second row) in symmetrical and asymmetrical compound channels with smooth floodplains

између 1,7 m/s и 5,9 m/s, а у асиметричном између 1,9 m/s и 6,5 m/s. Са друге стране, РКК за главно корито је у симетричном КВВ за 27% до 45% већа него у асиметричном, јер у укупном доприносу РКК у симетричном кориту учествују две плавне површине, за разлику од асиметричних корита где учествује само једна плавна површина.

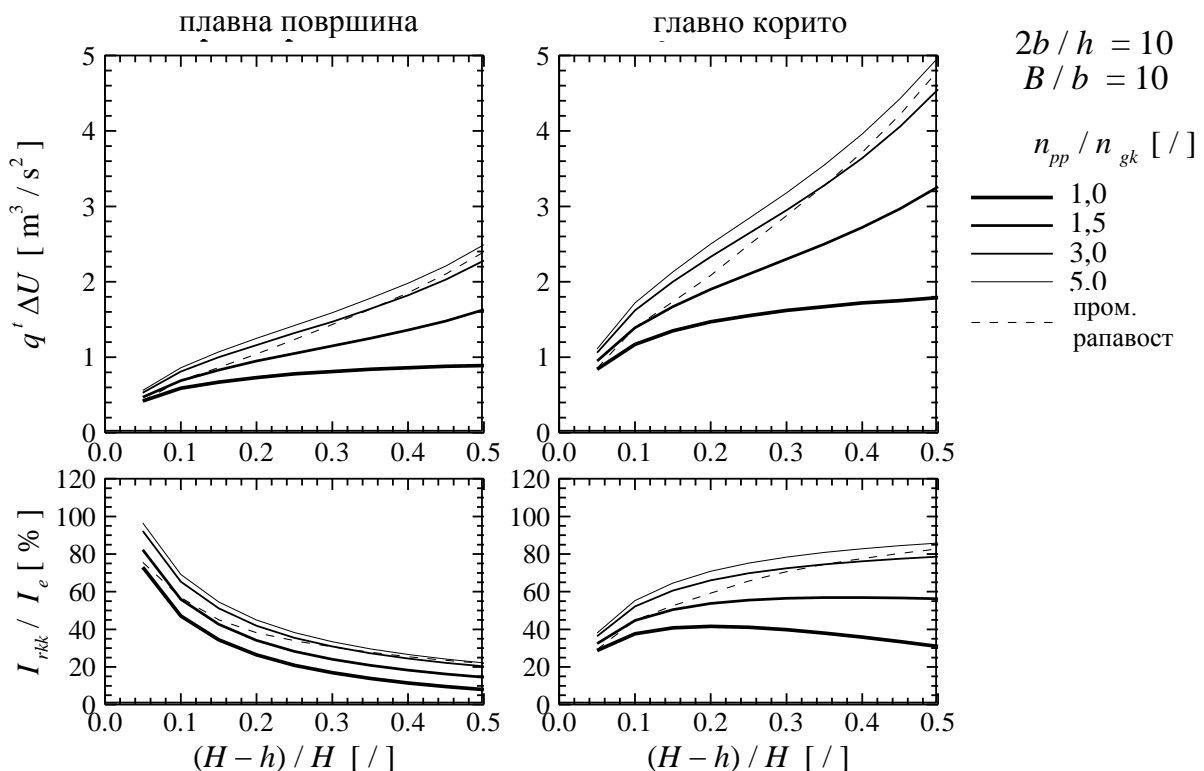
Разлика између плавних површина и главног корита постаје још очигитија када се посматра удео РКК у укупном губитку енергије (I_{rkk} / I_e). За плавне површине то је монотонно опадајућа функција, док за главно корито она има облик параболе. Удео РКК у укупном губитку енергије на плавним површинама (слика 2, други ред) већи је за асиметрична корита, као и сама РКК (слика 2, први ред). У главном кориту ситуација је обрнута. Смањење удела РКК у укупном губитку енергије на плавним површинама са повећањем релативне дубине, резултат је уједначавања хидрауличких услова у попречном пресеку КВВ, односно смањења градијента брзине између главног корита и плавних површина. У коритима са ужим плавним површинама ($B / b < 10$) удео РКК је већи, јер је у том случају ширина вртлога са вертикалном осовином, кроз који се размењује количина кретања, приближно једнака ширини плавне површине и утицај обала није занемарљив. На ширим плавним површинама ($B / b > 10$) утицај обала на појаве које се дешавају на прелазу из главног корита на плавне површине постаје занемарљив и потпуно се губи када је $B / b = 60$. У главном кориту, удео размене количине кретања достиже

највећу вредност за $(H - h) / H = 0,20$, а са даљим повећањем релативне дубине он монотono опада, што је у складу са закључцима лабораторијских испитивања [5].

Следећи корак у испитивању утицаја изабраних чинилаца јесте увођење у разматрање рапавости плавних површина. Због веће рапавости плавних површина у односу на рапавост главног корита, ток преко плавне површине је спорији у односу на ток преко „глатке” плавне површине, што за последицу има веће смицање између два тока и већу размену количине кретања између суседних сегмената КВВ. Најпре ће се размотрити утицај непроменљиве рапавости по дубини, а потом и утицај рапавости која се по дубини мења.

Утицај непроменљиве рапавости плавне површине испитан је на примеру симетричног КВВ код кога је $B / b = 10$, а $2b / h = 10$. Резултати за неколико изабраних вредности рапавости плавне површине укључујући и случај „глатке” плавне површине ($n_{pp} / n_{gk} = 1,0$) приказани су на слици 3.

Када је плавна површина рапава, РКК као и у случају „глатких” плавних површина, монотono расте са повећањем релативне дубине на плавној површини, а тај пораст је бржи и већи што је плавна површина рапавија (слика 3, први ред). Тако се повећање РКК у односу на „глатке” плавне површине за $n_{pp} / n_{gk} = 1,5$ креће се у распону од око 10% при мањим

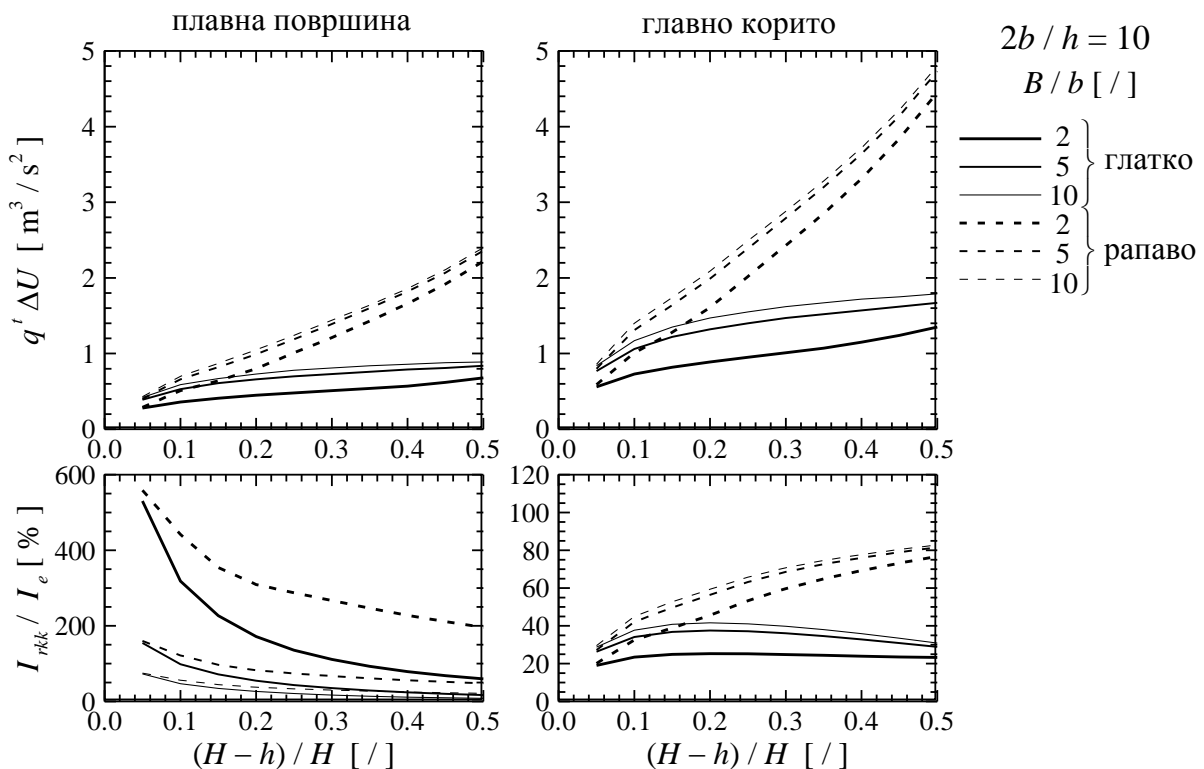


Слика 3. Утицај рапавости плавне површине на размену количине кретања између суседних сегмената (први ред) и удео те размене у укупном „губитку” енергије (други ред) за симетрична КВВ (случај непроменљиве рапавости по дубини)

Figure 3. Effect of floodplain roughness on the: momentum exchange between adjacent compartments of compound channel cross-section (first row) and its contribution to the total energy „loss” (second row) in symmetrical compound channels (case with constant value of roughness coefficient for all depths)

дубинама до 80% при $(H-h)/H = 0,50$, а за $n_{pp}/n_{gk} = 5,0$ оно расте од око 30% до приближно 180%. Занимљиво је запазити да се за једну дубину воде на плавној површини прираштај РКК услед повећања рапавости нелинеарно смањује. Примера ради, за $(H-h)/H = 0,50$, прираштај се смањује од око 80% за $n_{pp}/n_{gk} = 1,5$, до приближно 1% за $n_{pp}/n_{gk} = 5,0$.

Као и код „глатких” плавних површина, удео РКК у укупном „губитку” енергије на рапавим плавним површинама монотонно опада са порастом релативне дубине. Прираштај удела РКК са порастом рапавости плавних површина уједначенији је од прираштаја саме РКК. Линије $I_{rkk}/I_e((H-h)/H)$ су приближно паралелне (слика 3, други ред, лево), за разлику од линија $q^i \Delta U((H-h)/H)$ које се „зракасто” разилазе (слика 3, први ред). Линија која показује промену удела РКК у главном кориту у зависности од дубине на плавној површини мења облик са променом рапавости. При мањим вредностима рапавости плавних површина она има облик параболе, а са повећањем рапавости постаје монотонно неоппадајућа функција. Због тога прираштај удела РКК са повећањем дубине није уједначен као на плавним површинама, већ задржава исти карактер као димензионална величина $q^i \Delta U$.

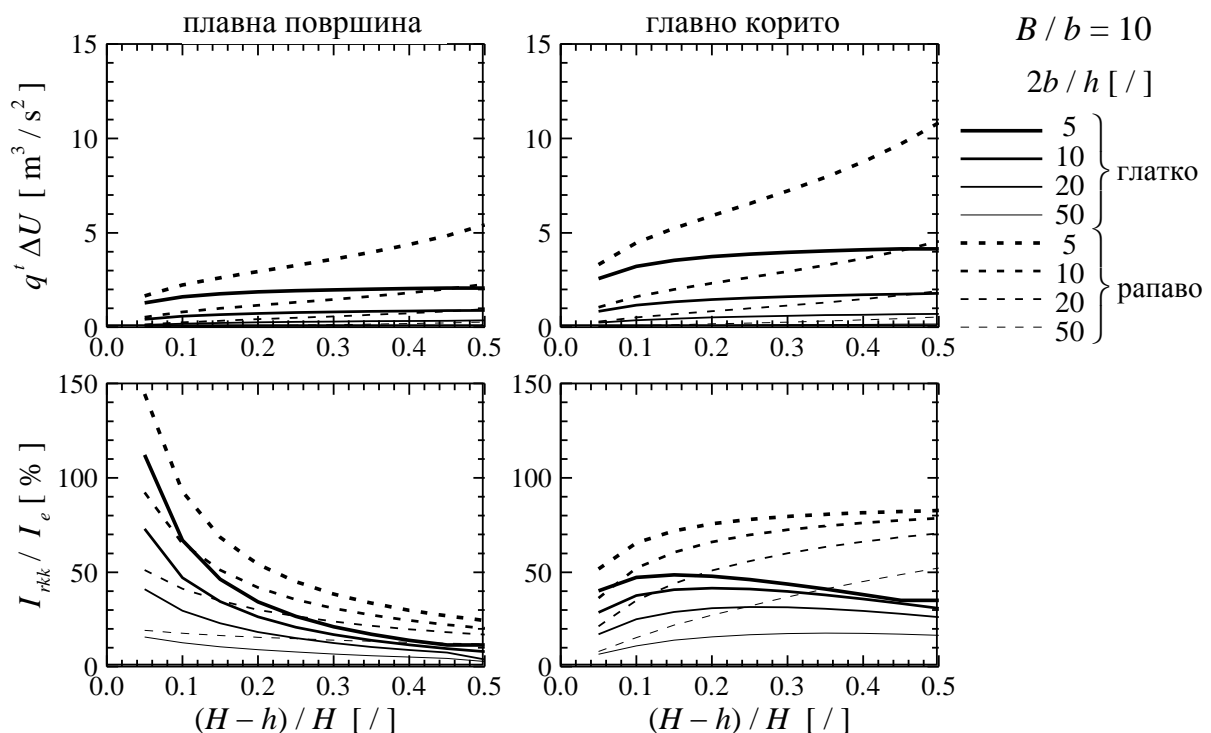


Слика 4. Утицај ширине и рапавости плавне површине на размену количине кретања између суседних сегмената (први ред) и удео те размене у укупном „губитку” енергије (други ред) за симетрична КВВ

Figure 4. Effects of floodplain width and roughness on the: momentum exchange between adjacent compartments of compound channel cross-section (first row) and its contribution to the total energy „loss” (second row) in symmetrical compound channels

Утицај променљиве рапавости плавне површине испитан је на примеру симетричног КВВ код кога је $2b/h = 10$. Разматрањима је обухваћен цео распон ширина КВВ $B/b = [2, 75]$. Резултати за неколико изабраних вредности B/b укључујући и одговарајуће случајеве „глатких” плавних површина ($n_{pp}/n_{gk} = 1,0$) приказани су на слици 4. Одмах се запажа да су на рапавим плавним површинама, због значајнијег смањења брзине, и РКК и градијент њеног пораста већи него на „глатким” плавним површинама (слика 4, први ред). Повећање РКК при малим релативним дубинама највеће је на уским плавним површинама ($B/b = 2$) и износи око 5%, а у КВВ код којих је $B/b \geq 10$ оно се смањује на приближно 2%. При највећим релативним дубинама $(H-h)/H = 0,50$, РКК на рапавим плавним површинама је од 1,6 до 2,3 пута већа од оне на „глатким” плавним површинама. Исто важи и за главно корито, где је, због симетрије, РКК двоструко већа него на плавној површини.

Повећање РКК на плавним површинама са променљивом рапавошћу за последицу има њен већи удео у укупном нагибу линије енергије и знатно спорије и мање опадање тог удела са повећањем дубине на плавној површини (слика 4, други ред, лево). Примера ради, за $B/b = 10$, удео РКК при $(H-h)/H = 0,5$ на рапавим плавним



Слика 5. Утицај односа ширине и дубине главног корита на размену количине кретања између суседних сегмената (први ред) и удео те размене у укупном „губитку” енергије (други ред) за симетрична КВВ

Figure 5. Effect of main channel aspect ratio on the: momentum exchange between adjacent compartments of compound channel cross-section (first row) and its contribution to the total energy „loss” (second row) in symmetrical compound channels

површинама износи око 20%, док се на „глатким” површинама смањује на приближно 8%. Повећање рапавости плавних површина одражава се и на закон промене удела РКК у главном кориту – параболе које на „глатким” плавним површинама достижу највећу вредност при $(H - h) / H = 0,20$, постају монотонно растуће линије на плавним површинама код којих се рапавост мења по дубини (слика 4, други ред, десно).

Занимљиво је запазити да се за $B / b = 10$ и $2b / h = 10$ РКК у КВВ са плавним површинама код којих се рапавост мења по дубини повећава са порастом нивоа врло слично као РКК у КВВ у којем је рапавост плавних површина константна и пет пута већа од рапавости главног корита. То, међутим, не важи за промену удела РКК у укупном „губитку” енергије. Удео РКК мањи је када се рапавост мења са дужином и на плавној површини се знатно спорије смањује са порастом нивоа него када је $n_{pp} / n_{gk} = 5,0$, док у главном кориту незнатно брже расте. Удео РКК за равномерну и удео за неравномерну рапавост се при великим дубинама воде $(H - h) / H \approx 0,5$ практично изједначавају и на плавној површини и у главном кориту.

Утицај односа ширине и дубине главног корита испитан је на примеру симетричног КВВ код кога је $B / b = 10$. На слици 5 упоређени су резултати за КВВ са „глатким” плавним површинама и рапавим плавним површинама код којих је $n_{pp} / n_{gk} = 3,0$. Запажа се да је РКК мања у плићем кориту (слика 5, први ред), јер су градијенти брзине између главног корита и плавне површине мањи код плићих него код дубљих корита. Примера ради, у КВВ са „глатким” плавним површинама за $2b / h = 50$ разлика брзина је око $\Delta U = 2,0$ m/s, док је за $2b / h = 5$ та разлика око $\Delta U = 3,0$ m/s, док у кориту са рапавим плавним површинама ове разлике износе око 2,7 m/s када је $2b / h = 50$, односно око 5,5 m/s када је $2b / h = 5$. Због тога је и промена удела РКК у укупном „губитку” енергије на плавним површинама израженија код дубљих него код плићих корита. Примера ради, за $2b / h = 5$ удео I_{rkk} / I_e се са порастом дубине нелинеарно смањује од око 110% на 11% на „глатким”, односно од 145% на 25% на рапавим плавним површинама. За $2b / h = 75$ одговарајући распони промене крећу се од 10–3% и од 12–10% (слика 5, други ред, лево). На промену РКК у главном кориту утичу и његова дубина и рапавост плавних површина. Када су плавне површине глатке, функција $I_{rkk} / I_e((H-h)/H)$ са смањењем дубине главног корита прелази од параболичне у монотонно неоппадајућу, а када су рапаве, монотонно неоппадајућа, прелази у монотонно растућу функцију (слика 5, други ред, десно).

5 Закључци

У овом раду спроведен је низ нумеричких огледа коришћењем модела линијског устаљеног течења у кориту за велику воду. Реч је о моделу који је претходно детаљно проверен коришћењем резултата лабораторијских огледа и који узима у обзир размену количине кретања између главног корита и плавних површина. Варирањем геометрије корита за велику воду и рапавости плавних површина утврђено је следеће.

1. Код симетричних корита РКК између плавних површина и главног корита двоструко је већа од размене између главног корита и плавне површине, зато што главно корито има два, а плавна површина само један суседни сегмент.
2. Удео РКК у укупном "губитку" механичке енергије на плавној површини смањује се са повећањем дубине независно од геометрије КВВ и рапавости плавних површина

- због уједначавања хидрауличких услова у попречном пресеку КВВ, односно због смањења градијента брзине између главног корита и плавних површина.
3. Искључење једне плавне површине, продубљење главног корита (смањење вредности односа $2b/h$) и повећање рапавости плавних површина код симетричних корита утичу на повећање удела РКК у укупном "губитку" механичке енергије тока, јер се у сва три случаја повећава РКК са главним коритом.
 4. У главном кориту промена удела РКК по дубини првенствено зависи од рапавости плавних површина. Када су плавне површине глатке, овај удео се мења по параболичном закону, а највећа вредност се достиже при оној релативној дубини при којој пресек престаје да буде хидраулички хетероген. На рапавим плавним површинама промена удела РКК зависи од тога да ли се рапавост мења по дубини или не. Када се рапавост не мења по дубини, промена удела РКК је монотono неоппадајућа функција, а када се рапавост повећава са дубином, прелази у монотono растућу функцију.
 5. Што је главно корито плиће, тј. што је вредност односа ширине и дубине корита већа, пресек КВВ је у хидрауличком смислу хомогенији, па се удео РКК и за плавну површину и за главно корито смањују.

Литература

1. Ackers, P., (1993), *Flow formulae for straight two-stage channels*, J. Hydr. Res., 31(4), pp 509-531.
2. Bousmar, D. and Zech, Y., (1999), *Momentum transfer for practical flow computation in compound channels*, J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(7), pp 696-706.
3. Ђорђевић, Д., Стојнић, И., Мухић, Ф., (прихваћен за штампу у часопису Водопривреда), *Приказ модела линијског течења у кориту за велику воду заснованог на размени количине кретања између главног корита и плавних површина*.
4. Мухић, Ф., (2015), *Модел линијског устаљеног течења у кориту за велику воду заснован на размени количине кретања између главног корита и плавних површина – утицај рапавости плавних површина на криву протока*, семинарски рад из предмета Одбрана од поплава, Грађевински факултет, Београд.
5. Myers, W.R.C. and Brennan, E.K., (1990), *Flow resistance in compound channels*, J. Hydr. Res., 28(2), pp 141-155.
6. Стојнић, И., (2014), *Модел линијског устаљеног течења у кориту за велику воду заснован на размени количине кретања између главног корита и плавних површина – утицај ширине плавних површина на криву протока*, семинарски рад из предмета Одбрана од поплава, Грађевински факултет, Београд.
7. Shiono, K., and Knight, D.W., (1991), *Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel*, J. Fluid Mech. Vol. 222, pp 617-646.

Процена криве протока у кориту за велику воду применом метода размене количине кретања и независних сегмената

Филип Мухић¹
Филип Станић¹
Иван Стојнић²
Дејана Ђорђевић³

САЖЕТАК: Овај рад се бави проблемима процене криве протока у кориту за велику воду (КВВ). Истраживања течења у КВВ током протеклих 25 година показала су да традиционалне методе не дају добру процену протока и да за те поребе треба користити моделе линијског течења који узимају у обзир размену количине кретања између главног корита и плавних површина. У овом раду користе се две рачунске методе којима се решавају једначине таквог модела линијског течења – метода размене количине кретања (МРКК) и метода независних сегмената (МНС). Успешност две методе оцењена је поређењем срачунатих протока са протоцима измереним у лабораторијском каналу за четири огледне поставке којима су обухваћени случајеви течења у симетричном и асиметричном праволинијском КВВ са глатким и рапавим плавним површинама. Показало се да су одступања за обе методе у границама грешке мерења (< 8%), као и то да обе методе добро процењују расподелу протока по сегментима.

Кључне речи: корито за велику воду, крива протока, модели линијског течења, размена количине кретања

Application of EDM and ISM methods in estimation of stage-discharge curve in a compound-channel

ABSTRACT: The paper addresses problems with a stage-discharge curve estimation in a compound channel. Investigations into flow in compound channels that have been conducting during last 25 years undoubtedly indicated that traditional methods could not be considered as a reliable tool for discharge estimations. Thus, new 1D models, which account for the momentum exchange between the main channel and the floodplain, have been developed. Two computational approaches to solving the model equations are used – namely, the exchange discharge method and the independent sections method. The quality of the two models is demonstrated through a comparison of the model results against measurements collected in four compound channel layouts that cover symmetrical and asymmetrical straight compound channels with smooth and rough floodplains. It is shown that discrepancies between the measured and calculated discharges are within the measurement error limit (< 8%), as well as that the discharge distribution between the main channel and floodplains is well predicted with both approaches.

Keywords: compound channel, stage-discharge curve, 1D-models, momentum exchange

¹ Филип Мухић и Филип Станић, студенти мастер студија, Грађевински факултет Универзитета у Београду

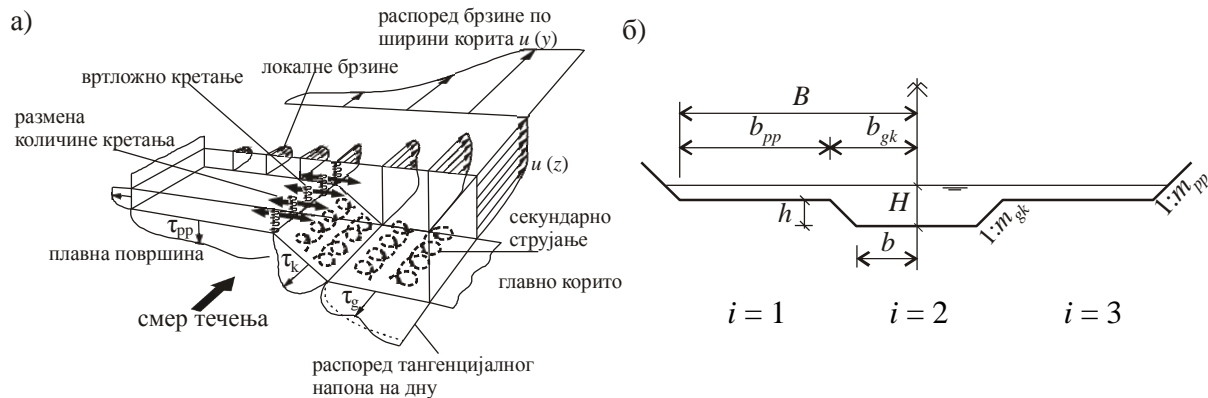
² Иван Стојнић, мастер инж. грађевинарства, демонстратор, Грађевински факултет Универзитета у Београду

³ Др Дејана Ђорђевић, доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду, dejana@grf.bg.ac.rs

1 Увод

Дефинисање криве протока у кориту за велику воду знатно је теже и сложеније од дефинисања криве протока у основном кориту. Због тешкоћа и опасности током теренских мерења, проток велике воде није могуће непосредно мерити, већ се његова вредност одређује посредно, на основу забележених трагова велике воде. У овом случају, вредност протока може се проценити или на основу утврђених хидрауличких зависности за објекте изграђене у речном кориту, ако они постоје (мостови, бране, каскаде итд.), или коришћењем математичких модела за прорачун течења у отвореним токови-ма. Преглед постојећих модела линијског течења у кориту за велику воду може се наћи у [3]. Традиционални модел, који се користи и у нашој инжењерској пракси, заснива се на подели пресека на хидраулички хомогене сегменте и коришћењу Шези-Манингове једначине која се исписује за сваки сегмент попречног пресека. Сложени пресек може се поделити на сегменте хоризонталним, вертикалним или дијагоналним равнима, али се у инжењерској пракси по правилу користи подела вертикалним равнима. За разлику од савремених модела, овај модел приликом процене нагиба линије енергије не узима у обзир размену количине кретања између суседних сегмената (слика 1а). Због тога су, како показују поређења са лабораторијским мерењима, вредности протока значајно прецењене (у зависности од дубине на плавној површини и до 60% [3]). У савременим математичким моделима течења у кориту за велику воду основне једначине (једначина одржања масе и једначина одржања количине кретања) исписују се за сваки сегмент сложеног пресека водећи рачуна о утицају суседног сегмента или сегмената.

У овом раду пореде се два модела – један, који је познат под називом метода размене количине кретања (МРКК) и други, познат под називом метода независних сегмената (МНС). Модел размене количине кретања предложили су крајем 1990-их Бузмар и Зек [2], док се модел независних сегмената појавио једну деценију касније. Метода независних сегмената, коју су предложили Пруст и ост. [5], представља унапређење модела Јена и ост. из 1985. године [5]. МРКК детаљно је описан у [2, 3, 4 и 7], а МНС у [5 и 6]. У МРКК систем једначина се погодним заменама преводи у једну нелинеарну једначину која се затим нумерички решава неком од метода интервала или тачака, док се у МНС систем нелинеарних једначина задржава и нумерички решава применом методе Њутн-Рафсона за систем једначина. Да би се оценила способност и успешност два модела у процени криве протока у различитим геометријским и хидрауличким условима, резултати оба модела упоредиће се са резултатима мерења из великог лабораторијског канала за испитивање течења у кориту за велику воду (КВВ) који је направљен у хидрауличкој лабораторији у Волингфорду у Великој Британији. Реч је о призматичном, симетричном, двогубом трапезном каналу у којем су сви огледи изведени у условима једноликог течења. За оцену два модела користиће се огледи у којима је разматран: 1) утицај ширине плавне површине (огледи са глатким плавним површинама, $B/b = \{2,2; 4,2\}$, где је $2B$ ширина корита за велику воду у нивоу обала, а $2b$, ширина у дну основног корита, слика 1б), 2) утицај повећане рапавости плавних површина (огледи за $B/b = 4,2$) и 3) утицај искључења једне плавне површине (огледи за $B/b = 4,2$). Циљ рада је да се утврди да ли и у којој мери усвојени приступ решавању проблема утиче на квалитет процене криве протока у призматичном КВВ.



Слика 1. а) Просторно течење у КВВ [8] и б) геометрија КВВ
 Figure 1. а) Characteristics of overbank flow (after [8]) and б) geometry of a compound channel

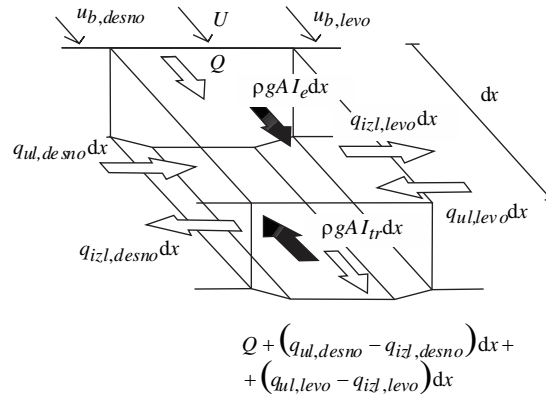
2 Математички модели

Основу оба математичка модела линијског неустаљеног/устаљеног течења у кориту за велику воду (МРКК и МНС) представља концептуални модел приказан на слици 1а. Попречни пресек сложеног облика у овим моделима дели се вертикалним равнима на хидраулички хомогене делове. У општем случају постоје три хомогена дела – главно корито и две плавне површине. Основне једначине – једначина одржања масе и једначина одржања количине кретања испишују се за сваки део сложеног пресека водећи рачуна о утицају изостављеног суседног сегмента или сегмената. Једначина одржања масе за елементарну деоницу дужине dx (слика 2) у оба модела је иста:

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = q_{b_i} = q_{ul,i} - q_{izl,i}, \quad i=1, 2, 3 \quad (1)$$

У њој су просторна координата x и време t независно променљиве, а зависно променљиве су: површина разматраног дела попречног пресека A_i , проток кроз тај део пресека Q_i и јединични бочни проток $q_{b,i}$. Јединични бочни доток и истицање, и размена протока између сегмената турбулентном дифузијом се у призматичним коритима међусобно потиру, јер представљају величине истог интензитета, али супротног смера. То, међутим, не важи за размену количине кретања између главног корита и плавних површина турбулентном дифузијом.

Између једначине одржања количине кретања (ј.о.к.к.) за МРКК и МНС нема суштинске разлике – у обе једначине, осим силе трења о чврсту границу, узимају се у обзир и привидна сила смицања између два напоредна тока из суседних сегмената у којима вода тече различитим брзинама и размена количине кретања услед непризматичности корита. У ј.о.к.к. за МНС ова два додатна узрока "губитка" механичке енергије тока посматрају се и моделирају одвојено, док су у ј.о.к.к. за МРКК обједињена у јединственом члану који се, потом, посебно моделира. Једначина одржања количине кретања за сегменте $i = 1, 2, 3$ у МРКК има следећи облик:



Слика 2. Схема сила и утицаја за контролну запремину једног сегмента КВВ (главно корито, према [2])

Figure 2. Momentum equilibrium for compound channel subsection (after [2])

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A_i U_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A_i U_i^2) + \rho g A_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} + \rho g A_i I_{tr,i} - \rho q_{ul,i} u_{b,i} + \rho q_{izl,i} U_i = 0 \quad (2)$$

а у МНС:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A_i U_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A_i U_i^2) + \rho g A_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} + \rho g A_i I_{tr,i} \mp \tau_{ij} (H - h_i) - \rho q_{ul,i} U_{ul,i} + \rho q_{izl,i} U_{izl,i} = 0 \quad (3)$$

Величине у претходним једначинама имају следеће значење: ρ је густина воде, $U_i = Q_i / A_i$ је средња брзина у разматраном делу попречног пресека (i), Z_i је ниво воде у сегменту i , g је убрзање Земљине теже, $I_{tr,i}$ је нагиб линије енергије услед трења у сегменту i , $u_{b,i}$ је брзина у суседном сегменту којом се остварује унос количине кретања, и то она њена компонента која је усмерена је у правцу главног тока, τ_{ij} је алгебарска вредност привидног напона смицања у вертикалној равни која раздваја сегменте i и j , q_{ul} и q_{izl} су јединични протоци који брзинама U_{ul} и U_{izl} улазе у сегмент i , односно из њега излазе. У МРКК јединични бочни протоци q_{ul} и q_{izl} представљају збир бочног дотока, односно бочног истицања услед турбулентне дифузије (општа ознака q^t) и непризматичности корита (општа ознака q^g , тзв. геометријска размена), док се у МНС њима искључиво обухвата геометријска размена. Једначине (2) и (3) се одговарајућим трансформацијама (видети [3, 4, 6 и 7]), превode у одговарајуће једначине одржања енергије. Те једначине у условима устаљеног течења за $i = 1, 2, 3$ имају следећи облик:

$$\text{МРКК: } I_e = -\frac{d}{dx} \left(Z_i + \frac{U_i^2}{2g} \right) = I_{tr,i} + \frac{q_{ul,i} (U_i - u_{b,i})}{g A_i} = I_{tr,i} + I_{rkk+m,i} = I_{tr,i} (1 + \chi_i) \quad (4)$$

$$\text{МНС: } I_e = -\frac{d}{dx} \left(Z_i + \frac{U_i^2}{2g} \right) = I_{tr,i} \pm \frac{\tau_{ij} (H - h_i)}{\rho g A_i} + \frac{q_{ul,i} (U_i - U_{ul,i}) + q_{izl,i} (U_{izl,i} - U_i)}{g A_i} = I_{tr,i} + I_{rkk,i} + I_{m,i} \quad (5)$$

Укупан „губитак“ механичке енергије I_e у МНС, као што је речено, представља збир „губитака“ услед: трења I_{tr} , размене количине кретања између суседних сегмената турбулентном дифузијом I_{rkk} и размене масе између сегмената I_m (када је корито не-призматично). У МРКК сви додатни „губици“ обједињени су у једном члану I_{rkk+m} . Када се они изразе у односу на „губитак“ енергије услед трења ($\chi = I_{rkk+m} / I_{tr}$), систем од три нелинеарне једначине са три непознате брзине (4) може се, уз одговарајућа физичка ограничења, превести у једну нелинеарну једначину са једном непознатом, која се потом решава применом методе Њутн-Рафсон (видети [2, 3, 4 и 7]). При томе се претпоставља да је ниво воде у попречном пресеку КВВ хоризонталан ($Z_i = Z = \text{const}$ и $I_{e,i} = I_e$, $i = 1, 2, 3$). Ова претпоставка важи и у МНС у којој се за прорачун размене количине кретања турбулентном дифузијом користи исти модел као у МРКК:

$$\left| \tau_{ij} \right| (H - h_i) = \rho \psi^t (U_i - U_j)^2 (H - h_i) \text{ за МНС, односно } q_{ul,i}^t = \psi^t (U_i - U_j) (H - h_i) \text{ за МРКК (6)}$$

где је ψ^t параметар модела којег аутори називају коефицијентом размене количине кретања турбуленцијом [5]. Оптимална вредност овог параметра одређује се калибрацијом. Геометријска размена се у оба случаја моделира на исти начин:

$$q^s = \psi^s \kappa \frac{dK_{pp}}{dx} \sqrt{I_{tr,pp}} \quad (7)$$

где је ψ^s параметар модела који се у МРКК, као и ψ^t , калибрише, док је у МНС $\psi^s = 1$. Параметар κ узима вредности $\{-1, 0, 1\}$ у зависности од тога да ли се КВВ сужава или шири (видети [2, 3, 4 и 7]). Величине K_{pp} и $I_{tr,pp}$ представљају, редом, проточност и нагиб линије енергије услед трења на плавној површини. За разлику од МРКК, у МНС се не уводе смене променљивих, већ се решава систем једначина (5) применом методе Њутн-Рафсон за системе нелинеарних једначина (видети [6]).

За потребе процене кривих протока у КВВ написана су два програма у софтверском пакету МАТЛАВ – један по методи размене количине кретања и други, по методи независних сегмената. У наставку се пореде резултати ова два модела коришћењем резултата лабораторијских огледа.

3 Оцена подобности два модела за процену криве протока у КВВ

Успешност МРКК и МНС у процени криве протока у КВВ оцењена је коришћењем података прикупљених у великом лабораторијском каналу за испитивање течења у КВВ, направљеном у хидрауличкој лабораторији у Волингфорду, у Великој Британији. Да би се истакла предност ове две методе у односу на традиционалне методе за процену криве протока у КВВ, приказани су и резултати добијени применом методе јединственог пресека (МЈП) и методе хидраулички хомогених сегмената (МХХС).

3.1 Опис лабораторијског канала и огледа

Огледи који су коришћени за оцену два модела спроведени су у каналу који је дугачак 56 m и широк 10 m. У њему је направљено двогубо трапезно корито тако што је главно корито изливено у бетону и прекривено углачаном цементном кошуљицом, док су плавне површине направљене од плоча плексигласа. Основне димензије корита сложеног симетричног попречног пресека са слике 1б дате су у табели 1. Као што се види, за проверу и процену успешности два модела коришћене су три различите геометрије, с тим што је једна разматрана у варијанти са „глатким” и рапавим плавним површинама. Прве две огледне поставке у којима је разматран утицај ширине плавне површине на течење у КВВ (огледи 2 и 3) послужиле су за испитивање осетљивости модела на промену ширине КВВ. Прва и трећа (оглед 6) искоришћене су за проверу способности модела да репродукује услове течења у случају искључења једне плавне површине (асиметрично корито), а прва и четврта (оглед 7) његову способност да процени криву протока у реалним условима у којима су плавне површине рапаве и на којима рапавост расте са повећањем дубине (случај растиња које штрчи изнад воде). За глатке равне површине коришћена је процењена вредност Манинговог коефицијента рапавости од $n = 0,01 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, а за рапаве, зависност утврђена обрадом резултата мерења [1]. Сви огледи изведени су у условима једноликог течења, при чему је у сваком од њих варирано по осам дубина. Нагиб дна канала је у свим огледима био исти и износио је 1,027‰.



Слика 3. Лабораторијски канал за испитивање течења у кориту за велику воду [8]

Figure 3. Flood Channel Facility [8]

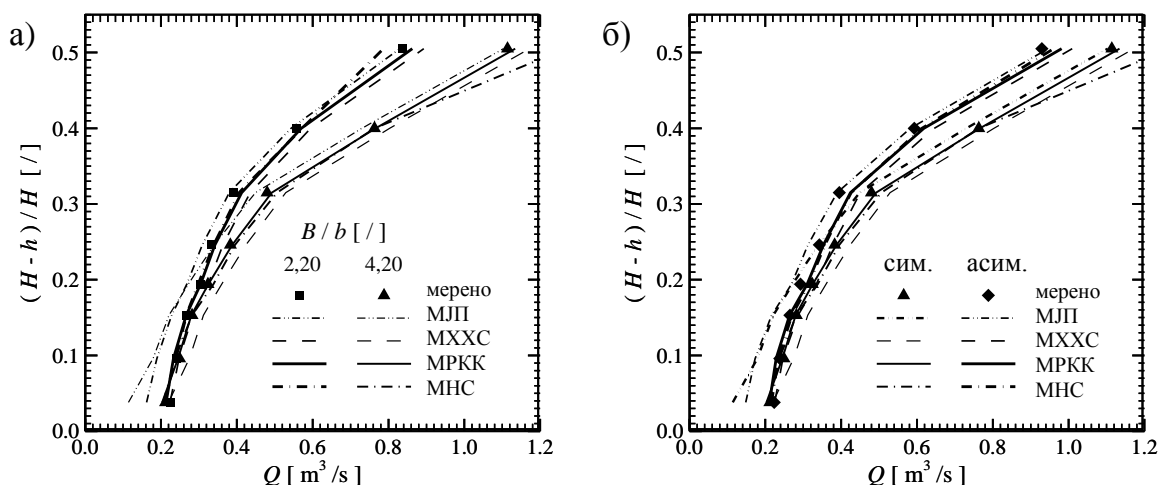
Табела 1. Геометрија КВВ за различите огледне поставке
 Table 1. Geometry of FCF for different compound channel layouts

Огледна поставка	B [m]	b [m]	B/b [/]	m_{gk} [/]	рапавост пп
2	6,3	1,5	4,20	1	не
3	3,3	1,5	2,20	1	не
6	6,3	1,5	4,20	1	не
7	6,3	1,5	4,20	1	да

3.2 Криве протока за различите геометрије корита

Симетрична корита. На слици 4а упоређене су рачунске криве протока за два испитивана и два традиционална модела, са кривама протока добијеним мерењима на физичком моделу. Вредности параметра ψ' подешаване су како би се постигло што боље слагање са мерењима. У МРКК вредности су мењане у распону од 0,01 до 0,15, а у МНС од 0,005 до 0,100. Показало се да се најповољнија вредност у МРКК мења са променом ширине КВВ. При мањим ширинама ($B/b = 2,20$) она је већа и износи 0,10, а у коритима са већом ширином ($B/b = 4,20$), она је мања и износи 0,05. У оба случаја највећа одступања од мерних вредности су у границама грешке мерења – износе око 5% (табела 2). За разлику од МРКК, најповољнија вредност параметра ψ' у МНС практично не зависи од ширине КВВ и износи 0,065. Међутим, највећа одступања прелазе 5% и то или при најмањим дубинама на плавној површини, када је проток потцењен за око 8% ($B/b = 2,20$) или при највећим дубинама, када је проток прецењен за 13,6% ($B/b = 4,20$ – табела 2). На преосталом делу криве протока, МНС даје нешто веће протоке од МРКК (разлике износе до 4%). Применом традиционалних метода добијају се знатно већа одступања од измерених вредности – МЈП при мањим дубинама, када је изражена размена количине кретања између главног корита и плавних површина, потцењује протоке и до 46%, док их МРКК прецењује за око 10%. Оно што је занимљиво је да се при већим релативним дубинама $(H - h) / h > 0,31$, када хидраулички услови у попречном пресеку почињу да се уједначавају, одступања традиционалних метода смањују испод 7% за МХХС, односно испод 5% за МЈП. Овакво смањење одступања оправдава примену ових метода само при високим нивоима воде на плавним површинама.

Предност метода које у процени криве протока узимају у обзир размену количине кретања између главног корита и плавних површина постаје још очитија када се посматра расподела протока по сегментима КВВ (слика 5). Добра процена расподеле протока битна је за анализу процеса проноса наноса и његовог таложења на плавним повр-

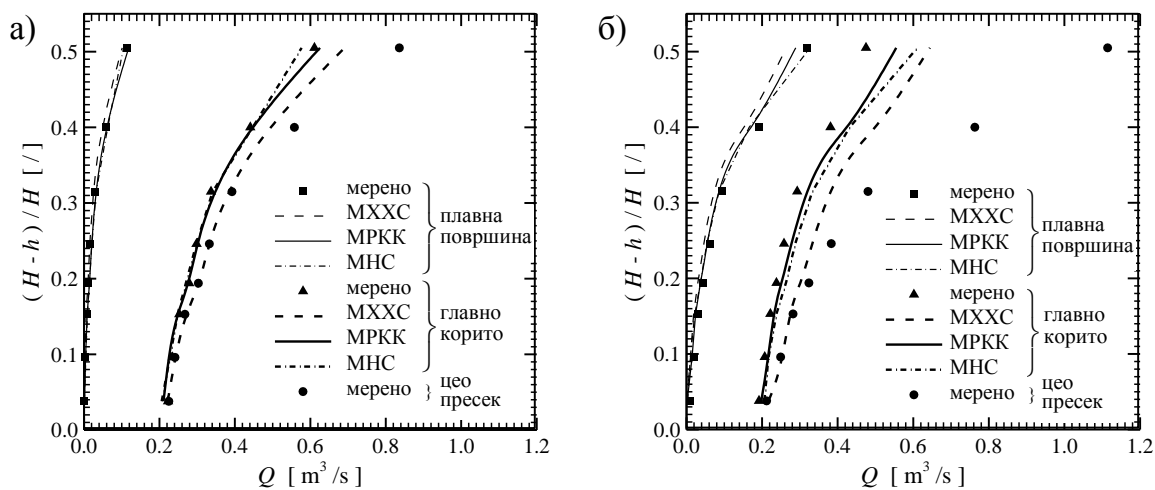


Слика 4. Поређење рачунских кривих протока са измереном кривом за цео пресек КВВ: а) утицај ширине плавне површине и б) утицај искључења плавне површине ($B/b = 4,20$)
 Figure 4. Comparison of calculated and measured stage-discharge curves for the entire cross-section: a) effect of floodplain width and б) effect of floodplain asymmetry ($B/b = 4,20$)

Табела 2. Распони релативног одступања у односу на мерне вредности протока за цео пресек КВВ и протока по сегментима

Table 2. Ranges of relative discrepancies between calculated and measured discharges for the whole cross-section, main channel and floodplain

Метода	огледна поставка			
	2	3	6	7
	цео пресек			
МЈП	-46,0 ÷ -1,0	-27,8 ÷ -0,7	-33,6 ÷ 1,8	-49,5 ÷ -25,5
МХХС	3,5 ÷ 11,1	-0,5 ÷ 11,0	0,4 ÷ 14,2	2,4 ÷ 59,0
МРКК	-4,4 ÷ 2,6	-5,1 ÷ 5,3	-5,5 ÷ 7,4	-4,5 ÷ 3,7
МНС	-4,8 ÷ 13,6	-7,9 ÷ 3,5	-3,3 ÷ 7,9	-4,6 ÷ 5,6
	главно корито			
МХХС	13,0 ÷ 35,6	-0,3 ÷ 14,5	4,0 ÷ 20,4	8,0 ÷ 105,9
МРКК	3,1 ÷ 16,8	-5,4 ÷ 4,1	-5,4 ÷ 8,8	0,8 ÷ 7,2
МНС	4,8 ÷ 28,6	-7,5 ÷ 1,4	-2,3 ÷ 7,6	1,5 ÷ 9,5
	плавна површина			
МХХС	-47,6 ÷ -17,5	-24,5 ÷ -9,7	-11,0 ÷ 0,4	-79,4 ÷ -20,9
МРКК	-28,6 ÷ -7,5	3,7 ÷ 33,3	0,4 ÷ 54,8	-69,7 ÷ -2,0
МНС	-52,4,0 ÷ 2,2	-6,8 ÷ 57,2	-3,7 ÷ 34,9	-71,1 ÷ -1,6



Слика 5. Поређење срачунатих расподела протока по сегментима са измереном расподелом.

Утицај ширине плавне површине: а) $B/b = 2,20$ и б) $B/b = 4,20$

Figure 5. Comparison of calculated and measured discharge distributions between main channel and floodplain. Effect of floodplain width: а) $B/b = 2.20$ and б) $B/b = 4.20$

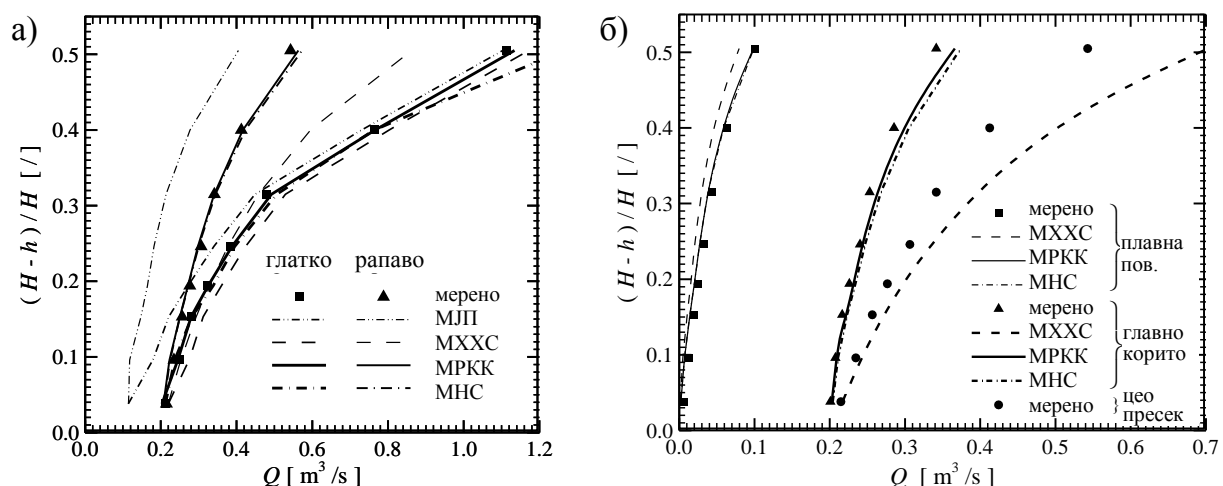
пинама. Обе методе – и МРКК и МНС много боље процењују протоке од МХХС. У КВВ са ужим плавним површинама, у коме је размена количине кретања израженија, МРКК даје нешто боље резултате и у главном кориту и на плавним површинама од

МНС (табела 2). Одступања добијена применом МХХС су 2,0–2,5 пута већа од оних добијених применом МРКК.

Асиметрична корита. Криве протока за симетрична и асиметрична корита упоређене су на слици 4б. И слика и подаци из табеле 2 показују да обе методе са задовољавајућом тачношћу (3–8%) процењују укупан проток у асиметричном КВВ. У овом случају се МХХС добијају 1,5–4,0 пута већа одступања у односу на МРКК и МНС. Када је у питању МЈП, онда важи исто као и за симетрично КВВ – када је $(H - h) / h < 0,31$, вредности протока су значајно потцењене (20–30%), али се са повећањем дубине преко ове границе, смањују испод 2%. При процени расподеле протока по сегментима, обе испитиване методе дају добре резултате, с тим што МНС даје нешто бољу расподелу протока по сегментима од МРКК. Одступања протока по сегментима добијена МХХС су 2,5–5,0 пута већа од одступања која се добијају када се узме у обзир размена количине кретања између главног корита и плавних површина.

3.3 Криве протока за различите рапавости плавних површина

Приликом процена криве протока у КВВ са рапавим плавним површинама (слика б) поново је подешавана вредност параметра ψ^t како би се добило што боље слагање са измереним вредностима. Показало се да се у МРКК задовољавајућа слагања са мерењима (релативно одступање мање од 5%) постижу за све вредности параметра ψ^t између 0,05 и 0,10, док је у МНС добијена иста вредност као и за КВВ са глатким плавним површинама ($\psi^t = 0,065$). Због већих градијената брзине на прелазу из главног корита на плавну површину, размена количине кретања између ова два дела КВВ је интензивнија, па предности МРКК и МНС у односу на традиционалне методе долазе до пуног изражаја. Одступања од измерених вредности не прелазе 6% (табела 2). Применом МЈП



Слика 6. Поређење рачунских кривих протока са измереном кривом. Утицај рапавости плавне површине ($B / b = 4,20$): а) цео пресек и б) расподела по сегментима
 Figure 6. Comparison of calculated and measured stage-discharge curves. Effect of floodplain roughness ($B / b = 4.20$): a) total discharge and б) discharge distributions between main channel and floodplain

протоци се потцењују за 25–50%, а када се примени МХХС, одступања се са порастом дубине повећавају од 2,4 до 60%.

Ако се изузму велика одступања (око 70%) за мале дубине воде на плавној површини при којима су неизвесности измерених величина велике, и МРКК и МНС веома успешно процењују расподелу протока на главно корито и плавне површине – одступања протока у главном кориту мања су од 7,5% за МРКК, односно од 9,5% за МНС. На плавним површинама, где проток не прелази 20% укупног протока, одступања су већа, али и њих треба приписати већим неизвесностима измерених величина које су последица тешкоћа приликом мерења брзина између вертикалних елемената рапавости.

4 Закључци

У раду су примењена и упоређена два рачунска поступка за дефинисање криве протока у кориту за велику воду – метода размене количине кретања и метода независних сегмената. Оба се користе за решавање једначина модела линијског устаљеног течења који узима у обзир размену количине кретања између главног корита и плавних површина. Корито за велику воду се у овом моделу вертикалним равнима дели на главно корито и плавне површине. За проверу и процену успешности два рачунска поступка коришћени су резултати мерења за три различите геометрије КВВ од којих је једна направљена у варијантама са глатким и рапавим дном. Три геометрије обухватиле су случајеве праволинијског симетричног КВВ са две различите ширине плавних површина и случај искључења једне плавне површине.

Поређење са мерењима показало је да обе методе процењују криву протока у КВВ са задовољавајућом тачношћу – одступања рачунских у односу на измерене вредности мања су од 8% што је у границама грешке мерења. МНС само при највећој испитиваној релативној дубини на плавној површини показује већа одступања, чији узрок у наставку истраживања треба детаљније испитати.

Традиционалне методе за процену криве протока или потцењују проток за 20–50% (метода јединственог пресека) или га прецењују за 2–60% (метода хидраулички хомогених сегмената).

Предност метода заснованих на размени количине кретања у односу на традиционалне методе највише долази до изражаја када су плавне површине рапаве, дакле, у реалним условима. Тада су одступања у односу на мерења испод 5,5%, док за МЈП износе –50%, а за МХХС чак 60%.

Осим тога што добро процењују криву протока, МРКК и МНС добро расподељују укупни проток на главно корито и плавне површине, што је битно како за проношење наноса и загађења, тако и за засипање плавних површина, па се закључује да би их требало увести у инжењерску праксу и за потребе процене криве протока у коритима за велику воду и за потребе анализе течења у случајевима проласка поплавних таласа.

Литература

1. Ackers, P., (1993), *Flow formulae for straight two-stage channels*, J. Hydr. Res., 31(4), pp 509-531.
2. Bousmar, D. and Zech, Y., (1999), *Momentum transfer for practical flow computation in compound channels*, J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(7), pp 696-706.
3. Ђорђевић, Д., Стојнић, И., Мухић, Ф., (прихваћен за штампу у часопису Водопривреда), *Приказ модела линијског течења у кориту за велику воду заснованог на размени количине кретања између главног корита и плавних површина*.
4. Мухић, Ф., (2015), *Модел линијског устаљеног течења у кориту за велику воду заснован на размени количине кретања између главног корита и плавних површина – утицај рапавости плавних површина на криву протока*, семинарски рад из предмета Одбрана од поплава, Грађевински факултет, Београд.
5. Proust, S., Bousmar, D., Riviere, N., Paquier, A. and Zech, Y., (2009), *Non-uniform flow in compound channel: A 1-D method for assessing water level and discharge distribution*, Water Resour. Res., 45, W12411, doi: 10.1029/2009WR008202.
6. Станић, Ф., Шоботић, Д., Ђунисијевић, М., (2015), *Неједнолико течење у сложеном кориту: Линијски модел за прорачуне криве протока и расподеле протока по сегментима*, семинарски рад из предмета Одбрана од поплава, Грађевински факултет, Београд.
7. Стојнић, И., (2014), *Модел линијског устаљеног течења у кориту за велику воду заснован на размени количине кретања између главног корита и плавних површина – утицај ширине плавних површина на криву протока*, семинарски рад из предмета Одбрана од поплава, Грађевински факултет, Београд.
8. Shiono, K., and Knight, D.W., (1991), *Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel*, J. Fluid Mech. Vol. 222, pp 617-646.

Zaštita naselja od velikih voda kontrolom protoka na uzvodnom mostovskom propustu

Božidar Batinić¹
Dragutin Pavlović²
Anja Randelović³

APSTRAKT: U radu je prikazano rešenje složenog hidrauličkog problema nastalog rekonstrukcijom saobraćajnice. Za kontrolu protoka ispod novoprojektovanog mosta preko vodotoka postavljena su četiri zahteva: (1) da se ublaže poplavni talasi za 10, 20 i 50 godišnju veliku vodu; (2) da se velike vode manje verovatnoće propuste pomoću šahtnog preлива; (3) da se obezbedi suvi prolaz za ljude i životinje, koji ima ustavu koja se zatvara pri nailasku poplavnog talasa; i (4) da se formira otvor za propuštanje poplavnih talasa sa regulisanom tablastom ustavom tako da protoci ne prevazilaze protoke zadatih verovatnoća pojave. Rešenje obuhvata dva denivelisana pravougaona propusta opremljena ustavama i jedan šahtni preliv. Rad prikazuje njihovo hidrauličko dimenzionisanje.

Ključne reči: most, propust, šahtni preliv, ustava

Settlement flood flow protection by flow control on upstream bridge culvert

ABSTRACT: This paper presents a proposed solution to a complex hydraulic problem which emerged with a reconstruction of a local road. The road reconstruction includes the design of a new bridge which additionally needs to control the water flow below it. There are four conditions which the water control structure or structures need to comply with: (1) to attenuate 10, 20 and 50 year return period flow hydrographs; (2) to convey less frequent floods over a shaft spillway; (3) to provide a dry passage for animals and humans, which is equipped with a table gate to prevent flood flow; and (4) to design a culvert with controllable table gate to control downstream flows so that they do not go beyond design flows. The proposed design comprises of two grade-separated rectangular culverts with table gates and one shaft spillway. The paper presents hydraulic design of all the structures.

Keywords: bridge, culvert, shaft spillway, gate

¹ Prof. dr Božidar Batinić (u penziji), Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

² Doc. dr Dragutin Pavlović, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, pavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Anja Randelović, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, anja@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

U sklopu rekonstrukcije jedne saobraćajnice, usled karaktera projektnog zadatka, pojavio se složen hidraulički problem. Na vodotoku je projektovan novi most u okviru koga je potrebno ostaviti dva mostovska otvora: jedan za prolaz životinja i pešaka i drugi koji pored propuštanja toka vode u normalnim uslovima služi i da reguliše protok velikih voda na tom profilu. Regulaciju protoka treba ostvariti po različitim kriterijumima za razne verovatnoće pojave velikih voda kao što je prikazano u tabeli 1.

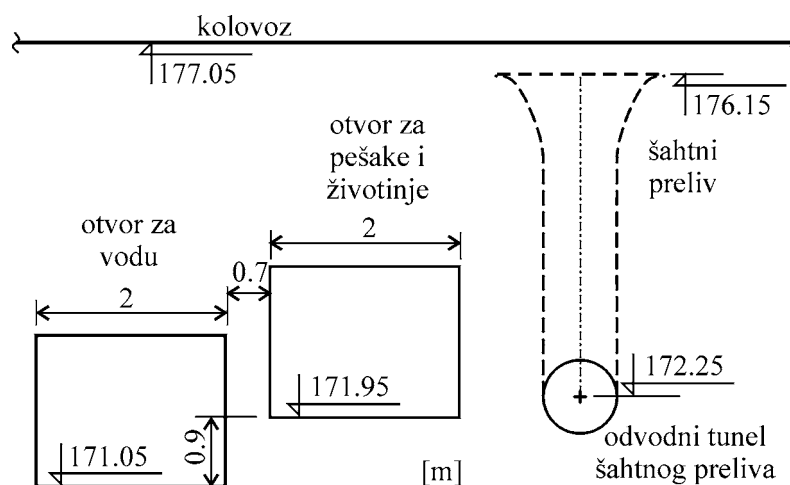
Višak vode poplavnih talasa iz procesa regulisane transformacije poplavnog talasa se uzvodno od mosta privremeno akumuliraju. Regulaciju protoka kroz mostovski otvor – propust za sprovođenje toka, treba da obavlja ustava koja ograničava protok i izaziva uspor. Za evakuaciju velikih voda poplavnih talasa verovatnoće pojave preko 50 godina potrebno je uvesti i dodatni hidraulički element – šahtni preliv u akumulaciji. Kompletan sistem je prikazan na slici 1. Privremenu akumulaciju uzvodno od mosta potrebno je urediti i obeležiti jasno vidnim oznakama sa obaveštenjem o izbegavanju prisustva pri većim padavinama, u cilju zaštite života i imovine.

Kao što je naglašeno, mostovski profil se sastoji od dva otvora: otvor za propuštanje vode i otvor za prolaz ljudi i životinja (slika 1). Poplavni talasi za verovatnoće javljanja 10%, 5% i 2% (redom povratnih perioda 10 20 i 50 godina) prikazani su na slici 2.

Tabela 1. Maksimalni dozvoljeni protoci Q_{max} nizvodno od mostovskog sušenja toka prema verovatnoći javljanja $P(x)$ maksimalnog protoka poplavnog talasa.

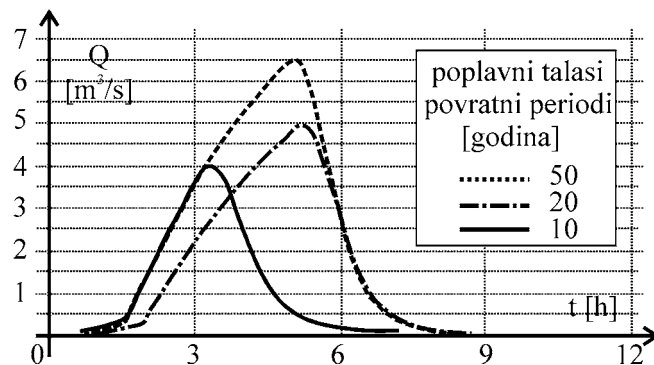
Table 1. Maximal allowable flows Q_{max} downstream to bridge narrows as function of the flood flows probability $P(x)$.

Poplavni talas uzvodno od mosta	Verovatnoća javljanja $P(x)$ [%] T(x) [god]	10 10	5 20	2 50
Zahtevano Q_{max} nizvodno		[m ³ /s] 3,00	2,80	2,60



Slika 1. Otvori u profilu mosta sa karakterističnim kotama (proračun kasnije u tekstu).

Figure 1. Bridge openings with characteristic elevations (calculations later in text).

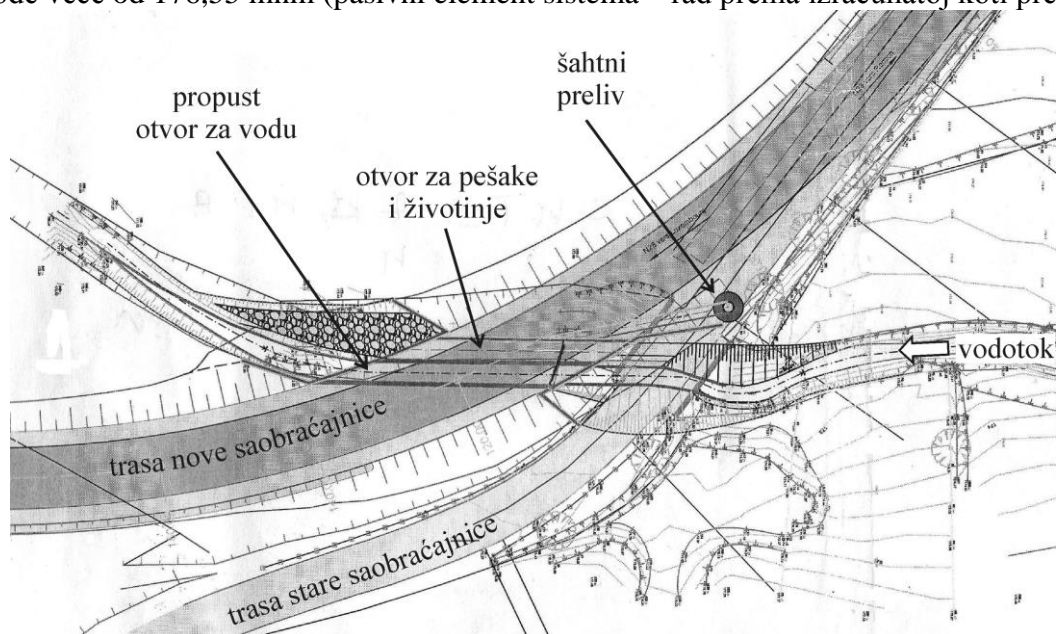


Slika 2. Zadati hidrogrami poplavnih talasa koji dotiču do mosta.

Figure 2. Bridge upstream hydrographs of different probabilities as design inputs.

Hidraulički sistem (slika 3 – osnova sistema u okviru rekonstrukcije saobraćajnice) koji reguliše protok sastoji se od više elemenata/objekata. Oni su dalje taksativno navedeni.

1. Otvor za propuštanje vode u kome je instalisana tablasta ustava koja reguliše propusnu moć (aktivni element sistema, vođen prema proračunu),
2. Suvi otvor za prolaz ljudi i životinja u kome je instalisana ustava koja potpuno zatvara prolaz u slučaju nailaska poplavnog talasa (aktivni element – dva stanja, otvoreno/zatvoreno),
3. Evakuator u vidu šahtnog preliva za propuštanje vode ređe verovatnoće. Voda verovatnoće 5% ($T=20$ godina) akumulira se do kote krune preliva 176,15 mm. Voda verovatnoće 2% ($T=50$ godina) preliva u šahtni preliv sa maksimalnim prelivnim mlazom $H_{p,max}=0,50$ m. Vode manje verovatnoće izazvaće u privremenoj akumulaciji kote nivoa vode veće od 176,55 mm (pasivni element sistema – rad prema izračunatoj koti preliva)



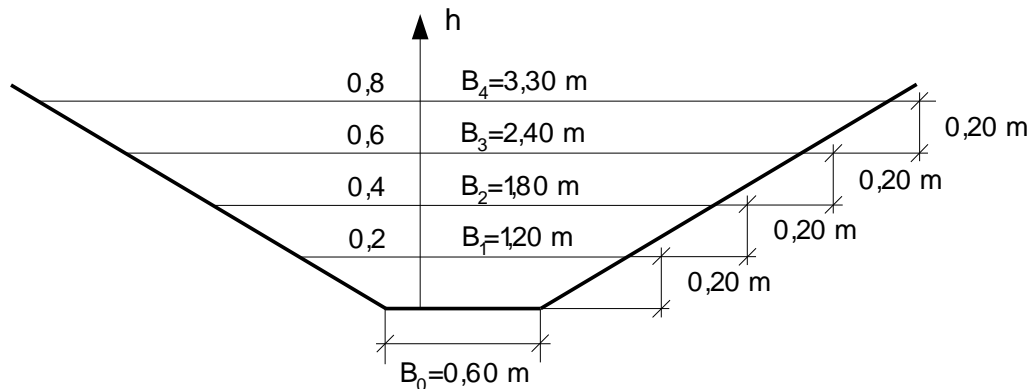
Slika 3. Rekonstrukcije saobraćajnice – osnova, sa prikazom hidrauličkih elemenata sistema na ukrštanju vodotoka i saobraćajnice.

Figure 3. The road reconstruction – plan view with the hydraulic elements of the road-streamflow intersection.

Upravljanje ustavama (na oba mostovska otvora) zavisice od hidrauličkog proračuna. Daće se kote nivoa vode u privremenoj akumulaciji pri kojima se one zatvaraju, odnosno otvaraju. Teorijske osnove za proračun nalaze se u literaturi [1] i [2].

2 Proračun propusne moći prirodnog toka reke

Na osnovu geodetskih snimaka korita vodotoka u zoni budućeg mosta, usvojen je osrednjeni poprečni presek prirodnog korita vodotoka, prikazan na slici 4.



Slika 4. Osrednjeni poprečni presek vodotoka.
 Figure 4. Approximated streamflow cross section.

Odgovarajući srednji pad prirodnog korita iznosi:

$$I = \frac{172,93 - 171,82}{157,50} = 0,007 \rightarrow I = 0,7\% , \quad (1)$$

Proticaj u prirodnom toku prema Šezi-Maningovoj formuli je:

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{2/3} \sqrt{I} , \quad (2)$$

Na osnovu fotografija vodotoka u zoni mosta, za Maningov koeficijent hrapavosti usvojena je vrednost $n=0,025 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ [3]. Frudov broj se računa po izrazu:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{g A^3} . \quad (3)$$

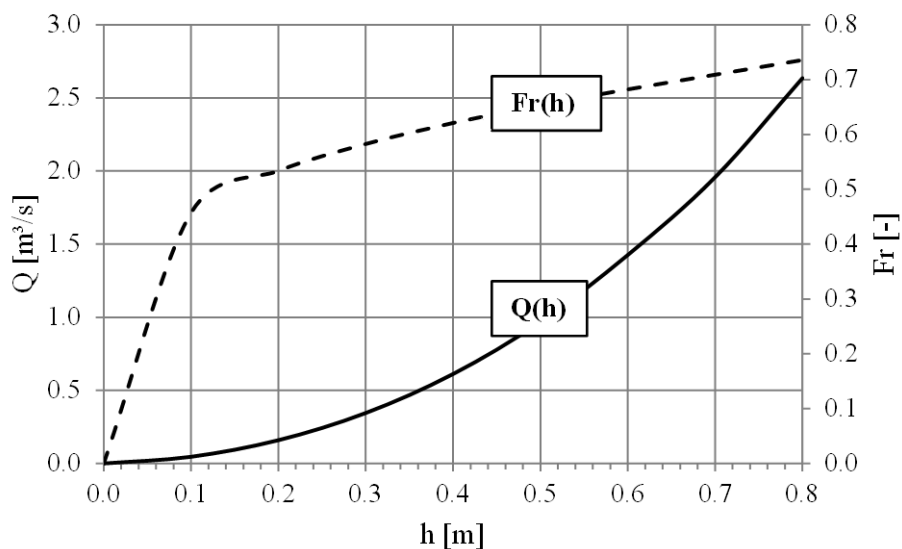
Po prethodno navedenim izrazima, i sa usvojenim vrednostima koeficijenata, sproveden je proračun protoka u koritu vodotoka. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 2. Zavisnost protoka Q i Frudovog broja Fr od dubine vode h u prirodnom koritu vodotoka uzvodno od propusta data je na slici 5. Iz tabele 2, za prikazan opseg protoka, tečenje u vodotoku je u

mirnom režimu ($Fr < 1$). To je pogodniji slučaj tečenja jer nema hidrauličkog skoka uzvodno od mostovskog suženja.

Tabela 2. Propusna moć reke po Šezi-Maningovoj formuli, $\frac{1}{n} \sqrt{I} = 40 \sqrt{0,007} = 3,35$.

Table 2. Streamflow discharge capacity, Chesey-Manning formula, $\frac{1}{n} \sqrt{I} = 40 \sqrt{0,007} = 3,35$.

i	h_i	$B(h_i)$	A_i	O	R_i	Q_i	Fr_i
[-]	[m]	[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]
0	0	0,60	0	0,60	0,00	0,00	0
1	0,2	1,20	0,18	1,32	0,136	0,16	0,53
2	0,4	1,80	0,48	2,04	0,235	0,	0,62
3	0,6	2,40	0,90	2,76	0,326	1,43	0,68
4	0,8	3,30	1,47	3,75	0,392	2,64	0,74



Slika 5. Dijagram propusna moći reke i $Fr(h)$ (po Šezi-Maningovoj formuli).
 Figure 5. Streamflow discharge capacity and Froude number $Fr(h)$ (Chezy-Manning formula).

3 Proračun propusne moći mostovskog profila

Proračun se sprovodi ispitivanjem pojave mirnog ili burnog tečenja kroz mostovsko suženje. Geometrija korita vodotoka u zoni mostovskog profila prikazana je na slici 6.

Proticaj u koritu ispod mosta dat je za jednoliki režim po Šezi Maningovom izrazu:

$$Q = \frac{1}{n} A_n \cdot R_n^{2/3} \sqrt{I}, \quad (4)$$

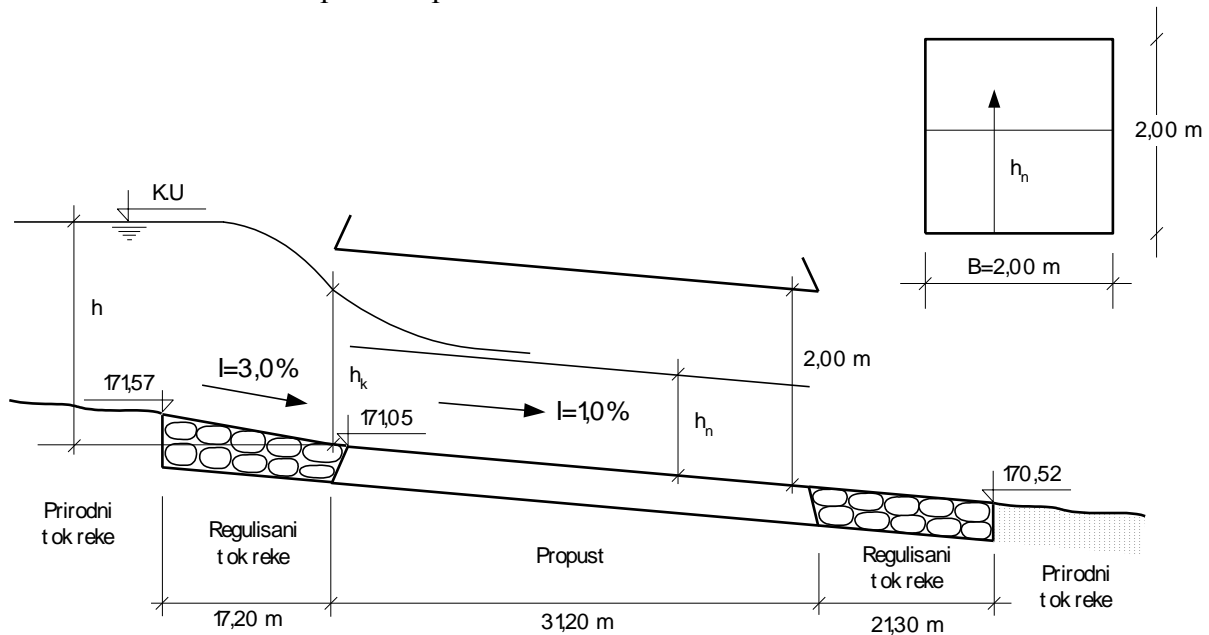
gde je:

$n = 0.015 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ - za oblogu od betona,

$A_n = B h_n$ - poprečni presek,

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- $A_n / (B + 2h)$ - hidraulički radijus,
 $I = 1\%$ - podužni pad korita.



Slika 6. Poprečni i podužni presek propusta.
Figure 6. Culvert longitudinal and cross sections.

Tabela 3. Proticaj pri normalnoj dubini u koritu propusta, $\sqrt{I} / n = 6.66$.
Table 3. Culvert normal depth flow, $\sqrt{I} / n = 6.66$.

h_n [m]	A_n [m ²]	R_n [m]	$R_n^{2/3}$ [m ^{2/3}]	Q [m ³ /s]	$Fr = \frac{Q^2 B}{g A^3}$	Primedba
0.10	0.20	0.09	0.20	0.27	1.86	Burno tečenje
0.20	0.40	0.17	0.30	0.81	2.09	
0.30	0.60	0.23	0.38	1.52	2.18	
0.35	0.70	0.26	0.41	1.89	2.16	
0.40	0.80	0.29	0.43	2.31	2.12	

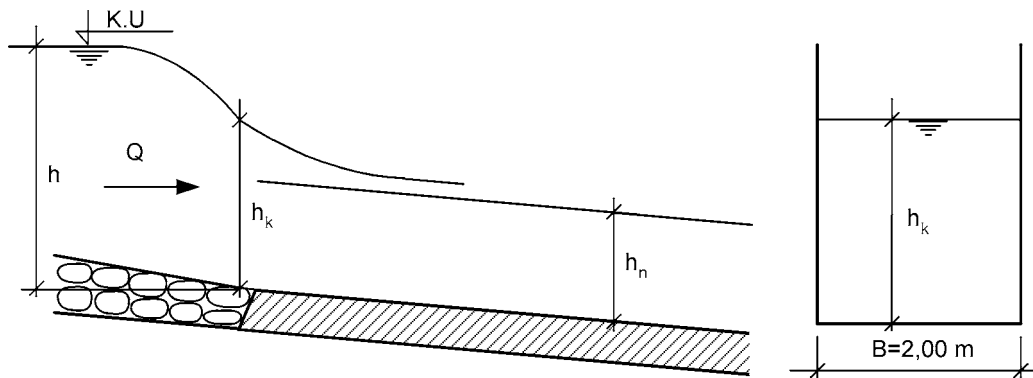
Pošto je pad toka u mostu veći od kritičnog javlja se buran režim u koritu mosta. Propusnu moć korita određuju ulazni uslovi, na ulazu se formira kritična dubina ili uzvodno na reguli-sanoj prilaznoj deonici (slika 7).

Vežu proticaja i kritične dubine određuje Frudov broj. Za pravougaoni poprečni presek (kao u propustu) izraz za Frudov broj ima pojednostavljen oblik kao u izrazu 5:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{g A^3} = \frac{v^2 A^2 B}{g A^3} = \frac{v^2 B}{g A} = \frac{v^2 B}{g h_k B} = \frac{v^2}{g h_k} = 1, \quad (5)$$

gde je h_k dubina vode neposredno ispred ulaza u propust. Dubina vode ispred propusta u prirodnom koritu $h = 1.6 h_k$ (uzima u obzir brzinsku visinu i procenjen gubitak energije od 0,1 brzinske visine). Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 4 i na slici 8.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

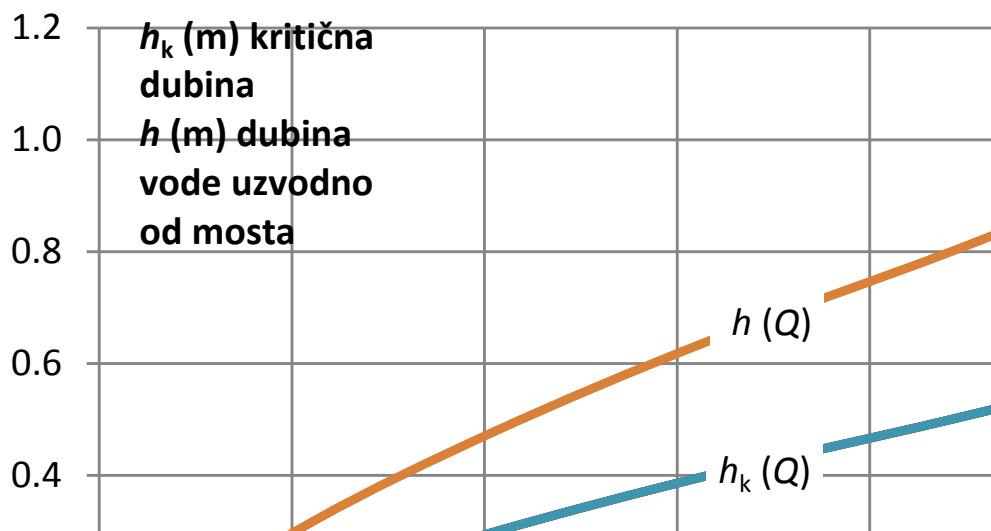


Slika 7. Propusna moć ulaza u profil mosta.
Figure 7. Scheme for culvert capacity calculation.

Tabela 4. Zavisnost dubine vode ispred profila mosta od proticaja, $v = \sqrt{9,81 \cdot h_k}$; $B=2,00$ m.

Table 4. Bridge upstream depth h vs. discharge Q , $v = \sqrt{9,81 \cdot h_k}$; $B=2,00$ m.

h_k [m]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
v [m/s]	0,99	1,40	1,72	1,93	2,21	2,34	2,62
A_k [m ²]	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
Q [m ³ /s]	0,20	0,56	1,03	1,58	2,21	2,91	3,67
h [m]	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96	1,12



Slika 8. Zavisnost proticaja od dubina h_k i h (uzvodno od propusta).
Figure 8. Culvert flow Q vs. upstream depth h or critical depth h_k at culvert inlet.

4 Propusna moć šahtnog preliva

Šahtni preliv treba da propusti višak protoka poplavnog talasa verovatnoće manje od 5% (tj. povratnih perioda većih od 20 godina). Svi poplavni talasi zaključno sa talasom verovatnoće 5% pune predviđenu retenziju do kote krune šahtnog preliva 176.15 mm (pogledati šemu na slici 9). Dodatni uslov je da kota u retenziji ne pređe 176.55 mm (kota maksimalnog dozvoljenog uspora - KMDU).

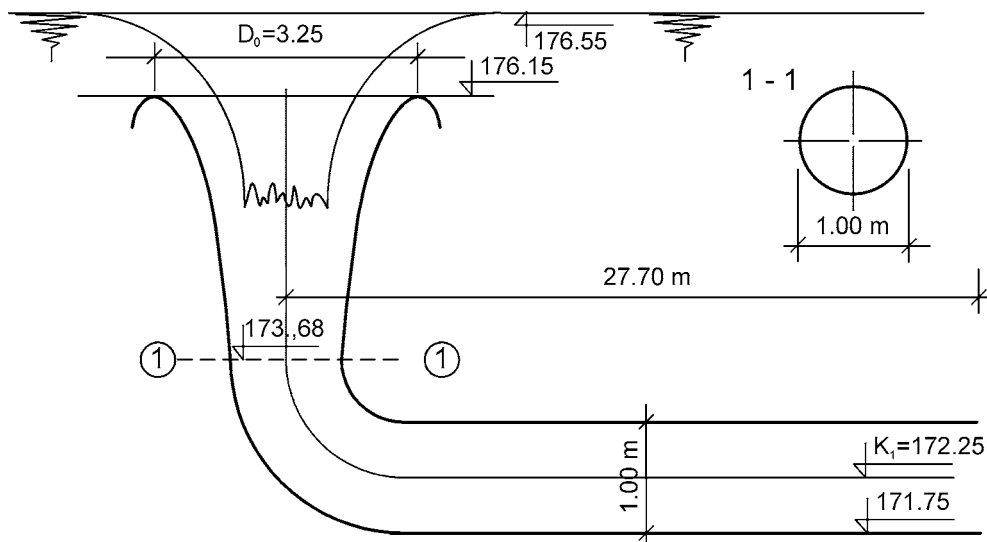
Kapacitet šahtnog preliva za dozvoljeni prelivni mlaz $H_p=0.50$ m iznosi:

$$Q = C_Q \cdot D_0 \cdot \pi \sqrt{2gH_p^3}, \quad (6)$$

gde je:

- $C_Q = 0.49$ koeficijent proticaja,
- $D_0 = 3.25$ m prečnik šahtnog preliva,
- $H_p = 0.50$ m dozvoljeni visina prelivnog mlaza.

$$Q = 0.49 \cdot 3.25 \text{ m} \cdot \pi \cdot \sqrt{19.62 \text{ m/s}^2 \cdot 0.50^3 \text{ m}^3} = 7.83 \text{ m}^3/\text{s} . \quad (7)$$



Slika 9. Podužni presek šahtnog preliva.
 Figure 9. Longitudinal cross section of the shaft spillway.

Propusna moć šahtnog preliva sa odvodnim tunelom dužine 27.77 m računa se povezivanjem profila na ulazu sa kotom maksimalnog uspora 176.55 mm i izlaznog profila na koti ose tunela 172.25 mm obračunavajući ulazne i izlazne gubitke i gubitke na trenje u protočnom sistemu (pod pritiskom):

$$Q = C_Q \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g(KMDU - K_1)} = C_Q \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g(176,55 \text{ mm} - 172,25 \text{ mm})} = C_Q \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g \cdot 4,3 \text{ m}},$$

$$\text{koeficijent trenja } \lambda = 125 \cdot n^2 \sqrt[3]{D} = 125 \cdot 0,015^2 \cdot \sqrt[3]{1} = 0,028,$$

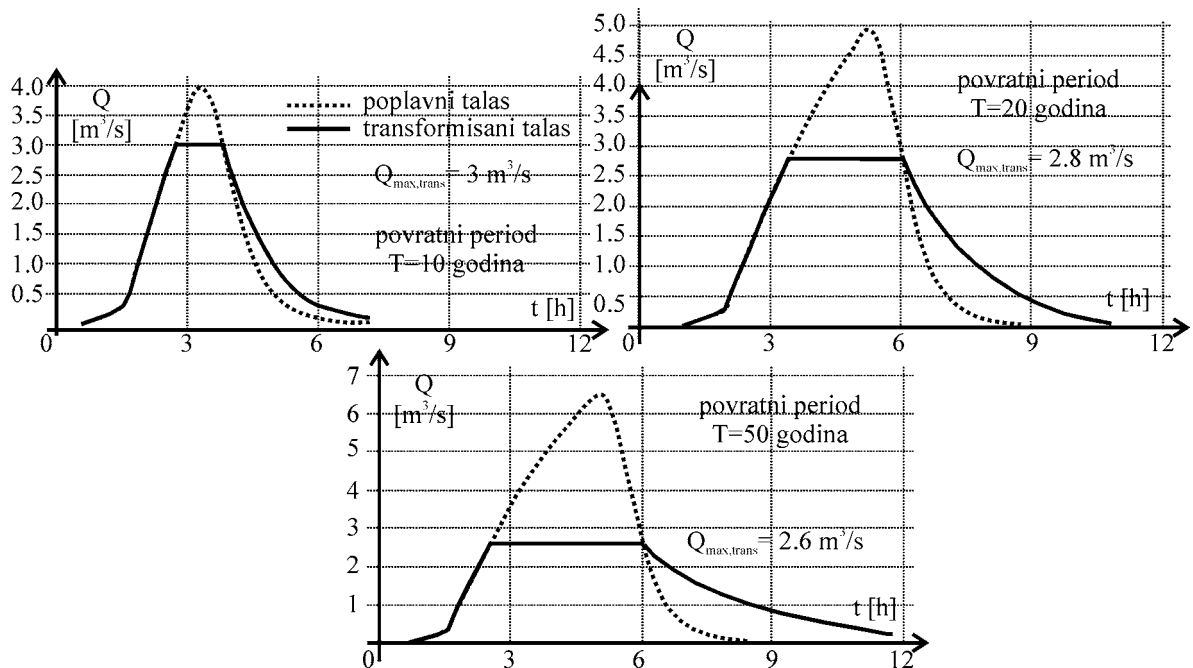
$$\text{koeficijent protoka } C_Q = 1 / \sqrt{\xi_{ul} + \lambda \cdot L / D + \xi_{izl}} = 1 / \sqrt{0,1 + 0,028 \cdot 31 / 1 + 1} = 1 / \sqrt{1,968} = 0,713, \quad (8)$$

$$\text{površina proticajnog profila } A_0 = D^2 \pi = 0,78 \text{ m}^2,$$

$$\text{protok kroz sistem } Q = 0,713 \cdot 0,78 \text{ m}^2 \sqrt{19,62 \text{ m/s}^2 \cdot 4,3 \text{ m}} = 5,1 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Kapacitet šahtnog preliva za visinu prelivnog mlaza od 0.5 metara iznosi $Q = 5.1 \text{ m}^3/\text{s}$, što je veće od razlike maksimuma računskog protoka sa hidrograma poplavnog talasa povratnog perioda 50 godina koji iznosi $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ i maksimalnog protoka koji teče kroz propust za te uslove od $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 10, dole), odnosno $5.1 \text{ m}^3/\text{s} > (6.5 - 2.6) \text{ m}^3/\text{s}$, tj. $5.1 \text{ m}^3/\text{s} > 3.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na slici 10 dati su poplavni talasi verovatnoće javljanja jednom u 10, 20 i 50 godina, na kojima se prikazuju prirodni i ublaženi talasi koji imaju maksimalni proticaj $Q_{\max} = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Održavanje ovog protoka se obezbeđuje aktivnom merom regulacije, radom tablaste ustave.



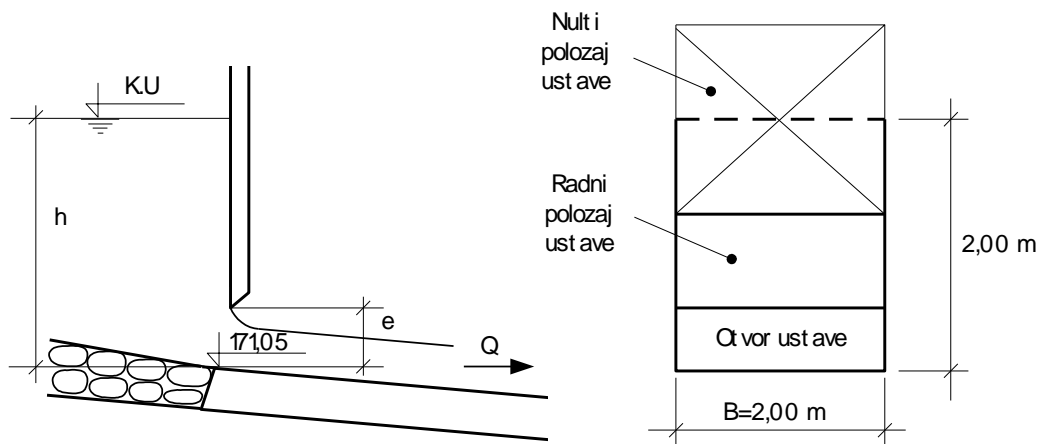
Slika 10. Merodavni projektni poplavni talasi i njihova transformacija.

Figure 10. Design flood waves and their transformation.

5 Propusna moć tablaste ustave

Zadatak tablaste ustave je da reguliše maksimalni protok koji otiče nizvodno od propusta. Ovaj protok je određen iz uslova da nivo vode pri tom proticaju ne potapa suvi prolaz koji je na koti 171.95 mm. Kako je kota u propustu na njegovom ulazu 171.05 mm dobija se dubina vode ispred ulaza od $h=0.90 \text{ m}$.

Na slici 8 je prikazana zavisnost nivoa vode od protoka $h(Q)$ i sa nje se očitava za $h=0.90$ m protok od $Q=2.6$ m³/s. Isticanje ovog protoka treba obezbediti ustavom nezavisno od nivoa vode u privremenoj uzvodnoj akumulaciji (slika 11). Proračun zavisnosti $e(h)$ prikazan je u tabeli 5 i na slici 12.



Slika 11. Isticanje ispod ustave.
Figure 11. Discharge under table gate.

$$Q = C_Q \cdot B \cdot e \sqrt{2g(h - C_A \cdot e)} = 2.6 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

gde je:

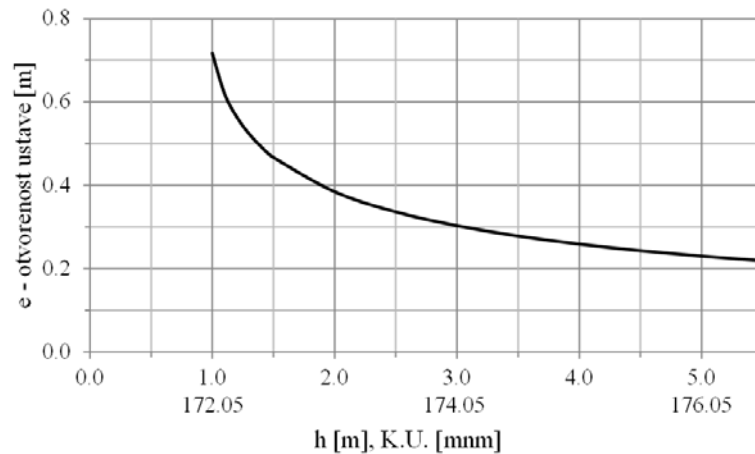
- $C_Q = 0.58$ koeficijent proticaja za oštroičnu ustavu,
- $B = 2.0$ m širina ustave i kanala,
- h dubina vode ispred ustave tj. kota uspora u privremenoj akumulaciji,
- $C_A = 0.7$ koeficijent kontrakcije mlaza
- e vertikalna dimenzija otvora ustave.

Tabela 5. Zavisnost $e(h)$ otvora ustave od dubine vode, odnosno KU , za $Q=2.6$ m³/s.
Table 5. Gate opening vs. upstream water depth h or water stage KU for $Q=2.6$ m³/s flow.

h [m]	1.00	2.00	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50
$\downarrow KU$ [mm]	172.05	173.05	174.05	174.55	175.05	175.55	176.15	176.55
e [m]	0.717	0.385	0.303	0.278	0.259	0.243	0.230	0.219

6 Automatsko upravljanje i obaveštavanje

Da bi regulacioni objekat bezbedno funkcionisao pri zadržavanju poplavnih talasa, potrebno je obezbediti i određene uslove:



Slika 12. Zavisnost otvora ustave od h -dubine vode odnosno KU kote uspora.
 Figure 12. Gate opening e vs. bridge upstream water depth h or water stage $K.U.$

1. Na terenu uzvodno od propusta treba obeležiti kotu maksimalnog uspora (176.60 mm). Obelažavanje pretpostavlja da se uzvodno od propusta data na liniji maksimalnog uspora postave stubovi ofarbani crveno-belo, visine 0.5 metara i prečnika 10 cm.
2. Ustava koja zatvara suvi prolaz počinje zatvaranje kad nivo vode u akumulaciji dostigne kotu 171.95 mm i treba da se zatvori za tri minuta. Upozorenje o početku zatvaranja treba da bude zvučno i svetlosno – semafor sa crvenim svetlom. Nivo vode se registruje u šahtu prečnika 1 metar koji je smešten u levom krilnom zidu. Šaht je spojen sa priključnom cevi \varnothing 10 cm koja ima rešetku na ulazu da se ne zaguši. Rešetku treba zaštititi od nanosa i plivajućih predmeta.
3. Ustava za zatvaranje propusta treba da održava konstantan protok $Q=2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ po zavisnosti koja je data na slici 9 odnosno sračunatoj u tabeli 5. Nivo vode h odnosno $K.U.$ kota uspora se registruje u pomenutom šahtu. Kad se zatvori suva ustava, ustava za regulaciju protoka na propustu se dovodi u početni položaj na koti 172.05 mm i kako nivo vode raste (povećava se kota) ona se zatvara po datom zakonu.

6 Zaključak

Izgradnjom propusta – mosta sa dva otvora omogućava se bezbedan prolaz ljudi i životinja za protoke u vodotoku do $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Automatskim upravljanjem ustavama i potrebnim signalima za početak zatvaranja ustave na suvom otvoru (koja radi u režimu otvoreno/zatvoreno), vodotok se sprovodi samo kroz mokri otvor koji ima funkciju propusta. Ustavom mokrog otvora automatski se upravlja da se u zoni nizvodnog naselja ne prevaziđu projektom zadati protoci. Šahtni preliv omogućava sprovođenje protoka većih od projektiranih. Veličina maksimalnog protoka koji može sprovesti šahtni preliv definisana je maksimalnom kotom koja se dozvoljava u privremenoj akumulaciji – retenziji.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

Sistem za automatsko upravljanje ustavama treba redovno kontrolisati i po potrebi servisirati kako bi u slučaju nailaska poplavnih talasa ona zaista funkcionisala.

Literatura

1. Batinić B. (1994), *Hidraulika*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
2. Savić Lj. (2003), *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet - Beograd.
3. French R. H., Chow V. T. (1985), *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Comp., New York.

Specifični pregradni hidrotehnički objekti hidroelektrane Papenoo 0, Tahiti

Nataša Marinković¹

APSTRAKT: Postojeća hidroelektrana Papenoo 0 izgrađena je kao poslednja od četiri kaskade na istoimenoj reci na severu ostrva Tahiti (Francuska Polinezija). Instalirana snaga hidroelektrane je 8 MW. Zbog nedovoljnog pada hidroelektrana radi u nepovoljnom režimu, uz čestu pojavu kavitacije i smanjenu proizvodnju električne energije. Studijom izvodljivosti, koja je urađena u firmi Stucky u oktobru 2014., razmotrena je izgradnja nove brane sa prelivom i pratećim objektima locirane 800 m uzvodno od postojećih objekata. Investitor je postavio uslov da tip i operative karakteristike novih objekata budu isti kao kod postojećih. Jedan od ključnih uslova bio je da se preko krune preliva, kada on nije u funkciji, omogući odvijanje saobraćaja za vozila težine do 5 t. U okviru ovog rada daje se prikaz usvojenog tehničkog rešenja kao i problema pri projektovanju sa limitiranim podlogama.

Ključne reči: hidrotehnički objekti, preliv, hidroelektrana, Tahiti

HPP Papenoo 0, Tahiti – specific hydro-technical barrier structures

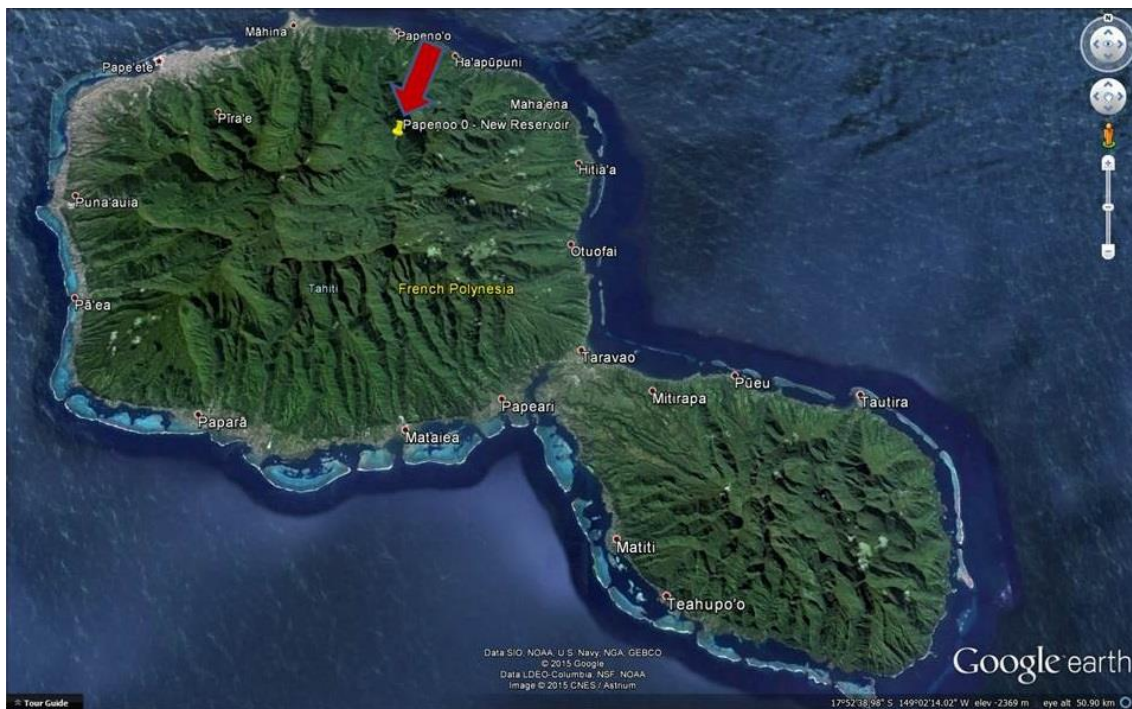
ABSTRACT: Existing HPP Papenoo 0, as last of fourth cascades, is located on the same name River on the northern part of Tahiti Island (French Polynesia). Installed capacity of HPP is 8 MW. Due to insufficient head this HPP operates in an unfavourable regime, with frequent occurrence of cavitation and reduced electricity production. Construction of new dam, spillway and other appurtenant structures located 800 m upstream from existing facilities have been analysed within Feasibility Study prepared by Stucky in October 2014. The Client define requirement that the type and operating characteristics of new facilities should be the same as existing ones. One of the key conditions was that over the spillway crest, during the period when it is not in operation, should be provide condition for traffic for vehicles up to 5 t weight. An overview of the adopted technical solutions as well as problems in the design with limited input data are presented within this paper.

Key words: hydro-technical structures, spillway, HPP, Tahiti

¹ Nataša Marinković, dipl.građ.inž., vodeći projektant za hidrotehniku, Stucky Balkans doo, Bul. Mihajla Pupina 155E/VI, Novi Beograd, nmarinkovic@stucky.ch

1 Uvod

Postojeća HE Papenoo 0 nalazi se na istoimenoj reci u severnom delu ostrva Tahiti (slika 1). Ona je poslednja stepenica u nizu od četiri hidroelektrane. Ukupna instalisana snaga celog sistema hidroelektrana je 28 MW. Instalisana snaga HE Papenoo 0 je 8 MW a njena prosečna godišnja proizvodnja iznosi 26 GWh.



Slika 1. Prikaz lokacije HE Papenoo 0 (Google Earth map)
Figure: HPP Papenoo 0 location (Google Earth map)

Elektrana je u puštena u rad sredinom 90-tih godina prošlog veka. U dosadašnjem radu uočeni su brojni problemi uzrokovani nedovoljnim padom, što dalje dovodi do rada agregata van optimalnog opsega. Zabeležena je i pojava kavitacije. Sa punim opterećenjem i pri maksimalnom protoku, ova HE ostvaruje svega 75% moguće proizvodnje.

Kako bi se nadomestila potrebna razlika pada, u okviru Studije opravdanosti razmatrana je mogućnost izgradnje nove akumulacije uzvodno od postojeće sa svim potrebnim pratećim objektima. Klijent je imao uslov da novi objekti budu što isti ili što sličniji sa postojećim, koji su relativno specifični. Ovde se posebno izdvaja preliv, koji osim uobičajenih zahteva vezanih za kapacitet pri pojavi merodavne velike vode ima i dodatni uslov – da se preko njegove krune omogući odvijanje saobraćaja u periodima kada preliv nije u funkciji.

U okviru ovog rada daće se kratak prikaz tehničkog rešenja novih objekata.

2 Postojeći objekti

Osim mašinske zgrade HE Papenoo 0 obuhvata sledeće objekte: Tevaiohiro akumulaciju, nasutu branu, preliv, zahvatna građevina sa rešetkom i dovodni cevovod dužine oko 4 km i prečnika 2800 mm.

Akumulacija Tevaiohiro ima zapreminu od 150000 m³. Kota normalnog uspora je 85 m n.m. Ono je formirano izgradnjom pregradne konstrukcije brane dodatnim prokopavanjem dna inundacije Papenoo reke.

Pregradna konstrukcija sastoji se od neprelivnog dela – brane i preлива. Brana je nasuta sa uzvodnim ekranom od PVC folije i geotekstila. Nizvodna kosina zaštićena je nabačajem od krupnog kamena. Kota krune brane je 88 m n.m. a njena maksimalna visina iznosi 10 m. Obzirom da se preko krune brane i preлива odvija sobračaj, između ova dva objekta locirana je kosa rampa upadu od 7%.



Pogled sa brane ka prelivu
View from dam to spillway



Pogled sa preлива ka brani i zahvatu
View from spillway to dam and intake

Slika 2. Fotografije akumulacije Tevaiohiro i brane [1]
Figure 2. Photographs of Tevaiohiro reservoir and dam [1]



Kruna preлива
Spillway crest



Pogled sa preлива ka recipijentu
View from spillway to recipient

Slika 3. Fotografije preлива [1]
Figure 3. Photographs of spillway [1]

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Preliv je kaskadni sa kotom krune 85 m n.m., a njegova dužina iznosi 206 m. Telo preлива čini nasuta konstrukcija sa uzvodne strane zaštićena kao i brana dok su sa nizvodne strane izgrađene kaskade obložene kamenom. Širina krune preлива je 5 m a kaskada u rasponu od 3-5 m. Kaskade se prilagođavaju topografskim uslovima tj morfologiji rečnog korita u koje se prelivna voda uliva. Duž uzvodne ivice preлива ka akumulaciji lociran je zaštitni zid dok se na nizvodnoj kosini nalaze oznake za regulisanje saobraćaja. Predviđeno je da se saobraćaj odvija samo u periodu kada preliv nije u funkciji.

Postojeći objekti prikazani su na slikama 2 i 3.

2 Podloge i ograničenja

2.1 Podloge

Pri definisanju tehničkog rešenja korišćene su sledeće podloge i podaci:

- Topografske podloge – karte razmere 1:500 koje su obuhvatile postojeću akumulaciju i dolinu reke od oko 2 km. Na žalost pojas topografskog snimanja je veoma uzak tako da visinski nije obuhvatio celokupnu površinu buduće akumulacije.
- Geološke podloge – geološka karta oblasti Tahiti Nui razmere 1:40000 i jedan prognozni geološki profil razmere 1:1000 na nepoznatoj lokaciji u akumulaciji Tevaihoiro. Imajući u vidu oskudnost podataka koji ukazuju na sloj aluviona debljine od oko 20 m u zoni budućih radova, posebna pažnja posvećena je adekvatnom rešenju temeljenja objekata
- Hidrološki podaci – raspolagalo se hidrološkom studijom urađenom za potrebe ovog projekta a koja je zasnovana na aktuelnim podacima vezanim za padavine u region od interesa.

2.2 Uslovi i ograničenja

Projektom zadatkom definisani su sledeći projektni uslovi i ograničenja:

- Svi objekti moraju biti isti ili što sličniji postojećim
- Preko brane i preлива treba da bude lociran put za “teški” saobraćaj koji tj saobraćaj vozila težine do 5 t,
- Merodavni proticaj za dimenzionisanje preлива je 100-godišnja velika voda koja iznosi 1400 m³/s [1]
- Maksimalni nivo u akumulaciji pri pojavi 100-godišnje velike vode mora biti takav da ne ugrozi rad HPP Papenoo 1 locirane uzvodno od buduće pregrade
- Novi objekti moraju biti maksimalno uklopljeni u okolinu i da omoguće poboljšanje turističke ponude lokalne zajednice
- Količina materijala iz iskopa za formiranje nove akumulacije trebalo bi da bude približno ista onoj koja je potrebna za izgradnju objekata

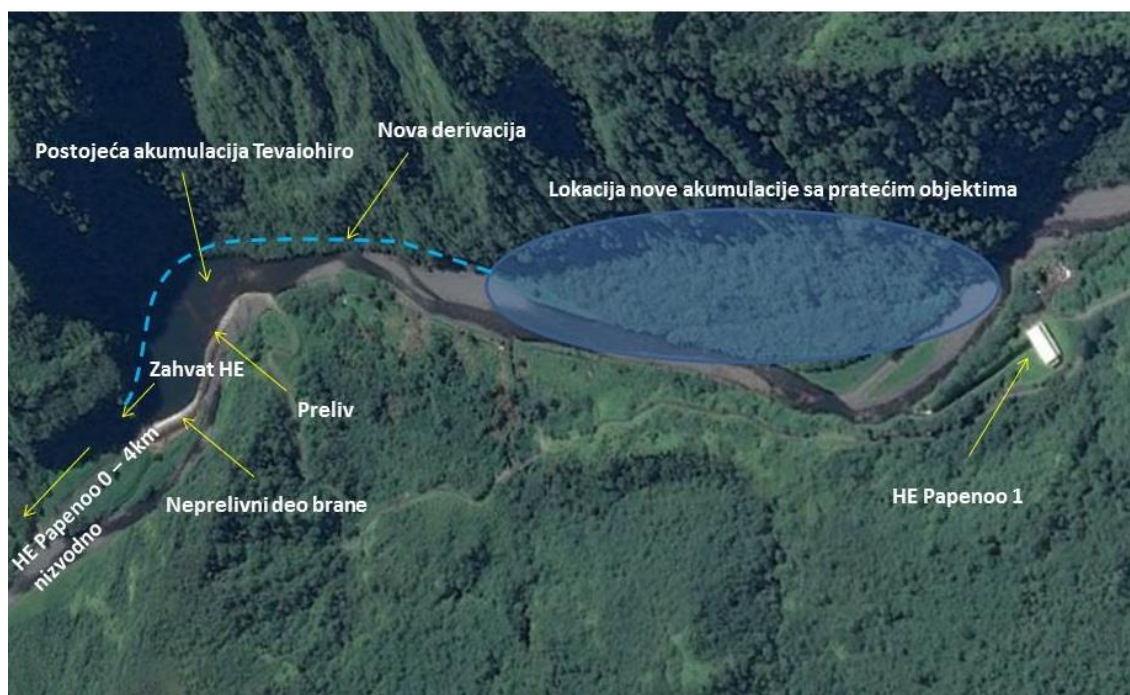
3 Opis tehničkog rešenja

3.1 Uvod

Tehničko rešenje obuhvatilo je sledeće objekte:

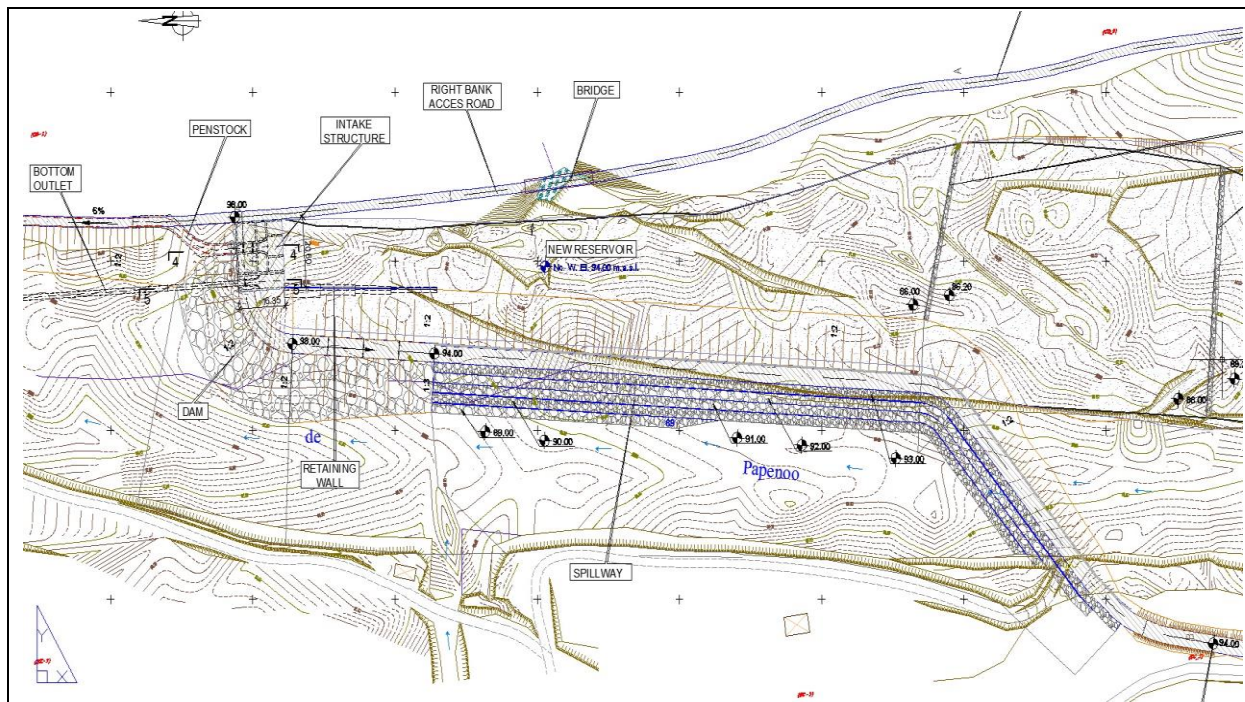
- Novu branu lociranu na 800 m uzvodno od postojeće (lokacija je ranije izabrana na osnovu optimizacionih analiza urađenih u okviru prethodne studije opravdanosti [2])
- Preliv
- Zahvat za elektranu
- Derivacioni cevovod prečnika 2500 mm i dužine 800 m, koji je lociran duž desne obale i spaja se sa postojećim na svom najnižvodnijem kraju
- Temeljni ispust
- Mrežu pristupnih puteva sa pripadajućim objektima (mostovima i propustima)

Položaj postojećih i projektovanih objekata šematski je prikazan na sledećoj slici.



Slika 4. Lokacija postojećih i novih (projektovanih) objekata
Figure 4. Location of existing and “new” (designed) structures

Situacija novih objekata prikazana je na sledećoj slici.



Slika 5. Situacioni prikaz novih objekata [3]
 Figure 5. Layout of designed structures [3]

U nastavku se daje detaljniji opis brane, zahvata, akumulacije i preliva.

3.2 Brana, zahvat i akumulacija

Brana je od nasutog materijala sa kotom krune 98 m n.m. Uzvodna kosina brane je u nagibu 1:2 i obložena je HDPE geomembranom. U zoni preliva ova kosina oslanja se na betonski potporni zid. Nizvodna kosina ima isti nagib i obložena je kamenom u cementnom malteru. Širina krune brane iznosi 5,5 m. maksimalna visina brane je 12 m. Kako bi se smanjili gubici vode usled proviranja, predviđena je injekciona zavesa ispod uzvodne kosine brane.

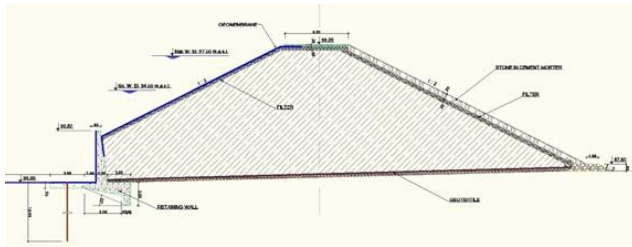
Zahvat je lociran u desnom boku brane. Čini ga betonska građevina sa krunom na koti 98 m n.m. Zahvat je opremljen rešetkom na ulazu, remontan i regulacionim zatvaračima. Ulaz zahvata hidraulički je oblikovan. Visinski položaj određen je na osnovu kriterijuma za bezbedan rad HE bez uvlačenja vazduha u dovod.

Karakteristični preseki brane i zahvata prikazani su na slici 6.

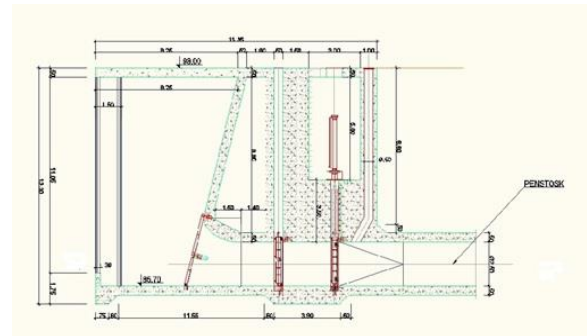
Akumulacija je locirana u inundaciji Papenoo reke. Njeni karakteristični nivoi određeni su iz uslova neometanog rada HE Papenoo 1, koja je locirana uzvodno i iznose:

- Normalni nivo 94 m n.m
- Maksimalni nivo pri pojavi 100-godišnje velike vode 97 m n.m.

Kako bi se obezbedila zapremina vode u novoj akumulaciji ista kao u postojećoj, kao i potrebna količine građevinskog materijala za izgradnju novih nasutih objekata predviđeno je postepeno prokopavanje tj. oblikovanje njenog dna. Nakon prokopavanja zapremina nove akumulacije pri koti normalnog uspora iznosi 150000 m³, dužina 660 m a površina pri istoj koti iznosi 6 ha.



Brana (neprelivni deo)
 Dam (non – overflow part)



Zahvat za HE
 Intake for HPP

Slika 6. Karakteristični poprečni presezi brane i zahvata [3]
 Figure 6. Characteristics cross-sections of dam and intake [3]

3.3 Preliv

Od svih novih objekata, preliv se izdvaja po svojoj specifičnosti. On je zakrivljen, jednom trećinom svoje dužina lociran je upravno na tok reke (čeonu preliv) dok je sa dve trećine dužine lociran paralelno sa tokom reke (bočni preliv).

Ukupna dužina preliva limitirana je topografskim uslovima i položajem i karakteristikama ostalih pregradnih objekata na razmatranom profile i ona iznosi 250 m što je ujedno i maksimalna raspoloživa dužina. Obzirom na računski proticaj od 1400 m³/s, jedinični proticaj preko preliva iznosi 5,6 m³/s/m².

Imajući u vidu uslov da nivo vode u odvodnoj vadi uzvodne HE Papanoo 1 ne sme da bude promenjen pri pojavi 100-godišnje velike vode, korišćenjem snimljenih poprečnih profila reke i programskog paketa HEC RAS došlo se do maksimalnog nivoa u akumulaciji od 97 m n.m.

Kota normalnog uspora ranije je određena iz uslova obezbeđenja dodatnog pada i ona iznosi 94 m n.m.

Kruna preliva nije hidraulički oblikovana. Preko nje prelazi put širine 5 m sa neophodnim bezbedonosnim zidom sa uzvodne strane širine i visine po 0,5 m.

Na osnovu svih ovih ograničenja može se zaključiti da je maksimalna raspoloživa visina prelivnog mlaza:

$$H_p = 97 - 94 + 0,5 = 2,5 \text{ m}$$

Koeficijent preliivanja pri pojavi 100-godišnje velike vode može se proceniti :

$$m = \frac{Q}{L\sqrt{2gH_p^3}} \tag{1}$$

Zamenom odgovarajućih veličina došlo se do njegove vrednost od 0,32.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Imajući u vidu položaj preliva tj njegovu zakrivljenost u odnosu na tok reke i postojanje zida na kruni što je onemogućilo njeno hidrauličko oblikovanje, može se smatrati da je ovaj koeficijent realan tj „na strani sigurnosti“.

Na žalost ne postoje podaci sa merenja na postojećoj brani tako da se usvojen koeficijent preliva može samo računski proveriti za poznatu dužinu i kotu postojećeg preliva. Korišćenjem iste formule sračunata je visina prelivnog mlaza od 2,84 m tj kota maksimalnog uspora od $85 + 2,84 = 87,84$ m n.m što je nešto niža vrednost od kote krune brane.

Telo preliva, poput brane, čini nasuta konstrukcija sa uzvodnom kosinom u nagibu 1 : 2 zaštićenom HDPE geomembranom. Nizvodu kosinu preliva čine kaskade koje su obložene kamenom u cementnom malteru.

Karakteristike kaskada usvojene tako da zadovolje uslove za ostvarenje takozvanog „klizećeg“ toka [4] tj. sledeću jednačinu:

$$\frac{h_{kr}}{h} > 1,057 - 0,465 \frac{h}{l} \quad (2)$$

gde je:

h_{kr} – kritična dubina (m)

h – visina kaskade (m)

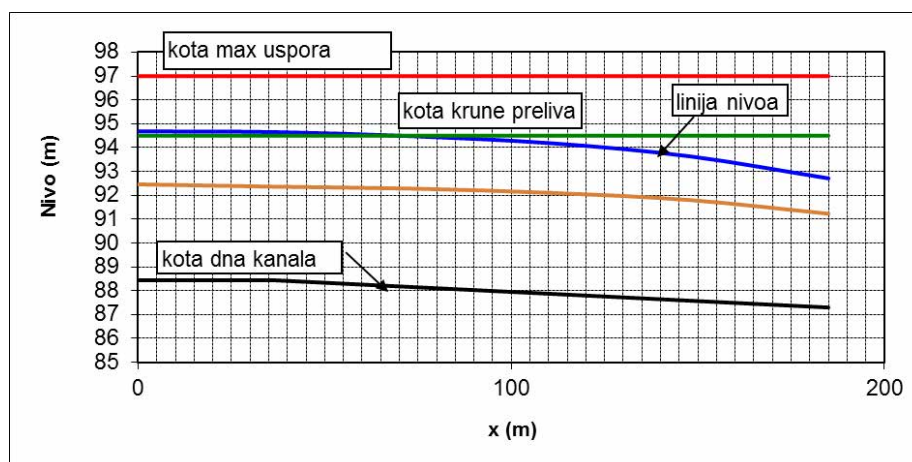
l – dužina kaskade (m)

Za kritičnu jedinični proticaj preko preliva od 5.6m odgovarajuća kritična dubina iznosi 1,47 m što dalje dovodi do potrebnih dimenzija kaskada od: visina – 1 m i dužina 3 m.

Linija nivoa duž „sabirnog“ kanala sračunata je na osnovu jednačine održanja količine kretanja za kanal sa bočnim doticajem [5]:

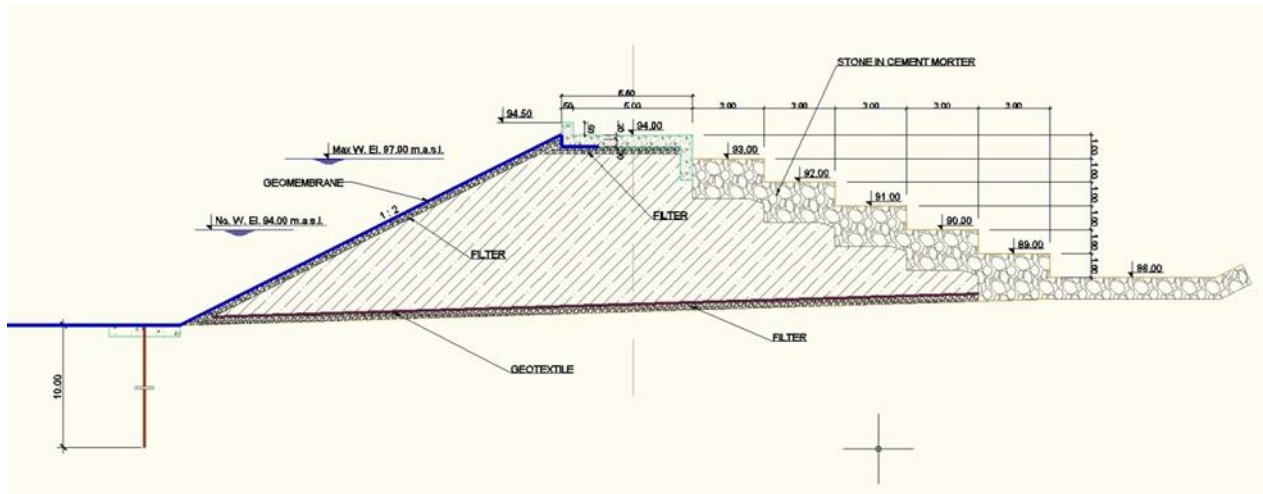
$$\frac{d}{dx} \left(\frac{V^2}{2g} + z \right) + \frac{Vq}{gA} = 0 \quad (3)$$

Linija nivoa duž ovog kanala prikazana je na slici 7.



Slika 7. Linija nivoa duž sabirnog kanala preliva
Figure 7. Flow profile along to collection channel of spillway

Karakteristični poprečni presek preлива prikazan je na slici 8.



Slika 8. Poprečni presek preлива [3]
Figure 8. Spillway cross section [3]

4 Završne napomene

Ovim projektom definisano je tehničko rešenje objekata koji će omogućiti povećanje bruto pada postojeće HE Papenoo 0 za 9 m. Usled hidrauličkih gubitaka duž derivacionog cevovoda neto pad iznosi 7.5 m što je dovoljno da se prevaziđu postojeći problemi u radu hidroelektrane i prosečna godišnja proizvodnja poveća do projektovane. Osim kriterijuma vezanih za njihovu bezbednost i funkcionalnost, projektovani objekti su zadovoljili dodatne vizuelne i operativne zahteve Investitora. Takodje, pri definisanju karakteristika objekata zadovoljeni su i uslovi njihove fizibilnosti tj. fizibilnosti celog projekta. Preporučeno je Investitoru sprovođenje detaljnih istražnih radova na analiziranoj lokaciji kako u cilju što preciznijeg projektog rešenja u narednoj fazi.

Literatura

1. Stucky (2014), "Hydromax, Centrale Papenoo 0, Modification du captage de cote 85 - Analyse préliminaire, Etude de pré faisabilité, Rapport de mission " No 5240 / 4011, Suisse
2. Stucky (2014), "Hydromax, Centrale Papenoo 0, Modification du captage de cote 85 - Analyse préliminaire, Etude de pré faisabilité, " No 5240 / 4012a, Suisse
3. Stucky (2014), "Hydromax, Centrale Papenoo 0, Modification du captage de cote 85 - Etude de faisabilité, " No 5240/4013, Suisse
4. Chanson H. (1996), "Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channels", Journal De Recherches Hydrauliques, Vol. 34 , No. 3
5. Savić Lj. (2003), "Uvod u hidrotehničke građevine", Građevinski Fakultet, Beograd

Uporedna analiza bočnog preliva sa glatkim brzotokom i piano key preliva sa stepenastim brzotokom na brani Yarascay (Tacna, Peru)

Dalibor Drašković¹

APSTRAKT: Za potrebe izrade Idejnog projekta brane Yarascay (Tacna, Peru) izvršena je uporedna analiza bočnog preliva sa glatkim brzotokom i piano key preliva sa stepenastim brzotokom, kako bi se utvrdilo, koji od dva razmatrana objekta, ima povoljnije ekonomske pokazatelje, pouzdanije rezultate numeričke analize propusne sposobnosti pojedinih njegovih delova, kao i druge pojedinosti koje su od značaja za odabir optimalnog tehničkog rešenja. U okviru ovog rada dat je uporedni grafički prikaz projektovanih varijantnih tehničkih rešenja kao i uporedni tabelarni prikaz rezultata sprovedenih hidrauličkih proračuna i koštanja glavnih građevinskih radova za oba analizirana objekata.

Comparative Analysis of Lateral Spillway with Flat Chute and Piano Key Spillway with Stepped Chute on Yarascay Dam (Tacna, Peru)

ABSTRACT: For the purpose of preparing the Preliminary Design of Yarascay Dam (Tacna, Peru), a comparative analysis of the lateral spillway with flat chute and piano key spillway with stepped chute was performed in order to determine which of the two spillway structures shows more favourable economic indicators, more reliable results of numerical analysis of discharge capacity for individual parts and other details of importance for the selection of the optimum technical solution. The paper includes a comparative graphic presentation of designed variant technical solutions, as well as a comparative table showing the results of hydraulic calculations and costs of main civil works for both analysed structures.

¹ Dalibor Drašković, dipl.inž.građ., Energoprojekt-Hidroinženjering, Bulevar Mihaila Pupina 12, Beograd

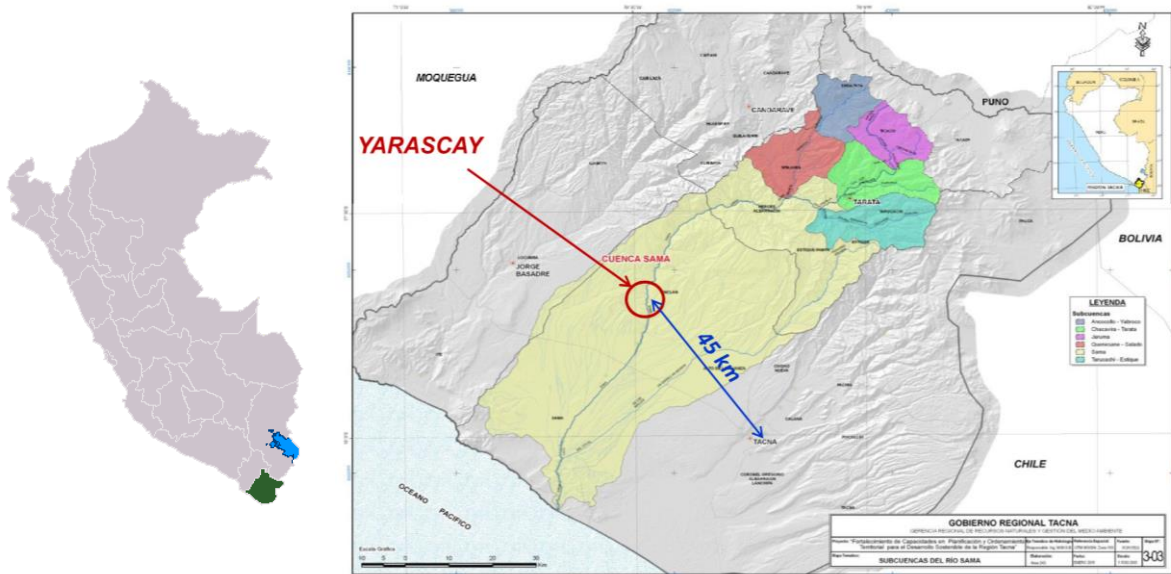
1. Uvod

Konzorcijum kojeg su sačinjavali Energoprojekt-Hidroinženjering a.d. (Beograd) i Tyspa Group (Madrid) je u periodu od septembra 2013. do aprila 2014. god uradio Idejni projekat sa Studijom opravdanosti brane Yarascay u Peruu za potrebe vlade regiona Tacna i njenog zavisnog preduzeća PET (Proyecto especial Tacna), koje je tokom 2009. god. aktuelizovalo prethodnu studiju opravdanosti brane Yarascay.

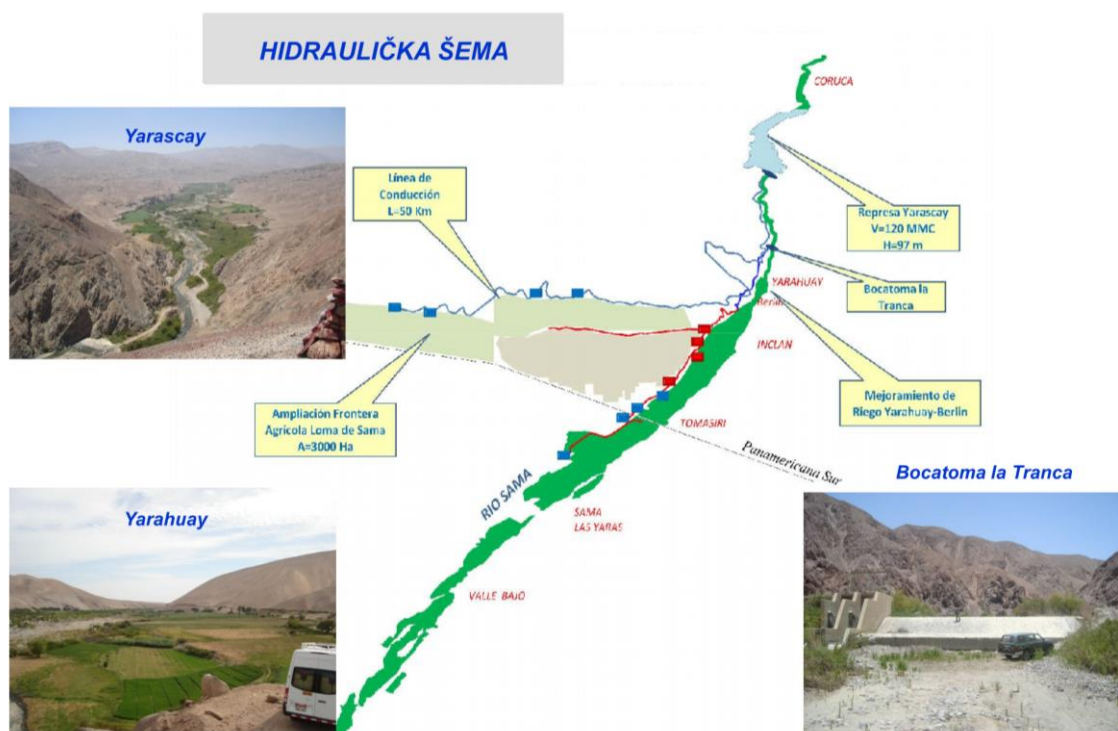
Izrada Idejnog projekta sa Studijom opravdanosti trajala je 6 meseci, pri čemu se tokom prva 3 meseca radilo na inoviranju svih neophodnih podloga (topografskih, geoloških, hidroloških, seizmičkih, socio-ekonomskih) i odabiru najpovoljnijeg tehničkog rešenja brane i objekata uz branu dok su druga 3 meseca iskorišćena za razradu usvojenog tehničkog rešenja na nivou Idejnog projekta i za takvo rešenje je na kraju urađena Studija ekonomske opravdanosti. Energoprojekt-Hidroinženjering je u pomenutom periodu realizovao studiju alternativnih varijanti tipa brane (Informe III) i Idejni projekat usvojenog tipa brane i objekata uz branu (Informe IV).

2. Lokacija, namena i dispoziciono rešenje projektovanih objekata

Pregradni profil brane Yarascay lociran je na reci Sama oko 45 km severozapadno od grada Tacna, glavnog grada istoimenog najjužnijeg regiona države Peru i oko 70 km severozapadno od međudržavne granice Peru-Čile. Izgradnjom brane na pomenutoj lokaciji unapredio bi se postojeći sistem za navodnjavanje nizvodnih obradivih površina u dolini reke Sama (Yarahuay, Berlin, i Inclan) i proširio na zapadnu oblast Loma de Sama koja do sada nije navodnjavana. Postojeći sistem za navodnjavanje sastoji se od niskog betonskog prelivnog praga (Bocatoma la Tranca), lociran oko 6,50 km nizvodno od pregradnog profila Yarascay, pomoću kojeg je formiran zaplav za kontrolisano zahvatanje vode. Voda se zahvata pomoću ulazne građevine koja je smeštena u desnom boku i dalje transportuje sistemom otvorenih kanala do nizvodnih korisnika.



Slika 1. Lokacija brane Yarascay



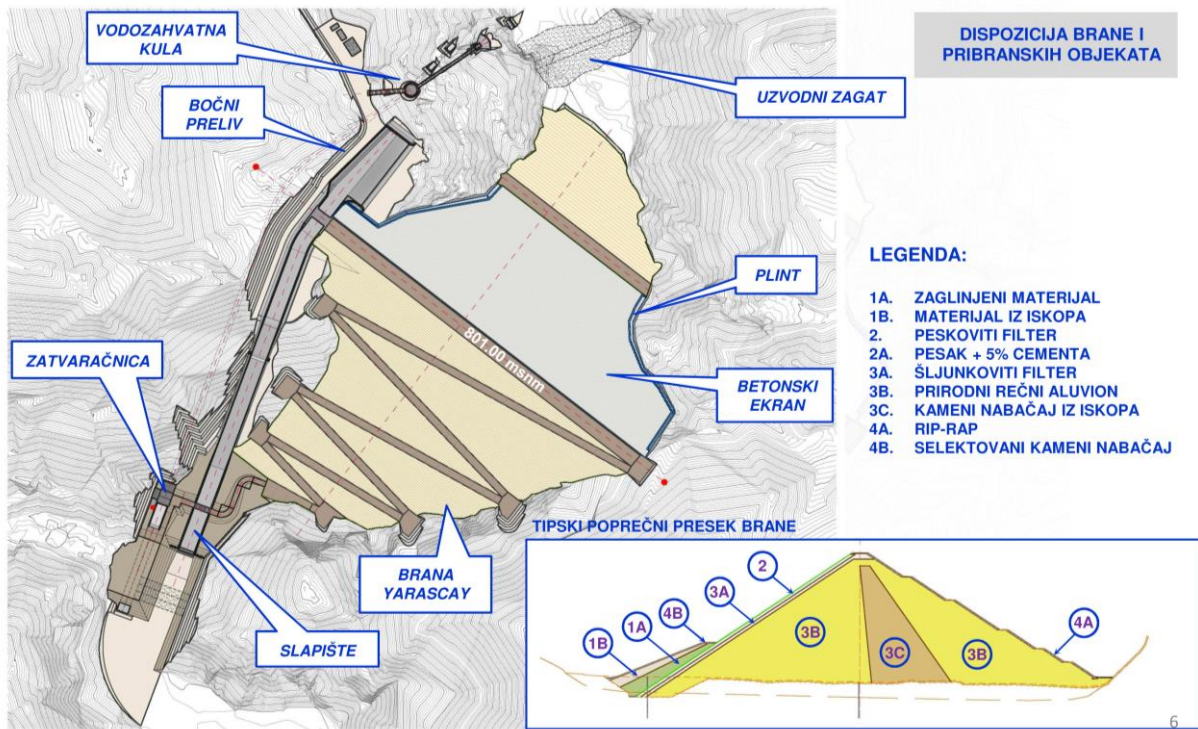
Slika 2. Hidraulička šema sistema za navodnjavanje – Tacna (Peru)

Projektovanom branom Yarascay sa krunom na koti 801,00 mmm maksimalne građevinske visine od 106,00 m, formirala bi se akumulacija sa kotom normalnog uspora 795,80 mmm i korisnom zapreminom od $105 \times 10^6 \text{ m}^3$. Kao minimalni radni nivo akumulacije definisana je kota 748,35 mmm kojoj odgovara zapremina mrtvog prostora od $15 \times 10^6 \text{ m}^3$. Sa pomenutom korisnom zapreminom moguće je godišnje isporučiti $51,76 \times 10^6 \text{ m}^3$ vode za potrebe navodnjavanja sa količinskom obezbeđenošću od 85 % i vremenskom obezbeđenošću od oko 75 %. Imajući u vidu da količina od 38,76 miliona m^3 , predstavlja potrebe za navodnjavanjem koje su označene u prethodnoj dokumentaciji (2009. god.), pomenutom akumulacijom moguće je obezbediti dodatnih 13 miliona m^3 vode.

U okviru studije alternativnih varijanti tipa brane analizirano je 5 tipova brane: 1) nasuta brana sa centralnim glinenim jezgrom, 2) nasuta brana sa centralnim asfaltnim jezgrom, 3) nasuta brana sa uzvodnim armirano-betonskim ekranom, 4) brana od valjanog betona i 5) lučna brana. Komparativna analiza tipa brane urađena je zajedno sa svim pripadajućim objektima uz branu a to su: objekti za skretanje reke, objekti za evakuaciju velikih voda i objekti za zahvatanje vode za nizvodne korisnike. Kao ekonomski najpovoljniji tip brane predložena je nasuta brana sa uzvodnim armirano-betonskim ekranom sa ukupnim investicijama od oko 52,20 miliona \$, što je oko 7,00 miliona \$ manje od investicija potrebnih za izgradnju druge najpovoljnije varijante a to je nasuta brana sa centralnim glinenim jezgrom. Brana od valjanog betona se pokazala kao najskuplja sa ukupnim investicijama od oko 93 miliona \$.

Predloženi tip brane sa svim pribranskim objektima razrađen je na nivou Idejnog projekta sa inoviranim topografskim, geološkim i hidrološkim podlogama. Predviđeno je da najveći deo potpornog tela nasute brane bude izgrađen od prirodnog aluvialnog materijala iz rečnog korita dok je samo njen manji centralni deo ispunjen kamenim nabačajem iz iskopa.

Za evakuaciju vode u toku izgradnje predviđen je optočni tunel u desnom boku koji se nakon spuštanja zatvarača na ulaznoj građevini pretvara u temeljni ispust i u njega se montira cevovod za dovod vode za nizvodne korisnike. Za evakuaciju velikih voda tokom eksploatacije projektovan je bočni preliv sa glatkim brzotokom i slapištem.



Slika 3. Dispozicija brane Yarascay i objekata uz branu

3. Podloge

Geologija

Nakon sprovedenih geoloških istražnih radova pokazalo se da je debljina aluvialnog materijala u zoni buduće brane između 11 i 12 m ispod kojeg je smeštena ispucala andezitska stenska masa koja ujedno sačinjava i bokove pregradnog profila. Geofizičkim ispitivanjima je utvrđeno da se debljina aluvialnih naslaga u zoni buduće akumulacije kreće u granicama od 30 do 50 m sa trendom povećanja od pregradnog profila uzvodno. Predloženi tip brane (CFGD-Concrete Face Gravel fill Dam) je postao najpovoljniji s obzirom da veći deo potpornog tela brane čini pomenuti aluvialni materijal a da istog ima u izobilju duž budećeg akumulacionog prostora na relativno malom rastojanju od pregradnog profila.

Hidrologija

Srednji višegodišnji proticaj reke Sama u profilu buduće brane iznosi 1,905 m³/s. Maksimalni proticaji ulaznih hidrograma velikih voda različitih povratnih perioda prikazani su u tabeli 1:

Tabela 1. Velike vode u profilu brane Yarascay

T (god)	10	20	50	100	500	1000	5000	10000	PMF
Q (m ³ /s)	44,20	114,40	190,00	281,00	543,90	677,30	1020,40	1181,1	2374,5

4. Uporedni prikaz hidrauličkih karakteristika bočnog i piano key preliva

Za evakuaciju velikih voda u periodu eksploatacije projektovana su dva varijantna tipa preliva: 1) bočni preliv sa glatkim brzotokom i 2) piano key preliv sa stepenastim brzotokom, sa ciljem da se sračunaju investicije potrebne za izgradnju oba varijantna rešenja i predloži ono koje je ekonomičnije za razradu na nivou Idejnog projekta.

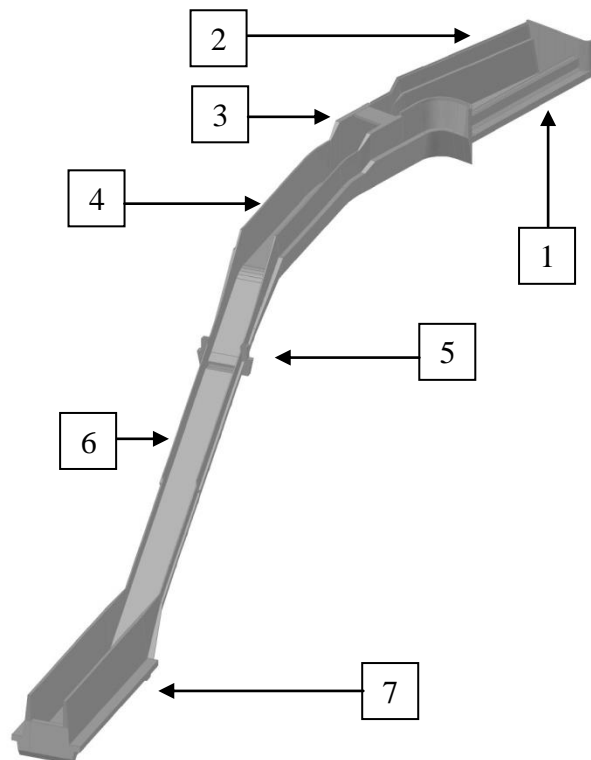
Bočni preliv je slobodan tip preliva bez mogućnosti regulisanja proticaja pri nailasku poplavnih talasa, kod koga se voda bočno uliva u sabirni kanal pri čemu je prelivanje upravno na pravac toka u sabirnom kanalu. Ovaj tip preliva je veoma pouzdan objekat i često se koristi kod nasutih brana u uskim kanjonima kako bi se sprečilo njeno prelivanje u periodima povodnja.

Piano-Key preliv (PKW) je tip slobodnog preliva koji se još uvek izučava na fizičkim modelima u hidrauličkim laboratorijama širom sveta kako bi se pronašao relativno jednostavan i opšte primenljiv postupak za proračun njegovog kapaciteta imajući na umu složenost strujanja na prelivnom pragu. Prelivna ivica ima oblik dirki klavira i njena razvijena dužina veća je od potrebna dužine analognog bočnog ili čeonog preliva, međutim ukupna širina fronta prelivanja (W) može biti i do tri puta manja.

Kod bočnog preliva izdvajaju se sledeći delovi:

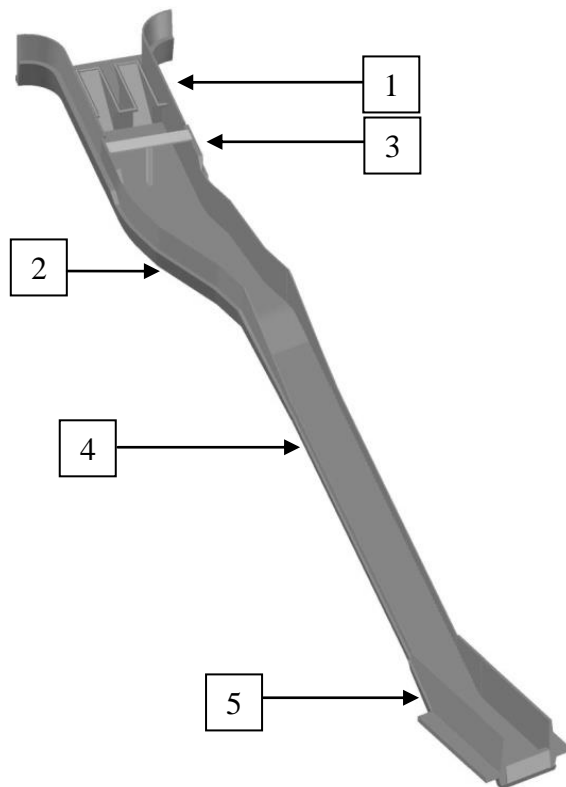
- **Ulazni deo** – Kriger-ov preliv
- **Provodnik**
 - Sabirni kanal sa bočnim doticajem
 - Prelazna deonica
 - Brzotok
- **Izlazni deo** – slapište

1. Preliv – prelivna ivica je oblikovana prema Kriger-u
2. Sabirni kanal
3. Most – u eksploatacionoj fazi njime se obezbeđuje komunikacija između leve i desne obale
4. Prelazna deonica
5. Aerator – rampa kojom se mlaz odbacuje od dna brzotoka a vazduh veštački uvlači u mlaz dovodom koji je smešten u bočnim zidovima i ispod rampe
6. Brzotok
7. Slapište



Kod piano key preliva izdvajaju se sledeći delovi:

- **Ulazni deo** – piano key preliv (PKW)
- **Provodnik**
 - Horizontalna kanalska deonica
 - Stepenasti brzotok
- **Izlazni deo** – slapište



1. Preliv – Piano Key A tip
2. Horizontalna prelazna deonica – kanal pravougaonog poprečnog preseka čija je širina diktirana širinom fronta preliivanja PKW preliva
3. Most – u eksploatacionoj fazi njime se obezbeđuje komunikacija između leve i desne obale
4. Stepenasti brzotok – energija mlaza vode koji se obrušava, efikasnije se “uništava” stepenastom konturim nego glatkom, tako da do slapišta dospeva delimično umiren
5. Slapište – preostali “neuništeni” deo energije umiruje se u slapištu čija je potrebna dužina daleko manja nego li da je brzotok bio gladak

4.1. Projektni kriterijumi

Imajući u vidu da je brana nasuta, ulazni deo i provodnik oba varijantna tipa preliva dimenzionisani su da propuste retendovani (transformisani) proticaj 10000-u godišnje velike vode pri čemu retendovani proticaj PMF-a treba prihvatiti valobranom odgovarajuće visine tako da ni pri ovim ekstremnim hidrološkim uslovima ne dođe do preliivanja brane. Geometrijske karakteristike izlaznog dela (slapišta) određene su iz uslova da se u njemu umiri retendovani proticaj 1000 godišnje velike vode.

4.2. Ulazni deo

Bočni preliv

Kota krune preliva jednaka je koti normalnog uspora akumulaciji i iznosi 795.80 mm. Pri merodavnom računskom proticaju na prelivu se formira projektovana visina prelivnog mlaza (H_p) a u akumulaciji kota maksimalnog uspora (KMU). Kako bi se definisala pomenuta kota

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

urađeni su proračuni potrebne dužine prelivne ivice bočnog preliva za različite visine prelivnih mlazova od 2,50; 3,00 i 3,50 m. Povećanje visine prelivnog mlaza za posledicu ima smanjenje potrebne dužine prelivne ivice bočnog preliva (L_p) sa jedne i izdizanje kote krune brane sa druge strane. Takođe, pri transformaciji poplavnog talasa koristi se sve veća zapremina akumulacije tako da retendovani proticaj biva sve manji ($Q_{IZLAZ,MAX}$) a time i dimenzije sabirnog kanala, prelazne deonice i brzotoka.

Tabela 2. Rezultati proračuna potrebne dužine prelivne ivice bočnog preliva za različite visine prelivnog mlaza

H_p (m)	L_p (m)	$Q_{IZLAZ,MAX}$ (m^3/s)	$Z_{AK,MAX}$ (mm)	$V_{AK,MAX}$ ($10^6 m^3$)
2.50	117.00	991.94	798.30	129.71
3.00	83.00	920.76	798.80	131.63
3.50	60.70	846.80	799.30	133.58

Preliv i sabirni kanal su projektovani tako da se pri svim proticajima koji su manji ili jednaki računskom obezbedi nepotopljeno prelivanje, tj da nivoi vode u sabirnom kanalu pri pomenutim proticajima ne utiču na smanjenje kapaciteta preliva.

Posebna pažnja posvećena je određivanju kapaciteta preliva za proticaje koji su veći od računskog. U slučaju da se želi obezbediti nepotopljeno prelivanje pri svim proticajima uključujući i maksimalni mogući, a to je retendovani proticaj PMF-a, sabirni kanal bi morao biti velikih dimenzija pre svega u pogledu njegove dubine. Kako bi se to izbeglo, on je projektovan tako da se pri proticajima koji su veći od računskog duž prelivne ivice uspostavlja delimično ili potpuno potopljeno prelivanje. Na taj način dobijaju se minimalno potrebne dimenzije sabirnog kanala.

Usvojena je visina prelivnog mlaza od 3,50 m. Deo krive proticaja sa nepotopljenim prelivanjem računat je prema preporukama iz lit./1/ dok je kapacitet preliva pri potopljenom prelivanju određen uprošćenim postupkom diskretizacije prelivne ivice na nekoliko zona.

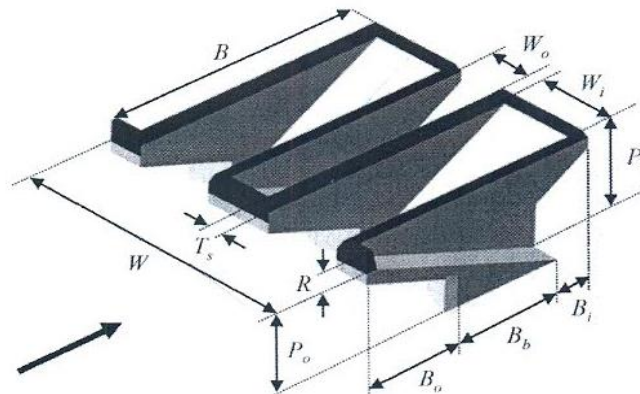
Piano key preliv

Dimenzije PKW preliva tipa A određene su korišćenjem preporuka iz lit./2/.

Postupak određivanja dimenzija PKW preliva (W_o , W_i , P_o , P_i , B_o , B_i , B_b , R , T_s) je iterativan. Prvi uslov je da su geometrijske karakteristike preliva (slika 4) odabrane tako da relativni odnosi pojedinih njegovih dimenzija budu u okviru ograničenja koja su navedena u pomenutoj literaturi. Ova ograničenja ujedno definišu i zonu upotrebljivosti predloženih jednačina kao i oblast u okviru koje su vršena hidraulička modelska ispitivanja za ovaj tip preliva.

Drugi uslov je da se, pomoću preliva odabranih dimenzija, može evakuisati maksimalni retendovani (transformisani) proticaj 10.000-u godišnje velike vode. Kako je ovaj proticaj takođe nepoznat u prvoj iteraciji se pošlo od maksimalnog proticaja pomenutog povratnog perioda koji se transformiše pomoću bočnog preliva i koji iznosi 846,80 m^3/s .

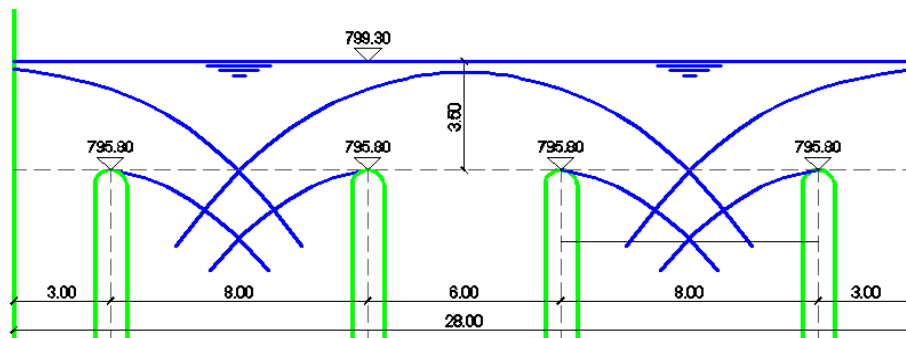
Treći uslov je da nivo vode, pri merodavnom računskom proticaju, u kanalu u preseku neposredno nizvodno od preliva ne utiče na smanjenje njegovog kapaciteta tj. da ne dolazi do potapanja prelivnog mlaza. Kako bi se to obezbedilo potrebno je pažljivo odabrati veličine W_o i P_i (slika 4).



Slika 4. Geometrijske karakteristike Piano Key preliva

Usvojene dimenzije Piano Key preliva su: $W = 28,00$ m; $W_o = 8,00$ m; $W_i = 6,00$ m; $P_o = 11,33$ m; $P_i = 12,70$ m; $B_o = 6,70$ m; $B_i = 6,70$ m; $B = 27,93$ m; $R = 1,37$ m.

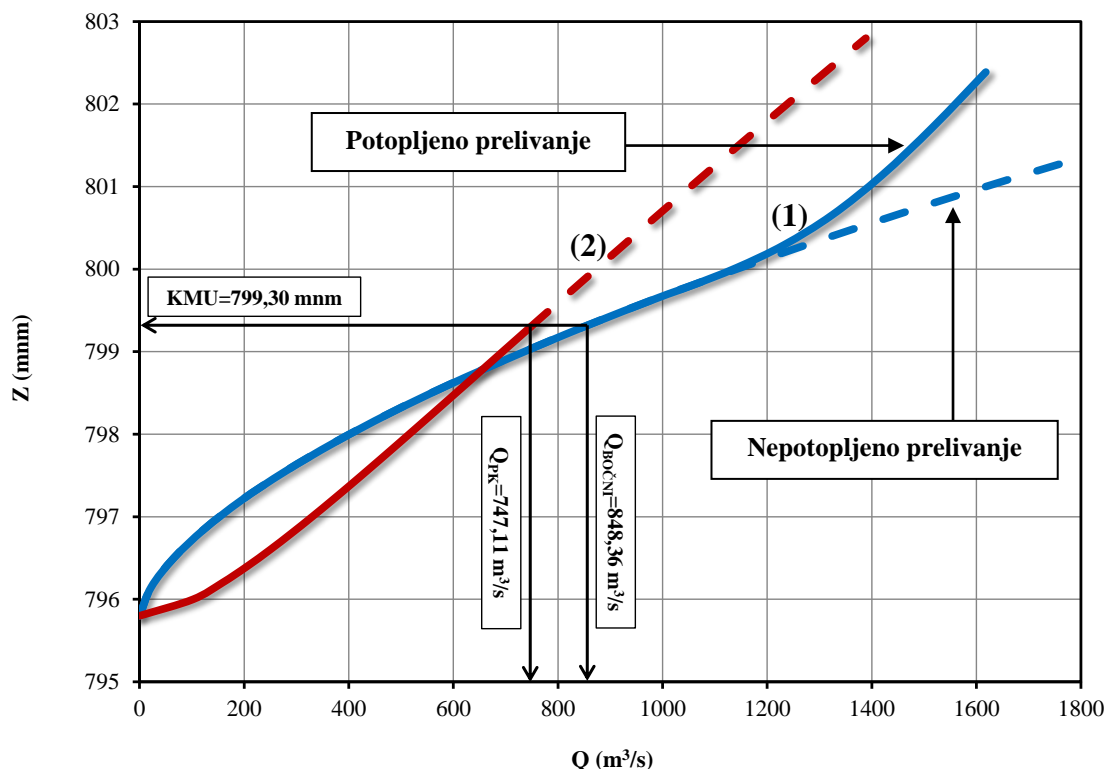
Dimenzija W_o iznosi 8.00 m a odabrana je tako da pri merodavnom računskom proticaju ne dolazi do sudaranja mlazova što bi za posledicu imalo prigušenje preliva tj. smanjenje njegovog kapaciteta i izdizanje nivoa vode u akumulaciji. Na slici 5 prikazan je očekivani izgled strujne slike u uslovima prelivanja pri merodavnom računskom proticaju. Kako bi se maksimalno smanjila ukupna širina fronta prelivanja (W), usvojeno je da širina šupljine preliva sa uzlaznom rampom bude 6.00 m.



Slika 5. Uslovi prelivanja preko piano key preliva pri merodavnom računskom proticaju

Pri proticajima koji su veći od računskog, povećavaju se negativni uticaji usled sudaranja mlazova koji se ulivaju u šupljine sa silaznom rampom. Nakon transformacije poplavnog talasa PMF-a na prelivu se formira mlaz visine 6.69 m pa su za isti određene konture gornje i donje ivice nakon čega je utvrđeno da do bočnih sudara dolazi na visini od oko 3.00 m što je manje od 50 % ukupne visine prelivnog mlaza. Ispunjenost ovog uslova pokazuje da je prelivanje nepotopljeno kod drugih tipova preliva (čeonni, bočni) ali se ne može sa sigurnošću tvrditi da on važi i za piano key preliv. Kako bi se odredila kriva proticaja preliva uzeta je u obzir pretpostavka da je prelivanje nepotopljeno pri svim proticajima pa i za one koji su veći od računskog.

Takođe treba imati na umu da su u pomenutoj literaturi date preporuke za proračun kapaciteta preliva pri proticajima koji su manji ili jednaki računskom tako da je deo krive za veće proticaje određen uz pretpostavku da se date jednačine mogu upotrebiti i za njih.



Slika 6. Uporedni prikaz krivih proticaja bočnog (1) i piano key preliva (2)

4.3. Transformacija poplavnih talasa

Krive kapaciteta varijantnih tipova preliva (slike 6) poslužile su kao ulazni parametar za proračun transformacije poplavnih talasa svih povratnih perioda od značaja za određivanje dimenzija: valobrana na kruni brane, provodnika i slapišta.

Tabela 3. Rezultati proračuna transformacija poplavnih talasa pomoću bočnog i PK preliva

	T	(god)	1000	10000	PMF
	$Q_{ULAZ,MAX}$	(m^3/s)	677,30	1181,10	2374,50
Bočni preliv	$Q_{IZLAZ,MAX}$	(m^3/s)	447,26	846,79	1534,98
	$Z_{AK,MAX}$	(mm)	798,15	799,30	801,84
	V_{MAX}	($10^6 m^3$)	129,15	133,58	145,89
Piano Key preliv	$Q_{IZLAZ,MAX}$	(m^3/s)	449,67	740,30	1329,09
	$Z_{AK,MAX}$	(mm)	797,64	799,26	802,49
	V_{MAX}	($10^6 m^3$)	127,17	133,45	149,99

Rezultati pokazuju da projektovani piano key preliv ima veću sposobnost ublaženja računskog poplavnog talasa nego bočni preliv ali i osetno manji kapacitet pri porastu kote u akumulaciji. Imajući u vidu da je kruna brane na koti 801,00 mm i da treba sprečiti njeno prelivanje i pri najekstremnijim hidrološkim uslovima (nailazak maksimalno mogućeg poplavnog talasa), na osnovu rezultata iz tabele 3 primećuje se da je u varijanti sa bočnim prelivom ovaj uslov

moguće obezbediti sa valobranom koji je niži za 0,65 m nego li u varijanti sa Piano Key prelivom.

4.4. Provodnik

Bočni preliv

Voda koja preko preliva dospeva u sabirni kanal, teče duž njega u pravcu koji je približno upravan na pravac prelivanja. Poprečni presek sabirnog kanala je trapeznog oblika. Širina kanala je promenljiva i linearno se povećava od 6.00 m koliko ona iznosi u najuzvodnijem preseku do 12.00 m koliko iznosi u najnižvodnijem. Podužni pad kanala je 3.33 % a definišu ga kote dna kanala u krajnjim presecima. Kota dna kanala u uzvodnom preseku iznosi 784.00 mnm a u nizvodnom je 2.00 m niža. Nagib levog bočnog zida (ka obali) jednak je nagibu iskopa u steni i iznosi 5:1 dok je desni bočni zid koji se nastavlja na prelivni prag projektovan u nagibu 1.50:1.

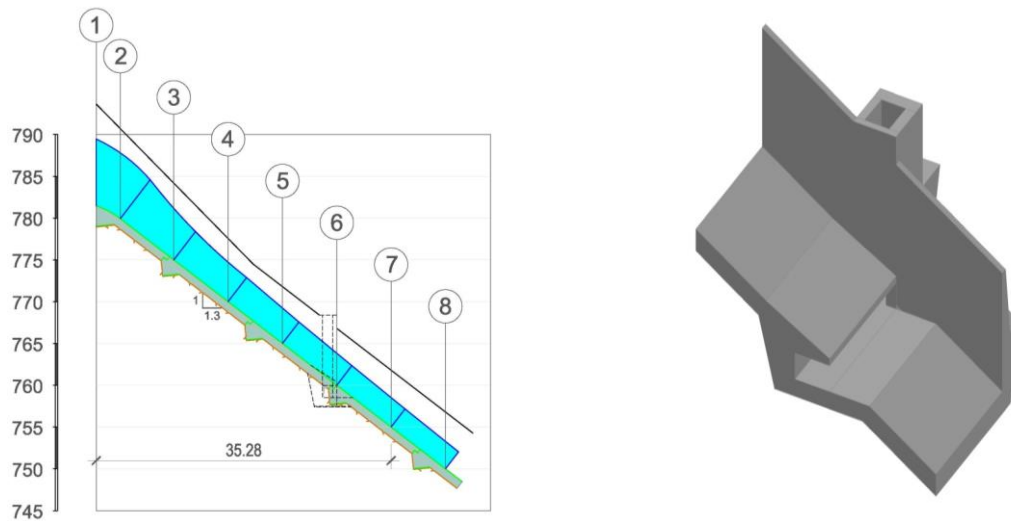
Na sabirni kanal se nastavlja horizontalna prelazna deonica ukupne dužine 114.00 m. Širina prelazne deonice je konstantna i iznosi 12.00 m. Pomoću horizontalne krivine čiji je poluprečnik 50 m a skretni ugao 17.30° osovina prelazne deonice i brzotoka se usmerava ka rečnom koritu u koje se upušta voda koja se evakuše preko preliva.

Hidraulički proračun duž sabirnog kanala i prelazne deonice urađen je korišćenjem jednačine održanja količine kretanja za kanal sa bočnim doticajem (lit./3/). Nizvodni granični uslov za proračun je dubina koja se ostvaruje u najnižvodnijem preseku prelazne deonice pri kojoj je Frudov broj jednak 0.95, dok je uzvodni granični uslov maksimalni proticaj na koji je dimenzionisan preliv od $846,80 \text{ m}^3/\text{s}$. Geometrijske i hidrauličke karakteristike sabirnog kanala proverene su i korišćenjem preporuka iz lit./4/ i lit./5/.

Kraj prelazne deonice pretstavlja ujedno i početak brzotoka. To je kanal pravougaonog poprečnog preseka čiji je projektovani podužni pad od $V:H = 1:1.3$, proizvod topografskih i geoloških uslova duž njegove trase. Dno brzotoka je glatko a širina u dnu je konstantna i iznosi 12.00 m.

Brzine vode u pravcu tečenja rastu pa tako i opasnost od pojave kavitacije i kavitacione erozije. Iskustva sa izvedenih objekata su pokazala da je aeracija najefikasniji način za sprečavanje ove pojave kod brzotoka.

Hidraulički proračun linije nivoa pri računskom proticaju je pokazao da je presek 8 (slika 7) prvi presek u kojem je relativni pritisak manji od -6 mvs. Međutim, iskustvo pokazuje da se najmanji kavitacioni broj dostiže pri protoku manjem od računskog tako da su proračuni linije nivoa duž brzotoka urađeni za još tri proticaja: $200 \text{ m}^3/\text{s}$, $400 \text{ m}^3/\text{s}$ i $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri protoku od $400 \text{ m}^3/\text{s}$, prvi presek u kojem relativni pritisak „padne“ ispod -6 mvs je presek 7 tako da je upravo ova činjenica opredelila projektanta da aerator postavi u prvom uzvodnijem profilu a to je profil 6.



Slika 7. Položaj i trodimenzionalni prikaz aeratora

Piano key preliv

Prelivena voda dospeva u kanal pravougaonog poprečnog preseka ukupne dužine 112.60 m. Širina kanala neposredno nizvodno od preliva uslovljena je širinom fronta preliivanja (W) koji iznosi 28.00 m. Ovu širinu kanal zadržava na dužini od 67.80 m. Na rastojanju od 42.70 m od nizvodnog lica prelivne konstrukcije projektovana je horizontalna krivina čiji je poluprečnik 50 m a skretni ugao 17.30° pomoću koje se osovina kanala i brzotoka usmerava ka rečnom koritu. Prelaznom deonicom dužine 30.00 m širina kanala se sužava sa 28.00 m na 18.00 m što ujedno pretstavlja i širinu brzotoka.

Hidraulički proračun dubina vode duž kanala urađen je sukcesivnim rešavanjem energetske jednačine u uzvodnom smeru s obzirom da je tečenje u kanalu mirno. Nizvodni granični uslov za proračun je dubina koja se ostvaruje u najnižvodnijem preseku kanala pri kojoj je Frudov broj jednak 0.95, dok je uzvodni granični uslov maksimalni proticaj na koji je dimenzionisan preliv od $740.30 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kraj prelazne deonice pretstavlja ujedno i početak stepenastog brzotoka čiji je projektovani podužni pad od $V:H = 1:1.3$, isti kao i kod glatkog brzotoka bočnog preliiva. Širina brzotoka u dnu je konstantna i iznosi 18.00 m. Usvojena visina stepenika iznosi 1.00 m.

Izbor širine stepenastog brzotoka je u direktnoj vezi sa merodavnim računskim proticajem koji je potrebno evakuisati u nizvodno rečno korito bez preliivanja bočnih zidova. Naime prednost stepenastog brzotoka u odnosu na glatki jeste njegova veća uloga u uništavanju energije burnog vodenog toka što kao direktnu posledicu ima manje dimenzije objekta za umirenje energije. Dosadašnja istraživanja ovog tipa brzotoka pokazuju da je gornja granica njegove primenljivosti i efikasnosti vezana za maksimalni specifični proticaj od oko $50 \text{ m}^3/\text{sm}$.

Hidraulički proračun stepenastog brzotoka urađen je u skladu sa preporukama iz lit./6/ i lit./7/.

4.5. Izlazni deo

Bočni preliv

Za potrebe dimenzionisanja izlaznog dela – slapišta, urađen je proračun kako bi se sračunala linija nivoa duž brzotoka pri merodavnom računskom proticaju od 447.26 m³/s a pre svega dobio podatak o neaerisanoj dubini vode i brzini u najnižvodnijem preseku.

Širina slapišta je jednaka širini brzotoka, a usvojena kota dna (690.00 mm) je proizvod želje projektanta da se investicije potrebne za izgradnju ovog objekta minimiziraju imajući na umu rezultate geoloških istražnih radova koji su pokazali da je debljina aluviona u ovoj zoni oko 11.00 m. Dužina slapišta iznosi 68,00 m a usvojena je na osnovu preporuka iz lit./8/.

Piano key preliv

Širina slapišta jednaka je širini brzotoka i iznosi 18.00 m. Kako bi se odredila potrebna dužina slapišta, ponovljen je postupak određivanja neaerisane dubine na kraju brzotoka po Boes-u i Hager-u pri maksimalnom retendovanom proticaju 1.000-u godišnje velike vode koji iznosi 449.67 m³/s. Ovaj proticaj je merodavan za dimenzionisanje slapišta.

Spregnuta dubina u slapištu je određena za neaerisanu dubinu na kraju brzotoka što za posledicu ima duže slapište u odnosu na ono koje bi se dobilo pri proračunu u kojem bi ulazni podatak bila aerisana dubina. Usvojeni kriterijum je na strani sigurnosti a eventualno smanjenje dužine slapišta moguće je izvršiti tek nakon rezultata hidrauličkih ispitivanja koja bi se izvršila na fizičkom modelu celine preliv-brzotok-slapište.

Kota dna slapišta je 690.00 mm. Usvojena dužina slapišta iznosi 42.00 m.

Tabela 4. Upporedni prikaz karakterističnih veličina proračuna slapišta bočnog i PK preliva

		Bočni preliv	PK preliv
Q	(m ³ /s)	447,26	449,67
h	(m)	1,01	1,06
v	(m/s)	37,09	23,55
h'	(m)	16,29	10,43
v'	(m/s)	2,29	2,40
L	(m)	68,00	42,00

U tabeli 4 oznake imaju sledeća značenja: Q – merodavni računski proticaj, h – neaerisana dubina vode na kraju brzotoka, v – brzina vode na kraju brzotoka, h' – spregnuta dubina u slapištu, v' – brzina vode u slapištu, L – dužina slapišta.

4.6. Upporedna analiza bočnog i piano key preliva

Nakon analize koštanja glavnih građevinskih radova (zemljani, betonski i armirački) potrebnih za izgradnju oba tipa preliva, pokazalo se da je varijanta bočnog preliva investiciono povoljnija (tabela 5). Međutim to nije jedina prednost ove varijante. Bočni preliv je primenjen na mnogim projektovanim i izvedenim branama nasutog tipa širom sveta i pokazao se kao veoma pouzdan objekat u eksploataciji. Takođe ovaj tip preliva je dosta

izučavan u hidrauličkim laboratorijama širom sveta tako da postoji veliki broj literaturnih radova u kojima je moguće naći primenljive obrazce za proračun njegovog kapaciteta. Pri evakuaciji proticaja koji su veći od računskog, bočni preliv se pokazao kao veoma efikasan. Na bočnom prelivu brane Yarascay pri ovim proticajima se javlja potopljeno prelivanje a deo krive kapaciteta u ovoj zoni određen je proračunom uz određene pretpostavke i pojednostavljenja. Mada se i takav pojednostavljeni postupak može smatrati dosta pouzdanim za procenu propusne moći preliva poželjno je dobijene rezultate proveriti na hidrauličkom modelu razmere 1:30 - 1:40.

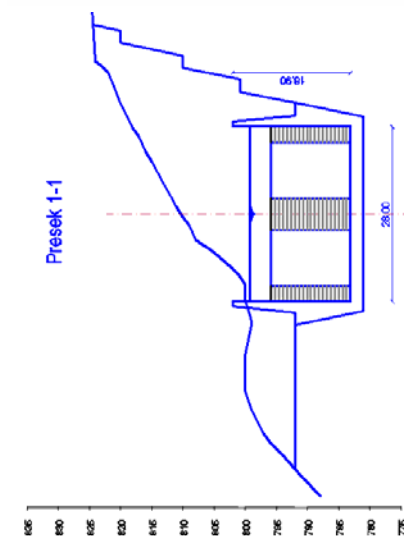
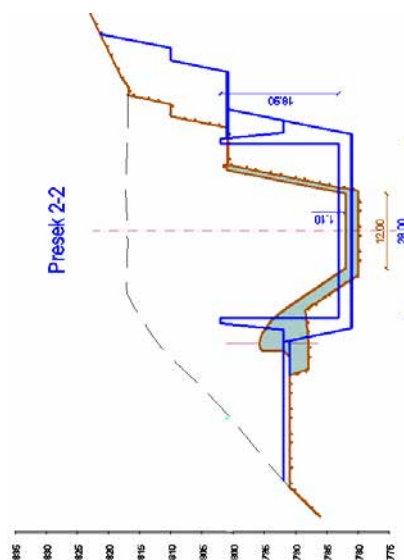
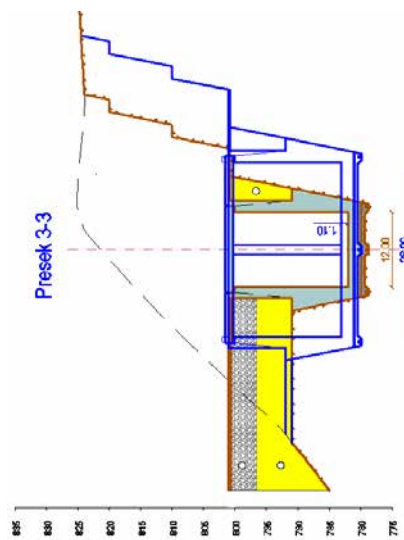
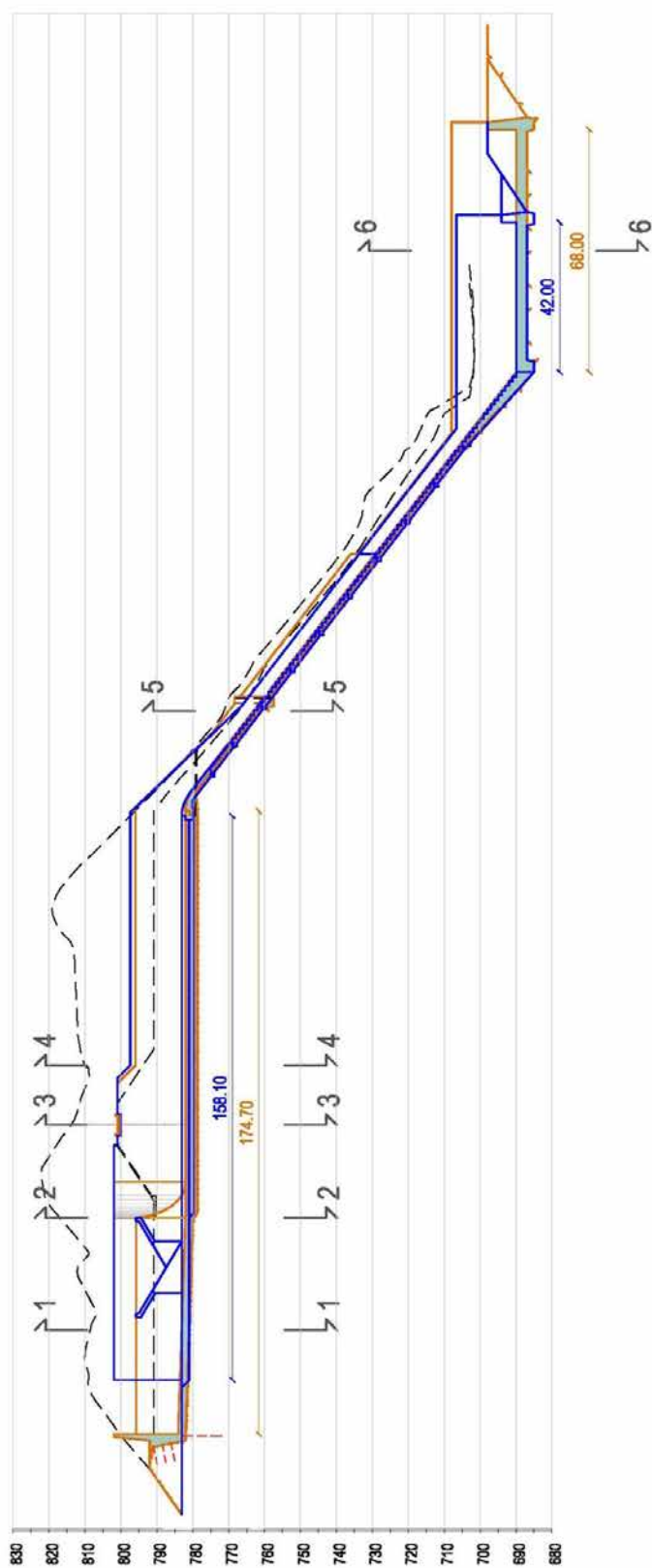
Piano key preliv nastao je kao proizvod evolutivnog unapređenja lavirint preliva sa ciljem da se potrebna širina fronta prelivanja maksimalno smanji a time i investicije potrebne za izgradnju takvog tipa preliva. Relativno je novijeg datuma i počeo je intenzivnije da se primenjuje početkom ovog veka. Kako se širila njegova primena rastao je i broj radova vezanih za rezultate modelskih ispitivanja na ovom tipu preliva. Međutim još uvek se ne može tvrditi da je ovaj tip preliva izučen do kraja. Najveći problem kod ovog tipa preliva je način određivanja kapaciteta za proticaje koji su veći od računskih. Pri ovim proticajima na prelivu se formira mlaz koji je veći od računskog, a preporuke u literaturi se daju za računsku visinu mlaza. Pored geometrije prelivne konstrukcije (pre svega širina šupljina sa uzlaznom i silaznom rampom), na kapacitet preliva jako bitnu ulogu ima i uticaj vode u nizvodnom kanalu u koji prelivena voda dospeva. S obzirom da je u pitanju nasuta brana i da se ni po koju cenu ne sme dozvoliti njeno prelivanje jako je važno poznavati hidrauličke karakteristike preliva pri svim proticajima koji se mogu javiti tokom eksploatacije. Preliv je dimenzionisan na retendovani proticaj 10.000-u godišnje velike vode ali je betonski valobran na brani projektovan da prihvati maksimalni retendovani proticaj PMF-a. Upravo iz tog razloga jako je važno znati kapacitet preliva i za proticaje koji su veći od računskog a to sa dosadašnjim saznanjima nije moguće sa sigurnošću utvrditi bez rezultata detaljnih hidrauličkih modelskih ispitivanja.

Armirano-betonska konstrukcija piano-key preliva sa nizvodnim odvodnim kanalom nešto je kraća u odnosu na dužinu sabirnog kanala bočnog preliva sa prelaznom deonicom. Dubina odvodnog kanala piano key preliva manja je za 1.10 m od dubine prelazne deonice bočnog preliva. Takođe kako bi se vodi omogućio pristup piano key prelivu potrebno je isprojektovati prilaznu deonicu sa hidraulički oblikovanim bočnim zidovima što u mnogome poskupljuje investicije pre svega zemljanih radova. Širina odvodnog kanala piano-key preliva je 28.00 m i uslovljena je potrebnom širinom fronta prelivanja. Prelaznom deonicom njegova širina se sužava na 18.00 m što ujedno pretstavlja i širinu brzotoka. Širina prelazne deonice bočnog preliva i brzotoka je 12.00 m. Pomenute razlike u dimenzijama značajno utiču na poskupljenje varijante sa piano key prelivom ali ne samo to već i koštanje betonskih radova potrebnih za izgradnju stepenastog brzotoka u odnosu na one koji su potrebni za glatki koji je predviđen kod bočnog preliva. Jedine uštede javljaju se kod slapišta piano key preliva koje je kraće od slapišta bočnog preliva za 26.00 m.

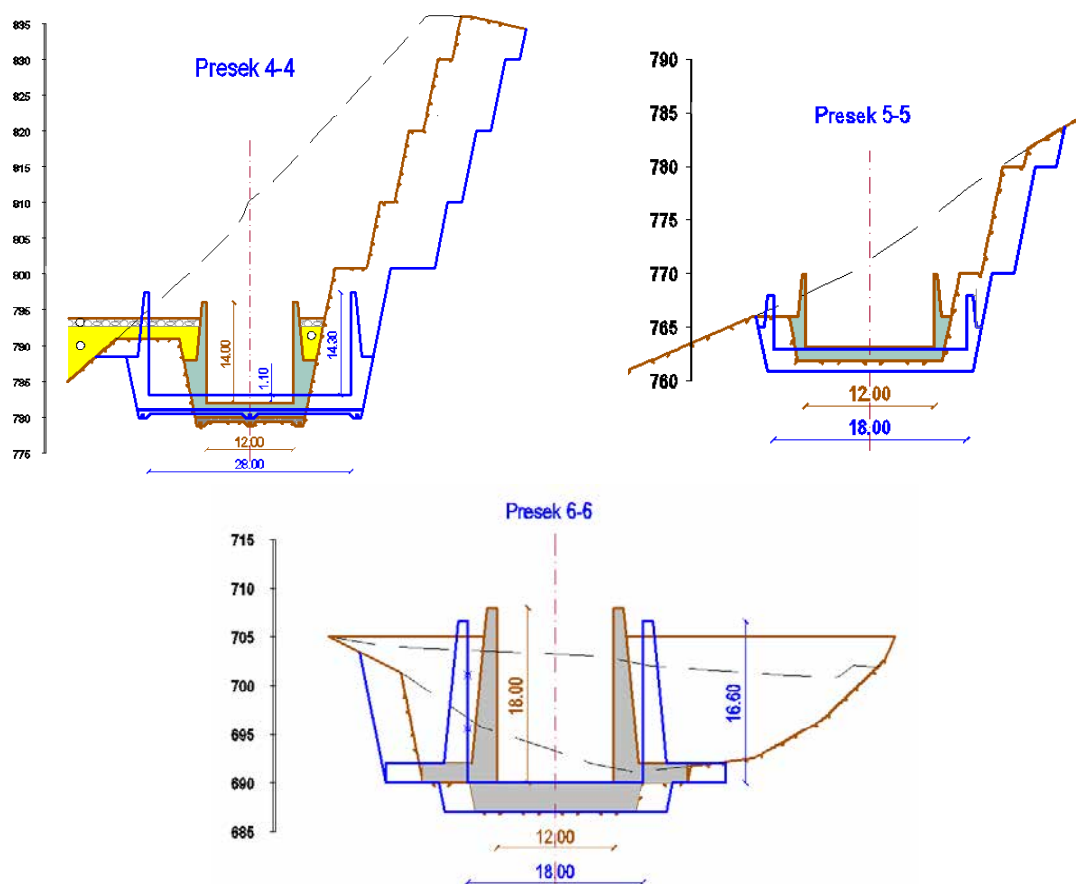
Treba imati na umu da su hidrološki uslovi u zoni buduće brane Yarascay (merodavne velike vode) takvi da favorizuju bočni preliv sa glatkim brzotokom kao rešenje za evakuaciju velikih voda. Bilo bi interesantno sprovesti istu uporednu analizu na nekom drugom pregradnom profilu sa vodotokom kojeg karakterišu manje vrednosti pikova poplavnih talasa koji su merodavni za dimenzionisanje objekata. U okviru narednih priloga daje se uporedni prikaz dimenzija bočnog i piano key preliva na brani Yarascay kako bi se jasno uočile razlike i jednostavnije sagledale investicije potrebne za izgradnju razmatranih tipova preliva.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 8. Uporedni podužni i poprečni preseki bočnog i piano key preliva

U okviru naredne tabele uporedno se prikazuje predmer zemljanih, betonskih i armiračkih radova za oba razmatrana tipa preliva.

Tabela 5. Uporedni predmer glavnih građevinskih radova za dva varijantna tipa preliva (napomena: pri proračunu armature uzeto je da je preliv armiran sa 50 kg/m³ a brzotok i slapište sa 100 kg/m³)

			Bočni preliv	Piano key preliv
1.	Iskop u steni			
1.1.	Preliv i prelazna deonica	m ³	177.683,11	298.830,79
1.2.	brzotok	m ³	33.246,69	58.631,87
1.3.	slapište	m ³	11.749,78	21.811,27
	Ukupno 1:	m ³	222.679,58	379.273,93
2.	Iskop u aluvionu	m ³	35.078,45	23.086,37
3.	Beton			
3.1.	preliv	m ³	16.812,19	23.238,73
3.2.	brzotok	m ³	3.856,72	6.484,06
3.3.	slapište	m ³	11.990,35	8100,37
	Ukupno 3:	m ³	32.659,26	37.823,16
4.	Armatura	Tn	2.425,32	2.652,17

Literatura

1. Design of Small Dams, (1987), United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Third Edition.
2. Marcelo Leite Ribeiro, Michael Pfister, Anton J. Schleiss, Jean-Louis Boillat, (2012), Hydraulic Design of A-type Piano Key Weirs, Journal of Hydraulic Research Vol. 50, No. 4, pp. 400-408.
3. Ljubodrag M. Savić, (2009), Uvod u hidrotehničke građevine, drugo izdanje, Građevinski fakultet – Beograd.
4. Georgije Hajdin, (1966), Sabirni kanali sa ravnomernim priticajem, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“.
5. Prof. dr. Georgije Hajdin, (2006), Uslovi i uputstva za hidraulički račun sabirnog kanala u koga voda preliva sa njegovog boka, Vodoprivreda 0350-0519, 38, 222-224, p. 163-166,
6. Robert M. Boes and Willi H. Hager, (2003), Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways, F.ASCE, Journal of Hydraulic Engineering ASCE (661-670)
7. Robert M. Boes and Willi H. Hager, (2003), Hydraulic Design of Stepped Spillways, F.ASCE, Journal of Hydraulic Engineering ASCE (671-679)
8. A.J.Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, , United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 25.

Ispitivanja lavirint preliva na dva fizička modela različitih razmera

Danica Starinac¹
Predrag Vojt²
Marijana Damnjanović³
Radomir Kapor⁴
Ljubodrag Savić⁵
Budo Zindović⁶
Dragiša Žugić⁷

APSTRAKT: Projektovano rešenje brane sa lavirint prelivom provereno je putem hidrauličkih modelskih ispitivanja, sprovedenih na dva fizička modela – parcijalnom modelu lavirint preliva i modelu celine. Oba modela napravljena su koristeći pravila Frudove sličnosti – parcijalni u razmeri 1:15, a model celine u razmeri 1:30. Osnovni razlog za izradu dva modela leži u činjenici da se uticaj aeracije preliva, koji je jedan od ključnih zadataka ovih modelskih ispitivanja, može pouzdano utvrditi jedino na modelu u krupnijoj razmeri. U ovom radu daju se opisi i rezultati ispitivanja lavirint preliva na oba modela, analizira se uticaj razmere na reprodukciju uslova tečenja na modelu i ističu se najvažniji zaključci izvedeni tokom ovih ispitivanja.

Ključne reči: lavirint preliv, parcijalni model, model celine

Investigations of the labyrinth spillway applying two different scaled physical models

ABSTRACT: The design of the dam has been verified by scale model analyses, conducted on two separate physical models – partial model of the labyrinth spillway (scaled 1:15) and complete model of flood evacuation structures (scaled 1:30). Both models were built assuming the Froude similarity law. The main reason for use two models was the fact that the spillway aeration could be tested correctly only by using large model scale. The most important results and conclusions are summarized in this paper. Also, the influence of the scale factor on the reproduction of flow conditions on the model is analyzed.

Keywords: labyrinth spillway, partial scale model, complete model

¹ Danica Starinac, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, danica.starinac@jcerni.co.rs

² Predrag Vojt, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, predrag.vojt@jcerni.co.rs

³ Marijana Damnjanović, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, marijana.damnjanovic@jcerni.co.rs

⁴ Prof. dr Radomir Kapor, dipl.inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁵ Prof. dr Ljubodrag Savić, dipl.inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

⁶ Budo Zindović, dipl.inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs

⁷ Dragiša Žugić, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, dragisa.zugic@jcerni.co.rs

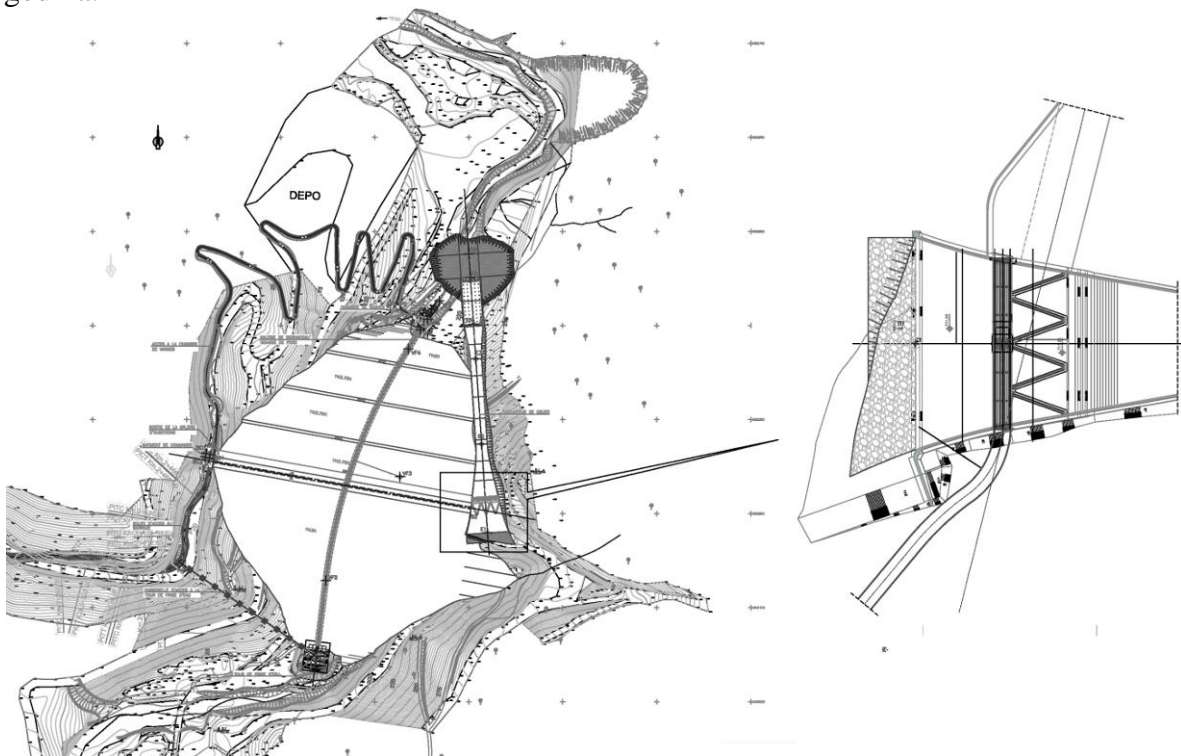
1 Uvod

Lavirint preliv je tip evakuacionog objekta, koji je nastao kao posledica težnje da se na ograničenoj širini pregradnog profila obezbedi što veća dužina prelivne ivice, čime bi se dobio što veći kapacitet preliva. Lavirint preliv se obično sastoji od nekoliko polja, trouglastog ili trapezoidnog oblika u osnovi, sa relativno tankom prelivnom ivicom (Slika 1). Uzvodno lice je najčešće vertikalno, a kruna se oblikuje kao preliv praktičnog profila. Lavirint preliv može predstavljati vrlo ekonomično rešenje, s obzirom da se za istu visinu prelivnog mlaza dobija veći protok, u odnosu na klasične pravolinijske prelive [1].

Primena lavirint preliva, kao glavnog evakuacionog objekta na branama, vezuje se za poslednjih trideset godina. U skladu sa tim, istraživanja lavirint preliva su postala brojnija u ovom periodu ([2], [7], [8]), ali se ipak može reći da je količina empirijskih podataka ograničena i da se raspoložive empirijske formule iz literature moraju pažljivo primenjivati. Svaki novoprojektovani lavirint preliv je jedinstven objekat, čije ponašanje diktira mnoštvo parametara. Prostorno strujanje i prisustvo vazduha dodatno usložnjavaju hidrauličke uslove, pa je za analizu ovakvih objekata preporučljivo korišćenje hidrauličkih, fizičkih modela.

U ovom radu koriste se rezultati modelskih ispitivanja objekata brane Beni Slimane [3], sprovedenih u hidrauličkoj laboratoriji Instituta Jaroslav Černi, Beograd, Srbija, tokom 2014. i 2015. godine.

Projektovana brana Beni Slimane gradi se na reci Mela, u pokrajini Medea, u Alžiru. Osnovna namena brane je regulisanje dotoka reke u cilju navodnjavanja, kao i bezbedno propuštanje protoka $Q_{0,01\%} = 563,4 \text{ m}^3/\text{s}$, što predstavlja veliku vodu povratnog perioda 10000 godina.



Slika 1. Dispozicija predloženog tehničkog rešenja brane Beni Slimane.

Figure 1. General layout of Beni Slimane Dam.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Usvojeno rešenje je nasuta zonirana brana sa centralnim glinenim jezgrom (Slika 1). Kruna je definisana na koti 719,00 mm, širine 11,00 m i oko 279 m dužine. Nagib uzvodnog lica je 1V:3H, a nizvodnog 1V:2,75H. Maksimalna građevinska visina brane iznosi 67 m.

Objekti za evakuaciju velikih voda smešteni su na desnom boku. Čine ih lavirint preliv, brzotok i umirujući bazen.

Lavirint preliv postavljen je na širini poprečnog profila od 32,00 m (srednja linija). Sastoji se od tri segmenta, čije su stranice postavljene pod uglom od 19° u odnosu na osu preliva. Ukupna dužina prelivne ivice iznosi 77,1 m. Iznad preliva je projektovana mostovska konstrukcija. Za usmeravanje vode iz akumulacije ka prelivu, kao i radi zaštite nasute brane, sa obe strane preliva su predviđeni razdelni zidovi, čiji se razmak postepeno smanjuje u pravcu tečenja. Dno prelivne građevine je horizontalno (na koti 711,00 mm), visina preliva iznosi 4,00 m, tako da je kota krune preliva 715,00 mm.

Na prelivnu građevinu nastavlja se brzotok, dužine 190 m i širine 12 m, čiji je podužni pad 34,4%.

Na nizvodnom delu brzotok se postepeno proširuje na dužini od oko 40 m, sa početnih 12 m na 20 m, koliko iznosi širina umirujućeg bazena. Umirujući bazen je dužine 50 m, sa kotom dna na 646,8 mm, projektovan kao objekat tipa USBR II.

2 Hidraulički modeli

Osnovni cilj modelskih ispitivanja bio je utvrđivanje kapaciteta evakuacionih objekata, određivanje najpovoljnijeg rešenja za aeraciju prelivnog mlaza i oblika razdelnih zidova. Takođe, trebalo je proveriti uslove tečenja u brzotoku i umirujućem bazenu i proceniti eroziju u nizvodnom rečnom koritu.

Hidraulička modelska ispitivanja sprovedena su na dva hidraulička modela – parcijalnom modelu lavirint preliva i modelu celine. Osnovni razlog za izradu dva modela leži u činjenici da se uticaj aeracije preliva, koji je jedan od ključnih zadataka ovih modelskih ispitivanja, može pouzdano utvrditi jedino na modelu u krupnijoj razmeri. Naime, sa povećanjem razmere (odnosno smanjenjem dimenzija modela), uticaji kapilarnih i viskoznih sila postaju sve izraženiji, pa se tečenje mešavine vode i vazduha ne može pouzdano predstaviti (efekat razmere).

Parcijalni hidraulički model izgrađen je u razmeri 1:15, u Frudovoj sličnosti (Slika 2). Koristeći simetriju objekata u podužnom pravcu, na parcijalnom modelu predstavljena je samo jedna polovina lavirint preliva, pripadajući deo akumulacije (oko 40 m uzvodno od preliva) i početak uzvodnog kraja brzotoka. Napravljena je leva strana preliva, što znači da je leva obala stvarna, a desna je zid koji zamenjuje ravan simetrije. Usvojena razmera modela omogućava verno prikazivanje svih bitnih činilaca strujanja, pre svega složeno strujanje preko preliva, uz vernije predstavljanje aerisanja prelivnog mlaza predloženim sistemom cevi za aeraciju.

Hidraulički model celine izgrađen je u razmeri 1:30, takođe u Frudovoj sličnosti (Slika 3). Obuhvatio je deo akumulacije (oko 80 m uzvodno od preliva), lavirint preliv, brzotok, umirujući bazen i deo nizvodnog vodotoka (oko 180 m nizvodno od umirujućeg bazena).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2. Polovina lavirint preлива i brzotoka na parcijalnom modelu, u razmeri 1:15
Figure 2. Half of labyrinth spillway and chute, partial scale model, scale 1:15.



Slika 3. Model celine u razmeri 1:30.
Figure 3. Complete scale model of labyrinth spillway, chute and stilling basin, scale 1:30.

3 Hidraulička modelska ispitivanja

3.1 Ispitivanje aeracije lavirint preliva

Aeracija strujanja na lavirint prelivu ispitivana je na parcijalnom modelu. Osnovni cilj ovih ispitivanja bio je da se odredi najpovoljnije tehničko rešenje aeracije prelivnog mlaza. Predviđeno je postavljanje horizontalne aeracione cevi $\varnothing 300$ mm u središtu zakrivljenog dela prelivne konture, na celoj dužini prelivne ivice, sa aeracionim otvorima na nizvodnoj strani.

Na modelu je aeracija ostvarena bakarnom cevi, unutrašnjeg prečnika 20 mm, što odgovara prečniku cevi na prototipu. Kraj cevi na levoj strani modela je otvoren, a na desnoj strani kraj cevi je zatvoren plutanim zatvaračem. Po dužini jednog segmenta lavirint preliva postoje tri otvora i po jedan otvor na mestu preloma pravca (Slika 4).



Slika 4. Parcijalni model, pogled sa nizvodne strane
 Figure 4. Partial scale model, downstream view.

Na modelu su ispitane različite varijante (tehnička rešenja) sistema za aeraciju, u zavisnosti od broja aktivnih aeracionih otvora. Za Varijantu I, otvoren je samo jedan aeracioni otvor, na temenu nizvodne strane preliva. Za Varijantu II, osim aeracionog otvora na temenu nizvodne strane preliva, otvorena su i susedna dva otvora na prelivnim ivicama (po jedan sa leve i desne strane, na rastojanju jednakom četvrtini dužine prelivne ivice).

Varijanta u kojoj su svi otvori aktivni nije detaljno ispitivana, jer se pokazalo da u tim uslovima voda ulazi u sistem za aeraciju i ometa njegovu funkciju. Varijanta bez aeracije (zatvoreni svi otvori) ispitana je u cilju poređenja sa varijantama I i II.

Svaka od varijanti ispitana je pri zadatim karakterističnim protocima: $Q_{MPF}=850$ m³/s, $Q_{0,01\%}=563,4$ m³/s, $Q_{0,1\%}=420$ m³/s, $Q_{1\%}=252$ m³/s, kao i pri manjim protocima kod kojih su efekti aeracije obično uočljiviji.

Pri manjim proticajima, kada je visina prelivnog mlaza mnogo manja od visine preliva, potrebno je da se aeriše prostor neposredno iza prelivne ivice, sa nizvodne strane, koji je nastao namernim proširenjem krune preliva. Ako se u tome ne uspe, tu se pritisak smanjuje

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

zbog čega se mlaz koji preliva približava nizvodnoj strani zida preliva. Zakrivljenost strujnica se povećava, što sasvim malo povećava i protok preko preliva, ali se istovremeno povećava opasnost od pojave pulzacija mlaza i time izazvane vibracije konstrukcije.

Ako je proticaj preko preliva do $100 \text{ m}^3/\text{s}$, aeracija prostora ispod prelivne ivice je zadovoljavajuća (Slika 5). Ipak, ako se prelivni mlaz na nekom mestu mehanički «razdvoji», mlaz se «odmiče» od preliva, što pokazuje da je pritisak ispod mlaza ipak bio nešto manji od atmosferskog.



Slika 5. $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$.
Figure 5. $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Za protoke jednake i veće od $150 \text{ m}^3/\text{s}$, nivo vode u brzotoku nizvodno od preliva značajno poraste (Slika 6). Može se videti da je oko sredine preliva nizvodni nivo vode ispod mlaza toliko visok da se aerisani prostor ispod preliva skoro prekida. Istovremeno, pod dejstvom mlazeva susjednih preliva, stvaraju se u brzotoku dva helikoidna strujanja. U sredini ovih vrtloga pada pritisak, pa u njih ulazi vazduh iz brzotoka, sa nizvodne strane. Pri ovim proticajima vrtlozi nemaju vezu sa aerisanim prostorom ispod preliva.



Slika 6. $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$.
Figure 6. $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Povećanje protoka preko preliva na $300 \text{ m}^3/\text{s}$, kada je visina prelivnog mlaza slična visini preliva, slabi aeraciju prostora iza preliva. Pri protoku $420 \text{ m}^3/\text{s}$ (Slika 7) u deo prostora iza preliva, vazduh ne uspeva da stigne duž najvećeg dela prelivne ivice. Istovremeno vrtlozi u brzotoku, koji se spontano aerišu sa nizvodne strane, postaju sve značajniji. Prostor neposredno iza preliva se aeriše samo u blizini kraja aeracione cevi.



Slika 7. $Q = 420 \text{ m}^3/\text{s}$.
Figure 7. $Q = 420 \text{ m}^3/\text{s}$.

Daljim povećanjem protoka, debljina prelivnog mlaza značajno naraste i mogućnost aeracije prostora iza preliva praktično prestaje (Slika 8). Vrtlozi u brzotoku postaju sve veći, ali ne uspevaju da se produže do početka lavirinta gde se nalazi otvor za aeraciju.

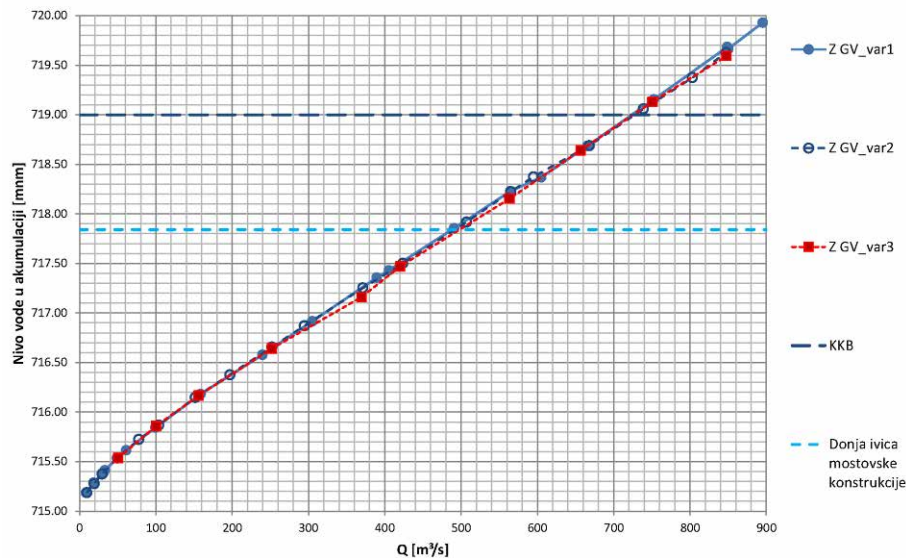


Slika 8. $Q = 563 \text{ m}^3/\text{s}$.
Figure 8. $Q = 563 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ispitivanja varijante II preduzeta su zbog slabijeg aerisanja vrtloga u brzotoku pri većim proticajima. Za ovu varijantu, pri istim ispitivanim proticajima, dobijeni su slični rezultati. Aerisanje vrtloga u brzotoku je stabilno i pri protoku od $420 \text{ m}^3/\text{s}$, dok se u varijanti I uočavalo periodično pomeranje vrtloga.

3.1.1 Izbor varijante aeracije lavirint preliva

Za svaku od ispitanih varijanti na parcijalnom modelu je izmerena odgovarajuća kriva protoka – zavisnost protoka od nivoa vode u akumulaciji (Slika 9). Ne uočavaju se bitne razlike u kapacitetu preliva za razmatrane varijante.



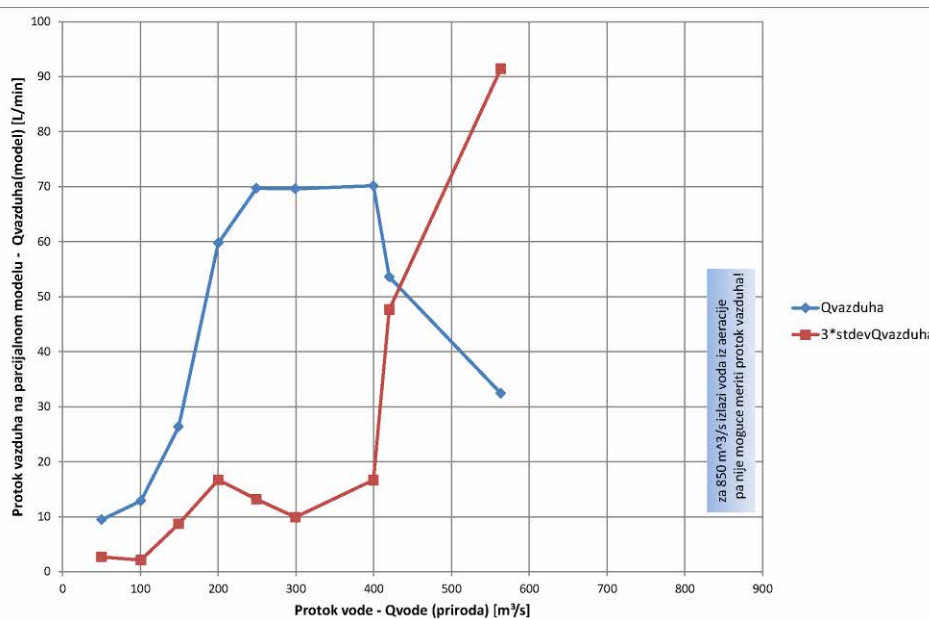
Slika 9. Krive protoka za različite varijante aeracije (parcijalni model).

Figure 9. Rating curves for different aeration variants (partial model).

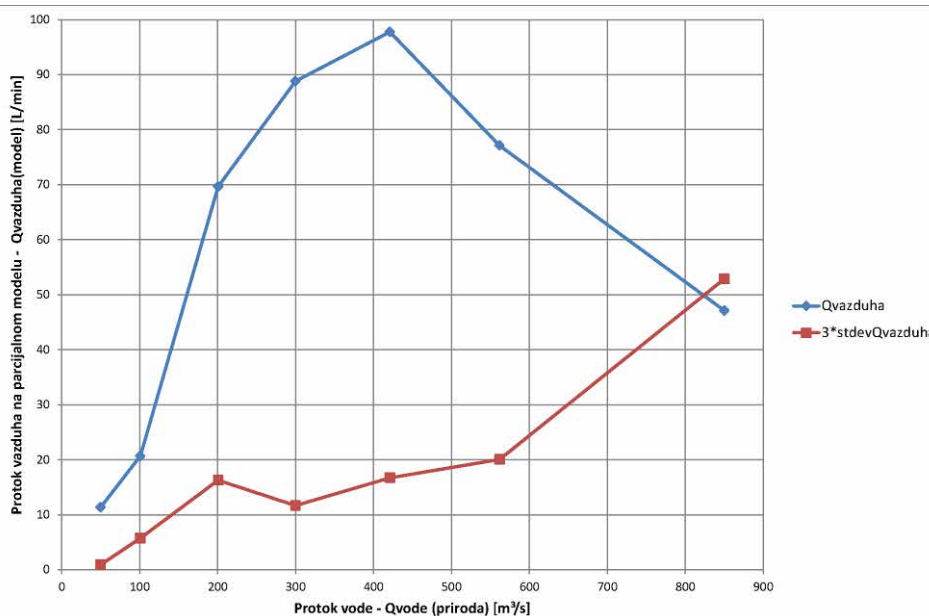
S obzirom da se na osnovu opisanih ispitivanja ni jedna varijanta aeracije preliva nije mogla smatrati hidraulički najpovoljnijom, pokušano je da se do relevantnih zaključaka dođe poređenjem pritisaka na nizvodnoj strani preliva. Pritisaci su izmereni standardnim postupkom merenja u pjezometarskim priključcima postavljenim u izabranim tačkama preliva, ali ni to nije omogućilo upotrebljive rezultate. Zbog velike turbulencije, prisustva velike količine vazduha i složenog prostornog strujanja, kao i relativno malih pritisaka koji se javljaju u toj zoni, rezultati merenja se ne mogu smatrati pouzdanim.

Kako se za ocenu uspešnosti aeracije nisu mogli koristiti izmereni pritisaci na zidu preliva, pokušalo se sa merenjem protoka vazduha koji ulazi u sistem za aeraciju. Na ulaz u aeracionu cev postavljeni su senzori za merenje razlike pritiska, na osnovu koje je ocenjen protok vazduha.

Rezultati merenja protoka vazduha za varijante I i II prikazani su na Slikama 10 i 11. Na oba grafika, plavom linijom i simbolom romba je predstavljen protok vazduha na modelu, a crvenom linijom i kvadratom - fluktuacije protoka vazduha, procenjene na osnovu trostruke vrednosti standardne devijacije fluktuacija. Fluktuacije protoka vazduha ukazuju na moguće fluktuacije pritiska vode koje mogu da izazovu vibracije na konstrukciji preliva. Zato je kao povoljnije rešenje usvojeno ono sa manjim fluktuacijama.



Slika 10. Protok vazduha na parcijalnom modelu u zavisnosti od protoka vode, varijanta I.
 Figure 10. Air flow on the partial model as a function of water flow, Variant I.



Slika 11. Protok vazduha na parcijalnom modelu u zavisnosti od protoka vode, varijanta II.
 Figure 11. Air flow on the partial model as a function of water flow, Variant II.

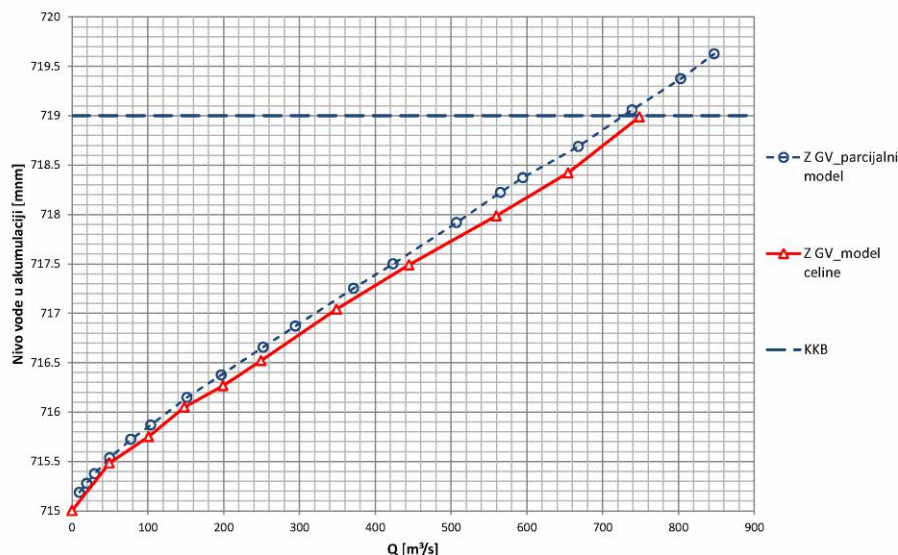
Za varijantu I (Slika 10) se primećuje da protok vazduha raste sa porastom protoka vode do vrednosti protoka od oko 250 m³/s. Zatim ostaje konstantan do vrednosti od oko 400 m³/s, odakle počinje naglo da opada. Pri većim proticajima (850 m³/s), kroz aeracionu cev prolazi voda umesto vazduha. Posmatrajući fluktuacije protoka vazduha, može se uočiti da su one

najmanje na početku i da se polako povećavaju do vrednosti protoka od 400 m³/s, nakon čega naglo rastu.

U slučaju varijante II (Slika 11), protok vazduha ima tendenciju rasta sve do protoka 420 m³/s, nakon čega počinje da opada, ali znatno sporije nego pri varijanti I. Kao posledica toga, čak i pri protoku od 850 m³/s, kroz aeracionu cev protiče polovina maksimalne vrednosti protoka vazduha. Ovo znači da aeracija funkcioniše, za razliku od varijante I, gde pri istom dotoku kroz aeracionu cev teče voda. Takođe, fluktuacije protoka vazduha su znatno manje, a protok vazduha veći nego u slučaju varijante I. Ovakvo tečenje je znatno povoljnije u pogledu sprečavanja vibracija na objektu. Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da je varijanta II aeracije najpovoljnija i da se može usvojiti kao konačna.

3.2 Kriva protoka lavirint preliva

Kriva protoka lavirint preliva je izmerena i na modelu celine, i upoređena sa dvostrukom krivom proticaja za varijantu II, sa parcijalnog modela (Slika 12).



Slika 12. Kriva protoka lavirint preliva prema parcijalnom i modelu celine.

Figure 12. Labyrinth spillway rating curves, partial and complete models.

Uočava se da između izmerenih krivih protoka postoje razlike. Kapacitet preliva je veći na modelu celine nego na parcijalnom. Razlike mogu biti rezultat nejednakosti u geometriji leve i desne polovine lavirint preliva, što pri uzimanju dvostruke vrednosti sa parcijalnog modela nije uzeto u obzir. Na parcijalnom modelu na mestu ravni simetrije preliva nalazi se zid, koji nepovoljno utiče na strujanje, kako svojim oblikom i položajem, tako i otporom trenja.

Kriva protoka dobijena na modelu celine može se smatrati relevantnom kad je reč o kapacitetu preliva, ali ta činjenica nikako ne potire potrebu za parcijalnim modelom. Ova ispitivanja su pokazala da aeracija lavirint preliva ne utiče na njegov kapacitet, ali utiče na

smanjenje opasnosti od kavitacije i vibracija na objektu. Dobra aeracija podrazumeva dovodenje vazduha u zone objekta gde se formiraju polja niskog pritiska koja mogu da izazovu kavitaciju i vibracije konstrukcije. Analiza ovakvih fenomena zahteva što tačniju reprodukciju tečenja vode i vazduha na modelu, odnosno korišćenje parcijalnog modela.

3.3 Ispitivanja na modelu celine

Hidraulička modelska ispitivanja brane Beni Slimane na modelu celine započeta su testiranjem projektovanog rešenja pri nekoliko karakterističnih protoka: $Q_{PMF}=850 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{0,01\%}=563,4 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{0,1\%}=420 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{2\%}=216 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri svakom od scenarija analizirani su hidraulički uslovi u svim zonama brane – na prelivu, brzotoku, umirujućem bazenu i nizvodnoj deonici rečnog toka.

Pri najvećem protoku, početak hidrauličkog skoka formira se na polovini dužine umirujućeg bazena i samim tim je hidraulički skok odbačen. To znači da energija koja je trebala da se umiri, nije umirena u dovoljnoj meri i prenosi se u korito nizvodno od bazena, što dovodi do erodovanja materijala. Na taj način ugrožava se stabilnost kompletne konstrukcije bazena i može doći do njegovog urušavanja. Predviđeni uzvodni zubi, čija je funkcija da razdvoje mlaz i na taj način doprinesu umirenju energije, ne vrše svoju funkciju, već postaju odskok preko kojih mlaz prelazi.

Uslovi tečenja pri narednom ispitanom protoku, $Q_{0,01\%}$, bili su povoljniji nego u slučaju Q_{PMF} . Hidraulički skok se odvija u umirujućem bazenu, ali ne dolazi do zadovoljavajućeg umirenja energije, pa se ponovo javlja opasnost od erozije i ugrožavanja samog objekta, ali u znatno manjoj meri nego u slučaju većeg protoka.

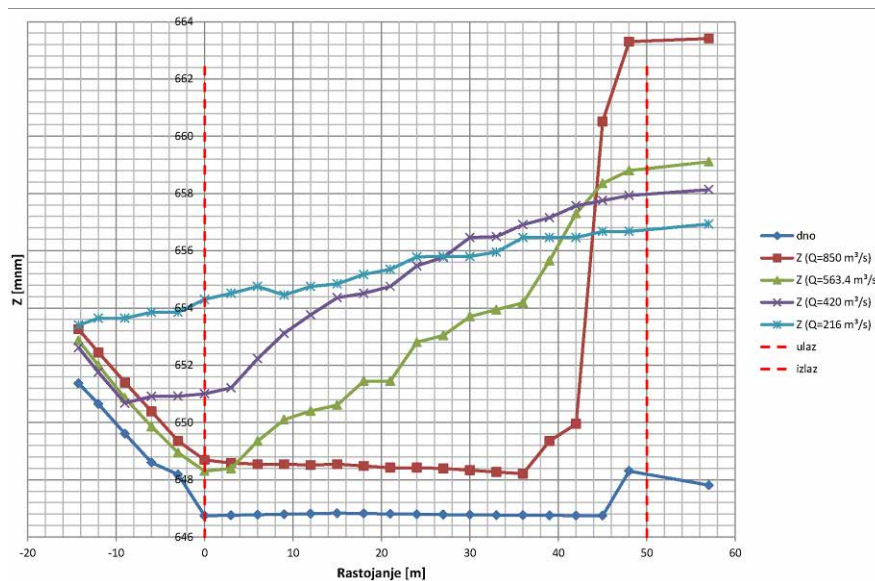
Treći ispitan protok, $Q_{0,1\%}$, bio je usvojen kao projektni kriterijum za dimenzionisanje umirujućeg bazena. U ovom slučaju početak hidrauličkog skoka javlja se na samom ulazu u umirujući bazen, ali ponovo ne dolazi do umirenja energije (Slika 13) i ponovo se javlja opasnost od erozije, a samim tim i opasnosti za stabilnost objekta.



Slika 13. Tečenje na izlasku iz umirujućeg bazena pri $Q_{0,1\%}$, projektovano rešenje.
Figure 13. Flow at the downstream end of the stilling basin at $Q_{0,1\%}$, initial design.

Kako je ustanovljeno da ni protok koji je definisan kao kriterijum za dimenzionisanje umirujućeg bazena ne zadovoljava neophodne uslove, da konstrukcija ne bude ni na koji način ugrožena i da se ne dozvoli da se višak energije prenese nizvodno, ispitan je i slučaj za protok $Q_{2\%}$. Za taj protok hidraulički skok je pomeren uzvodno, a tečenje je znatno povoljnije u odnosu na prethodne slučajeve. To znači da su se pri $Q_{2\%}$ javili uslovi koji omogućuju umirenje energije i ispuštanje umirene vode u tok nizvodno, bez bojazni da će doći do erozije korita.

Rezultati merenja nivoa vode po osi umirujućeg bazena, za sve ispitane protoke, prikazani su na Slici 14. Sa grafika se vidi da je hidraulički skok potpuno odbačen iz umirujućeg bazena pri Q_{PMF} , a da se situacija popravlja sa smanjivanjem protoka.



Slika 14. Linije nivoa po osi umirujućeg bazena pri ispitanim protocima, projektovano rešenje.

Figure 7. Water levels along the center line of the stilling basin at tested discharges, initial design.

Na osnovu sprovedenih ispitivanja može se zaključiti da predloženo rešenje umirujućeg bazena ne zadovoljava potrebne i neophodne kriterijume sigurnosti objekta i zahteva izmene u cilju poboljšanja uslova tečenja kako u umirujućem bazenu tako i na izlazu iz njega.

3.3.1 Izmene projektovanog rešenja

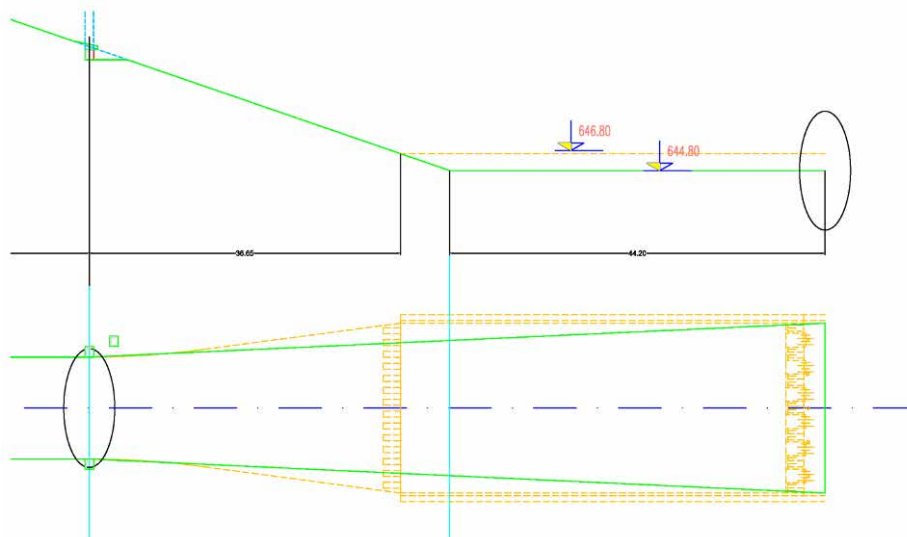
Kao prva mera koja bi se mogla primeniti u cilju poboljšanja uslova tečenja u umirujućem bazenu i nizvodno od njega, predloženo je uvođenje središnjih zuba [3], čija je uloga da poboljšaju uslove za umirenje energije. Razlog za to je što bi u tom slučaju projektovano rešenje pretrpelo najmanje izmena, pa je to bio prvi korak u odabiru mera za poboljšanje uslova tečenja. Središnji zubi su postavljeni na rastojanju 10.75 m od početka umirujućeg bazena.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Uslovi tečenja u umirujućem bazenu sa središnjim redom zuba ispitani su pri istim karakterističnim protocima kao i projektovano rešenje. Za protok Q_{PMF} , u odnosu na rešenje bez središnjih zuba javlja nepovoljnije tečenje. Razlog za to je što usled velikih brzina koje se javljaju, središnji red zuba predstavlja prepreku koju voda ne može drugačije da savlada nego naglim podizanjem nivoa vode. Pri ostalim protocima uočena su poboljšanja, ali nedovoljna da zadovolje potrebne i neophodne kriterijume sigurnosti objekta. Stoga, morala se tražiti nova modifikacija koja će ispuniti tražene uslove.

Sledeća varijanta (varijanta III) podrazumevala je značajnije izmene projektovanog rešenja (Slika 15). Kota dna umirujućeg bazena je spuštena za 2 m, odnosno sa početne kote od 646,80 mnm na kotu 644,80 mnm. Osim te izmene, promenjena je i geometrija umirujućeg bazena. Prema projektovanom rešenju, umirujući bazen je pravougaonog oblika, širine 20 m i dužine 50 m. Prema rešenju varijante III, širina umirujućeg bazena je promenljiva. Na mestu spoja sa brzotokom, širina umirujućeg bazena jednaka je širini brzotoka i iznosi 12 m, a zatim se postepeno širi do 20 m na njegovom kraju. Kao posledica ukopavanja umirujućeg bazena, došlo je do produžavanja brzotoka i smanjenja dužine umirujućeg bazena za 5.8 m. Nova dužina umirujućeg bazena iznosi 44,20 m. Izlazni profil umirujućeg bazena je ostao isti, a brzotok linearno produžen do nove kote dna slapišta.

Pored izmene u umirujućem bazenu, izvršena je i modifikacija brzotoka. Naime, projektovano rešenje nije predviđalo aeraciju brzotoka. Prema svetskoj praksi, kada su brzine preko 20 m/s obavezno je postavljanje aeracije kako bi se izbegla kavitaciona erozija. Potreba za aeratorom određena je na bazi numeričke analize. Kao prva pretpostavka na brzotoku su dodata dva aeratora, na rastojanjima 80 m i 150 m od početka brzotoka. Na modelu ove razmere nije bilo moguće pravilno simuliranje tečenje mešavine vode i vazduha, ali su aeratori ispitani u smislu uticaja njihove geometrije na tečenje u brzotoku.



Slika 15. Umirujući bazen i nizvodni deo brzotoka, varijanta III.

Figure 15. Stilling basin and downstream part of the chute, Alternative 3.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

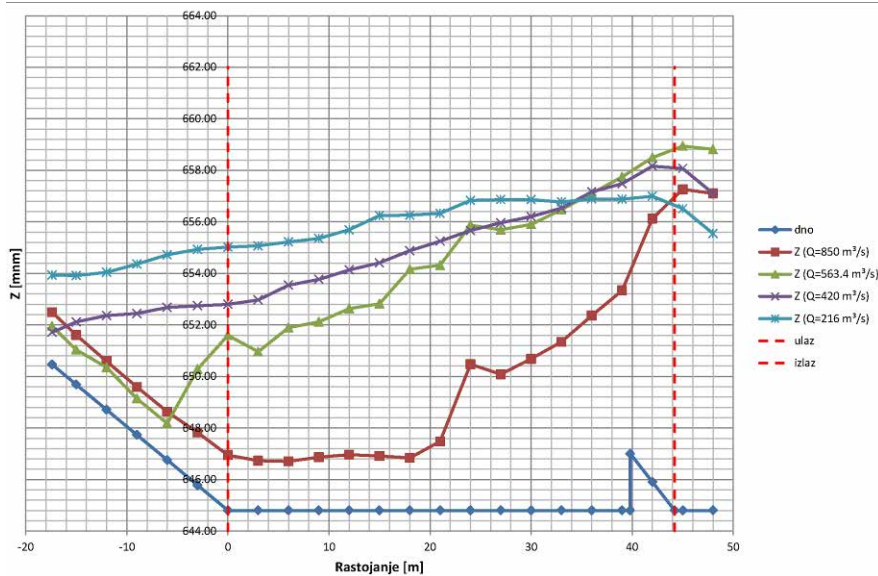
U slučaju ove varijante, za maksimalni protok Q_{PMF} , hidraulički skok je bliži početku umirujućeg bazena i daje nešto povoljniju sliku tečenja. Za protok $Q_{0,01\%}$, takođe je primetno poboljšanje u radu umirujućeg bazena. Početak hidrauličkog skoka formiran je na kraju brzotoka. Za $Q_{0,1\%}$, koji je i najmerodavniji, jer je usvojen kao kriterijum za dimenzionisanje umirujućeg bazena, mogu se videti značajna poboljšanja u strujnoj slici i radu umirujućeg bazena [3].

Može se zaključiti da predložena izmena projektnog rešenja zadovoljava potrebne i neophodne kriterijume sigurnosti objekta. Pored usvajanja rešenja u kojoj se menja geometrija umirujućeg bazena, primećeno je i da uzvodni red zuba, ne obavlja funkciju za koju je namenjen. Stoga je usvojeno da se uzvodni zubi uklone. U pogledu aeracije brzotoka, zaključeno je da nisu neophodna dva aeratora, već samo jedan. Na osnovu gore navedenog sprovedena je još jedna iteracija merenja.

Poslednja varijanta koja se ispitivala (varijanta IV), je varijanta sa usvojenom geometrijom iz varijante III, ali bez uzvodnih zuba u umirujućem bazenu i sa jednim aeratorom na brzotoku. Nizvodni aerator je uklonjen, a uzvodni je pomeren nizvodno za 36 m. Strujna slika u brzotoku je bila povoljnija sa jednim nego sa dva aeratora, pa je i usvojeno rešenje sa jednim aeratorom. Što se tiče uzvodnih zuba, oni su uklonjeni zato što nisu imali nikakav uticaj na strujnu sliku, što se i potvrdilo u okviru ovog poslednjeg ispitivanja. Uslovi tečenja u umirujućem bazenu za varijantu IV, koja je usvojena kao konačna, prikazani su na Slici 16. Takođe, kao i za prethodne varijante, izmereni su nivoi vode po osi umirujućeg bazena (Slika 17).



Slika 16. Tečenje u slapištu, pri $Q_{0,1\%}$, varijanta IV.
Figure 16. Flow in the stilling basin at $Q_{0,1\%}$, Alternative 4.



Slika 17. Linije nivoa po osi umirujućeg bazena pri karakterističnim protocima, varijanta IV.
 Figure 17. Water levels along the center line of the stilling basin at characteristic discharge rates, Alternative 4.

3.3.2 Ispitivanja usvojenog tehničkog rešenja

Za usvojenu dispoziciju svih objekata, na modelu su izvršena opsežna merenja različitih hidrauličkih veličina bitnih za dalje faze projektovanja [3].

Za sve ispitane varijante su izmerene i dubine u brzotoku pri karakterističnim protocima. Zbog velikog nagiba brzotoka, dubine su merene u pravcu upravnom na dno brzotoka. Merenja su urađena u tri podužna pravca: u osi brzotoka, u blizini levog zida i uz sam levi zid brzotoka. Ovaj način merenja je izabran kako bi se mogao uočiti raspored dubina po poprečnom preseku brzotoka, kao i prostiranje stojećih talasa u brzotoku. Na Slici 18 prikazani su rezultati merenja pri maksimalnom ispitanom protoku.

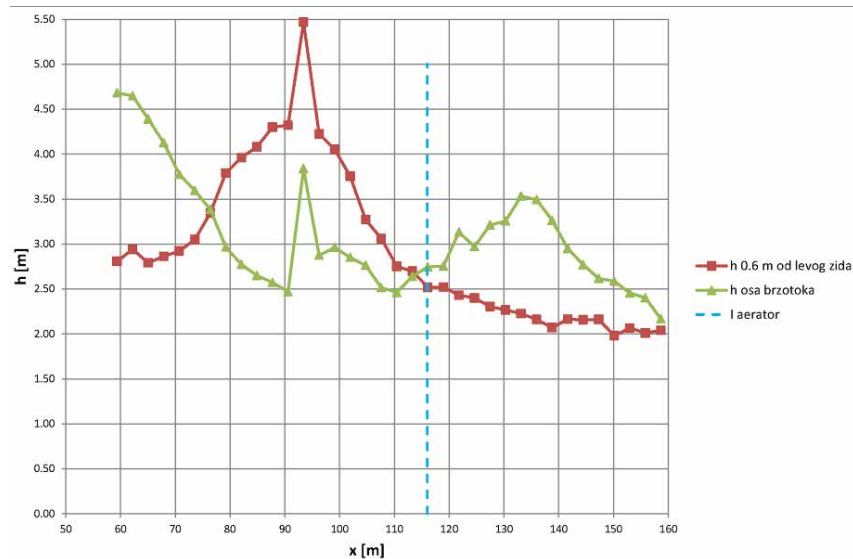
Na početku brzotoka, dubine su najveće u osi, a znatno manje uz zidove. Idući nizvodno, dubine u osi se smanjuju, a uz zidove povećavaju, da bi na kraju brzotoka opet porasle dubine u osi, a uz zidove se smanjile. Ova pojava primetna je pri svim ispitanim protocima. Zbog smanjenja širine profila u pravcu toka dolazi do formiranja stojećih talasa uz levi i desni zid. Sudaranje ovih talasa dovodi do lokalnog povećanja dubine u osi brzotoka. Zbog izrazito burnog tečenja, u daljem toku niz brzotok, mlaz se širi i udara u zidove. Odbijeni mlazevi se ponovo sudaraju, što objašnjava veće dubine u osi brzotoka nego uz zidove, u nizvodnom delu.

Pri svim razmatranim protocima, dubine vode u brzotoku su manje od visine zida brzotoka. Međutim, treba imati u vidu da su zbog efekta razmere dubine vode na brzotoku manje nego u prirodi, pa bi izmerene dubine trebalo korigovati empirijskim formulama za uvlačenje vazduha, kako bi se sa sigurnošću odredila odgovarajuća visina zida brzotoka.

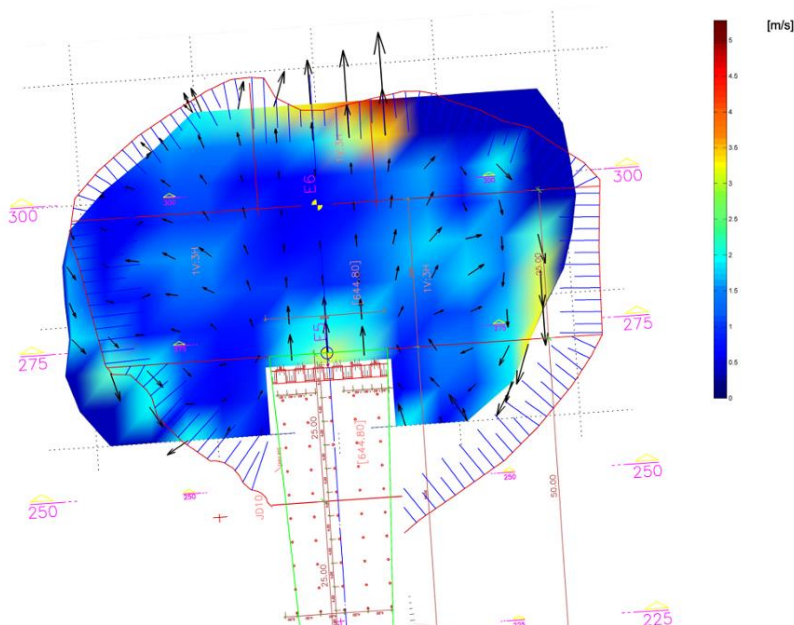
Za svaku ispitivanu varijantu proverene su brzine u profilu neposredno nizvodno od slapišta, pri karakterističnim protocima. Izmene geometrije slapišta nisu se u velikoj meri odrazile na brzine u nizvodnom profilu. Za projektovano rešenje maksimalna izmerena brzina

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

iznosi oko 8 m/s, dok je za usvojenu varijantu IV 9 m/s. Ove vrednosti su zabeležene pri najvećem ispitanom protoku (850 m³/s). Za manji protok (563,4 m³/s), izmerena je najveća brzina od oko 5 m/s za projektovano rešenje, dok se ukopavanjem slapišta brzina smanjuje na oko 4 m/s. Osim u pomenutom profilu, gde su brzine najveće, urađeno je i merenje brzina u široj zoni oko slapišta (Slika 19). Ove brzine poslužile su kao osnova pri projektovanju zaštite od erozije.



Slika 18. Dubine vode u brzotoku pri $Q_{PMF}=850 \text{ m}^3/\text{s}$, varijanta IV.
Figure 18. Water depths along the chute at $Q_{PMF}=850 \text{ m}^3/\text{s}$, Alternative 4.



Slika 19. Raspored brzina u široj zoni oko slapišta pri $Q_{0,01\%}=563,4 \text{ m}^3/\text{s}$, usvojena varijanta.
Figure 19. Velocity distribution in the extended zone around the stilling basin at $Q_{0,01\%}=563.4 \text{ m}^3/\text{s}$, proposed alternative.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Za usvojeno rešenje (varijanta IV) izvršena je analiza hidrodinamičkog opterećenja u slapištu [3], [5]. Ova analiza je izvršena za vremenske trenutke kada su fluktuacije pritisaka najveće, što odgovara pojavi maksimalnih proticaja preko preliva.

Fluktuacije pritiska uglavnom su proporcionalne srednjoj vrednosti pritiska. Srednji pritisci na dno slapišta su značajno veći od pritisaka na zidovima, dok su fluktuacije istog reda veličine. Na osnovu analize pritisaka, zaključeno je da nema opasnosti od pojave negativnih pritisaka u slapištu. U okviru analize hidrodinamičkog opterećenja, sračunate su i ukupne hidrodinamičke sile koje deluju na površinu svake od ploča. Kao logična posledica rasporeda pritisaka, srednje vrednosti sila u slapištu su značajno veće na dnu nego na zidovima, dok su fluktuacije istog reda veličine. S obzirom da su fluktuacije znatno manje od srednje vrednosti sile, ni u jednom delu slapišta nema opasnosti od pojave negativnih sila, čak ni pri najvećem ispitanom protoku (Q_{PMF}).

Nakon završetka opisanih ispitivanja, sa dela rečnog korita nizvodno od slapišta, uklonjena je cementna košuljica. U prvom delu ispitivanja, uklonjeni deo je zamenjen nekoherentnim materijalom – peskom. Pri razmatranju hidrauličke sličnosti, treba napomenuti da se za probleme erozije rečnog korita na hidrauličkom modelu može postići samo kvalitativna sličnost, bez obzira kojim se materijalom modelira korito vodotoka. Označeni deo hidrauličkog modela je ispunjen peskom granulacije 1 mm i oblikovan u skladu sa projektnom dokumentacijom. Ideja je bila da se kroz ispitivanje ponašanja korita pri proticaju $Q_{1\%}$ uoči tendencija erozije, odnosno da se uoče kritične oblasti, kako bi se na njima projektovala adekvatna zaštita.

Kako su brzine najveće na izlazu iz slapišta, a kako se treba zaštititi i od eventualne erozije pri većim protocima, projektant je predložio oblaganje odgovarajućom kamenom oblogom, debljine 1 m. Pri usvajanju krupnoće kamena vodilo se računa o maksimalnim vrednostima brzina u ovoj zoni, pa je uz odgovarajući faktor sigurnosti, projektant usvojio materijal sa srednjim prečnikom zrna $D_{SR}=0,6$ m. U drugom delu ispitivanja, dno modela je oblikovano u skladu sa projektovanim rešenjem, pri čemu je kao materijal korišćen pesak krupnoće 1 mm, sa kamenom oblogom po površini. Ova podloga ispitana je za dva protoka - $Q_{1\%}$ (Slika 20) i $Q_{0,1\%}$ (Slika 21). Prvi protok je bio merodavan za dimenzionisanje kamene zaštite, a drugi je korišćen kao kontrolni.



Slika 20. Erozija nizvodno od slapišta pri $Q_{1\%}$, projektovana nizvodna zaštita.
Figure 20. Erosion downstream from the stilling basin at $Q_{1\%}$, including designed downstream protection.



Figure 21. Erozija nizvodno od slapišta pri $Q_{0.1\%}$, projektovana nizvodna zaštita.
Figure 21. Erosion downstream from the stilling basin at $Q_{0.1\%}$, including designed downstream protection.

Prema prikazanim fotografijama se može zaključiti da pri razmatranim protocima nema značajnijih pomeranja kamene obloge, odnosno ne dolazi do erozije. Ispitivanja su urađena uz pretpostavku da je trajanje odgovarajućeg protoka 1 dan, što odgovara raspoloživim hidrološkim podlogama. Na osnovu svega izloženog, može se zaključiti da predložena nizvodna kamena zaštita obezbeđuje povoljne uslove tečenja pri ispitanim protocima i da objekti brane nisu ugroženi erozijom.

4 Zaključci

Hidraulička modelska ispitivanja konkretnog objekta na parcijalnom modelu i modelu celine omogućila su uočavanje i rešavanje problema koje nije bilo moguće sagledati pri projektovanju objekta.

Ispitivanja na parcijalnom modelu omogućila su određivanje najpovoljnije varijante aeracije lavirint preлива. Pokazano je da način aerisanja ne utiče na kapacitet preлива, ali utiče na smanjenje opasnosti od kavitacije i vibracija na objektu. Pri velikim proticajima dobra aeracija prelivne ivice se teško postiže. U tom slučaju, povratno tečenje iz brzotoka doprinosi aeraciji nizvodne strane zida preлива.

Ispitivanja na modelu celine pokazala su da projektovano rešenje umirujućeg bazena nije zadovoljavalo potrebne i neophodne kriterijume sigurnosti objekta, zbog čega je moralo da pretrpi određene izmene. Utvrđeno je da se znatno povoljniji uslovi tečenja dobijaju za varijantu IV, koja je i usvojena kao konačna.

Hidraulička modelska ispitivanja usvojenog tehničkog rešenja pokazala su da ovakvo rešenje obezbeđuje bezbednu evakuaciju vode, pri čitavom opsegu razmatranih protoka.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, za finansijsku podršku u okviru projekata tehnološkog razvoja broj TR 37005, 37009, 37010 i 37014.

Literatura

1. Hepler T. E., (1992), *Innovative Spillway Design*, Proc. of the Hydraulic Engineering Session at Water Forum `92, Baltimore, Maryland, USA, pp. 1222-1227.
2. Khode B. V., Tembhurkar A. R., (2010), *Evaluation and Analysis of Crest Coefficient for Labyrinth Weir*. World Applied Sciences Journal, Vol. 11 (7), pp. 835-839.
3. Starinac D., (2014), *Hidraulička modelska ispitivanja brane Beni Slimane - Konačan izveštaj /1216/*, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd.
4. Starinac D., Kapor R., Savić Lj., Vojt P., Žugić D., Damnjanović M., Zindović B., Đajić P., (2014), *Air-Water Flow on a Labyrinth Spillway*, Journal of Serbian Water Pollution Control Society "Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Vol. 4, No. 3, pp. 11-20.
5. Starinac D., Vojt P., Damnjanović M., Žugić D., Savić Lj., Kapor R., Zindović B., Đajić P. (2015), *Scale Modeling of Beni Slimane Dam*, Journal of Serbian Water Pollution Control Society "Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Vol. 5, No. 1, pp. 9-21.
6. Starinac D., Vojt P., Damnjanović M., Žugić D., Savić Lj., Kapor R., Zindović B., Glišić R. (2014), *Scale Modeling of the Bouzina Dam Flood Mitigation Structures*, Journal of Serbian Water Pollution Control Society "Water Research and Management", ISSN 2217-5237, Vol. 4, No. 1, pp. 31-42.
7. Tullis J. P., Amanian N., Waldron D., (1995), *Design of Labyrinth Spillways*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 121, No. 3, pp. 247-255.
8. Tullis J. P., Young J. C., Chandler M. A., (2007), *Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 3, pp. 248-254.

Primer modeliranja hidraulike i upravljanja kaskadnog hidroenergetskog sistema

Miloš Milašinović¹

Damjan Ivetić²

Dušan Prodanović³

APSTRAKT: Težnja da se u budućnosti napravi zaokret sa korišćenja fosilnih goriva na obnovljive izvore energije u prvi plan stavlja hidroenergetske sisteme. Među različitim oblicima hidroenergetskih objekata, kaskadni tip hidroenergetskih sistema se izdvaja prema svojoj složenosti sa stanovišta pravilnog upravljanja. Hidroenergetski sistem sastavljen od više povezanih hidroelektrana u nizu čini jedan složen sistem u kome praktično rad svih hidroelektrana utiče na neki deo sistema. Imajući u vidu da su ovakvi hidroenergetski sistemi na granici isplativosti od izuzetno bitnog značaja je pravilno upravljanje. Model hidroenergetskog sistema je razvijen u okviru programskog jezika MATLAB, tj. u njegovom podokruženju Simulink. Matematičkim modelom difuzionog talasa modelirana je hidraulika rečnih deonica a proporcionalno – integrativno – derivativnom (PID) kontrolom modelirano je upravljanje radom prelivnih objekata. Rezultati su prikazani za fiktivni HES sa malim padovima i malim akumulacionim prostorom, koji se sastoji od 10 kaskadnih hidroelektrana.

Ključne reči: kaskadni hidroenergetski sistem, Simulink, difuzioni talas, PID kontrola

Example of hydraulic and control modelling of cascaded reservoirs hydropower system

ABSTRACT: Future tendency of changing fossil fuels with renewable energy sources places hydropower systems in a highlight. Amongst several different types of hydropower plants, cascaded reservoirs hydropower plants stand out as one of the most complicated from the control point of view. Cascaded reservoir hydropower plant system is a complex system since every hydropower plant can affect some part of the system. Since these hydropower systems are usually on the verge of the profitability, a strong need exists for the proper control algorithm. In this paper cascaded reservoir hydropower plant system model is developed in MATLAB computing language, more precisely in its subenvironment Simulink. Diffusive wave was used for modelling reservoir dynamical hydraulics and proportional – integrative – derivative (PID) control for hydropower plant control modelling. Presented approach was applied on fictive hydropower plant system consisting of 10 cascaded hydropower plants with small falling heights and storage volumes.

Keywords: cascaded reservoirs hydropower system, Simulink, diffusive wave, PID controller

¹ Miloš Milašinović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, milosolimilos@gmail.com

² Damjan Ivetić, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, divetic@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, dprodanovic@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Tendencija XXI veka je postepena zamena fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije, pri čemu se, kao jedno od najjednostavnijih i najpristupačnijih rešenja, nameće značajnije korišćenje hidropotencijala. Na osnovu podataka Republika Srbija raspolaže sa 27200 GWh/god hidropotencijala [4] od čega se godišnje koristi oko 9000 GWh [9], odnosno, iskorišćenost je svega 33%. Poslednjih godina sve se češće priča o boljem iskorišćenju hidroenergetskog potencijala, kako bi se doprinelo stabilnosti energetskog sistema Republike Srbije, o čemu svedoče i brojni strani investitori koji nalaze interesa u investiranju u izgradnju hidroelektrana na ovim rekama. Kao jedno od rešenja za iskorišćenje hidroenergetskog potencijala predviđaju se na određenim rekama kaskadni mini hidroenergetski sistemi, koji se sastoje od dve ili više redno povezanih protočnih hidroelektrana. Kaskadni hidroenergetski sistemi se u mnogo čemu razlikuju u odnosu na ostala rešenja za iskorišćenje hidroenergetskog potencijala (derivacione i akumulacione hidroelektrane). U okviru kaskadnog hidroenergetskog sistema sve hidroelektrane utiču međusobno jedna na drugu, čineći na taj način složen sistem sa stanovišta upravljanja istim. Međusobni uticaj hidroelektrana u ovakvom sistemu najviše se ogleda u hidrauličkom smislu, jer on najviše utiče na samu proizvodnju energije, koja predstavlja krajnji „proizvod“ ovog složenog sistema. Stoga se kao glavni zadatak nameće pravilno upravljanje kaskadnim hidroenergetskim sistemima.

Tema ovog rada je analiza upravljanja potencijalnim hidroenergetskim sistemom na ravničarskoj reci sa malim raspoloživim padovima i akumulacijama malih zapremina. Kao osnova za rad upotrebljen je numerički model kaskadnih hidroenergetskih sistema primenom matematičkog modela difuzionog talasa [1] koji je u okviru ovog rada unapređen boljom aproksimacijom geometrije korita i dodatnim upravljačkim elementima. Za geometriju korita, iskorišćeni su podaci o deonici Velike Morave kod Čuprije, dužine 2066 m. Sa tom geometrijom, formiran je sistem sa deset kaskadno postavljenih hidroelektrana. Modeliranje i analiza upravljanja ovakvim HES urađena je u okviru programskog jezika MATLAB, tačnije u okviru njegovog podokruženja Simulink. Napravljeni model bi mogao da se primeni i na realnim primerima, kada bi mogao da se koristi i u svrhe analize energetske proizvodnje elektrana.

Analiza upravljanja kaskadnim hidroenergetskim sistemom u okviru ovog rada zasniva se na modeliranju rečnih deonica (akumulacija malih zapremina) između susednih pregradnih objekata, kao i na modeliranju samih pregradnih objekata, tačnije prelivnih objekata u cilju efikasnog upravljanja. Za modeliranje akumulacija korišćen je matematički model difuzionog talasa sa diskretizacijom jednačina na smaknutoj numeričkoj shemi. Postojeća, prirodna, geometrija rečne deonice aproksimirana je manjim brojem složenih aproksimiranih poprečnih preseka sa linearnom interpolacijom na računске preseke. Upravljanje radom prelivnih objekata modelirano je primenom proporcionalno – integrativno - derivativne (PID) kontrole na osnovu uspostavljene bezdimenzionalne veze između protoka i nivoa.

Sa naučno – istraživačkog i inženjerskog aspekta od izuzetnog značaja je ispitati kako određene upravljačke odluke utiču na hidrauličke parametre deonice. Ispitano je kako pojedine vrednosti kontrolnih parametara utiču na rezultate i određeni zaključci su izvedeni. Cilj analize rada kaskadnog hidroenergetskog sistema je, kao što je prethodno pomenuto, ispitati uticaj različitih vrednosti kontrolnih parametara na hidrauličke parametre akumulacija a na osnovu tih rezultata ustanoviti koje su to vrednosti koje zadovoljavaju neke unapred

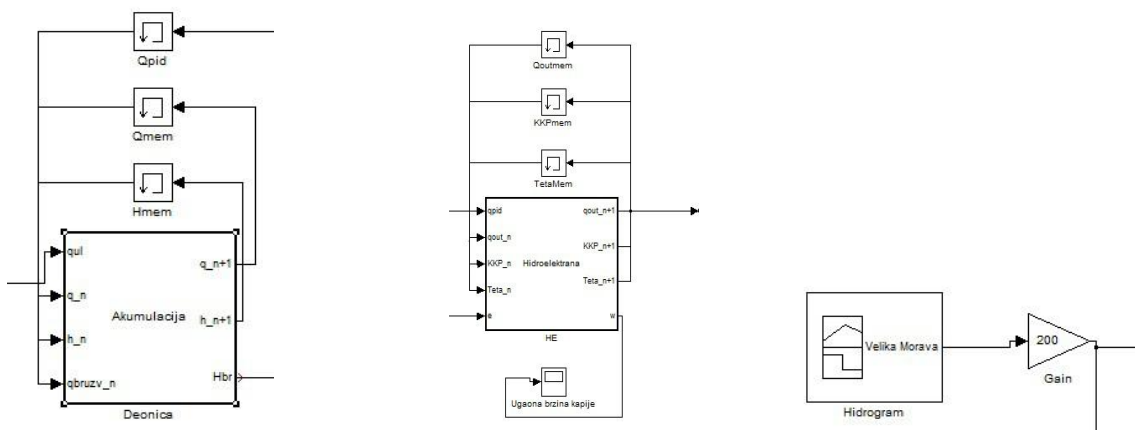
definisane kriterijume za upravljanje. Pored toga, ispitivane su različite vrednosti parametara koji se odnose na manevarske sposobnosti prelivnih objekata (brzina otvaranja/zatvaranja) u cilju određivanja vrednosti koja u određenoj meri, može da prati komande PID kontrole a da pri tome ne ugrožava fizička ograničenja rada prelivnih objekata, kao i da ne ugrožava rad preostalog dela hidroenergetskog sistema stvaranjem poplavnih talasa. U tu svrhu ispitana je dinamika sistema pri različitim dispozicijama, tj. u slučajevima kada se ne razmatraju manevarske sposobnosti prelivnih objekata i suprotno.

2 Metodologija

Analiza mogućnosti upravljanja kaskadnim HES je sprovedena na fiktivnom sistemu, na ravničarskoj reci sa malim padom i sa malim retenzionim prostorom. Za izradu modela kaskadnog hidroenergetskog sistema korišćen je programski jezik MATLAB, tačnije njegovo podokruženje Simulink. Osnovni elementi modela su akumulacije, hidroelektrane, PID kontrole i ulazni hidrogrami, koji su opisani u poglavlju 2.1. Elementi modela su postavljeni tako da izlaz iz jednog predstavlja ulaz u drugi element (npr ulaz u element koji se odnosi na hidroelektranu je izlaz iz elementa koji se odnosi na akumulaciju). Matematički model neustaljenog tečenja se koristi za modeliranje akumulacija, dok se matematički aparat PID kontrole koristi za model pregradnog objekta. Korišćen je veštački jedinični hidrogram kao ulaz u sistem kako bi se analizirao rad prelivnih objekata i uticaj rada na osnovne hidrauličke parametre akumulacije.

2.1 Primena Simulink – a za modeliranje HES

Konceptualni model hidroenergetskog sistema formiran je u Simulink okruženju. Simulink se koristi za analizu rada različitih sistema i uređaja, kao što su složeni energetske sistemi, sistemi za obradu signala itd. Odlika ovog okruženja je da poseduje biblioteku gotovih elemenata za različite matematičke i logičke operacije, ispisivanje rezultata, zadavanje ulaznih signala, memorisanje podataka, kontrolne funkcije itd.



Slika 1. Osnovni elementi modela hidroenergetskog sistema: Akumulacija, Hidroelektrana i Hidrogram

Figure 1. Basic elements used for hydropower plant system modelling: Reservoir, Hydropower plant and Hydrograph builder

Pored gotovih elemenata Simulink pruža mogućnost i kreiranja sopstvenih elemenata koji su korišćeni za modeliranje HES-a. Izgled osnovnih elemenata korišćenih za modeliranje hidroenergetskog sistema dat je na slici 1. Razvijeni elementi Akumulacija i Hidroelektrana su implementirani u ugrađene funkcije (eng. Embedded function). Ove funkcije izvršavaju operacije predviđene kodom u jednom vremenskom koraku pa je zbog toga bilo potrebno koristiti memorijske blokove (Qmem, Hmem,...) u kojima su čuvane vrednosti hidrauličkih parametara iz prethodnog vremenskog koraka za potrebe numeričkog modela. Treći element Hidrogram omogućava unošenje osmotrenih ili veštačkih hidrograma ručnim podešavanjem ili učitavanjem iz nekog od fajlova.

2.2 Matematički i numerički model akumulacije

Pri modeliranju hidraulike akumulacija, ili rečnih deonica između susednih hidroelektrana, polazi se od osnovnih Sen – Venanovih jednačina u kojima kao nepoznate figurišu dubina h i protok Q . Sređivanjem polaznih jednačina dolazi se do sledećeg oblika koji predstavlja matematički model akumulacije (rečne deonice):

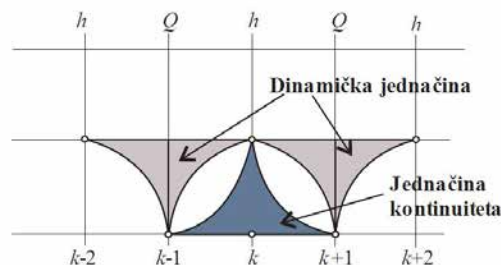
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + I_d + \frac{C_t}{2g} \frac{Q^2}{A^2 R} = 0 \quad (2)$$

Gde je B – širina vodenog ogledala, A – površina poprečnog preseka, R – hidraulički radijus, I_0 – nagib dna, C_t – koeficijent tangencijalnog napona.

Jednačina (1) predstavlja jednačinu kontinuiteta, dok je jednačina (2) dinamička jednačina. U zavisnosti od uprošćenja dinamičke jednačine (2) koriste se različiti matematički modeli neustaljenog tečenja u otvorenim tokovima. Za modeliranje rečnih deonica u okviru ovog rada korišćen je matematički model difuzionog talasa koji sadrži članove koji se odnose na uticaje trenja i sile težine, kao i član kojim se u obzir uzima i uticaj uspora. Pored ovih članova model difuzionog talasa korišćen u ovom radu razlikuje se od klasičnog modela zbog korišćenja i člana $\partial Q / \partial t$ kojim se u model uvodi i uticaj povratnog tečenja.

Jednačine (1) i (2) diskretizuju se metodom konačnih razlika na smaknutoj računskoj shemi na kojoj se naizmenično menjaju preseki u kojima se računaju protok Q i dubina h . Računska shema data je na slici 2:



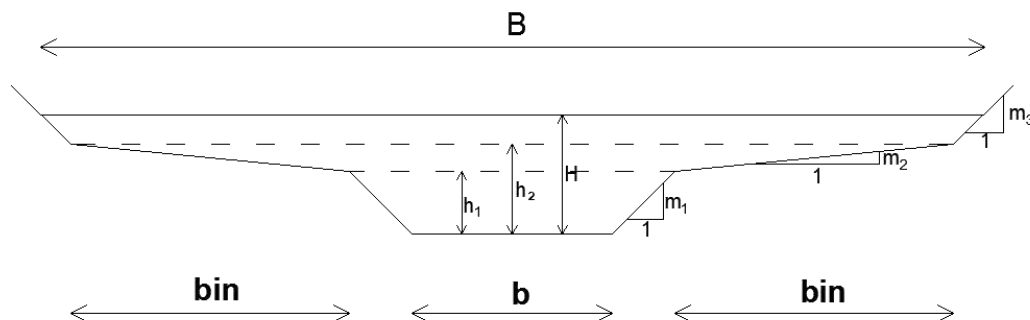
Slika 2. Numerička shema za model difuzionog talasa
 Figure 2. Numerical scheme for diffusive wave model

Diskretizacijom prema prethodnoj računskoj shemi dolazi se do sledećih jednačina koje je potrebno rešavati:

$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} \quad (3)$$

$$Q_{k+1}^{n+1} = \frac{\frac{Q_{k+1}^n}{g \left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + I_d - \frac{h_{k+2}^{n+1} - h_k^{n+1}}{\Delta x}}{\frac{1}{g \left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + K_1^* |Q_{k+1}^n|} \quad (4)$$

$$K_1^* = \frac{n^2}{\left(\frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{R_{k+2}^{n+1} + R_k^{n+1}}{2} \right)^{4/3}} \quad (5)$$



Slika 3. Aproximiran poprečni presek
Figure 3. Aproximated cross section

2.4 Konceptualni model kontrole (primena PID kontrole)

PID (proporcionalno – integrativno - derivativna) kontrola je matematički aparat koji se najčešće koristi u industrijskim procesima. PID kontinualno računa vrednost greške (error) koja predstavlja razliku između trenutne, izmerene, vrednosti procesne promenljive (proces variable) koja se želi kontrolisati, neke referentne vrednosti (setpoint) koju bi trebalo dostići i prethodnih vrednosti grešaka. PID kontrola teži da smanji vrednost greške tokom vremena podešavanjem kontrolne promenljive (control variable). U konkretnom slučaju koji je vezan za upravljanje HES procesna promenljiva koju treba održavati je nivo neposredno uz prelivni objekat, jer nam on predtavlja bruto pad na posmatranoj HE, preko izlaznog protoka kao kontrolne promenljive. Opšta veza između ove dve promenljive ima sledeći oblik:

$$q_{izl} = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

Gde je K_p – proporcionalni koeficijent, K_I – integrativni koeficijent i K_d – derivativni koeficijent, koji se često obeležavaju kao P , I i D , respektivno, $e(t) = (h(t) - h_{ref}) / h_{ref}$ - greška (bezdimenzionalna vrednost nivoa uz preliv), a $q_{izl} = (Q(t) - Q_{ref}) / Q_{ref}$ - kontrolna promenljiva (bezdimenzionalni izlazni protok). P se odnosi na trenutne vrednosti greške (ako imamo veliko i pozitivno odstupanje nivoa od referentnog i izlazni protok će biti veliki i pozitivan), I se odnosi na prethodne vrednosti greške (ukoliko su vrednosti izlaznog protoka u nekom prethodnom periodu bile male, tj. primenom samo P parametra dobijaju se mali izlazni protoci, I komponenta sumira greške u tom vremenskom periodu kako bi proporcionalno toj sumi isпустиła veći protok) dok se D odnosi na pretpostavljene buduće greške računajući da će nagib promene greške (prvi izvod po vremenu) ostati isti. Česti su slučajevi kada se koriste samo neke od komponenti PID – a za kontrolu, pa se često javljaju PI ili PD kontrole.

U radu su korišćene proporcionalna i integrativna komponenta. Zbog složenosti kaskadnog hidroenergetskog sistema, u kojem rad jedne hidroelektrane utiče na rad nizvodne hidroelektrane, tj. rad nizvodne hidroelektrane zavisi od rada uzvodne, u cilju prilagodjavanja svim promenama koje nastaju na uzvodnoj HE uvedena je komponenta q_{ff} , tzv. FEED FORWARD, kojom se vrši prenos informacija sa uzvodne na nizvodnu HE:

$$q_{izl} = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + q_{ff} \quad (7)$$

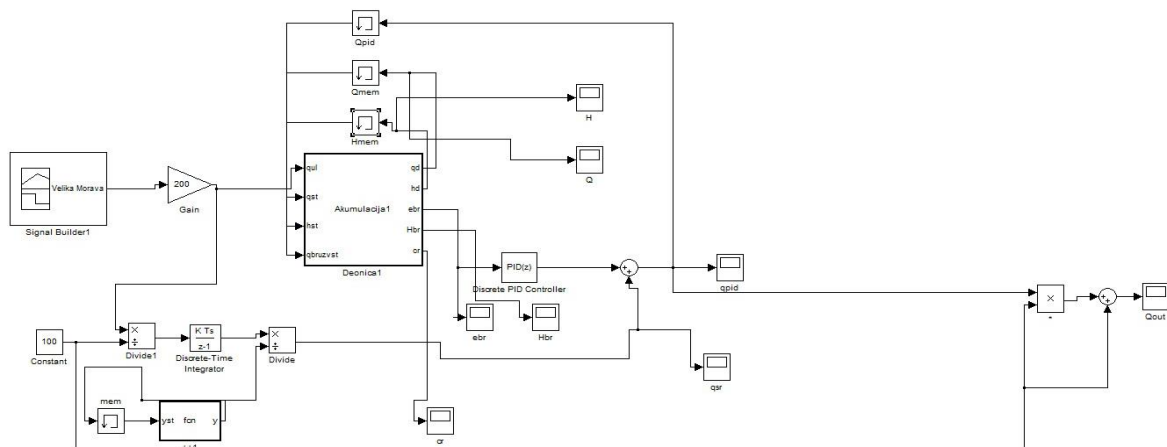
U nastavku će biti prikazani rezultati kojima se opisuje uticaj koeficijenata K_p i K_I , kao i prilagođavanje ograničenih manevarskih mogućnosti prelivnih objekata u cilju održavanja nivoa.

3 Primer primene upravljanja i rezultati

Hidroenergetski sistem se sastoji se od deset protočnih hidroelektrana sa po dve turbine, segmentnim ustavama za evakuaciju velikih voda i rotirajućih klapni za regulaciju protoka. Uzima se da sve hidroelektrane imaju istu instalisanu snagu, protok i referentni nivo uz preliv (veličina koji treba održavati). Instalisani protok je $100 \text{ m}^3/\text{s}$ dok je referentni nivo 5 m iznad dna kanala. Sama geometrija korita je urađena prema deonici Velike Morave kod Čuprije.

3.1 Primer akumulacije sa PID kontrolom na nizvodnom kraju

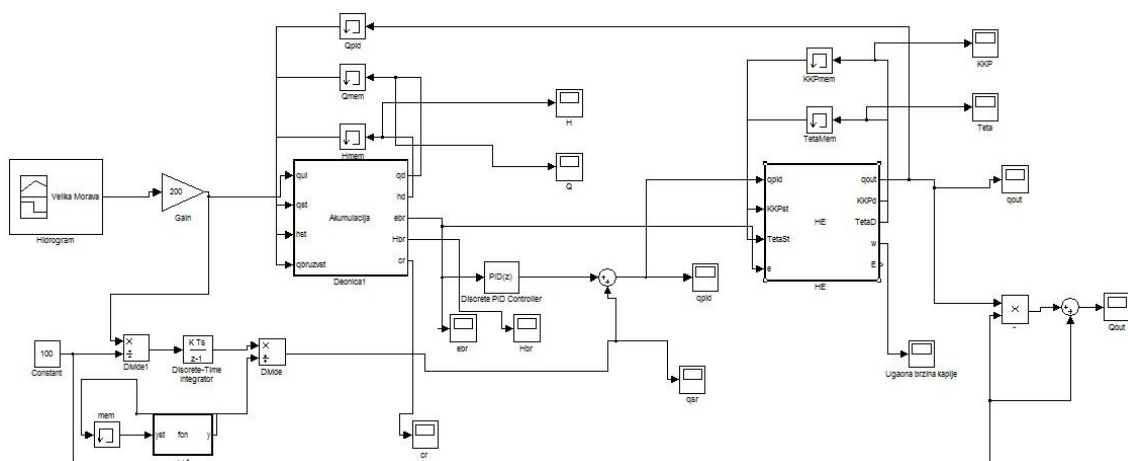
Kako bi se sagledao uticaj PID kontrole kao graničnog uslova kojim se upravlja nivoom neposredno uz hidroelektranu, razmatrana je dispozicija sistema prikazana na slici 4.



Slika 4. Rečne deonice (akumulacija) sa PID kontrolom kao nizvodnim graničnim uslovom
 Figure 4. River section (reservoir) with PID controller as downstream boundary condition

3.2 Primer akumulacije sa PID kontrolom na nizvodnom kraju i modelom rada hidroelektrane

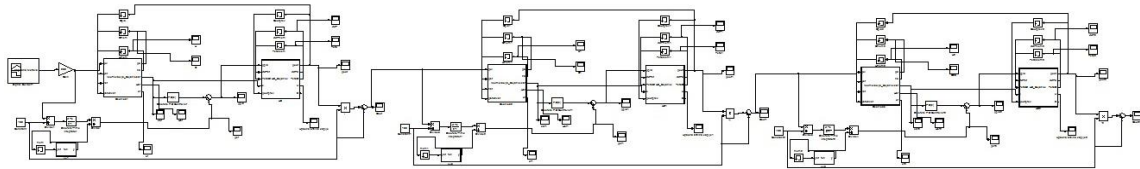
Korišćena PID kontrola kao granični uslov jedini cilj ima da, kao što je već pomenuto, smanji grešku tokom vremena, a pri tome kao kontrolnu promenljivu daje neku vrednost izlaznog protoka (protok kroz turbine + protok preko preliva) kojom nastoji da smanji odstupanje nivoa ispred ustave od referentnog nivoa. Ako je zahtevani protok veći od instalisanog, jedini način da se taj protok evakuše u nizvodnu akumulaciju je pravilnim manevrima prelivnih objekata (u ovom slučaju prelivnih klapni). Ono što se javlja kao problem je to što prelivni objekti imaju neku konačnu vrednost manevrisanja čime nije uvek u mogućnosti da evakuše onoliko protoka koliko je to “savetovano” PID kontrolom. Kao posledica toga dolazi do dužeg vremenskog perioda u kom se odstupanje nivoa svodi na neko prihvatljivo kao i na veće oscilacije nivoa. Zbog toga je potrebno odrediti i odgovarajuću brzinu otvaranja/zatvaranja klapni kako bi oscilacije bile što manje. Za potrebe toga formiran je model rada pregradnog objekta čija je dispozicija prikazana na slici 5.



Slika 5. Shema akumulacije sa PID kontrolom i hidroelektrane u Simulink-u
 Figure 5. Reservoir with PID controller and hydropowerplant scheme in Simulink

3.3 Primer kaskadnog hidroenergetskog sistema

Prethodni primeri odnose se na jednu akumulaciju. Princip rada ostalih akumulacija je isti, a jedina razlika je u tome što je ulaz u svaku od nizvodnih akumulacija u stvari izlaz iz uzvodne akumulacije. Prikazan je način povezivanja kaskadnog sistema od 3 hidroelektrane.

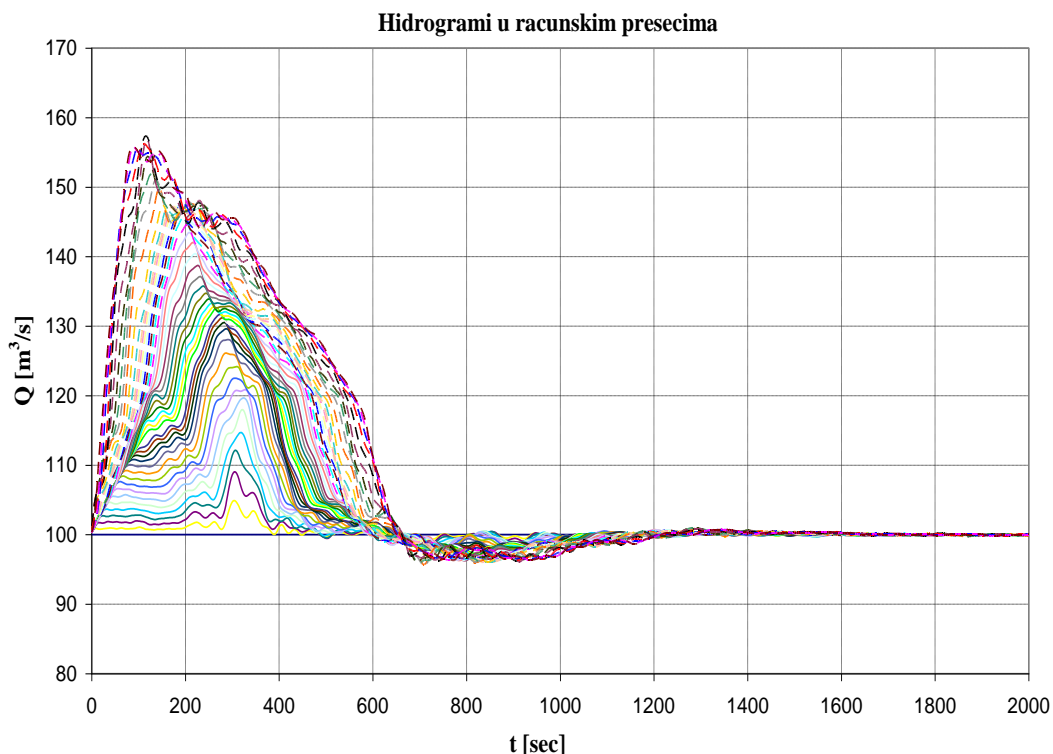


Slika 6. Shema kaskadnog hidroenergetskog sistema u Simulink-u
 Figure 6. Cascaded reservoir hydropower plants system scheme in Simulink

4 Rezultati

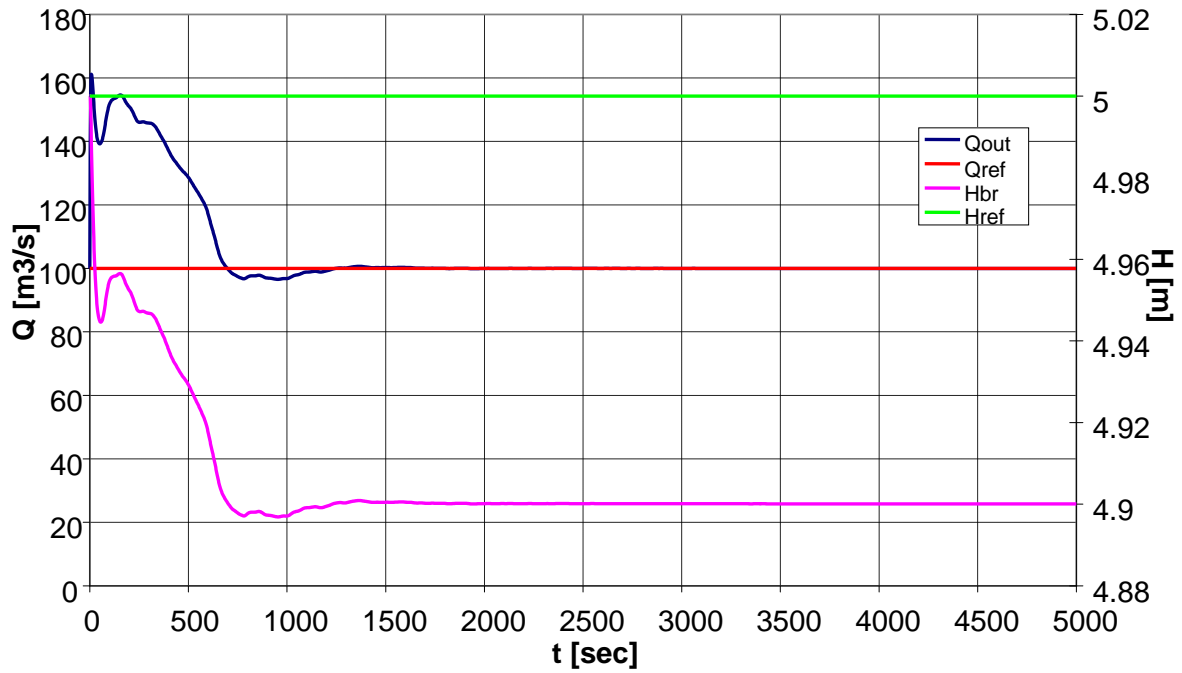
4.1 Rezultati za dispoziciju sistema prikazanu pod 3.1

Ispitivan je uticaj različitih vrednosti kontrolnih parametara K_p i K_i . U prvom slučaju predstavljeni su rezultati simulacije u kojoj, u okviru PID kontrole, figuriše samo proporcionalni faktor, dok se u drugom slučaju uključuje i integrativni faktor. Rezultati su prikazani na slikama 7. do 12.



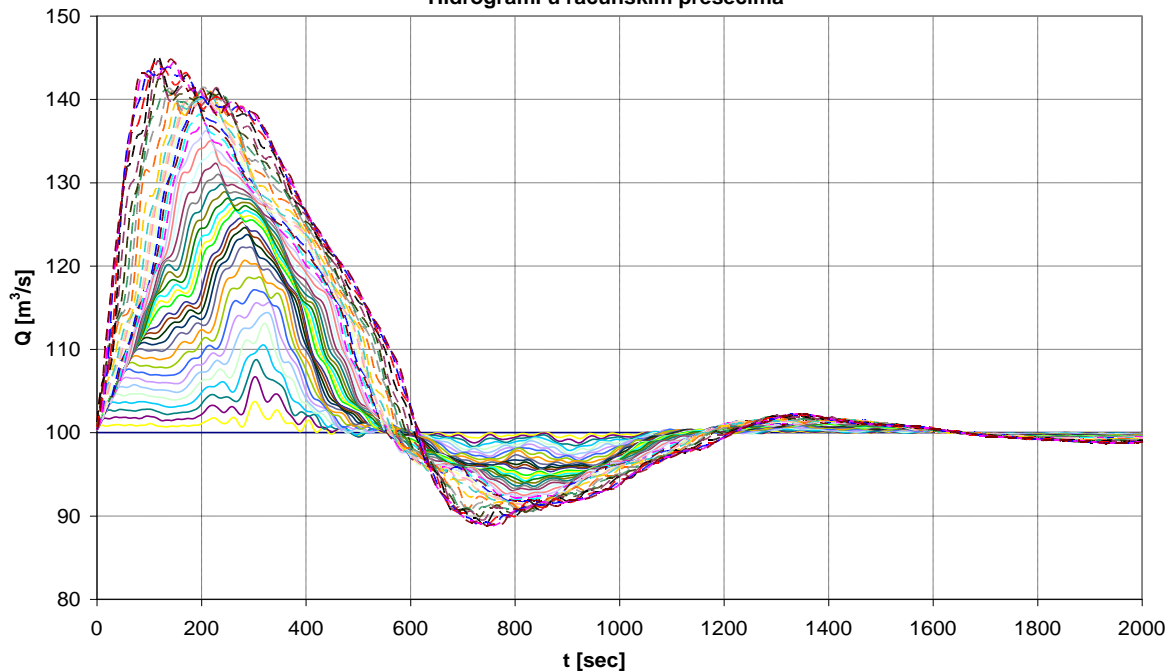
Slika 7. Hidrogrami u računskim preseccima za $K_p=50$ i $K_i=0$
 Figure 7. Hydrographs for $K_p=50$ and $K_i=0$

Promena izlaznog protoka i nivoa uz branu



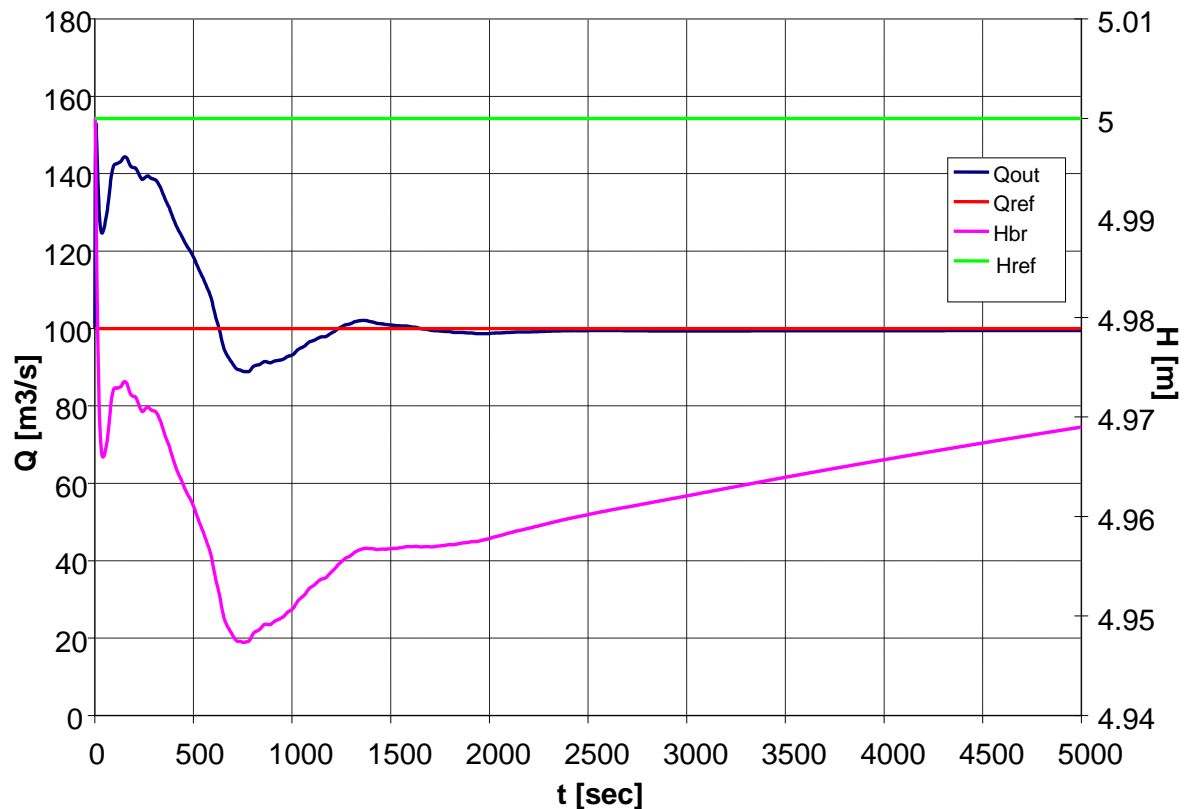
Slika 8. Izlazni protok i nivo uz branu za $K_p=50$ i $K_i=0$
 Figure 8. Hydropower plant discharge and water level for $K_p=50$ and $K_i=0$

Hidrografi u računskim preseccima



Slika 9. Hidrografi u računskim preseccima za $K_p=100$ i $K_i=0,01$
 Figure 9. Hydrographs for $K_p=100$ and $K_i=0,01$

Promena izlaznog protoka i nivoa uz branu



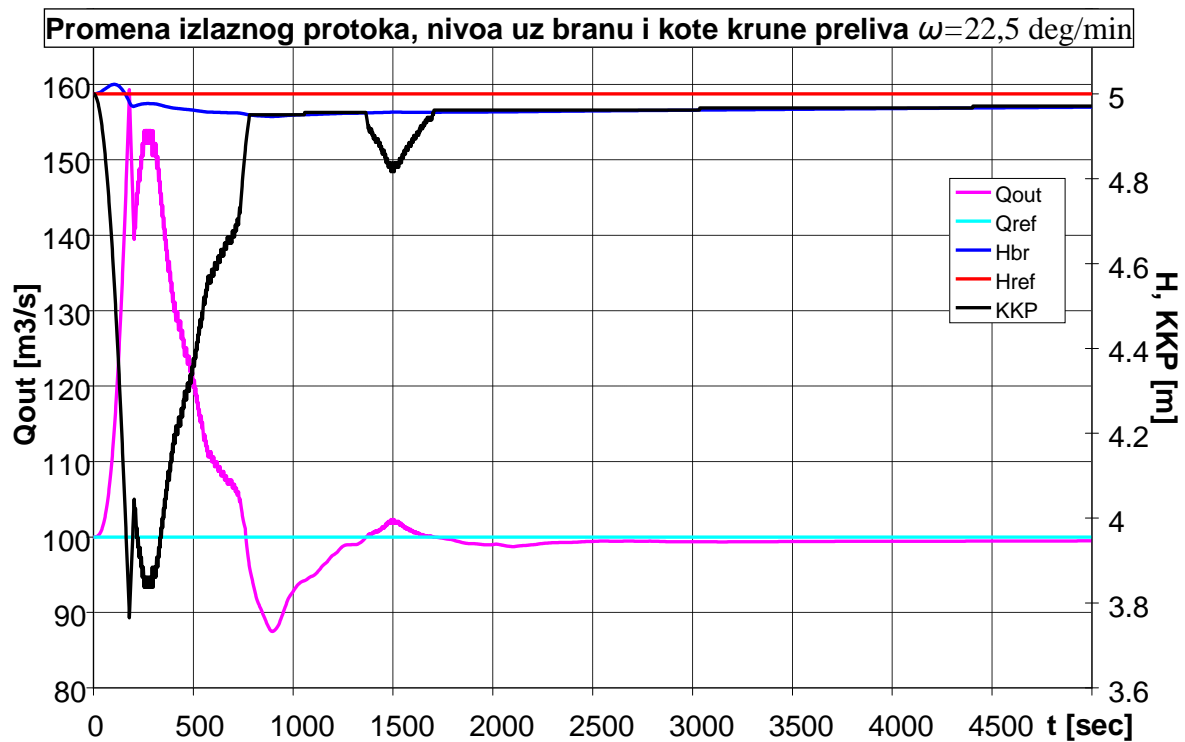
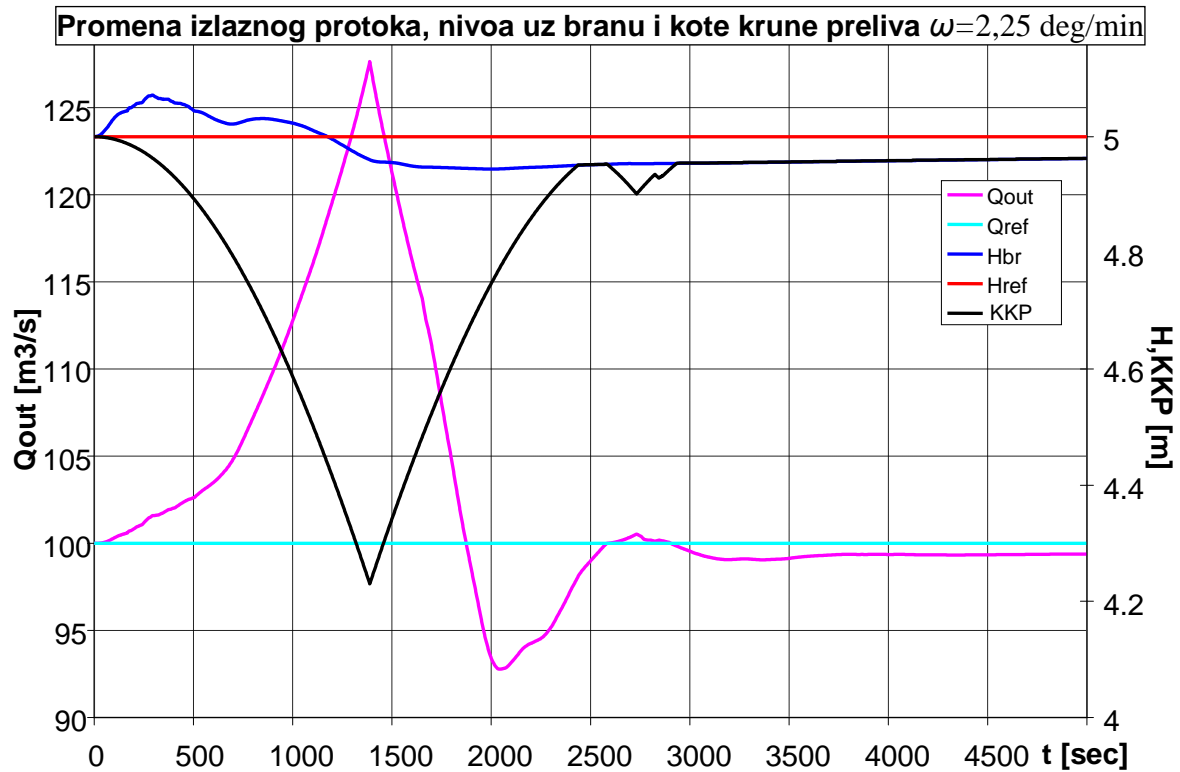
Slika 10. Izlani protok i nivo uz branu za $K_p=100$ i $K_i=0,01$
 Figure 10. Hydropowerplant discharge and water level for $K_p=100$ and $K_i=0,01$

4.2 Rezultati za dispoziciju sistema prikazanu pod 3.2

Za shemu prikazanoj na slici 5., u kojoj se, za vrednosti kontrolnih parametara $K_p=100$ i $K_i=0,01$ uključuje i model hidroelektrane ispitan je uticaj dve vrednosti brzine otvaranja/zatvaranja ω . Rezultati su prikazani na slici 11.

4 Diskusija

Na osnovu prikazanih rezultata simulacija vidi se da različite vrednosti kontrolnih parametara izuzetno utiču na vrednosti svih promenljivih od značaja. Rezultati dobijeni za slučaj kada se u okviru kontrole koristila samo proporcionalna komponenta pokazuju da ni posle dužeg vremenskog perioda nivo kojim se upravlja nema tendenciju približavanja referentnom nivou, već se ustaljuje oko neke druge, manje, vrednosti. Zbog toga je potrebno uključiti i integrativnu komponentu u okviru kontrole, što je i učinjeno nakon čega se u rezultatima (slika 10.) vidi tendencija približavanja nivoa referentnoj vrednosti.



Slika 11. Izlazni protok, nivo uz HE i kota krune preliva za $\omega=2,25$ i $22,5$ deg/min

Figure 11. Hydropower discharge, water level and gate position for $\omega=2,25$ and $22,5$ deg/min

U drugoj varijanti, kada se uključuje i model hidroelektrane, ispitan je uticaj dve vrednosti brzina otvaranja/zatvaranja prelivnih objekata. Za veću vrednost brzine manevrisanja ($22,5$ deg/min) dobijena su manja odstupanja nivoa uz branu od referentne vrednosti nego što je to bio slučaj za manju brzinu ($2,25$ deg/min). Međutim, korišćenje veće brzine manevrisanja indukuje veći pik na izlaznom hidrogramu, a pored toga dovodi i do znatno intenzivnijeg pomeranja klapne (u jednom vremenskom trenutku se spušta, a odmah u narednom ju je potrebno podići) što nije zgodno sa stanovišta uređaja za pokretanje prelivnih objekata.

5 Zaključak

Iskorišćenje hidroenergetskog potencijala pojedinih reka u Srbiji koje nemaju mogućnost formiranja velikih akumulacija, nameće rešenje u vidu kaskadnih hidroenergetskih sistema sa protočnim hidroelektranama. Kao veoma skupi i gotovo uvek na granici isplativosti, kaskadni HES, koji energetske proizvodnje zasnivaju na trenutnim vrednostima protoka i nivoa, zahtevaju pravilno upravljanje pre svega u cilju održavanja nivoa.

Može se videti da je ispitivani algoritam upravljanja nivoom u različitim slučajevima dovodio do zadovoljavajućih rezultata sa stanovišta održavanja nivoa neposredno uz pregradni objekat. Ono što se nameće kao problem u upravljanju nivoom jesu ograničene manevarske sposobnosti prelivnih objekata, što dovodi do usporavanja procesa ustaljivanja nivoa, odnosno do većih oscilacija. Zbog toga je potrebno pažljivo odrediti vrednosti kontrolnih parametara i pokušati da se manevri prelivnih objekata što više prilagode tim parametrima. Zbog toga je potrebno dalje razraditi predloženi algoritam upravljanja.

Kao neke od tema narednih istraživanja povezanih sa ovim problemom nameću se istraživanja o optimizaciji upravljanja ovakvim sistemom sa stanovišta maksimizacije energetske proizvodnje i zaštite priobalja, poboljšanje modela prenosom informacija o upravljanju sa jedne hidroelektrane na više nizvodnih, za razliku od modela opisanog u ovom radu koji prenosi informacije samo na susednu hidroelektranu, podesavanje manevara prelivnih objekata u cilju što boljeg prilagodjavanja PID kontroli itd.

Napominje se da se rezultati dobijeni primenom predloženog algoritma odnose se na aproksimiranu geometriju akumulacija, čime se unosi značajna greška u model koji može poslužiti za analizu upravljanja hidroenergetskim sistemima na nižim nivoima projektovanja, dok bi se za detaljnije i tačnije upravljanje morala koristiti prirodna geometrija.

Literatura

1. Ivetić D., (2015), *Upravljanje prelivnim objektima kaskadnog HES Zapadna Morava*, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
2. Gullhamn E., (2004), *Control of water content and retention in hydropower plant cascades*, KTH Signals Sensors and Systems, Stockholm, Sweden
3. Astrom K. J., (2002), *Control System Design*, University of California, Santa Barbara.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

4. Đorđević B., (2001), *Hydroenergetsko korišćenje voda*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija
5. Foo M., Ooi S. K., Weyer E., (2013), *Centralised and decentralised control of the Broken river*, European control conference, Zurich, Switzerland
6. Hartmut L., Eckhard A., (2002), *Model based predictive control of river reservoirs*, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain
7. Rantz S. E. And others, (1982), *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of discharge*, United States Government Printing Office, Washington, USA
8. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Zavod za brane, hidroenergetiku, rudnike i saobraćajnice, (2010), *Hidroelektrane na Ibru – generalni projekat*, Beograd, Srbija
9. Elektroprivreda Srbije, (2011), *Izveštaj za 2011. godinu*, Beograd, Srbija

Закони сличности хидрауличних турбина

Мирослав Бенишек¹

АПСТРАКТ: Истраживање у области хидрауличних турбина није могуће без карактеристичних величина – значајца. Академик Никола Обрадовић, проф. Машинског факултета је израз карактеристичне величине заменио изразом значајца који је у духу нашег језика и описује намену ових величина – оне нешто значе. Значајца су величине које у себи обједињују више димензионих величина као што су: H - нето пад, Q – проток, n – брзину обраћања, D – пречник обртног кола и др. и на тај начин омогућају да се једноставно на једном универзалном дијаграму – топографском дијаграму прикажу својства једног типа турбина након моделских испитивања. Такође, значајца омогућавају да се на основу њих одреде и карактеристике велике турбине-протописа. Значајно је да се на основу значајца за дате параметре електране може исправно и поуздано одредити одговарајући тип турбине. Применом закона механичке сличности у раду су изведене сви аналитички изрази за значајца.

Кључне речи: хидрауличне турбине, закони сличности, значајца.

Mechanical similarity laws of the hydraulic turbines

ABSTRACT: Research in the hydraulic turbine field is not possible without the characteristic values – so called, in Serbian – significant values. Academician Nikola Obradović, a full professor on the Mechanical Engineering Faculty of the Belgrade University was the first who introduced the terms – significant values, which better explain their purpose. The significant values unite in them more dimensional values such as: H – net head, Q – discharge, n – rotational speed, D – runner diameter and so on, and in that way give the possibility that hill chart diagram shows the main features of the concrete model turbine which is obtained by a model test. So the significant values give the possibility to determine prototype characteristics. Also, it is significant that the reliable convenient turbine type for the known hydro power station parameters can be determined. In this paper all analytic expressions for the characteristic values were determined using the mechanical similarity laws.

Key words: hydraulic turbines, similarity laws, characteristic values.

¹ Проф. др Мирослав Бенишек, дипл.инж.маш, Универзитет у Београду Машински факултет, Краљице Марије 16, Београд.

Prof. Dr Miroslav Benišek, University of Belgrade, Mechanical Faculty, Kraljice Marije 16, Belgrade.

1 Увод

Решења диференцијалних једначина струјања флуида у општем случају нису у стању да опишу стварно струјање у хидрауличним машинама, због чега не задовољавају у потпуности потребе техничке праксе. Разлог овоме лежи у чињеници да се при решавању једначина кретања ради затварања система једначина морају увести одређене претпоставке, јер природа турбулентних струјања није још увек довољно проучена. Једноставно речено, не можемо се увек и без резерве поуздати у добијене резултате прорачуна, као и на основу њих добијене интегралне карактеристике машине. Све ово упућује на прибављање поузданих резултата другим начином, који ће у сваком случају задовољити критеријуме техничке праксе. Тај други пут је експериментални.

Експериментална истраживања обављају се у хидрауличким лабораторијама на моделима турбина геометријски сличним великим турбинама у хидроелектранама, која се називају и главним извођењима или прототиповима.

Резултати добијени моделским испитивањима своде се на карактеристичне величине – значајке, које представљају једнозначну зависност основних величина утврђених помоћу закона о сличности механичких система. Применом значајка могуће је прерачунати геометријске и опитне параметре модела турбине на главно извођење, а такође извршити и избор турбина за дате параметре водотока. Посебна важност значајка огледа се и у графичком приказивању погонских својстава турбине.

Сва разматрања сличности модела и прототипа заснивају се на општим законима механичке сличности.

2 Закони механичке сличности турбина

Два механичка система (у које спадају и струјни простори турбина са својим границама) су слична, ако су истовремено задовољени услови **геометријске**, **кинематске** и **динамичке** сличности. Постоје и други услови сличности, али су сви од мањег значаја за хидрауличне турбине.

Услови **геометријске сличности** два струјна простора модела (m) и прототипа (p) турбине су испуњени, ако су односи одговарајућих димензија једнаки

$$\lambda_l = \frac{(AB)_p}{(AB)_m} = \frac{(BC)_p}{(BC)_m} = \frac{b_{1p}}{b_{1m}} = \frac{D_{1p}}{D_{1m}} = \frac{D_{2p}}{D_{2m}} = \dots = \text{const.} \quad (2.1)$$

где је λ_l – преводни коефицијент геометријске сличности.

Услови (2.1) укључују и једнакост одговарајућих углова модела и прототипа тј. услов **геометријске изогоналности**. Тако, за сваки произвољан угао θ , мора да буде испуњена релација $\theta_p = \theta_m$.

Кинематска сличност струјних поља модела и прототипа турбине је испуњена када су поред геометријске сличности и односи између одговарајућих брзина у коресподентним тачкама модела и прототипа једнаки.

$$\lambda_c = \frac{u_p}{u_m} = \frac{w_p}{w_m} = \frac{c_p}{c_m} = \frac{c_{mp}}{c_{mm}} = \dots = \frac{n_{1p} D_{1p}}{n_{1m} D_{1m}} = \text{const.} \quad (2.2)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

где је λ_c – преводни коефицијент кинематске сличности.

Услов (2.2) доводи до једнакости одговарајућих струјних углова (услов **струјне изогоналности**) тако да је $\alpha_m = \alpha_p$ и $\beta_m = \beta_p$. Кинематска сличност у струјном простору модела и прототипа доводи и до сличног геометријског распореда, како релативних тако и апсолутних струјница.

Услов **динамичке сличности** је испуњен ако су задовољена два претходна услова механичке сличности: геометријска и кинематска сличност, а затим да су односи одговарајућих сила, које делују на струјни простор модела и прототипа једнаки.

У једном струјном простору јављају се једначине силе (силе сведене на јединицу масе) као што су: сила инерције \vec{F}_I , сила притиска \vec{F}_P , сила тежине \vec{F}_G и сила вискозности \vec{F}_V . Међусобна веза поменутих јединичних сила које делују на флуидни делић је

$$\vec{F}_I = \vec{F}_G + \vec{F}_P + \vec{F}_V \quad . \quad (2.3)$$

Израз (2.3) познат је као Навије-Стоксова (Navier-Stokes) једначина [1] и може се написати у облику

$$\frac{D\vec{c}}{Dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{c} \quad , \quad (2.4)$$

у којој поједини чланови једначине редоследно одговарају члановима израза (2.3).

Једначина (2.4) може се написати у облику [1]:

$$\frac{\partial \vec{c}}{\partial t} + (\vec{c} \nabla) \vec{c} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{c} \quad , \quad (2.5)$$

јер се јединична инерцијална сила $D\vec{c}/Dt$, која је једнака убрзању, може разложити на $\partial \vec{c}/\partial t$ – локално и $(\vec{c} \nabla) \vec{c}$ – конвективно убрзање флуидног делића.

Увођењем карактеристичних величина C – за брзину \vec{c} , T – за време t , G – за запреминску силу \vec{F} и P – за притисак p , могуће је дефинисати бездимензијске величине \vec{c}^* , t^* , \vec{F}^* , и p^* дате изразима:

$$\vec{c} = C \vec{c}^* \quad , \quad t = T t^* \quad , \quad \vec{F} = \vec{F}^* G \quad \text{и} \quad p = p^* P \quad , \quad (2.6)$$

тако да се једначина (2.5) може написати у облику

$$\frac{C}{T} \frac{\partial \vec{c}^*}{\partial t^*} + \frac{C^2}{L} (\vec{c}^* \nabla^*) \vec{c}^* = G \vec{F}^* - \frac{P}{\rho L} \nabla^* p^* + \frac{\nu C}{L^2} \Delta^* \vec{c}^* \quad (2.7)$$

Оператори ∇^* и Δ^* имају различите облике зависно од координатног система у коме се проблем разматра. Примера ради, за Декартов (Descartes) координатни систем они се могу написати у облику

$$\left. \begin{aligned} \nabla^* &= \frac{\partial}{\partial x^*} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y^*} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z^*} \vec{k} \\ \Delta^* &= \frac{\partial^2}{\partial (x^*)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (y^*)^2} + \frac{\partial^2}{\partial (z^*)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Сводећи чланове јединичне (2.7) на карактеристичне вредности конвективног убрзања флуидних делића, делећи једначину (2.7) са C^2/L , добија се једначина количине кретања у бездимензијском облику

$$\frac{L}{CT} \frac{\partial \vec{c}^*}{\partial t^*} + (\vec{c}^* \nabla^*) \vec{c}^* = \frac{GL}{C^2} \vec{F}^* - \frac{P}{\rho C^2} \nabla^* p^* + \frac{\nu}{CL} \Delta^* \vec{c}^* \quad (2.9)$$

Једначина континуета, у бездимензијском облику, добија се сличним разматрањем

$$\nabla^* \vec{c}^* = 0 \quad . \quad (2.10)$$

Односи карактеристичних величина у једначини (2.9) дефинишу бездимензијске бројеве сличности [1]:

Струхалов (Strouhal) број	Фрудов (Froude) број	(2.11)
$\text{Sh} = \frac{L}{CT}$	$\text{Fr} = \frac{C^2}{GL}$	

Ојлеров (Euler) број	Рејнолдсов (Reynolds) број	(2.11)
$\text{Eu} = \frac{P}{\rho C^2}$	$\text{Re} = \frac{CL}{\nu}$	

тако да једначина (2.9) постаје

$$\text{Sh} \frac{\partial \vec{c}^*}{\partial t^*} + (\vec{c}^* \nabla^*) \vec{c}^* = \frac{1}{\text{Fr}} \vec{F}^* - \text{Eu} \nabla^* p^* + \frac{1}{\text{Re}} \Delta^* \vec{c}^* .$$

У случају потпуне (савршене, идеалне) динамичке сличности два струјна поља, динамичке једначине количине кретања у бездимензијском облику, за модел и главно извођење морају бити идентичне. Услов идентичности бездимензијских динамичких једначина модела и главног извођења је једнакост свих бројева сличности:

$$\text{Sh}_m = \text{Sh}_p, \text{Fr}_m = \text{Fr}_p, \text{Eu}_m = \text{Eu}_p, \text{Re}_m = \text{Re}_p \quad (2.12)$$

Карактеристичне величине L , C , T , P и G усвајају се зависно од проучаваног струјног проблема. При разматрању сличности хидрауличних турбина за карактеристичне величине обично се узимају следеће вредности:

- L – највећи пречник кола D_1 ,
- C – средња карактеристична брзина везана за проток и карактеристични пресек $C = Q/A$ или се за карактеристичну брзину узима обимска брзина на улазу у коло $C = u_1$, а често и $C = \sqrt{2gH} = \sqrt{2Y}$,
- T – реципрочна вредност учестаности обртања кола $T = 1/f_k$, где је $f_k = \omega/2\pi$ док је $\omega = 2\pi n/60$ кружна учестаност обртања кола, а n брзина обртања,
- $P - p_k = \rho g H_k = \rho Y_k$ и
- G – убрзање земљине теже $G = g$.

3 Карактеристичне значајне хидрауличких турбина

Потпуну динамичку сличност, а самим тим и услове (2.12), није могуће увек остварити у механици флуида. Покушај да се задовољи потпуна сличност хидрауличних машина доводи до контрадикторних услова.

Истовремено задовољење једнакости Фрудових и Рејнолдсових бројева сличности код модела и прототипа немогуће је остварити. Тако на пример, испуњење једнакости $Re_m = Re_p$ при истој кинематској вискозности флуида $\nu_m = \nu_p$, мора да буде испуњен услов да су брзине $c_m > c_p$, пошто је $D_{1m} < D_{1p}$. За једнакост Фрудових бројева, $Fr_m = Fr_p$ при $G_m = G_p = g$ мора да буде испуњен услов да су брзине $c_m < c_p$, с обзиром да је $D_{1m} < D_{1p}$.

У струјним просторима турбина могуће је остварити само делимичну (парцијалну) сличност, која обухвата једнакост оних бројева сличност који зависе од доминантних (најугицајнијих) сила које се јављају у конкретним случајевима. Тако на пример, у отвореним каналима са слободном површином као и код брзоходних реакцијских турбина са малим падовима као што су цевне турбине, Фрудов број се не сме занемарити, и он има доминантан утицај, јер у овим проблемима главну улогу има јединична сила теже $G = g$.

При моделирању струјних процеса у цевоводима под притиском, а и у реакцијским турбинама, које раде на вишим падовима и сл., где битно утичу силе вискозности, силе притиска и појаве нестационарности апсолутног тока у обртном колу треба обезбедити једнакост Ојлерових и Струхалових бројева, сличности модела и главног извођења.

Једнакост Re бројева модела главног извођења турбине не може се остварити. Пошто су пречници обртних кола D_{1m} мањи од пречника обртних кола D_{1p} , а такође и падови H_m су мањи од падова H_p главних извођења, то је $Re_p = (30 \div 100) Re_m$. Ова чињеница, неједнакости Рејнолдсових бројева модела и главног извођења, као и чињеница да је релативна хрпаваост $\delta_m > \delta_p$ ($\delta = \Delta/D_1$, Δ – апсолутна хрпаваост површине), утиче на неједнакост бездимензијских хидрауличних губитака енергије у моделу и прототипу турбине. Све ово доводи до апсолутне немогућности остваривања једнакости хидрауличних степена корисности модела и главног извођења тј. $\eta_{hm} \neq \eta_{hp}$. Увођењем у разматрање само Ојлеровог и Струхаловог броја без утицаја Рејнолдсовог броја долази до критеријума делимичне сличности код турбина

$$Eu_m = Eu_p, Sh_m = Sh_p. \quad (3.1)$$

Карактеристична величина притиска P дефинише се помоћу јединичног струјног рада кола Y_k . Величина Y_k са јединичним струјним радом турбине Y везана је релацијом $Y_k = \eta_h Y = \eta_h g H$ (где је H – нето пад турбине, а η_h – хидраулички степен корисности), тако да је

$$P = \rho Y_k = \rho \eta_h Y = \rho g \eta_h H \quad (3.2)$$

За карактеристичну брзину C усваја се средња меридијанска брзина на улазу у обртно коло c_{m0} која се може одредити на основу израз

$$c_{m0} = \frac{Q_K}{A} = \frac{Q \eta_Q}{\pi D_1 b_1}, \quad (3.3)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

где су: Q и Q_K – протоци кроз турбину односно коло, A – проточна површина $A = \pi D_1 b_1$, D_1 и b_1 – пречник и ширина кола на улазу, док је η_Q – волуметријски степен корисности. Ојлеров број је тада

$$Eu = \frac{P}{\rho C^2} = \frac{Y_K}{c_{m0}^2} = \frac{Y_K}{Q^2 \eta_Q^2} \pi^2 D_1^2 b_1^2 = \frac{\eta_h Y D_1^4}{Q^2 \eta_Q^2} \pi^2 \left(\frac{b_1}{D_1} \right)^2. \quad (3.4)$$

$$Q'_{11} = \frac{Q \eta_Q}{D_1^2 \sqrt{Y \eta_h}} = \frac{1}{\sqrt{Eu}} \pi \left(\frac{b_1}{D_1} \right) = \text{const.} \quad (3.5)$$

Десна страна израза (3.5) једнака је за модел и прототип, према изразу (3.1), а то значи да и бездимензијска величина Q'_{11} мора задовољити једнакост облика

$$Q'_{11m} = Q'_{11p} \Rightarrow \frac{Q_m \eta_{Qm}}{D_{1m}^2 \sqrt{Y_m \eta_{hm}}} = \frac{Q_p \eta_{Qp}}{D_{1p}^2 \sqrt{Y_p \eta_{hp}}} = \text{const.} \quad (3.6)$$

У случају да је $g_m = g_p$, занемарења утицаја хидрауличног и волуметријског степена корисности и узимајући у обзир да је $Y = gH$, израз (3.6) може се написати у облику

$$Q_{11m} = Q_{11p} \Rightarrow \frac{Q_m}{D_{1m}^2 \sqrt{H_m}} = \frac{Q_p}{D_{1p}^2 \sqrt{H_p}}. \quad (3.7)$$

Величина Q_{11} назива се **јединичним протоком** и бројно је једнака протоку условно изабране јединичне турбине која има пречник $D_1 = 1$ m и ради на нето паду $H_1 = 1$ m. Величина Q_{11} је димензијска величина $Q_{11} [\text{m}^{0.5}/\text{s}]$. Често се у пракси условно узима за Q_{11} јединицу протока $Q_{11} [\text{m}^3/\text{s}]$.

Струхалов број може се написати у облику

$$Sh = \frac{L}{CT} = \frac{D_1 f_k}{c_m}, \quad (3.8)$$

где су карактеристичне величине $L = D_1$, $C = c_m$ и $T = 1/f_k = 2\pi/\omega$. Из израза (3.8) и (3.4) следи

$$f'_{11} = \frac{D_1 f_k}{\sqrt{Y_K}} = \frac{Sh}{\sqrt{Eu}}. \quad (3.9)$$

Десна страна израза (3.9) једнака је за модел и прототип, а то значи да и бездимензијских величина f'_{11} мора задовољити једнакост

$$f'_{11m} = f'_{11p} \Rightarrow \frac{D_{1m} f_{km}}{\sqrt{Y_{Km}}} = \frac{D_{1p} f_{kp}}{\sqrt{Y_{Kp}}} = \text{const.} \quad (3.10)$$

У случају занемарења утицаја степена корисности израз (3.10) добија облик

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$f_{11m} = f_{11p} \Rightarrow \frac{D_{1m} f_{km}}{\sqrt{Y_m}} = \frac{D_{1p} f_{kp}}{\sqrt{Y_p}} = \text{const.} \quad (3.11)$$

Величина f_{11} назива се **јединичном фреквенцијом обртања** кола и бројно је једнака фреквенцији обртања кола турбине која има пречник кола $D_1 = 1$ m и јединични струјни рад $Y = 1$ J/kg.

У техничкој пракси чешће се уместо величине f_{11} користи величина n_{11} која се добија из израза (3.11) стављајући $f_k = n/60$, где је n брзина обртања и $Y = gH$ тако да је за $g_p = g_m$

$$n_{11m} = n_{11p} \Rightarrow \frac{D_{1m} n_m}{\sqrt{H_m}} = \frac{D_{1p} n_p}{\sqrt{H_p}} = \text{const.} \quad (3.12)$$

Величина n_{11} је димензијска величина и назива се **јединичним бројем обртаја** и бројно је једнака броју обртаја условно изабране турбине пречника $D_1 = 1$ m на паду $H = 1$ m. Често се, стога, за јединицу n_{11} узима условно јединица брзине обртаја (min^{-1}).

На основу израза за унутрашњу снагу турбине $P_i = \rho Q Y \eta_i$ и израза (3.5) добија се

$$\frac{P_i \eta_Q}{\rho D_1^2 Y^{3/2} \eta_h^{1/2} \eta_i} = \frac{P_i}{\rho D_1^2 Y^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R} = Q'_{11} = \text{const.} \quad (3.13)$$

где је η_i унутрашњи степен корисности[2], $\eta_i = \eta_h \eta_Q \eta_R$.

За модел и прототип важи веза $Q'_{11m} = Q'_{11p}$ тј.

$$\left(\frac{P_i}{\rho D_1^2 Y^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R} \right)_m = \left(\frac{P_i}{\rho D_1^2 Y^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R} \right)_p = \text{const.} \quad (3.14)$$

Из израза (3.14) може се издвојити димензијски израз, стављајући да је $Y = gH$, $\eta_h = 1$ и $\eta_i = 1$.

$$P_{11} = \frac{P_i}{D_1^2 H \sqrt{H}} = Q'_{11} \rho g^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R \quad , \quad (3.15)$$

који је у употреби у техничкој пракси и назива се **јединичном снагом турбине**, а бројно је једнака снази на вратилу јединичне турбине пречника $D_1 = 1$ m и паду $H = 1$ m.

Момент на вратилу турбине, користећи израз (3.10) је

$$M = \frac{P_i}{\omega} = \frac{P_i}{2\pi f_k} = \frac{Q'_{11} \rho D_1^2 Y^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R}{2\pi f_k} \quad (3.16)$$

Користећи израз (3.10) из (3.15) добија се **значица момента**

$$M'_{11} = \frac{M}{\rho D_1^3 Y \eta_h \eta_R} = \frac{1}{2\pi} \frac{Q'_{11}}{f'_{11}} \quad (3.17)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Десна страна израза (3.17) једнака је за модел и прототип, а то значи да и бездимензијска величина M'_{11} мора задовољити једнакост облика

$$M'_{11m} = M'_{11p} \Rightarrow \left(\frac{M}{\rho D_1^3 Y \eta_h \eta_R} \right)_m = \left(\frac{M}{\rho D_1^3 Y \eta_h \eta_R} \right)_p \quad (3.18)$$

У техничкој пракси користи се димензијска величина M_{11} [N/m³] добијена из израза (3.17) и која је облика

$$M_{11} = \frac{M}{D_1^3 H} = \frac{\rho g \eta_h \eta_R}{2\pi} \frac{Q'_{11}}{f'_{11}} \quad (3.19)$$

Величина M_{11} назива се јединичним моментом и бројно је једнака моменту на вратилу јединичне турбине која има пречник $D_1 = 1$ m, а ради на паду $H = 1$ m.

Уводећи у (3.19) величине n_{11} и Q_{11} добија се израз за јединични момент у облику

$$M_{11} = \frac{M}{D_1^3 H} = 93,68 \rho \eta_i \frac{Q_{11}}{n_{11}} \quad (3.20)$$

За проучавање јединичног момента M_{11} са модела на прототип, из израза (3.19) следи

$$\frac{M_{11p}}{M_{11m}} = \frac{\eta_{hp} \eta_{Rp}}{\eta_{hm} \eta_{Rm}} = \frac{\eta_{ip} \eta_{Qm}}{\eta_{im} \eta_{Qp}} \quad (3.21)$$

Последњих година, уместо уобичајених јединичних величина n_{11} и Q_{11} уведе се другачије значајне, које директно зависе од Ојлеровог и Струхаловог броја.

За карактеристичну величину притиска P усваја се, према изразу (3.2), $P = \rho Y_K = \rho \eta_h Y$, а за карактеристичну брзину C усваја се обимска брзина $u_1 = \pi D_1 n/60 = \pi D_1 f_k$. Ојлеров број је сада

$$Eu = \frac{P}{\rho u_1^2} = \frac{\rho Y_K}{\rho u_1^2} = \frac{Y_K}{\pi^2 D_1^2 f_k^2} = \frac{\eta_h Y}{\pi^2 D_1^2 f_k^2} = \frac{\Psi_K}{2} \quad (3.22)$$

где је величина Ψ_K значајна јединичног струјног рада кола. Из (3.22) следи

$$\Psi_K = 2 Eu = 2 \frac{Y_K}{\pi^2 D_1^2 f_k^2} = \frac{2 \eta_h Y}{\pi^2 D_1^2 f_k^2} = \eta_h \Psi \quad (3.23)$$

Величина Ψ је значајна јединичног струјног рада турбине, а одређује се на основу израза

$$\Psi = \frac{\Psi_K}{\eta_h} = \frac{2 Eu}{\eta_h} = \frac{2 Y}{u_1^2} = \frac{2 Y}{\pi^2 D_1^2 f_k^2} \quad (3.24)$$

Лева страна израза (3.23) једнака је за модел и прототип, а то значи да и величина Ψ_K мора задовољити једнакост

$$\Psi_{Km} = \Psi_{Kp} \Rightarrow \left(\frac{2 Y_K}{u_1^2} \right)_m = \left(\frac{2 Y_K}{u_1^2} \right)_p = \text{const.} \quad (3.25)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Односно

$$\Psi_m \eta_{hm} = \Psi_p \eta_{hp} \Rightarrow \left(\frac{2Y \eta_h}{u_1^2} \right)_m = \left(\frac{2Y \eta_h}{u_1^2} \right)_p = \text{const..} \quad (3.26)$$

Из израза (3.26) следи веза међу јединичним струјним радовима модела и прототипа која је облика

$$\frac{Y_p}{Y_m} = \frac{\eta_{hm}}{\eta_{hp}} \frac{u_{1p}^2}{u_{1m}^2} = \frac{\eta_{hm}}{\eta_{hp}} \frac{D_{1p}^2 n_p^2}{D_{1m}^2 n_m^2} \quad (3.27)$$

На основу израза (3.8) за Sh број, узимајући да су карактеристичне величине:

$$T = \frac{1}{f_k} = \left(\frac{\pi D_1}{u_1} \right), \quad C = c_{m0} = \frac{Q_K}{\pi D_1 b_1}, \quad L = D_1,$$

добиа се

$$\text{Sh} = \frac{L}{TC} = \frac{D_1 u_1}{Q_K} b_1 = \frac{D_1^2 u_1}{Q_K} \frac{b_1}{D_1}, \quad (3.28)$$

односно

$$\frac{\pi}{4} \frac{D_1}{b_1} \text{Sh} = \frac{D_1^2 \pi u_1}{4 Q_K} = \frac{1}{\varphi_K} \quad (3.29)$$

Величина ψ_K назива се **значицом протока кола**. Лева страна израза (3.29) једнака је за модел и прототип, а то значи да и величина φ_K мора задовољити једнакост облика

$$\varphi_{Km} = \varphi_{Kp} \Rightarrow \left(\frac{4 Q_K}{\pi D_1^2 u_1} \right)_m = \left(\frac{4 Q_K}{\pi D_1^2 u_1} \right)_p \quad (3.30)$$

Уводећи проток кроз турбину $Q = Q_K/\eta_Q$ добија се

$$\varphi_K = \frac{4 Q \eta_Q}{\pi D_1^2 u_1} = \varphi \eta_Q \quad (3.31)$$

Величина φ је **значица протока турбине**. За модел и прототип може се написати

$$\varphi_m \eta_{Qm} = \varphi_p \eta_{Qp} \quad (3.32)$$

Величине (n_{11}, Q_{11}) или (φ, ψ) дефинишу погонску тачку турбине. Међу овим величинама постоје следеће везе:

$$n_{11} = \frac{60}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{\Psi}} \quad \text{и} \quad Q_{11} = \frac{\pi \sqrt{2g}}{4} \frac{\varphi}{\Psi^{1/2}} \quad (3.33)$$

Ако се у израз за унутрашњу снагу турбине $P_i = \rho Q Y \eta_i$ уведу величине φ_K и ψ_K добија се

$$\frac{8 P_i \eta_h \eta_Q}{\rho \pi D_1^2 u_1^3 \eta_i} = \frac{8 P_i}{\rho \pi D_1^2 u_1^3 \eta_R} = \frac{8 P_K}{\rho \pi D_1^2 u_1^3} = \varphi_K \Psi_K = \lambda_K, \quad (3.34)$$

где је $P_i/\eta_R = P_K$ снага кола.

Величина λ_K назива се **значицом снаге кола турбине**. За модел и прототип важи релација облика

$$\lambda_{Km} = \lambda_{Kp} \quad . \quad (3.35)$$

Увођењем величина φ и ψ у израз (3.34) добија се

$$\lambda_K = \varphi_K \Psi_K = \varphi \Psi \eta_Q \eta_h = \lambda \eta_Q \eta_h \quad , \quad (3.36)$$

где је величина λ **значица снаге турбине**. За модел и прототип важи релација облика

$$(\lambda \eta_Q \eta_h)_m = (\lambda \eta_Q \eta_h)_p = \text{const.} \quad (3.37)$$

Када се у израз за момент на вратилу турбине унесу величине φ_K и Ψ_K добија се израз облика

$$\frac{16 M}{\pi \rho D_1^3 u_1^2 \eta_R} = \varphi_K \Psi_K \quad . \quad (3.38)$$

На основу израза (3.38) могуће је наћи везу међу моментима на вратилу модела и прототипа

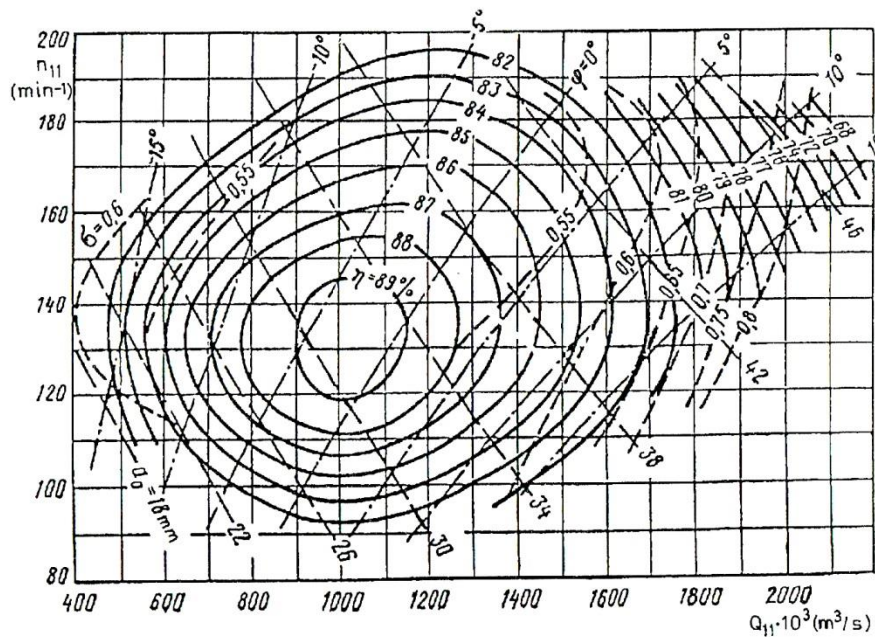
$$\left(\frac{M}{\pi D_1^3 u_1^2 \eta_R} \right)_m = \left(\frac{M}{\pi D_1^3 u_1^2 \eta_R} \right)_p = \text{const.} \quad (3.39)$$

Значице и јединичне величине турбина служе да се пронађу везе међу параметрима сличних турбина, као и да се прикажу универзалне карактеристике турбина.

На слици 3.1 приказана је универзална карактеристика (топографски дијаграм) модела Капланове турбине у координатама (n_{11}, Q_{11}) .

4 Специфична брзина окретања, значица брзоходости и значица пречника

Променом погонских параметара, јединичне величине турбине (значице) такође мењају своје вредности. Величине n_{11} , Q_{11} , φ и ψ , свака посебно, не могу дефинисати геометријски облик турбине. Међутим, показало се, да функционални однос значица φ и ψ односно n_{11} и Q_{11} , или n_{11} и P_{11} дефинисан за тачно одређену погонску тачку (оптималну или номиналну) турбине, одређује карактеристичан облик турбине, односно тип турбине.



Слика 3.1 Топографски дијаграм модела једне Капланове турбине пречника обртног кола $D_m = 0,46$ m

Поменута функционална зависност, која у себи укључује две јединичне величине (значице), уједно у себи обједињује и утицај битних параметара турбине: протока, пада, снаге, и брзине обртања и представља општи и збирни показатељ свих важних обележја које означавају тип турбине.

На основу израза (3.12) и (3.13) може се за било коју турбину написати

$$\frac{n D_1}{\sqrt{Y_K}} = \text{const.} \quad \frac{P_i}{\rho D_1^2 (g H)^{3/2} \eta_h^{3/2} \eta_R} = \text{const.} \quad (4.1)$$

Елиминишући пречник турбине D_1 из израза (4.1) за сваку турбину истог типа следи

$$\frac{n^2 P_i}{\rho H^{5/2} \eta_h^{5/2} \eta_R} = \text{const.} \quad (4.2)$$

Израз (4.2) је константан за сваку сличну турбину, па и за условно уведено турбину таквих димензија да на паду $H^* = 1$ m даје снагу $P_i^* = 1$ kW при брзини окретања n_{SP}^* . Одговарајући степени корисности условне турбине су η_h^* и η_R^* . Из израза (4.2) се добија број обртаја условно уведене турбине

$$n_{SP}^* = \frac{n \sqrt{P_i}}{H^{5/4}} \left(\frac{\eta_h^*}{\eta_h} \right)^{5/4} \left(\frac{\eta_R^*}{\eta_R} \right)^{1/2} = n_{SP} \left(\frac{\eta_h^*}{\eta_h} \right)^{5/4} \left(\frac{\eta_R^*}{\eta_R} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

где је величина n_{SP} **специфична брзина обртаја турбине**.

$$n_{SP} = \frac{n \sqrt{P_i}}{H^{5/4}} \quad (4.4)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Специфична брзина обртања n_{SP} (брзоходост) бројно је једнака брзини обртаја n условно изабране турбине ($n = n_{SP} = n_{SP}^*$) која на паду од $H^* = 1$ m даје снагу од $P_i^* = 1$ kW.

У техничкој пракси користи се специфична брзина обртаја n_{SP} дефинисана за условну турбину која на паду од $H^* = 1$ m даје снагу $P_i^* = 1$ KS.

Овако дефинисана специфична брзина обртања одређује се помоћу израза

$$n'_{SP} = \frac{n \sqrt{P'_i}}{H^{5/4}} \quad , \quad (4.5)$$

где је снага $P'_i = [KS]$.

За модел и главно извођење турбине на основу (4.2) и (4.4) важи

$$\left(\frac{n_{SP}}{\eta_h^{5/4} \eta_R^{1/2}} \right)_m = \left(\frac{n_{SP}}{\eta_h^{5/4} \eta_R^{1/2}} \right)_p \quad . \quad (4.6)$$

У теорији турбомашина, па и код турбина, може да се користи поред специфичног броја обртаја n_{SP} **специфични број обртаја** n_{SQ} .

На основу израза (3.11) и (3.5) може се написати

$$\frac{n D_1}{\sqrt{H} \eta_h} = \text{const.} \quad \text{и} \quad \frac{Q \eta_Q}{D_1^2 \sqrt{H} \eta_h} = \text{const.} \quad (4.7)$$

Елиминишући пречник турбине D_1 из израза (4.7), за сваку турбину истог типа, следи

$$\frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \frac{\sqrt{\eta_Q}}{\eta_h^{3/4}} = \text{const.} \quad (4.8)$$

Израз (4.8) је константан за сваку сличну турбину.

За случај када се степен корисности занемарује добија се величина n_{SP} која се назива специфична брзина обртања турбине, а израчунава се на основу израза

$$n_{SQ} = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad . \quad (4.9)$$

Специфична брзина обртања n_{SQ} (брзоходост обзиром на проток) бројно је једнака броју обртаја условно изабране турбине ($n = n_{SP}$) која на паду $H = 1$ m има проток $Q = 1$ m³/s.

Последњих година, у литератури уместо димензионог израза (4.9) користи се бездимензијски израз облика

$$f_{SQ} = \frac{f_k \sqrt{Q}}{Y^{3/4}} \quad . \quad (4.10)$$

Величина f_{SQ} се назива **специфичном фреквенцијом**, а бројно је једнака фреквенцији обртања кола $f_{SQ} = f_k$ условно изабране турбине која ради на јединичном струјном раду турбине $Y = 1$ J/kg и протоку $Q = 1$ m³/s.

Специфични бројеви обртаја n_{SP} и n_{SQ} су у директној вези.

$$n_{SP} = n_{SQ} \sqrt{g \eta_i} = 3,13 n_{SQ} \sqrt{\eta_i} \quad (4.11)$$

Величине n_{SQ} и n_{SP} су зависне од јединичних величина n_{11} и Q_{11} .

$$n_{SQ} = n_{11} \sqrt{Q_{11}} \quad \text{и} \quad n_{SP} = n_{11} \sqrt{Q_{11} g \eta_i} = 3,13 n_{11} \sqrt{Q_{11} \eta_i} \quad (4.12)$$

Специфични број обртања n_{SQ} може да се изрази помоћу значаја φ и ψ . Коришћењем израза (4.9), (3.24), (3.31), и (3.30) добија се

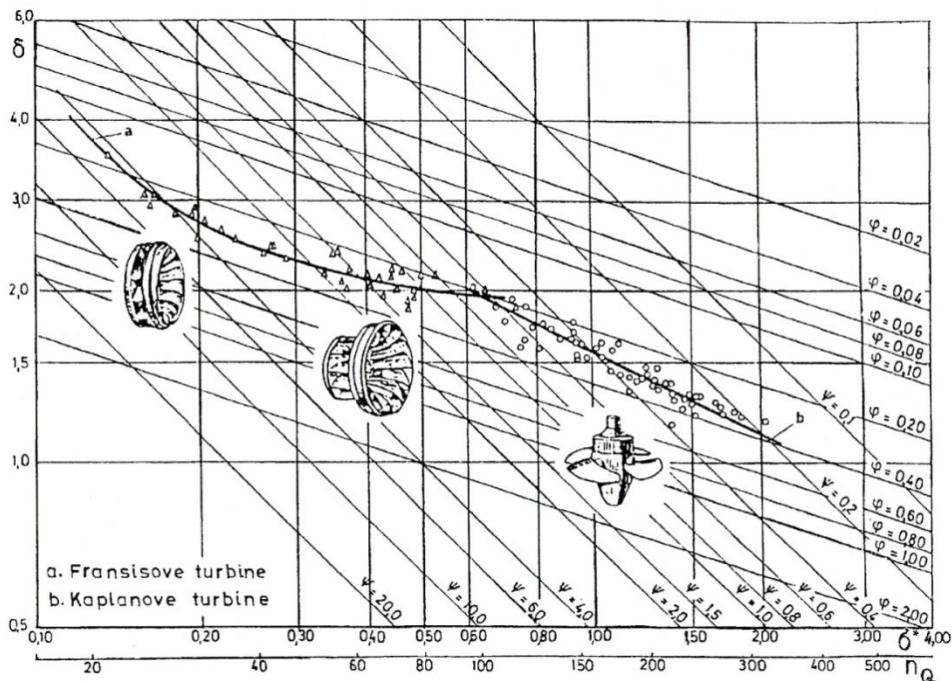
$$n_{SQ} = 30 \frac{(2g)^{3/4} \varphi^{1/2}}{\sqrt{\pi} \Psi^{3/4}} = 157,8 \frac{\varphi^{1/2}}{\Psi^{3/4}} = 157,8 \sigma^* = 332,6 f_{SQ} \quad (4.13)$$

Величина σ^* назива се **значајом брзоходости** и има исти значај као и специфични бројеви обртања n_{SP} и n_{SQ} у одређивању типа турбине.

Повезујући значају напора ψ и значају протока φ тако да се при том из израза елиминира брзина обртања, а садржи линеарна зависност од пречника турбине добија се

$$\delta = \frac{\Psi^{0,25}}{\varphi^{0,5}} = \frac{\sqrt{\pi} Y^{0,25} D_1}{2^{0,75} Q^{0,5}} \quad (4.14)$$

Бездимензијска величина δ назива се **значајом пречника**.



Слика 4.1 Зависност специфичног пречника δ од значаје брзоходости σ^* , односно n_Q

Истраживања Кордиеа (Cordier) су показала да се тип турбомашине може подробије дефинисати помоћу значајца δ и σ^* . На основу тога, примера ради, на дијаграму сл. 4.1 дата је функционална зависност поменутих значајца израчунатих за оптималне вредности степена корисности савремених Капланових и Франсисових турбина [3].

У дијаграму су унете и вредности одговарајућих значајца ϕ и ψ . Методом најмањих квадрата примењеном на скуп вредности σ^* и δ за Франсисове и Капланове турбине уз коришћење погодних аналитичких израза добијају се изрази:

- за Франсисове турбине

$$\delta = 10 \left[0,15 - 0,19 (\log \sigma^*) - 0,52 (\log \sigma^*)^2 \right] \quad (4.15)$$

- док је за Капланове турбине

$$\delta = 1,556 \cdot (\sigma^*)^{-0,5} \quad (4.16)$$

Изрази (4.15) и (4.16) могу корисно послужити при конструисању нових турбина, а такође и при пројектовању и избору турбина хидроелектрана.

5 Закључак

Закони механике сличности (са своја три услова: геометријски, кинематички и динамички) се могу применити и на хидрауличне турбине.

Примена закона механичке сличности доводи до увођења карактеристичних бројева који морају бити идентични за модел и главно извођење. За хидрауличне турбине важни су бројеви Sh – Струхалов, Fr – Фрудов, Eu – Ојлеров и Re – Рејнолдсов.

У раду је показано да не могу сви карактеристични бројеви за модел и прототип испунити услов идентичности (тотална механичка сличност) већ само идентичност појединих утицајних бројева (делимична сличност) Делимична механичка сличност модела и прототипа хидрауличне турбине је испуњена када су идентични бројеви $Sh_m = Sh_p$ и $Eu_m = Eu_p$. Показано је да Рејнолдсови бројеви модела и прототипа не могу бити идентични тј. $Re_m \neq Re_p$, што доводи до потребе прерачунавања хидрауличног степена корисности модела на прототип. Услов идентичности Струхалових бројева, као и Ојлерових бројева уз увођење карактеристичних величина доводи до увођења јединичних значајца: протока Q_{11} и брзине обртања n_{11} , односно значајца: протока турбине ϕ и јединичног струјног рада турбине ψ .

Показано је да значајце, свака за себе, не могу дефинисати одређен тип турбине, али пар значајца одређене за оптималну радну тачку турбине (највиши степен корисности) (n_{11}, Q_{11}) као и (ϕ, ψ) могу одредити тип турбине. Тако су уведене карактеристичне величине: специфична брзина обртања турбине (брзоходост) n_{SP} – обзиром на снагу, n_{SQ} – обзиром на проток (као и аналогне величине: f_{SQ} – специфична фреквенција и σ^* – значајца брзоходости). Међу карактеристичним величинама n_{SP} , n_{SQ} , f_{SQ} , σ^* и δ постоје међусобне везе. На основу вредности ових карактеристичних величина дефинисаних за оптималну радну тачку турбине могуће је одредити тип турбине. Ова особина карактеристичних величина омогућава правилан избор типа турбине. Сва моделска испитивања турбина се показују у координатама значајца (n_{11}, Q_{11}) односно (ϕ, ψ) при чему се у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

такве дијаграме (топографске дијаграме) уносе и величине: η_h -const – хидраулички степен корисности, α -const – отвор спроводног апарата, φ -const – отвор обртног кола и др.

Литература

- [1] Лоицянский, Л. Г.: Механика жидкости и газа, Издательство „Наука“, Москва, 1973.
- [2] Benišek, M: Hidraulične turbine, Edicija mehanika fluida i hidraulične mašine, Mašinski fakultet univerziteta u Beogradu, 1998.
- [3] Schweiger, M. A., Gregori J.: Design of Large Hydraulic Turbines, International Symposium on Large Hydraulic Machinery and Associated Equipments, 28-31 May 1989, Beijing.

Бурно течење у хоризонталној кривини затвореног проводника

Милена Лучић¹
Љубодраг Савић²
Радомир Капор³
Никола Младеновић⁴

АПСТРАКТ: У раду је анализирано течење у проводнику кружног попречног пресека, које настаје услед присуства хоризонталне кривине при бурном току. На физичком моделу је испитан утицај геометријских карактеристика кривине (закривљеност и скретни угао) и услова течења у узводној непо ремећеној зони (дубина и Фрудов број) на настанак одређеног типа течења у проводнику. На основу анализе резултата моделских испитивања, изведене су емпиријске једначине којима се, у зависности од поменутих величина датим у бездимензионалном облику, описују зоне настанка одређеног типа течења.

Кључне речи: буран ток, хоризонтална кривина, затворени проводник, физички модел, хеликоидно течење, загушење тока

Supercritical flow in closed conduit with horizontal bend

ABSTRACT: A complex flow pattern occurring in a circular conduit bend with supercritical flow has been studied. The influence of bend characteristics (curvature and deflection angle) and upstream flow conditions (relative flow depth and Froude number) on the occurrence of a certain type of flow in the conduit has been analyzed on the scale model. A series of experiments provided data for developing empirical relationships describing the effects of aforementioned variables given in non-dimensional form on the inception of a certain type of flow.

Keywords: supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, scale model, helical flow, choking flow

¹ Милена Лучић, дипл. инж, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Бул. Михаила Пупина 12, 11070 Београд, milenakolarevic@yahoo.com

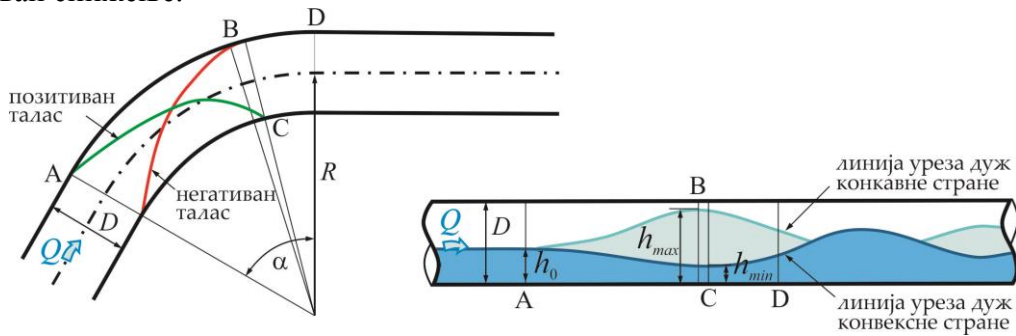
² Др Љубодраг Савић, редовни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

³ Др Радомир Капор, ванредни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁴ Др Никола Младеновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд, nmladenovic@mas.bg.ac.rs

1 Увод

Присуство кривине у хоризонталној равни при бурном течењу изазива нагле поремећаје тока, који се у виду косих стојећих таласа простиру низводно. На месту промене правца, на спољашњој (конкавној) страни кривине настаје позитиван, а на унутрашњој (конвексној) негативан талас. Позитиван талас карактерише повећање нивоа воде, а негативан снижење.



Слика 1. Простирање позитивног и негативног таласа дуж проводника
 Figure 1. Propagation of positive and negative wave along the conduit

Промене дубине и брзине имају таласне карактеристике, па за њих важе закони рефлексије и интерференције. Таласни поремећаји се простиру низводно и одбијају од чврсте границе, услед чега се на зидовима проводника наизменично јављају позитивне и негативне осцилације нивоа.

Код затвореног проводника кружног попречног пресека може да дође до окретања млаза по обиму проводника, и настанка хеликоидног течења, а при одређеним условима и до његовог загушења, чиме се прекида проток ваздуха изнад водене површине, па течење са слободном површином прелази у течење под притиском. Ова појава може да има периодичан карактер, где се наизменично смењују течење под притиском и са слободном површином, па долази до смањења капацитета проводника и опасности од настанка вибрација конструкције.

У пракси се због недовољног познавања специфичности оваквог течења, често избегавају криволинијске деонице код евакуационих објеката у којима се остварује течење са слободном површином (темељни испуст, тунелски прелив), иако то може да доведе до значајног увећања трошкова изградње.

Основни циљ израде овог рада је да се одреде услови при којима долази до настанка хеликоидног течења и загушења тока. Условима су обухваћене и геометријске карактеристике кривине (закривљеност и скретни угао) и услови течења у узводној непо ремећеној зони (дубина и Фрудов број).

Испитивања су рађена на физичком моделу, па су након анализе добијених резултата, предложене емпиријске једначине којима се у зависности од горе наведених величина, одређује тип течења у проводнику. Једначине су дате у бездимензионалном облику погодном за примену. Резултати моделских испитивања су упоређени и са расположивим резултатима из литературе.

2 Анализа претходних истраживања

Анализом бурног течења при промени правца контуре бавили су се многи истраживачи. Међутим, већина радова је фокусирана на течење у отворним каналима, док је течење у кривини затворених проводника обрађено у веома малом броју радова.

У раду [2] је анализирано течење у кривини темељног испуста кружног попречног пресека, са циљем да се одреде услови при којима долази до настанка хеликоидног течења.

Испитивања су рађена на физичком моделу, на коме је испитана једна кривина са закривљеношћу $D/R = 1/3$ и скретним углом од 45° . Пречник цеви је износио 24 cm, а у свим извршеним опитима је запуњеност проводника узводно од кривине била 60% ($h_0/D = 0,6$). Фрудов број је дефинисан изразом $Fr_{0,G\&H} = Q/\sqrt{gDh_0^4}$ и обухваћен је опсег од 1,4 до 4,2.

Пошто карактеристике течења у кривини и низводно од ње првенствено зависе од узводних услова течења, аутори чланка су дефинисали бездимензионални „број загушења“, $C_{G\&H}$, као производ Фрудовог броја и релативне дубине воде узводно од кривине, па су на основу њега одредили границу појаве хеликоидног течења:

$$C_{G\&H} = Fr_{0,G\&H} \frac{h_0}{D}, \quad \begin{cases} C_{G\&H} < 1 & \text{Течење без окретања млаза} \\ C_{G\&H} > 1 & \text{Хеликоидно течење} \end{cases} \quad (1)$$

Према претходној једначини могло би се закључити да једино узводни услови течења утичу на настанак хеликоидног течења, док геометријске карактеристике кривине немају утицаја. Пошто је испитана само једна диспозиција проводника, аутори рада заправо нису ни могли да донесу закључак о утицају карактеристика кривине на течење у проводнику, иако је веома разумно очекивати да овакав утицај постоји.

Због тога је, један од основних циљева овог рада да се анализа бурног течења у кривини кружног проводника прошири и на утицај карактеристика кривине на формирања различитих типова течења у проводнику.

3 Хидрауличка моделска испитивања

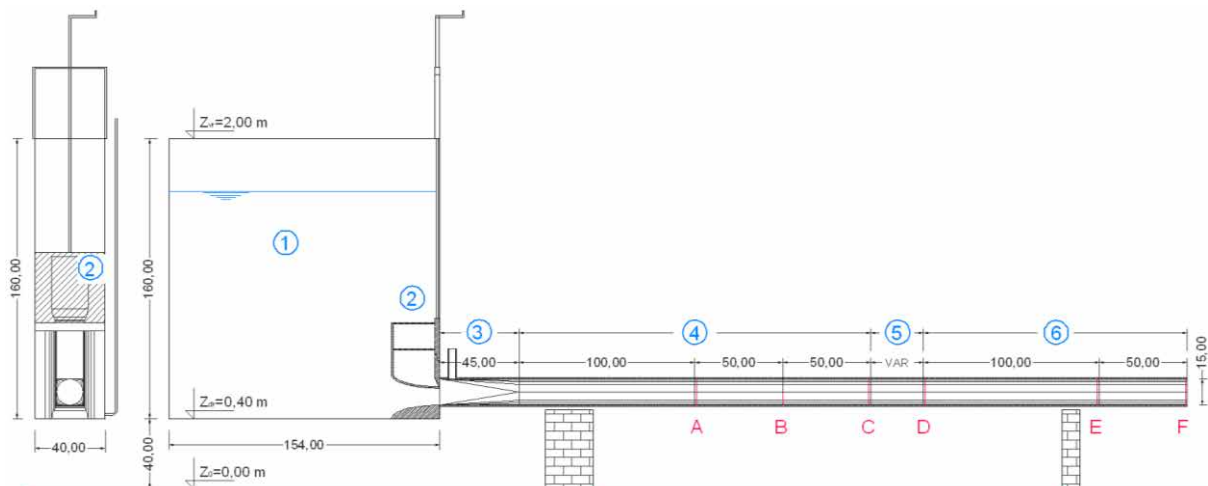
Хидраулички модел је направљен у Лабораторији Института за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство, који је део Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Експериментална инсталација се састоји од (слика 2):

- узводног резервоара из кога се вода контролисано упушта у проводник и
- проводника пречника 15 cm, који се састоји од једне хоризонталне кривине и узводне и низводне праволинијске деонице.

Вода из резервоара се помоћу табласте уставе контролисано упушта у проводник квадратног попречног пресека, који на дужини $3D$ прелази у кружни попречни пресек (прелазна деоница). Аерациона цев је постављена непосредно иза затварача. Проводник је хоризонталан.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 2. Подужни пресек кроз експерименталну инсталацију (димензије су дате у cm)
 1 - резервоар, 2 - табласта устава, 3 - прелазна деоница, 4 - узводна праволинијска деоница, 5 - кривина, 6 - низводна праволинијска деоница
 Figure 2. Experimental installation longitudinal section (distances are given in cm)
 1 - reservoir, 2- slide gate, 3 - transition reach, 4 - upstream straight reach, 5 - bend, 6-downstream straight reach

Доток у узводни резервоар се не мења током једне симулације. Жељени услови течења (прилазна дубина и Фрудов број) се постижу променом дубине воде у резервоару и отвора устава.

Моделским испитивањима је обухваћено 14 различитих диспозиција проводника, са циљем да се одреде утицаји скретног угла кривине и њене закривљености на течење у проводнику, чиме би се употпунила постојећа истраживања у којима су ови утицаји изостављени. Испитане су три закривљености кривине ($D/R = 1/2, 1/3, 1/4$) и четири скретна угла ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60°). Анализа је проширена и на веће скретне углове (75° и 90°), али само за закривљеност $D/R = 1/3$. Закривљеност се мери по оси кривине.

Увлачење ваздуха у ток је још један веома важан аспект разматраног проблема, јер иако је модел релативно малих димензија, ипак је долазило до увлачења ваздуха. Количина увученог ваздуха у ток зависи од деонице која се посматра. Најинтензивније увлачење ваздуха је на узводном крају проводника (на месту где вода истиче испод затварача), али и у зони кривине и низводно од ње, нарочито у случају хеликоидног течења.

С обзиром да је за даљу анализу потребно одредити услове течења непосредно узводно од кривине (релативна дубина и Фрудов број чисте воде), од интереса је да се одреди количина ваздуха у том пресеку (пресек С на слици 2). На моделу се није располагало опремом за мерење концентрације увученог ваздуха у ток, па је она процењена на основу израза из литературе [1]:

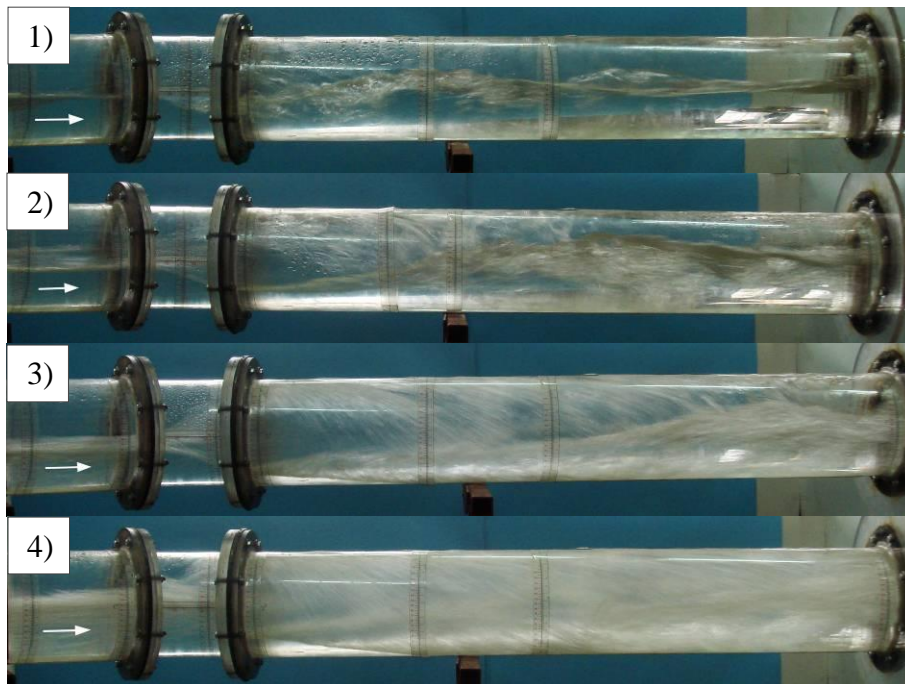
$$\bar{C} = 0,05Fr - \frac{\sqrt{\sin \varphi} \cdot We}{63Fr} \quad (2)$$

где је: $\bar{C} = Q_a / (Q_a + Q_w)$ – средња концентрација ваздуха у мешавини, $Fr = v / \sqrt{g A / B}$ – Фрудов број за чисту воду, ϕ – угао који одговара подужном нагибу канала у коме је нормална дубина једнака ефективној, $We = v / \sqrt{\sigma_w / (\rho_w A / B)}$ – Веберов број, v – средња брзина, σ_w – површински напон воде, ρ_w – густина воде.

4 Анализа резултата моделских испитивања

Сва остварена течења на моделу су класификована у један од четири усвојена типа (слика 3):

1. Течење без окретања млаза,
2. Прелазно течење код кога долази до делимичног окретања млаза,
3. Хеликоидно течење код кога се млаз потпуно окрене по обиму проводника, али не долази до загушења тока,
4. Хеликоидно течење са загушењем тока.



Слика 3. Карактеристичне струјне слике при бурном течењу у кривини затвореног проводника: 1) течење без окретања млаза, 2) прелазно течење, 3) хеликоидно течење без загушења, 4) загушење тока

Figure 3. Types of supercritical flow in closed conduit bend: 1) stratified flow, 2) transition flow, 3) helical flow without choking, 4) choking flow

При течењу без окретања млаза долази до повећања нивоа воде дуж конкавне стране, али он не досеже до врха проводника. На деоници низводно од кривине се јављају осцилације нивоа воде, које се смањују дуж тока, као што се види на слици 3.1).

У случају када максимална дубина на конкавној страни досеже до врха проводника, а само мали део млаза прелази на супротну страну проводника, настаје прелазно течење, слика 3.2).

Хеликоидно течење настаје када се млаз са конкавне стране кривине потпуно окрене по обиму проводника и споји са током на конвексној страни. Део тока на конвексној страни проводника је „поклопљен“ окренутим млазом, услед чега се осцилације нивоа не издвајају јасно, слика 3.3). У зони окретања млаза по обиму проводника, ваздух пролази кроз његов средишњи део, док се низводно од тог места успоставља „класично“ течење са слободном површином, уз присуство стојећих таласа.

Уколико је при окретању млаза по обиму проводника цео попречни пресек испуњен мешавином воде и ваздуха, не остављајући простор за струјање ваздуха кроз његов средишњи део, настаје хеликоидно течење са загушењем, слика 3.4). Осцилације нивоа воде низводно од кривине се не уочавају, јер је цео попречни пресек испуњен мешавином воде и ваздуха.

Анализа резултата моделских испитивања је приказана у наставку на примеру диспозиције проводника са закривљеношћу $D/R = 1/3$ и скретним углом кривине од 45° . С обзиром да је израз из литературе изведен на основу испитивања на кривини истих карактеристика, омогућено је њихово поређење. Слична анализа је урађена и за остале моделе, након чега су изведене емпиријске зависности, којима се дефинишу границе настанка хеликоидног течења и загушења тока.

4.1 Анализа резултата моделских испитивања за диспозицију проводника са закривљеношћу $D/R = 1/3$ и скретним углом од 45°

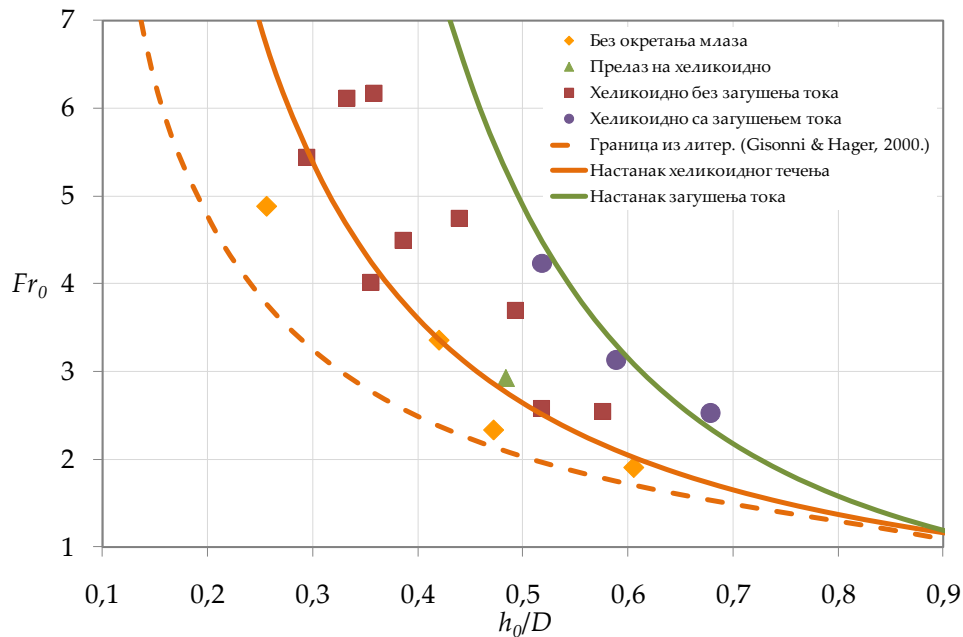
На поменутом моделу кривине је извршено 17 опита. Услови течења у узводној непоремећеној зони су дефинисани релативном дубином, h_0/D , и Фрудовим бројем (односно, формлано гледано, кореном из Фрудовог броја), $Fr_0 = v_0/\sqrt{g A_0/B_0}$, у пресеку непосредно узводно од кривине (пресек С, слика 2). Обухваћен је опсег релативних дубина узводно од кривине од 0,26 до 0,68 и Фрудових бројева од 1,91 до 6,18. Течење на моделу је класификовано у складу са напред изнетом поделом и сваки тип течења је на дијаграму приказан другачијом ознаком.

На слици 4 су приказане карактеристике течења у зависности од услова течења узводно од кривине (релативне дубине и Фрудовог броја).

Испрекиданом линијом на дијаграму је приказана крива из литературе [2], којом се дефинише граница настанка хеликоидног течења. Сви извршени опити на физичком моделу се налазе у зони где је $C_{G\&H} > 1$ (где се очекује појава хеликоидног течења) иако су испитивањима обухваћени и случајеви када не долази до окретања млаза и појаве хеликоидног течења. У литератури [2] нису приказане вредности величина измерених на моделу, на основу којих је изведена емпиријска једначина (1). Може се претпоставити да су аутори рада желели да пруже дозу сигурности корисницима поменутог израза.

С обзиром да крива из литературе [2] не одговара резултатима моделских испитивања, предложене су нове границе настанка хеликоидног течења и загушења

тока. Слична анализа је урађена и за преосталих 13 диспозиција проводника, чиме је обухваћен и утицај геометријских карактеристика кривине на настанак одређеног типа течења у проводнику. Да би се објединили добијени резултати и да би се омогућила примена резултата испитивања и за карактеристике кривине које нису испитане на моделу, дефинисане су емпиријске зависности за границе настанка хеликоидног течења и загушења тока.



Слика 4. Зависности типа течења од релативне дубине и Фрудовог броја узводно од кривине ($D/R = 1/3$, $\alpha = 45^\circ$) и поређење са предложеним границама
 Figure 4. Type of flow depending on the approach flow conditions ($D/R = 1/3$, $\alpha = 45^\circ$) and comparing with suggested limit-curves for onset of the helical and choking flow

4.2 Одређивање граница настанка хеликоидног течења и загушења проводника

Слично као у једначини (1) и овде су границе настанка хеликоидног течења и загушења тока дате у зависности од услова течења узводно од кривине, али је сада уврштен и утицај карактеристика кривине на течење у проводнику. Општи облици једначина су дефинисани следећим изразима:

Граница настанка хеликоидног течења:

$$C_H = \frac{1}{H_1} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{H_2} \begin{cases} < 0,95 & \text{без окретања млаза} \\ = 0,95 - 1,05 & \text{прелазно течење} \\ > 1,05 & \text{хеликоидно течење} \end{cases} \quad (3)$$

где су H_1 и H_2 променљиве које зависе од скретног угла кривине и њене закривљености.

$$H_1 \begin{cases} H_1 = 0,76 \left(\frac{R}{D}\right)^{0,23} + 0,1 \cdot (\cos \alpha)^5 & \text{за } 15^\circ \leq \alpha < 45^\circ \\ H_1 = 0,7 + 0,1 \frac{R}{D} & \text{за } \alpha \geq 45^\circ \end{cases} \quad (4)$$

$$H_2 \begin{cases} H_2 = 0,535 \left(\frac{R}{D}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{0,3} + 0,5 & \text{за } 15^\circ \leq \alpha < 45^\circ \\ H_2 = 1,25 + 0,05 \frac{R}{D} & \text{за } \alpha \geq 45^\circ \end{cases} \quad (5)$$

Из претходних израза се види да променљиве H_1 и H_2 зависе само од закривљености за углове веће од 45° , па величина скретног угла изнад ове границе не утиче на формирање хеликоидног течења у проводнику.

Граница настанка загушења тока:

$$C_z = \frac{1}{Z_1} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D}\right)^{Z_2} \begin{cases} < 1 & \text{без загушења} \\ > 1 & \text{загушење тока} \end{cases} \quad (6)$$

где су Z_1 и Z_2 променљиве које зависе од скретног угла кривине и њене закривљености.

$$Z_1 = 0,55 \left(\frac{R}{D}\right)^{0,4} \cdot (\sin \alpha)^{-0,22} \quad (7)$$

$$Z_2 = 0,85 \left(\frac{D}{R}\right)^{0,005} + 0,6 \cdot (\cos \alpha)^{1,6} + 1,22 \quad (8)$$

С обзиром да су предложени емпиријски изрази за границу настанка хеликоидног течења и загушења тока изведени на основу испитивања на физичком моделу релативно малих димензија, у природи се може очекивати значајније увлачење ваздуха у ток и „бубрење“ млаза, услед чега ће се окретање млаза по обиму проводника догодити и при мањим релативним дубинама воде и мањим Фрудовим бројевима узводно од кривине, него што је то био случај на физичком моделу. До сличног закључка се долази и по питању границе настанка загушења тока, с тим што је овде утицај ваздуха још израженији.

Да би се применом предложених емпиријских израза остало на страни сигурности при пројектовању хидротехничких објеката у пракси, границе настанка хеликоидног течења и загушења тока треба померити ка мањим релативним дубинама и Фрудовим бројевима узводно од кривине, па се препоручује употреба коефицијента сигурности, $\sigma = 1,1$. Општи облици емпиријских зависности које се предлажу за пројектовање су сада дати изразима:

$$C_H = \sigma \frac{1}{H_1} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{H_2} \quad (9)$$

$$C_Z = \sigma \frac{1}{Z_1} Fr_0 \left(\frac{h_0}{D} \right)^{Z_2} \quad (10)$$

Због ограничености простора у раду, није приказано поређење предложених израза за настанак хеликоидног течења и загушења тока са резултатима мерења за сваку испитану диспозицију проводника. Резултати мерења детаљно су приказани у [3] и [4]. У наставку су упоређене одговарајуће предложене криве у циљу одређивања утицаја карактеристика кривине (закривљеност и скретни угао) на формирање одређеног типа течења у проводнику.

4.3 Утицај скретног угла на карактеристике течења у проводнику

Поређењем предложених граница настанка хеликоидног течења и загушења тока за кривине са истом закривљеношћу, а различитим скретним угловима, процењен је утицај вредности скретног угла на карактеристике течења у проводнику. Прво су упоређене границе настанка хеликоидног течења и дати су коментари, а затим је исто урађено и за границе настанка загушења тока. Утицај скретног угла је приказан на примеру за закривљености $D/R = 1/3$.

4.3.1 Настанак хеликоидног течења

На физичком моделу су за закривљеност $D/R = 1/3$ испитани скретни углови од 15° , 30° , 45° , 60° , 75° и 90° , па су упоређене границе настанка хеликоидног течења за испитани опсег углова. Поред тога, криве су упоређене и са кривом из литературе [2], која је добијена на основу моделских испитивања на кривини са истом закривљеношћу и скретним углом од 45° .

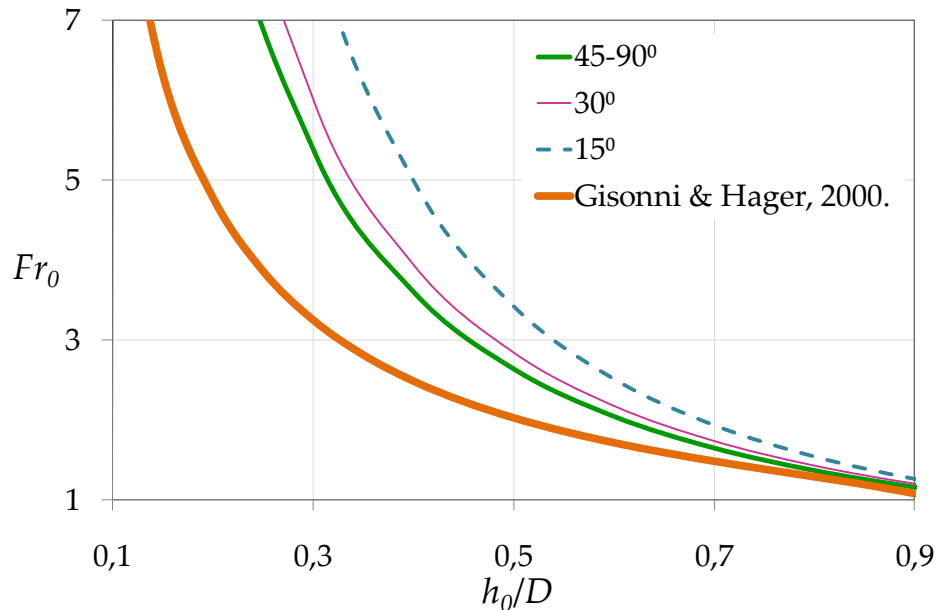
На дијаграму се види да скретни угао кривине не утиче на појаву хеликоидног течења за углове веће од 45° , па су конструисане границе настанка хеликоидног течења исте за скретне углове од 45° до 90° .

Такође се види да се крива за скретни угао кривине од 15° значајније разликује од осталих кривих, што има физички смисао. При испитивањима на моделу са скретним углом од 15° , у скоро свим случајевима у којима је дошло до окретања млаза, то се догодило на праволинијској деоници низводно од кривине. Нагиб узлазне путање млаза постаје блажи када млаз изађе из кривине и дође до низводне праволинијске деонице. Због тога се окретање млаза по обиму цеви догоди на већој удаљености од почетка кривине него при већим скретним угловима, или се уопште не догоди.

Са смањењем скретног угла, граница настанка хеликоидног течења се помера на више (ка већим релативним дубинама и Фрудовом бројевима узводно од кривине), па ће се при истим условима течења узводно од кривине, који се налазе у зони између

кривих, формирати хеликоидно течење код већег скретног угла, док ће се за мањи остварити течење без окретања млаза.

Разлике између граница настанка хеликоидног течења за углове од 15° , 30° и $45^\circ - 90^\circ$, се смањују са повећањем дубине воде узводно од кривине. Ниво воде је тада ближи темену цеви, па се млаз „лакше“ окрене по обиму (ако се окрене). Са повећањем узводне дубине, а при истим брзинама течења, место на коме се млаз окрене се помера узводно ка почетку кривине.



Слика 5. Границе настанка хеликоидног течења за закривљеност $D/R = 1/3$ и разматране скретне углове кривине

Figure 5. Limits between the stratified and the helical flow for curvature $D/R = 1/3$ and considered deflection angles

Препоручена крива из литературе [2] се налази испод кривих добијених на основу моделских испитивања за скоро цео испитани опсег.

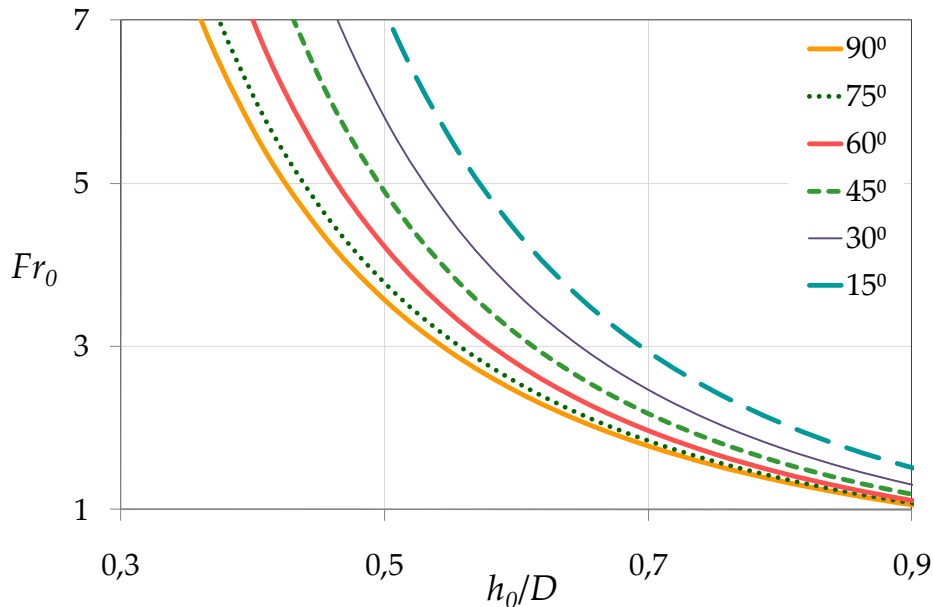
4.3.2 Настанак загушења тока

На следећем дијаграму је приказан утицај скретног угла на настанак загушења тока на примеру закривљености $D/R = 1/3$.

На приказаном дијаграму се види да је за сваки испитани скретни угао конструисана друга крива, јер скретни угао кривине утиче на настанак загушења тока (што није био случај код границе појаве хеликоидног течења).

Међусобни положај кривих је такав да се, са смањењем скретног угла кривине, граница појаве загушења тока помера на више. То значи да ће се при истим условима течења узводно од кривине, остварити загушење тока код већег скретног угла, а течење без загушења код мањег.

Разлике између граница настанка загушења тока се смањују са повећањем запуњености проводника узводно од кривине, јер је тада ниво воде ближи темену, па „лакше“ долази до његовог загушења.



Слика 6. Границе настанка загушења тока за закривљеност $D/R = 1/3$ и разматране скретне углове кривине

Figure 6. Limits of choking for curvature $D/R = 1/3$ and considered deflection angles

4.4 Утицај закривљености на карактеристике течења у проводнику

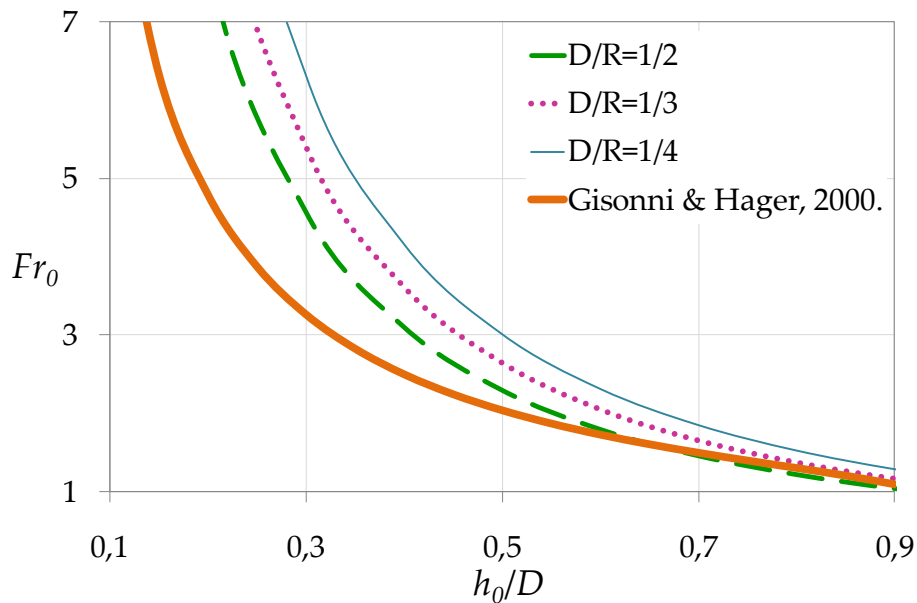
Поређењем предложених граница настанка хеликоидног течења и загушења тока за кривине са истим скретним углом, а различитом закривљеношћу, одређен је утицај закривљености на карактеристике течења у проводнику. Прво су упоређене границе настанка хеликоидног течења и дати су коментари, а затим је исто урађено и за границе настанка загушења тока. Утицај скретног угла је приказан на примеру скретног угла од 45° .

4.4.1 Настанак хеликоидног течења

На физичком моделу су испитане три закривљености ($D/R = 1/2$, $D/R = 1/3$ и $D/R = 1/4$), па су упоређене предложене границе настанка хеликоидног течења. Криве су упоређене и са кривом из литературе [2], која је добијена на основу моделских испитивања на кривини са истом закривљеношћу и скретним углом од 45° .

На дијаграму се види да се са смањењем закривљености граница настанка хеликоидног течења помера на више, па ће се при истим условима течења узводно од кривине, остварити хеликоидно течење на диспозицији проводника са већом закривљеношћу, а течење без окретања млаза при мањој закривљености.

Нагиб и облик узлазне путање млаза дуж конкавне стране кривине не зависе од скретног угла, већ само од њене закривљености и брзине млаза узводно од кривине. Са повећањем закривљености (а при истим условима течења узводно од кривине), нагиб узлазне путање постаје све стрмији, па се место окретања млаза помера узводно. Супротно томе, са смањењем закривљености, а последично и са смањењем нагиба ове узлазне путање, место окретања млаза се помера низводно, али се дешава и да млаз не досегне до врха цеви због веома благог нагиба узлазне путање, па се у том случају остварује течење без окретања млаза.

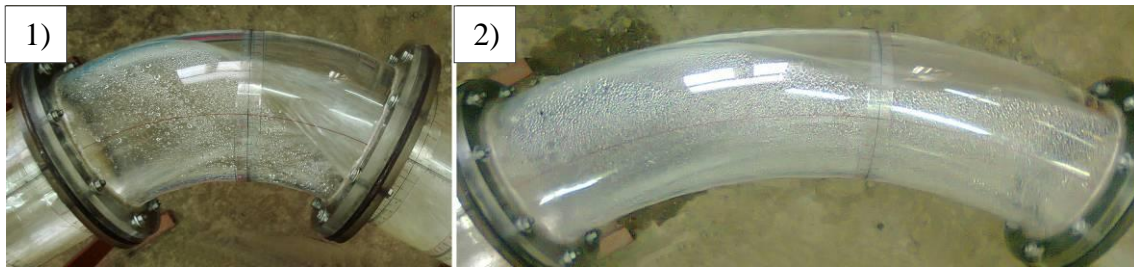


Слика 7. Границе настанка хеликоидног течења за скретни угао од 45° и разматране закривљености

Figure 7. Limits between the stratified and the helical flow for deflection angle 45° and considered curvatures

На слици 8 је приказан утицај закривљености на формирање хеликоидног течења. Услови течења узводно од кривине су исти у оба случаја. Релативне дубине износе, $h_0/D = 0,40$, а Фрудови бројеви, $Fr_0 = 2,95$. Овакве карактеристике тока узводно од кривине леже на граници настанка хеликоидног течења за закривљеност $D/R = 1/2$ (слика 7). На моделу са већом закривљеношћу се остварује прелазно течење, док у случају мање закривљености не долази до окретања млаза по обиму проводника.

Препоручена криве из литературе [2] се налази испод кривих добијених на основу моделских испитивања за скоро цео испитани опсег. Њеним коришћењем се остаје на страни сигурности чак и за случај нешто веће закривљености кривине од оне која је испитана на моделу.

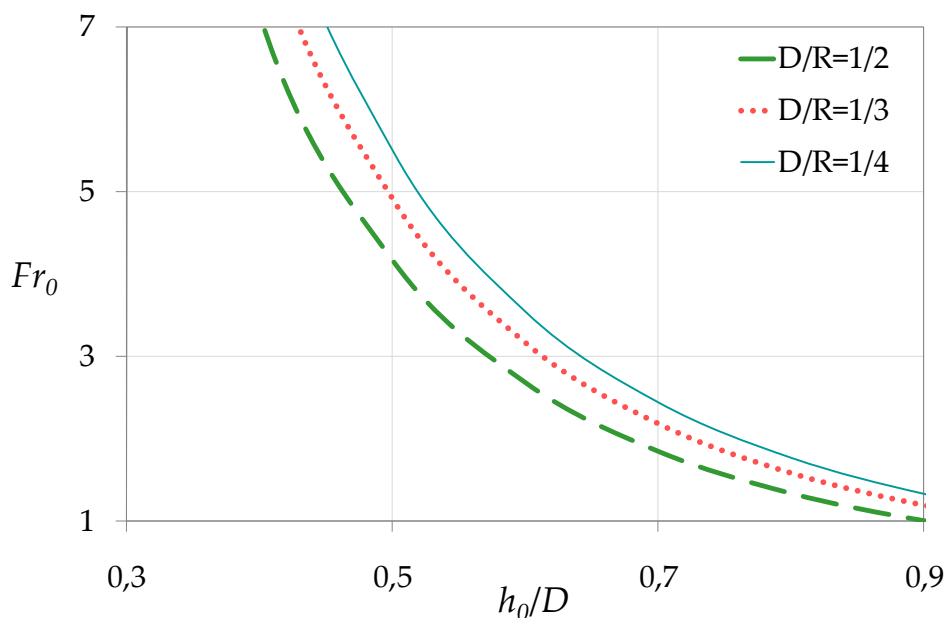


Слика 8. Облик путање млаза на конкавној страни кривине за скретни угао од 60°:
 1) прелазно течење за $D/R = 1/2$, 2) течење без окретања млаза за $D/R = 1/4$
 Figure 8. Shape of flow on the concave side of the bend for deflection angle of 60°:
 1) transition flow for $D/R = 1/2$, 2) stratified flow for $D/R = 1/4$

4.4.2 Настанак загушења тока

Утицај закривљености на настанак загушења тока је приказан на примеру скретног угла од 45°. На слици 9 се види да је за сваку испитану закривљеност конструисана друга крива, јер закривљеност кривине утиче на настанак загушења тока.

На дијаграму се види да се са смањењем закривљености граница настанка загушења тока помера на више, па ће при истим условима течења узводно од кривине, настати загушење тока на диспозицији проводника са већом закривљеношћу, а течење без загушења при мањој.



Слика 9. Границе настанка загушења тока за скретни угао кривине од 45° и разматране закривљености
 Figure 9. Limits of choking for deflection angle of 45° and considered curvatures

5 Закључци и препоруке

У оквиру рада је анализирано бурно течење у проводнику кружног попречног пресека, са кривином у хоризонталној равни. Анализом је обухваћено 14 кривина различитих карактеристика, за које су дефинисани услови течења на узводној непо ремећеној деоници, који у кривини изазивају течење одређеног типа.

На основу анализе резултата испитивања на физичком моделу, предложене су емпиријске зависности којима се у функцији бездимензионалних величина (геометријских карактеристика кривине и услова течења у непо ремећеној зони) описују границе настанка хеликоидног течења и загушења тока. С обзиром да се у природи очекује значајније увлачење ваздуха у ток, него што је то случај на моделу, препорука је да се при примени предложених израза користи коефицијент сигурности, $\sigma = 1,1$.

Закривљеност кривине утиче на успостављање хеликоидног течења. Са смањењем закривљености, граница настанка хеликоидног течења се помера ка већим релативним дубинама и већим Фрудовим бројевима узводно од кривине. Скретни угао кривине такође има утицаја на настанак хеликоидног течења, али само за углове мање од 45° .

И закривљеност и скретни угао кривине утичу на појаву загушења тока, па се њиховим смањењем граница настанка загушења помера ка већим релативним дубинама и Фрудовим бројевима узводно од кривине.

Применом предложених емпиријских израза у пракси, омогућава се ефикасније и поузданије пројектовање хидротехничких објеката (темељни испуст, тунелски прелив).

Захвалност

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 „Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и морфодинамичких параметара река и водних акумулација“ и пројекта ТР 35043.

Литература

1. Falvey, H., (1980), *Air Water Flow in Hydraulic Structures*, Engineering Monograph, No. 41, pp 37–54.
2. Gissoni, C., Hager, W., H., (2000), *Bend Flow in Bottom Outlets*, материјал са интернета.
3. Коларевић, М., (2015), *Бурно течење у кривинама евакуационих објеката*, Докторска дисертација, Универзитет у Београду - Грађевински факултет.
4. Kolarevic, M., Savic, Lj., Kapor, R., Mladenovic, N., (2015), *Supercritical flow in circular conduit bends*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 53 (1), pp. 93-100.

Губитак енергије при хеликоидном течењу у затвореном проводнику са кривином

Милена Лучић¹
Љубодраг Савић²
Радомир Капор³
Никола Младеновић⁴

АПСТРАКТ: Хеликоидно течење у проводнику кружног попречног пресека настаје услед присуства хоризонталне кривине у бурном току. Коefицијенти губитка енергије, при оваквом типу течења, су одређени на основу испитивања на физичком моделу, након чега су дефинисани општи изрази којима се у зависности од карактеристика кривине (скретног угла и закривљености) одређује коефицијент губитка. С обзиром да у литератури нису пронађени изрази којима се описује овакав губитак енергије у кривини, предложене зависности су упоређене са изразима који се односе на течење под притиском. На крају рада су дате препоруке и закључци.

Кључне речи: буран ток, хоризонтална кривина, затворени проводник, физички модел, хеликоидно течење, губитак енергије

Energy loss for helical flow in closed conduit bend

ABSTRACT: Helical flow in closed conduit is caused by the (presence of) bend with supercritical flow. Based on the scale model experiments, the energy loss for helical flow are determined and empirical relationships for the energy bend loss coefficient depending on the bend characteristics (curvature and deflection angle) were proposed. Empirical relationships for the supercritical flow, are compared with expressions for the pressurized flow in bends, because there is no information presently available in literature for the corresponding energy losses. Recommendations and conclusions are also given.

Keywords: supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, scale model, helical flow, energy loss

¹ Милена Лучић, дипл. инж, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Бул. Михаила Пупина 12, 11070 Београд, milenakolarevic@yahoo.com

² Др Љубодраг Савић, редовни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

³ Др Радомир Капор, ванредни професор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра 73, 11000 Београд, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁴ Др Никола Младеновић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд, nmladenovic@mas.bg.ac.rs

1 Увод

Присуство кривине у хоризонталној равни при бурном течењу изазива нагле поремећаје тока, који се у виду косих стојећих таласа простиру низводно. Таласи могу да буде значајне висине, а у случају затвореног проводника може да дође и до окретања млаза по обиму проводника и формирања хеликоидног течења [4], [5]. Уколико је при окретању млаза по обиму проводника цео попречни пресек испуњен мешавином воде и ваздуха, не остављајући простор за струјање ваздуха кроз његов средишњи део, настаје хеликоидно течење са загушењем.

При бурном течењу са кривином долази до губитка енергије, који није занемарљив. Од интереса је да се одреди вредност тог губитка, чиме се омогућава и одређивање преостале енергије низводно од кривине, што је веома значајно при димензионисању евакуационих објеката (као што су темељни испусти и тунелски преливи високих брана).

При одређивању губитка енергије у кривини, коришћена су мерења на физичком моделу, а тежиште испитивања је стављено на одређивање губитка енергије при хеликоидном течењу у проводнику.

2 Хидрауличка моделска испитивања

Физички модел је направљен у лабораторији Грађевинског факултета Универзитета у Београду (Институт за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство). На њему су испитане различите диспозиције проводника, са циљем да се одреди утицај геометријских карактеристика кривине на енергетске губитке при хеликоидном течењу.

Експериментална инсталација се састоји од:

- узводног резервоара из кога се вода контролисано упушта у проводник и
- проводника пречника 15 cm, која се састоји од једне хоризонталне кривине и узводне и низводне праволинијске деонице.

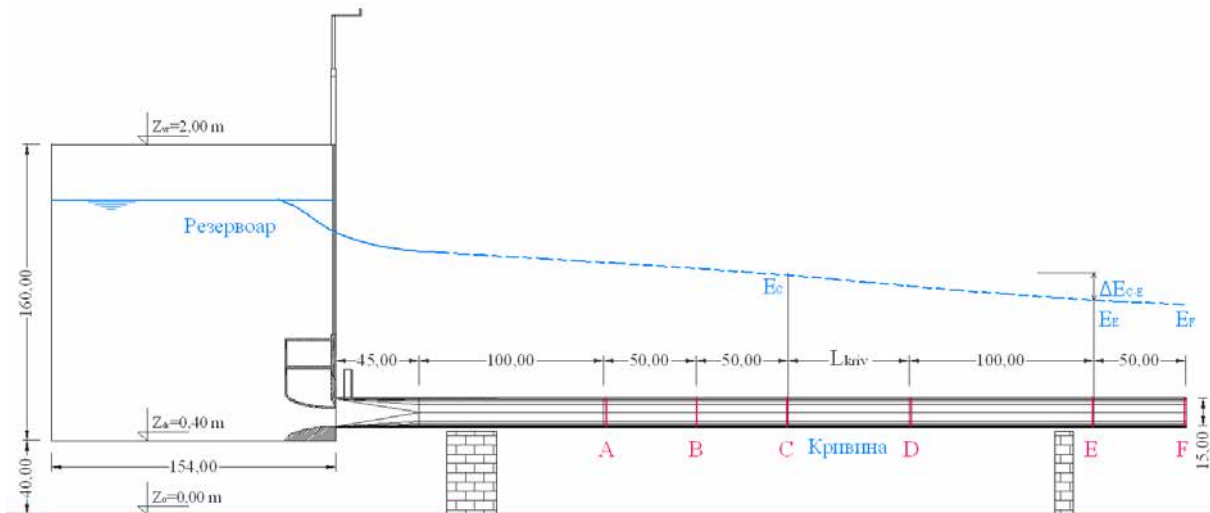
Подужни пресек кроз експерименталну инсталацију је приказан на Слици 1. Вода из резервоара се помоћу табласте уставе контролисано упушта у проводник квадратног попречног пресека, који на дужини $3D$ прелази у кружни попречни пресек (прелазна деоница). Аерациона цев је постављена непосредно иза затварача. Проводник је хоризонталан.

Доток у узводни резервоар се не мења током једне симулације. Жељени услови течења (узводна дубина и Фрудов број) се постижу променом дубине воде у резервоару и отвора уставе.

Моделским испитивањима је обухваћено 13 диспозиција проводника. Испитане су три закривљености кривине ($D/R = 1/2, 1/3, 1/4$) и четири скретна угла ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60°). Анализа је проширена и на скретни угао од 75° , али само за закривљеност $D/R = 1/3$. Закривљеност се мери по оси кривине.

Проток воде је мерен на Томсоновом преливу (контролни пресек) пре уласка у експерименталну инсталацију. Дубина тока је мерена помоћу мерних лењира направљених од транспарентне фолије и постављених по обиму проводника на 6 фиксних мерних места (А, В, С, D, Е и F, слика 1). Скала на њима није линеарна, већ је прилагођена директном читавању дубине.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 1. Подужни пресек кроз експерименталну инсталацију, мерна места и енергетска линија (димензије су дате у cm)
Figure 1. Experimental installation longitudinal section, measuring locations and energy line (distances are given in cm)

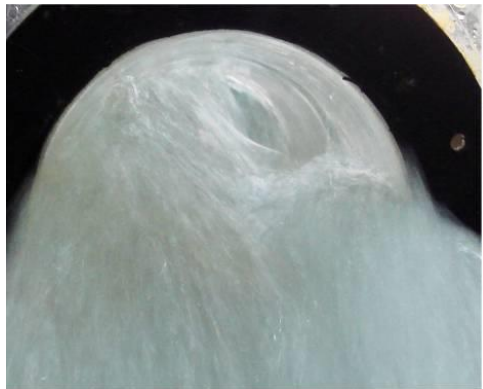
Меродавни узводни пресек за одређивање губитка енергије је пресек непосредно узводно од кривине, (пресек С, слика 2). У кривини и низводно од ње се јавља окретање млаза по обиму проводника, па се као низводни пресек узима место на коме се млаз „размота“ и поново се успостави приближно паралелно и праволинијско струјање (пресек Е, слика 2).

На деоници низводно од кривине струјнице нису стриктно праве и паралелне, а уз то, ни нивои воде у попречном правцу, у мерним пресецима, нису хоризонтални. Узводно од кривине су такође присутне разлике нивоа воде на левој и десној страни проводника, али оне нису велике и настају као последица несавршено обликоване контуре улаза у проводник. Разлике нивоа воде на супротним странама проводника низводно од кривине настају као последица течења у кривини (слика 3).

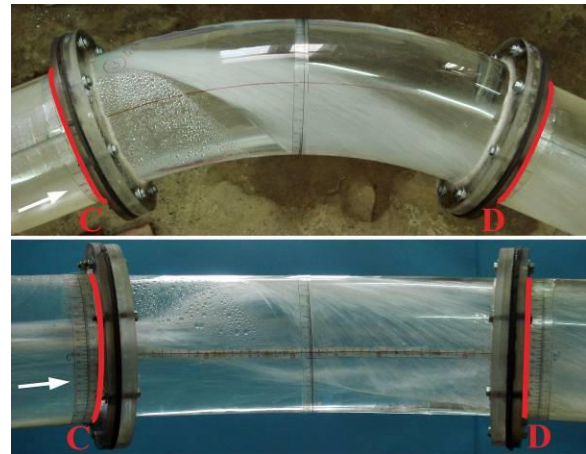
При окретању млаза по обиму проводника повећава се додирна површина између воде и ваздуха, па се додатно појачава увлачење ваздуха у ток (слика 4). Окренути млаз повлачи са собом ваздух и заробљава мехуриће, при поновном спајању са током на супротној страни. Увлачење ваздуха у ток је веома изражено у зони окретања млаза, али често није занемарљиво ни на деоници узводно од кривине, јер је реч о бурном току.



Слика 2. Хеликоидно течење у проводнику са хоризонталном кривином
Figure 2. Helical flow in the conduit with the horizontal bend



Слика 3. Одступање нивоа воде од хоризонталног низводно од кривине
 Figure 3. Deviation of water level from horizontal downstream of the bend



Слика 4. Интензивно увлачење ваздуха у ток при окретању млаза
 Figure 4. Intensive air entrainment with turning of the flow

За даљу анализу је потребно одредити услове течења (дубина и брзина) у меродавним попречним пресецима, који се односе на чисту воду. С обзиром да се на моделу није располагало опремом за мерење концентрације увученог ваздуха у ток, она је процењена на основу израза из литературе [1]:

$$\bar{C} = 0,05Fr - \frac{\sqrt{\sin \phi \cdot We}}{63Fr} \quad (2)$$

где је: $\bar{C} = Q_a / (Q_a + Q_w)$ – средња концентрација ваздуха у мешавини, $Fr = v / \sqrt{g A/B}$ – Фрудов број за чисту воду, ϕ – угао који одговара подужном нагибу канала у коме је нормална дубина једнака ефективној, $We = v / \sqrt{\sigma_w / (\rho_w A/B)}$ – Веберов број, v – средња брзина, σ_w – површински напон воде, ρ_w – густина воде.

Све ово се мора узети у обзир при вредновању поузданости предложених емпиријских израза за локални губитак енергије при хеликоидном течењу.

3 Анализа моделских испитивања и одређивање губитка енергије при хеликоидном течењу

Енергетски губици у кривини су посебно анализирани, за сваку од 13 испитаних диспозиција проводника, да би се оценио утицај карактеристика кривине (скретног угла и закривљености) на ове губитке.

При течењу без окретања млаза је несумљиво присутан губитак енергије (јер долази до наизменичног ударања тока у зидове проводника), али није довољно велики да би се могао одредити коришћењем расположиве мерне опреме. Губици енергије у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

кривини при загушеном току такође нису одређени, јер је представљало проблем одређивање карактеристика течења низводно од кривине, услед испуњености пресека мешавином воде и ваздуха. Према томе, анализом су обухваћени само опити код којих се остварило хеликоидно течење без загушења.

Анализирано је укупно 70 опита, а у табели су дати подаци о броју опита за сваки модел. Већи број опита и мање расипање резултата, указују на већу поузданост.

Табела 1. Број разматраних опита на којима се остварило хеликоидно течење
Table 1. Number of considered experiments with helical flow

	15°	30°	45°	60°	75°
$D/R = 1/2$	3	5	6	8	/
$D/R = 1/3$	5	8	9	8	2
$D/R = 1/4$	4	6	3	3	/

Енергетски губици на деоници између пресека С и Е настају услед трења о зидове проводника – линијски губици, али и услед промене правца чврсте границе – локални губици. Да би се одредили локални губици који су последица кривине, укупне губитке између пресека С и Е треба умањити за одговарајуће линијске губитке на тој деоници.

Укупни губици енергије између пресека С и Е су:

$$\Delta E_{C-E} = E_C - E_E \quad (2)$$

Разлике у дужини анализираних кривина су велике и крећу се од 7,85 cm за угао од 15° и закривљеност $D/R = 1/2$, до 62,83 cm за угао од 60° и закривљеност $D/R = 1/4$. Да би се одвојио утицај дужине кривине, односно одговарајућих линијских губитака, укупан енергетски губитак између пресека С и Е је умањен за линијски губитак на овој деоници, а који одговара губитку на праволинијској деоници исте дужине (као да нема кривине).

$$\Delta E_{kriv} = \Delta E_{C-E} - \Delta E_{C-E}^{lin} \quad (3)$$

Линијски губици су обрачунати са хидрауличким параметрима који се односе на пресек узводно од кривине (пресек С). Експериментална цев је направљена од акрилних плоча, па је на основу података из литературе за овакву врсту материјала [3], усвојен Манингов коефицијент храпавости од $0,009 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$:

$$\Delta E_{C-E}^{lin} = \left(\frac{Q \cdot n}{A_C \cdot R_C^{2/3}} \right)^2 \cdot (L_{kriv} + L_{D-E}) \quad (4)$$

Коефицијент губитка у кривини је одређен на основу губитка енергије у кривини према једначини (3) и брзине тока узводно од кривине:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$\xi_{kriv} = \frac{2g \cdot \Delta E_{kriv}}{V_C^2} \quad (5)$$

За сваку диспозицију проводника је одређена средња вредност коефицијента губитка, која се односи на разматрану комбинацију закривљености и скретног угла (Табела 2 и Слика 6). Такође је одређена и стандардна девијација (мера одступања резултата од средње вредности), као показатељ поузданости добијених резултата.

$$\bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_{kriv,i}^{R,\alpha} \quad (6)$$

$$\sigma_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\xi_{kriv,i}^{R,\alpha} - \bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha} \right)^2} \quad (7)$$

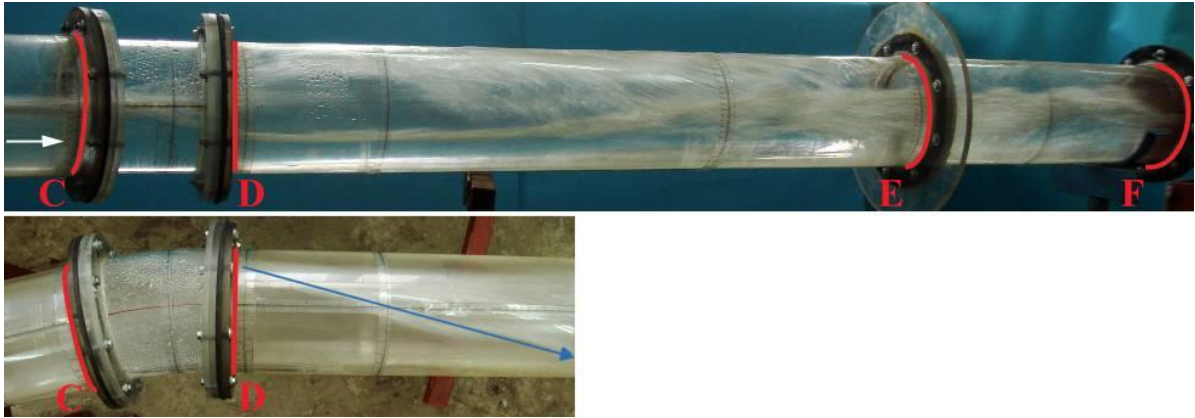
Табела 2. Средња вредност коефицијента губитка у кривини
Table 2. The average value of the bend loss coefficient

$\bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha}$	15°	30°	45°	60°	75°
$D/R = 1/2$	0,140	0,170	0,195	0,199	/
$D/R = 1/3$	0,100	0,108	0,154	0,176	0,194
$D/R = 1/4$	0,093	0,101	0,117	0,123	/

Табела 3. Стандардна девијација коефицијента губитка у кривини
Table 3. The standard deviation of the bend loss coefficient

$\sigma_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}}$	15°	30°	45°	60°	75°
$D/R = 1/2$	0,125	0,040	0,030	0,064	/
$D/R = 1/3$	0,061	0,056	0,093	0,038	0,197
$D/R = 1/4$	0,049	0,068	0,043	0,030	/
$\bar{\sigma}_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}}$	0,078	0,055	0,055	0,044	0,197

Са повећањем закривљености и скретног угла, расте и вредност коефицијента губитка у кривини, што се могло очекивати. Запажа се и велика вредност стандардне девијације за скретни угао од 75°, што указује на веома малу поузданост измереног коефицијената губитка за овај угао. Такође, и вредности стандардне девијације за скретни угао од 15° су веће у односу на остале разматране углове. При малом скретном углу, млаз се окреће по обиму цеви под малим нагибом у односу на правац проводника, па клизи по калоти на великој дужини (Слика 5). Због тога је представљало тешкоћу да се за овај скретни угао одреди меродавна дубина низводно од кривине у пресеку Е, а грешке при њеном одређивању доводе до грешке у коефицијенту губитка.

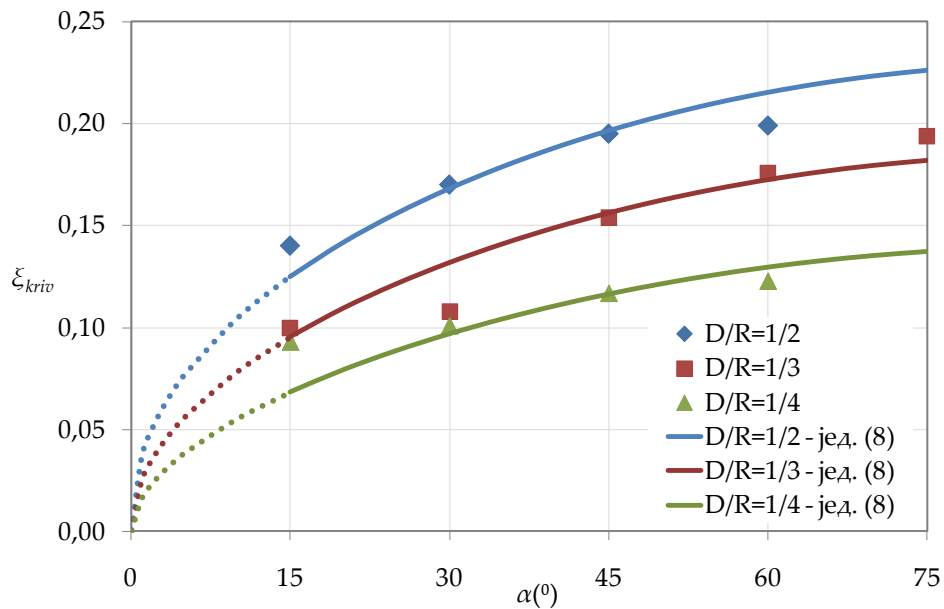


Слика 5. Окретање млаза по обиму цеви под малим углом у односу на правац проводника за скретни угао од 15°
 Figure 5. Small angle between turning of the flow and conduit axis for deflection angle 15°

На основу приказаних резултата предложене су зависности за одређивање коефицијента локалног губитка у кривини кружног проводника, при хеликоидном течењу:

$$\xi_{kriv} = a \cdot \sin^b \alpha \quad (8)$$

где су коефицијенти a и b функције закривљености кривине:



Слика 6. Средња вредност коефицијента губитка у кривини и предложене емпиријске зависности (јед. (8))

Figure 6. The average value of the bend loss coefficient and suggested empirical relationships (eq. (8))

$$a = 0,32 - \frac{0,045}{\left(\frac{D}{R}\right)} \quad (9)$$

$$b = 0,37 + \frac{0,04}{\left(\frac{D}{R}\right)} \quad (10)$$

Вредности коефицијената a и b , у једначинама (9) и (10), одређене су на основу регресионе анализе измерених величина.

4 Поређење резултата са изразима за течење под притиском

У литератури нису пронађени подаци о енергетским губицима у кривини затвореног кружног проводника, при бурном течењу са слободном површином. Зато ће се резултати приказаног испитивања поредити са изразима који се односе на струјање у кривини при течењу под притиском. Ови изрази такође уважавају зависност губитка у кривини од закривљености и скретног угла.

Према USA CE [6]:

$$\xi_{kriv} = \frac{2\alpha}{\pi^2} \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{D}\right) + \alpha} \quad (11)$$

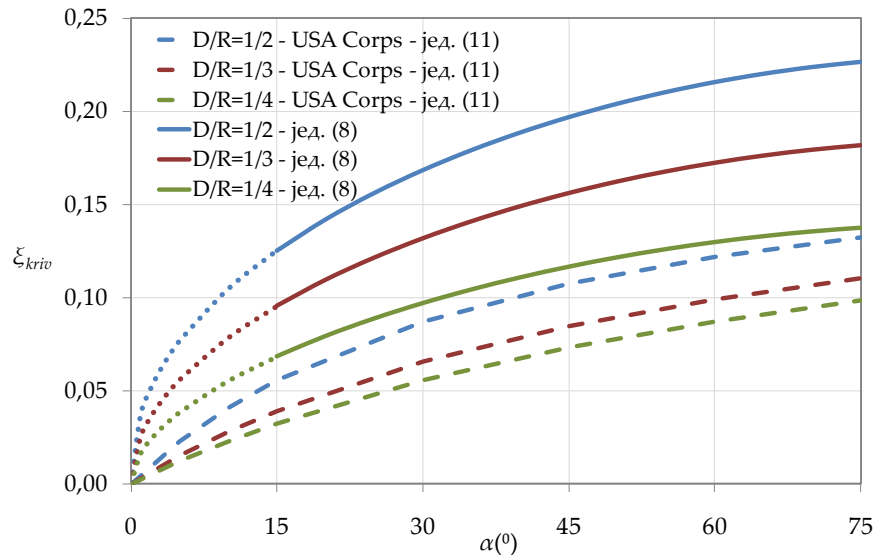
На слици 7 су приказани упоредни резултати испитивања за течење са слободном површином у бурном режиму са изразом (11). Уочава се да су при течењу са слободном површином добијене до два пута веће вредности коефицијента губитка енергије у кривини, од вредности коефицијента губитка при течењу под притиском. Веће вредности настају с обзиром да при бурном течењу прво долази до удара окренутог млаза у супротну страну проводника и спајања са током на супротној страни, а затим и до губитка енергије услед наизменичног ударања тока у зидове проводника.

Треба напоменути да су губици енергије у кривини добијени према изразу (8) ипак донекле прецењени, јер су одређени као разлика између укупних губитака између пресека С и Е и линијских на тој деоници, који су потцењени. Наиме, линијски губици су одређени са хидрауличким параметрима који се односе на пресек узводно од кривине, иако се при окретању млаза по обиму проводника повећава додирна површина између воде и чврсте границе, па су и губици на треће већи.

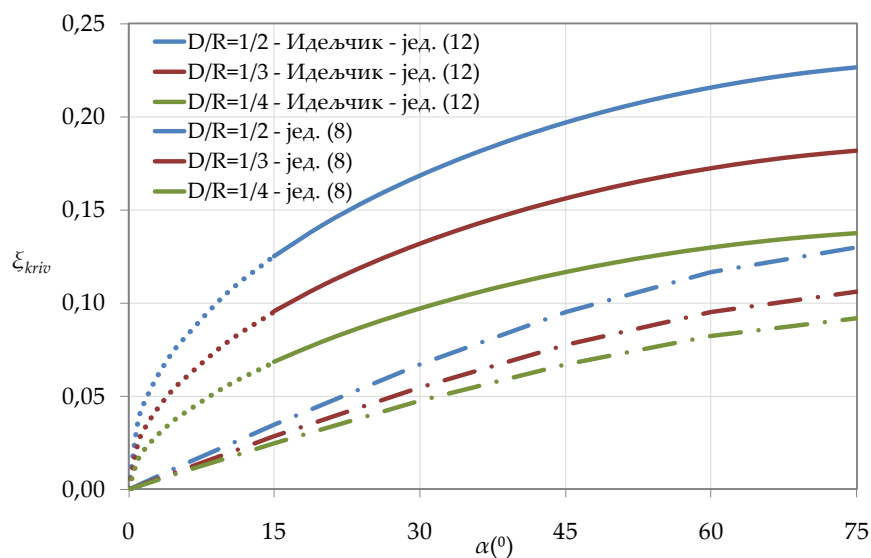
Предложена зависност за коефицијент губитка у кривини при бурном течењу је уопређена и са изразом Идељчика [2]:

$$\xi_{kriv} = \frac{0,19 \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\frac{R}{d_0}}} \quad (12)$$

Добијене су још веће разлике између вредности коефицијената губитка у кривини. Разлике се повећавају са смањењем скретног угла, па за угао од 15° износе 3 – 4 пута.



Слика 7. Вредности коефицијента губитка у кривини при хеликоидном течењу према предложеној зависности (8), у поређењу са изразом (11), за течење под притиском
 Figure 7. Energy bend loss coefficient for helical flow (Eq. (8)) – Comparison with Eq. (11) for pressurized flow



Слика 8. Вредности коефицијента губитка у кривини при хеликоидном течењу према предложеној зависности (8), у поређењу са изразом (12) за течење под притиском
 Figure 8. Energy bend loss coefficient for helical flow (Eq. (8)) – Comparison with Eq. (12) for pressurized flow

На претходним дијаграмима се уочава да предложене криве генерално имају сличан облик као криве из литературе [6] и [2].

5 Закључна разматрања

На основу резултата моделских испитивања одређене су емпиријске зависности за вредност коефицијента губитка енергије, који настаје услед присуства кривине у затвореном проводнику, при хеликоидном течењу. Испитано је 13 различитих кривина, па су и емпиријски изрази за одређивање коефицијента енергетског губитка дати у зависности од карактеристика кривине (скретног угла и закривљености).

С обзиром да у доступној литератури нису нађени слични изрази, којима се дефинише енергетски губитак при хеликоидном течењу, предложени изрази су упоређени са вредностима коефицијента губитка енергије за течење под притиском. Вредности коефицијента енергетског губитка у кривини при хеликоидном течењу су и до два пута већи од одговарајућих губитака при течењу под притиском.

Захвалност

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 „Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и морфодинамичких параметара река и водних акумулација“ и пројекта ТР 35043.

Литература

1. Falvey, H., (1980), *Air Water Flow in Hydraulic Structures*, Engineering Monograph, No. 41, pp 37–54.
2. Idelchik, I., (1986), *Handbook of Hydraulic Resistance*, Springer-Verlag, Berlin.
3. Капор, Р., (2011), *Хидраулика*, Београд, Грађевински факултет Универзитета у Београду.
4. Коларевић, М., (2015), *Бурно течење у кривинама евакуационих објеката*, Докторска дисертација, Универзитет у Београду - Грађевински факултет.
5. Kolarevic, M., Savic, Lj., Kapor, R., Mladenovic, N., (2015), *Supercritical flow in circular conduit bends*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 53 (1), pp 93-100.
6. US Army Corps of Engineers., (1977), *Hydraulic design criteria*. Vicksburg, MS.

Зависност хидродинамичких притисака у слапишту од сужења степенастог брзотока

Бојан Миловановић¹
Будо Зиндовић²
Предраг Војт³
Радомир Капор⁴
Владан Кузмановић⁵
Љубодраг Савић⁶

АПСТРАКТ: У раду се анализирају хидродинамичка оптерећења која делују на дно и зидове слапишта, на основу мерења притисака у изабраним тачкама на физичком хидрауличком моделу. За различите протоке, степене сужења брзотока и потољности хидрауличког скока, извршена су мерења на великом броју мерних места, тако да је добијена поуздана расподела хидродинамичког оптерећења.

Кључне речи: слапиште, хидродинамичко оптерећење, степенести брзоток, сужење

Hydrodynamic pressures in the stilling basin of narrowing stepped spillway

ABSTRACT: This paper analyzes the hydrodynamic loads acting on the bottom and walls of a stilling basin, based on the pressure measurements at the selected points of a scale model. For different degrees of narrowing of the spillway, the hydrodynamic pressures were measured at a large number of points, providing the reliable distribution of hydrodynamic loads.

Keywords: stilling basin, hydrodynamic load, converging stepped spillway

¹ Бојан Миловановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, bojanmil@mts.rs

² Будо Зиндовић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Предраг Војт, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Јарослава Черног 80, Пиносава-Београд, predrag.vojt@jcerni.co.rs

⁴ Проф. др Радомир Капор, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, rkarog@hikom.grf.bg.ac.rs

⁵ Проф. др Владан Кузмановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, vladak@grf.bg.ac.rs

⁶ Проф. др Љубодраг Савић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

1 Увод

Најчешће коришћен тип умиривача енергије тока код брана са степенастим брзотоком је умирујући базен (слапиште). У њему се јавља вртложни ваљак хидрауличког скока, који представља прелаз из бурног у миран режим течења и у коме долази до великог расипања кинетичке енергије тока. Последица овако снажног вртложног кретања је појава флукуација (пулзација) притисака, које представљају значајна оптерећења на дно и бочне зидове базена.

Неопходно је обезбедити да се плоче и зидови слапишта могу супротставити флукуационим оптерећењима, због чега се ови утицаји морају узети у обзир при конструктивном обликовању и димензионисању.

У оквиру рада анализирају се хидродинамичка оптерећења која делују на зидове базена за различите степене сужења степенастог брзотока којим вода долази у слапиште.

2 Опис физичког модела

За испитивање хидродинамичких притисака у умирујућем базену коришћен је физички модел (слика 1) на коме су мењане поједине геометријске карактеристике. Овакав геометријски променљив физички модел омогућио је испитивање хидродинамичког оптерећења, како при различитим хидрауличким условима (проток и дубина доње воде), тако и при различитом степену сужења степенастог брзотока.



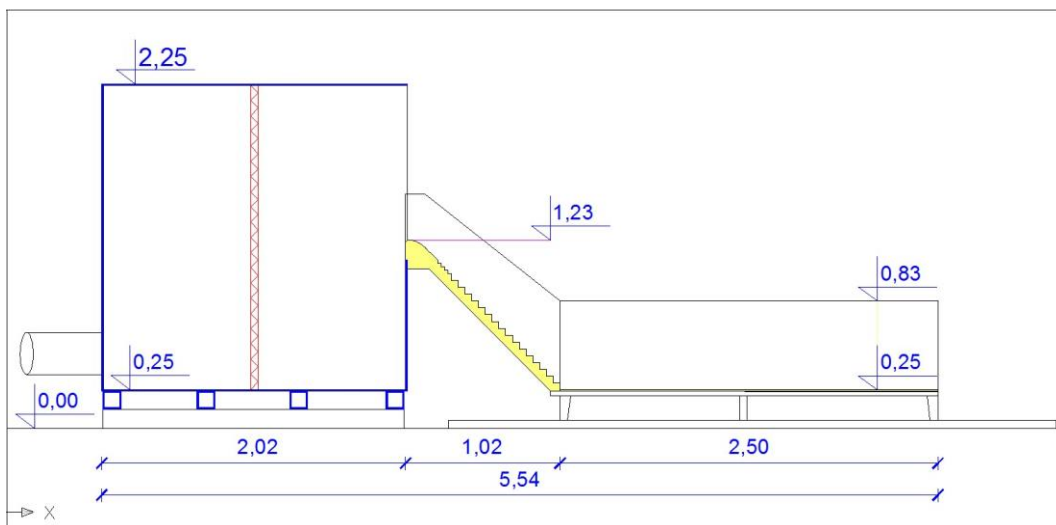
Слика 1. Физички модел за испитивање хидродинамичких притисака
Figure 1. Physical model for studying hydrodynamic pressures

Моделска испитивања су вршена у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику и водноеколошко инжењерство, који је део Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Димензије модела изабране су на основу расположивог

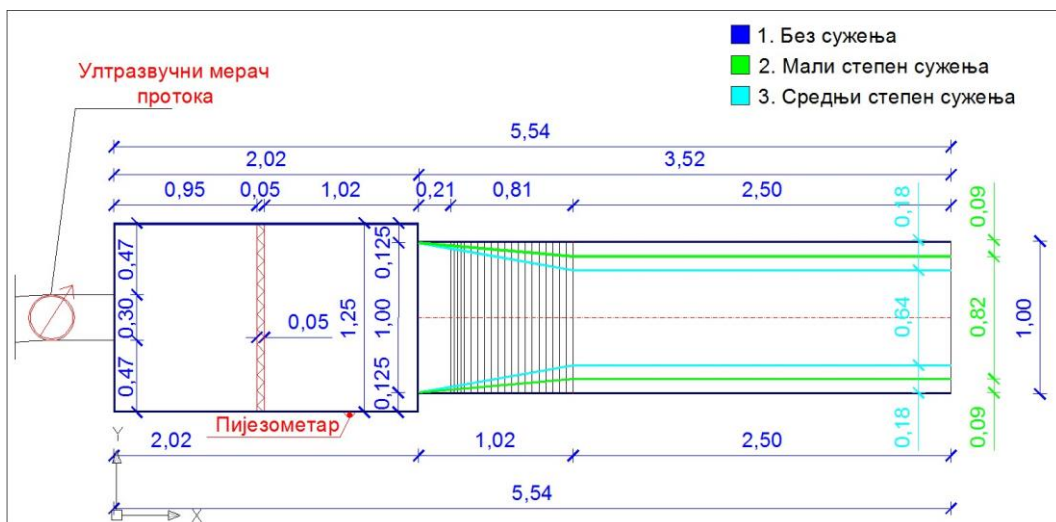
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

простора хидрауличке лабораторије, а евакуациони органи димензионисани су на максималан проток (100 L/s) инсталације хидрауличке лабораторије. Физички модел обухвата резервоар, прелив, степенasti брзоток и умирујући базен (слика 2). Капацитет резервоара износи 4,25 m³. На средини резервоара постављен је умиривач, како би се обезбедио равномеран дотицај на прелив. Прелив је слободни чеони, практичног профила и састоји се од једног преливног поља, ширине 100 cm. Степенasti брзоток је током испитивања имао 4 диспозиције са различитим степенима сужења од којих су у раду искоришћене 3 (слика 3):

- без сужења (ширина на крају брзотока је $b_1 = 100$ cm)
- мали степен сужења ($b_2 = 82$ cm)
- средњи степен сужења ($b_3 = 64$ cm).



Слика 2. Подужни пресек кроз физички модел
Figure 2. Physical model, longitudinal section



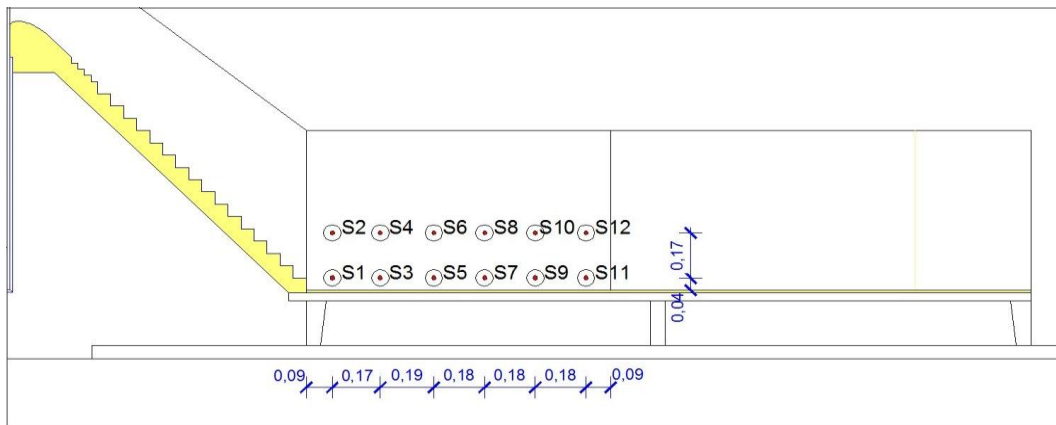
Слика 3. Основа физичког модела
Figure 3. Physical model layout

Степанаст брзоток се састоји од 20 степеника, при чему су прва четири степеника висине 2,25 cm док су преостали висине 4,50 cm.

Умирујући базен је призматичан, ширине која је једнака ширини низводног краја брзотока. Пуна дужина умирујућег базена је 250 cm. Контрола низводног граничног услова врши се помоћу дрвених летви, постављених у посебне жљебове.

3 Мерења на физичком моделу

Програм испитивања на моделу обухватио је мерења и анализу карактеристичних величина ради што бољег сагледавања сложених услова течења. Притисци на моделу мерени су на узводном делу десног зида умирујућег базена у дужини од 105 cm. За потребе ових мерења формирано је 12 мерних места (слика 4).



Слика 4. Мерни места на физичком моделу
Figure 4. Measuring points in the physical model

Притисци су мерени за све три геометријске диспозиције при два различита протока и одговарајућим дубинама доње воде:

1. $Q_1 = 20 \text{ L/s}$ и $h_{DV1} = 11 \text{ cm}$,
2. $Q_2 = 40 \text{ L/s}$ и $h_{DV2} = 17 \text{ cm}$.

За мерење притиска коришћене су сонде за притисак произвођача „DRUCK“, са тачношћу од $\pm 0,1 \%$. Свако мерење је трајало 120 секунди, док је учесталост узорковања износила 200 Hz. За синхрону аквизицију података коришћени су аквизициони уређаји „НВМ Quantumx“.

4 Теоријске основе за процену хидродинамичког оптерећења

За процену карактеристика хидродинамичког оптерећења у слапишту примењен је стандардни поступак, детаљно приказан у [1], [2] и [3].

Тренутна вредност притиска, p , у некој тачки може се приказати као збир средње вредности притиска, \bar{p} , и вредности флукуационог одступања, p' :

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$p = \bar{p} + p' \quad (1)$$

Просечна вредност притиска \bar{p} дефинише се као:

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt, \quad (2)$$

где је T укупно време посматрања.

Показатељ развијености флукуација је средње квадратно одступање σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (p - \bar{p})^2 \cdot dt}, \quad (3)$$

и представља квадратни корен из варијансе:

$$\sigma = \sqrt{p'^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p'^2 \cdot dt}. \quad (4)$$

За практичне потребе одређивања пулзационог притисака меродавни подаци су максимална и минимална вредност притиска, а то су вредности који одговарају веома малим вероватноћама појаве. Велики број истраживања показало је да се функција густине вероватноће за притиске може добро апроксимирати нормалном расподелом:

$$f\left(\frac{p}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{p/\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{p^2}{\sigma^2}} \cdot d\left(\frac{p}{\sigma}\right). \quad (5)$$

Са усвојеном нормалном расподелом, максималне и минималне вредности пулзације притиска могу се дефинисати као:

$$p'_{max} = -p'_{min} = k \cdot \sqrt{p'^2}, \quad (6)$$

где је k коефицијент који зависи од вероватноће појаве. Уобичајно је да се усваја $k = 3,20$, за притисак вероватноће појаве 99,9 %, што значи да ће овако добијени екстремни притисак бити надмашен у само 0,1 % времена.

5 Резултати мерења

Мерењима су регистровани средњи притисци и флукуације притисака на зиду слапишта, за усвојене протоке и нивое доње воде. Измерене величине су статистички обрађене.

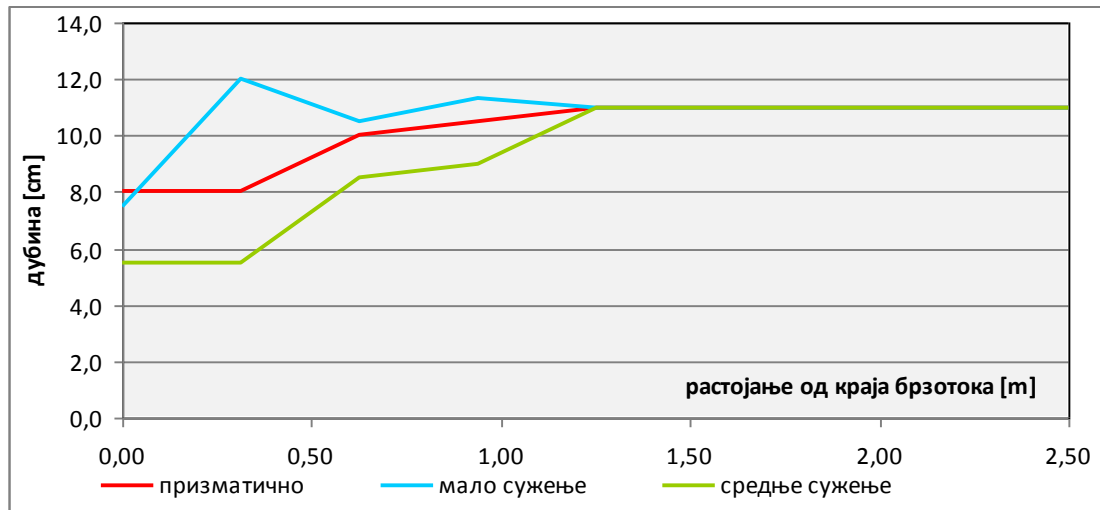
За сваку мерну тачку при анализи коришћено је 24000 података, који су подељени у 20 класа. Показало се да се највећи део резултата може апроксимирати нормалном

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

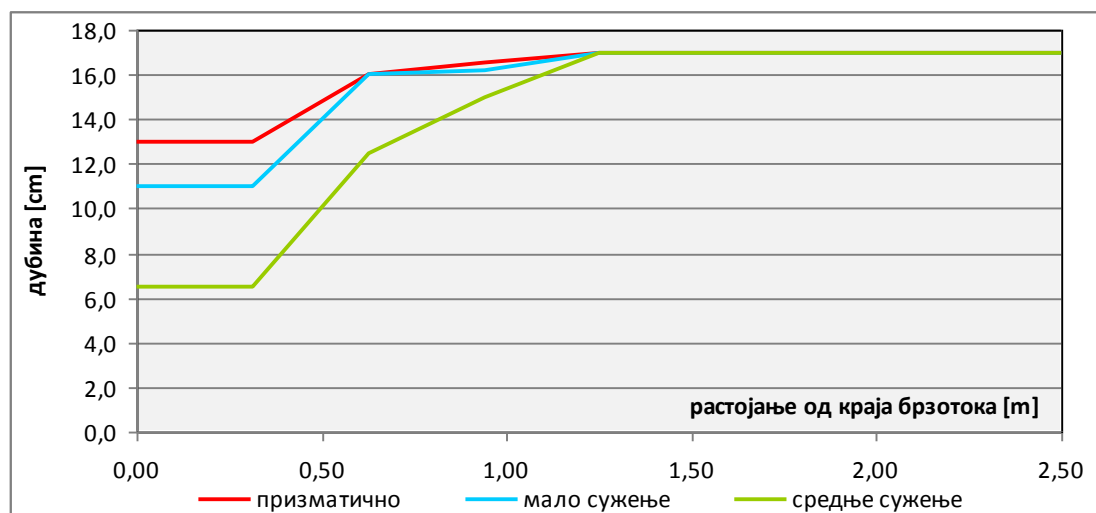
расподелом (слагања се крећу у распону од 80 до 98 %, само су сонде које су током мерења остајале углавном „суве“ имале униформну расподелу $p = 0$).

За диспозицију без сужења, као и за диспозицију са средњим степеном сужења регистрована је уобичајена слика хидрауличног скока у умирујућем базену како за проток од 20 L/s (слика 5) тако и за проток од 40 L/s (слика 6), при чему је за случај са сужењем хидраулички скок мало даље одбачен.

У случају диспозиције са малим сужењем при оба разматрана протока јавља се оштрији хидраулички скок, при чему је то израженије при мањем протоку.



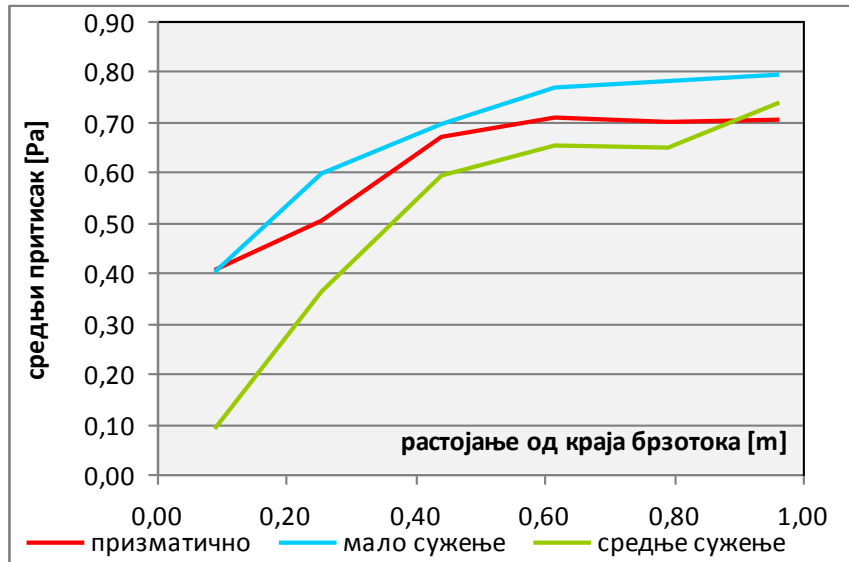
Слика 5. Линија нивоа у умирујућем базену за $Q_1 = 20$ L/s и $h_{DV1} = 11$ cm
Figure 5. The levels in the stilling basin for $Q_1 = 20$ L/s and $h_{DV1} = 11$ cm



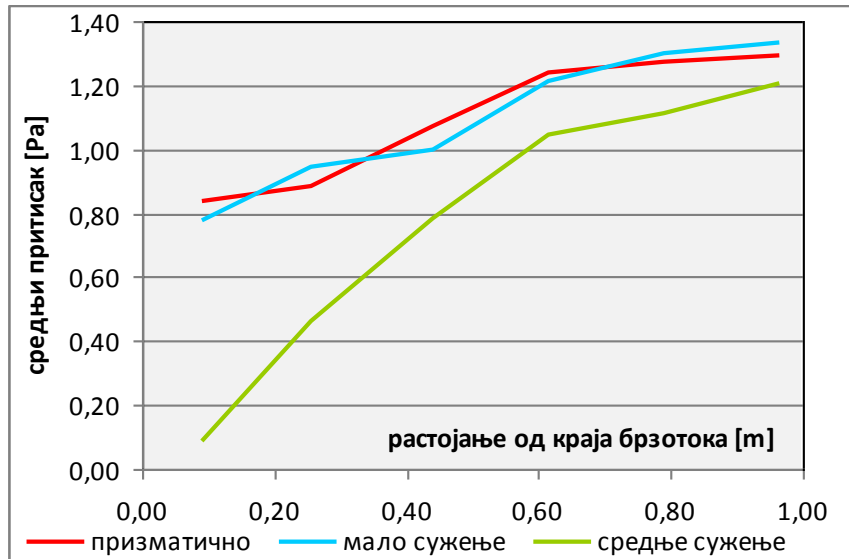
Слика 6. Линија нивоа у умирујућем базену за $Q_1 = 40$ L/s и $h_{DV1} = 17$ cm
Figure 6. The levels in the stilling basin for $Q_1 = 40$ L/s and $h_{DV1} = 17$ cm

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Измерене вредности средњих притисака при дну зида за сваку од мерних диспозиција приближно прате одговарајуће линије нивоа у умирујућем базену (слика 7 и слика 8).

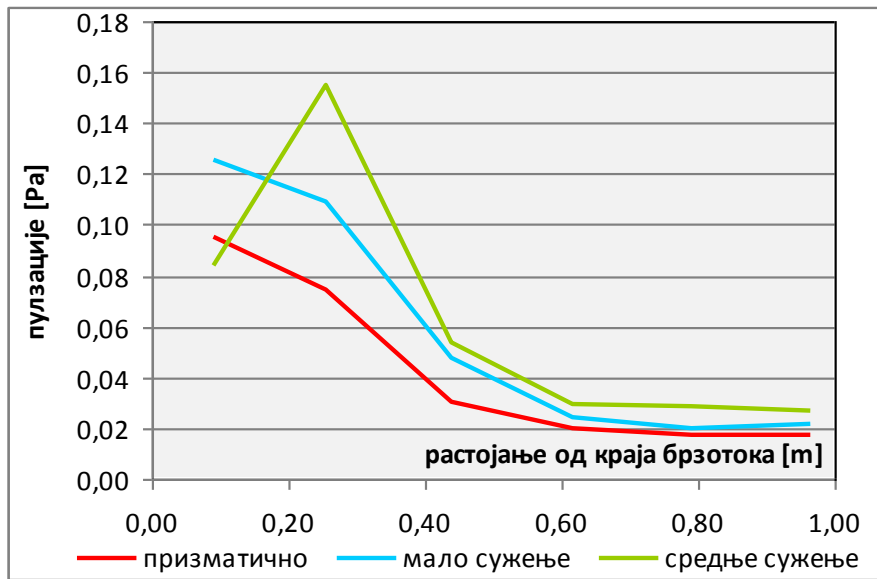


Слика 7. Средњи притисци у умирујућем базену за $Q_1 = 20$ L/s и $h_{DV1} = 11$ cm
Figure 7. Average pressures in the stilling basin for $Q_1 = 20$ L/s and $h_{DV1} = 11$ cm

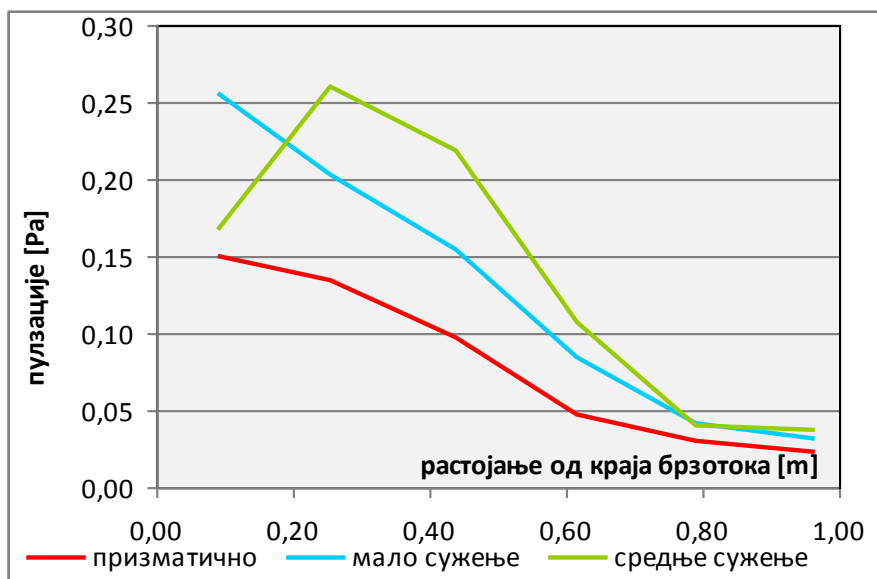


Слика 8. Средњи притисци у умирујућем базену за $Q_1 = 40$ L/s и $h_{DV1} = 17$ cm
Figure 8. Average pressures in the stilling basin for $Q_1 = 40$ L/s and $h_{DV1} = 17$ cm

За све мерне диспозиције пулзације притисака имају своје максималне вредности на месту где се налази хидраулички скок. Може се уочити да вредности пулзација расту са степеном сужења брзотока (слика 9 и слика 10), што се може приписати већој нестабилности хидрауличног скока.

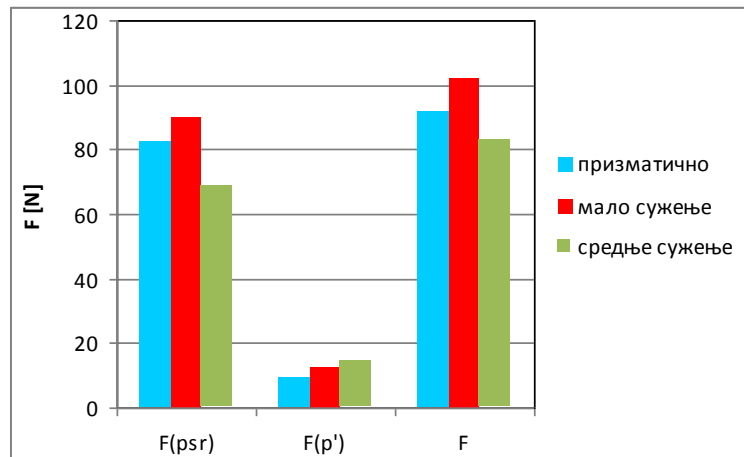


Слика 9. Пулзације у умирујућем базену за $Q_1 = 20 \text{ L/s}$ и $h_{DV1} = 11 \text{ cm}$
 Figure 9. Pressure fluctuations in the stilling basin for $Q_1 = 20 \text{ L/s}$ and $h_{DV1} = 11 \text{ cm}$

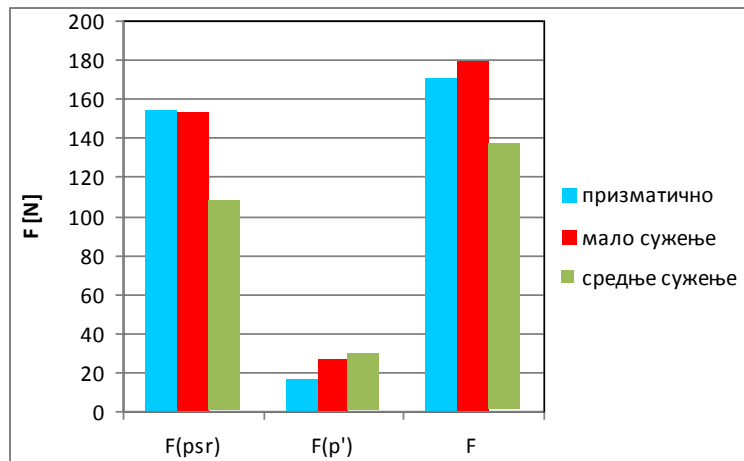


Слика 10. Пулзације у умирујућем базену за $Q_1 = 40 \text{ L/s}$ и $h_{DV1} = 17 \text{ cm}$
 Figure 10. Pressure fluctuations in the stilling basin for $Q_1 = 40 \text{ L/s}$ and $h_{DV1} = 17 \text{ cm}$

На основу срачунатих сила на узводни део зида у дужини од 105 cm може се закључити да у свим диспозицијама доминантан утицај имају средњи притисци. Релативни утицај силе услед пулзација у укупној сили расте са степеном сужења. У случају призматичног брзотока допринос пулзација износи мало мање од 10 % у укупној сили, док у случају средњег сужења тај утицај расте на више од 20 % (слика 11 и слика 12).



Слика 11. Сила на зид умирујућег базена за $Q_1 = 20 \text{ L/s}$ и $h_{DV1} = 11 \text{ cm}$
 Figure 10. The force acting on the wall of the stilling basin for $Q_1 = 20 \text{ L/s}$ and $h_{DV1} = 11 \text{ cm}$



Слика 12. Сила на зид умирујућег базена за $Q_1 = 40 \text{ L/s}$ и $h_{DV1} = 17 \text{ cm}$
 Figure 12. The force acting on the wall of the stilling basin for $Q_1 = 40 \text{ L/s}$ and $h_{DV1} = 17 \text{ cm}$

6 Закључци

На основу мерења на физичком моделу и обраде добијених резултата може се закључити следеће:

- Сва оптерећења прате законе нормалне расподеле
- Средњи притисци приближно прате линију нивоа у умирујућем базену
- Највеће вредности пулзација су добијене у зони хидрауличког скока.

Ако се посматра утицај степена сужења брзотока на хидродинамичко оптерећење зида слапишта, могу се извести следећи закључци:

- Нестабилност хидрауличког скока и пулзације расту са степеном сужења
- Утицај пулзационих сила у укупној сили зрасте са степеном сужења брзотока.

Литература

1. Мушкатиновић Ј., Јовић С., (1982), *Анализа хидродинамичког оптерећења слапишта преливне бране*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож.
2. Хајдин Г., (1982), *Прилози за процену флукуационог оптерећења на граничне површине флуидне струје – на основу измерених притисака у неколико тачака површине*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож.
3. Савић Љ., (2009), *Увод у Хидротехичке грађевине*, Универзитет у Београду Грађевински факултет, Београд.
4. Миловановић Б. и Зиндовић Б. (2015), *Мерења на моделу за испитивање умирујућег базена степенстих брзотока са сужењем (радни материјал)*, Грађевински факултет, Београд.

Анализа хидродинамичких притисака у умирујућем базену насуте бране

Маријана Дамњановић¹
Предраг Војт²
Даница Старицац³
Драгиша Жугић⁴
Радомир Капор⁵
Љубодраг Савић⁶

АПСТРАКТ: Умирујући базен је један од најчешће примењиваних типова умиривача енергије, због високе ефикасности у расипању енергије основног тока кроз секундарно вртложно струјање у ваљку хидрауличког скока који се у њему образује. Битна одлика оваквог струјања су и пулзације притисака, посебно изражене на плочама дна, бочним зидовима и осталим бетонским елементима базена. У раду се анализирају хидродинамичка оптерећења која делују на дно и зидове слапишта, на основу мерења притисака у изабраним тачкама на физичком хидрауличком моделу. Мерено је на великом броју мерних места, тако да је добијена поуздана расподела хидродинамичког оптерећења, за различите услове течења.

Кључне речи: слапиште, хидродинамичко оптерећење, флукуација притисака

Analysis of the hydrodynamic pressures in the stilling basin of an embankment dam

ABSTRACT: Stilling basin is one of the most commonly used energy stilling techniques due to its high efficiency in dissipation of the main flow energy through secondary swirling flow in the hydraulic jump. An important feature of this flow type is pressure pulsation, particularly noticeable at the bottom panels, side walls and other concrete elements of the basin. This paper analyzes the hydrodynamic loads acting on the bottom and walls of a stilling basin, based on the pressure measurements at the selected points of a scale model. The hydrodynamic pressures were measured at a large number of points, providing the reliable distribution of hydrodynamic loads, for different flow conditions.

Keywords: stilling basin, hydrodynamic load, pressures fluctuations

¹ Маријана Дамњановић, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, marijana.damnjanovic@jcerni.co.rs

² Предраг Војт, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, predrag.vojt@jcerni.co.rs

³ Даница Старицац, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, danica.starinac@jcerni.co.rs

⁴ Драгиша Жугић, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, dragisa.zugic@jcerni.co.rs

⁵ Проф. др Радомир Капор, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁶ Проф. др Љубодраг Савић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, ljsavic@grf.bg.ac.rs

1 Увод

Умирујући базен представља завршни део евакуационог органа, преко кога се преливена вода предаје кориту реке низводно од бране. Излазни део има задатак да распе („потроши“) енергију воде коцентрисану узводно од бране, која се прикупљала дуж успореног тока реке. Сва та „накупљена“ енергија се мора „потрошити“ на малом простору низводно од бране, односно у умирујућем базену у коме се ствара вртложни ваљак хидрауличког скока, који представља нагли прелаз из бурног у мирно струјање воде, праћен знатним расипањем кинетичке енергије. Овај процес прате и велике флукуације (пулзације) притисака, посебно изражене на плочама дна, бочним зидовима и осталим бетонским елементима базена. Услед појаве великих флукуација притисака може доћи до хаварија на базенима (нпр. испливање плоча слапишта), чиме се угрожава стабилност целе грађевине. Имајући ово у виду, јасно је да је један од кључних корака у пројектовању управо одређивање максималне величине флукуационе силе (F').

У оквиру рада анализирају се хидродинамичка оптерећења која делују на дно и зидове базена, а за различите меродавне протоке и два решења слапишта.

2 Опис хидрауличког модела

Предмет испитивања је насута брана Бени Слимане (река Mellah, покрајина Medea, Alžir). Висина бране је 67 m. Поред своје основне намене, да регулише доток реке у циљу наводњавања, брана са претећим објектима треба да омогући безбедно пропуштање протока од $Q = 563,4 \text{ m}^3/\text{s}$, односно велику воду повратног периода 10000 година. Поплавни талас великих вода се евакуише преко лавиринт прелива, брзотока и умирујућег базена (слапишта), позиционираних на десном боку бране. Лавиринт прелив се састоји од три модула, чије су странице постављене под углом од 19° у односу на осу прелива, формирајући тако преливну ивицу укупне дужине 77,1 m. На преливну грађевину се наставља брзоток, дужине 190 m и ширине 12 m, подужног пада 34,4%. На низводном делу брзоток се постепено проширује на дужини од 40 m, са почетних 12 m на 20 m, достижући тако ширину умирујућег базена. Умирујући базен је дужине 50 m, са котом дна на 646,8 мнм, пројектован као објекат типа USBR II. Меродаван проток за димензионисање евакуационих објеката одговара великој води повратног периода 1000 година, $Q_{0,1\%} = 420 \text{ m}^3/\text{s}$.

У Заводу за хидраулику Института за водопривреду „Јарослав Черни“ изграђен је хидраулички модел бране Бени Слимане, у размери за дужине 1:30 [4].

3 Мерења на хидрауличком моделу

Програм испитивања на хидрауличком моделу бране Бени Слимане обухватио је мерења и анализу великог броја карактеристичних величина, а све ради што бољег сагледавања сложених услова течења који се могу јавити на објекту. Један од задатака је био и испитивање течења у слапишту и анализа хидродинамичких притисака на плоче дна, као и на зидове умирујућег базена.

У оквиру рада анализираће се хидродинамички притисци при меродавним протоцима и за различита решења умирујућег базена. Мерено је на плочама дна и левом зиду слапишта, при протоцима $Q = \{850; 563,4; 420; 216\} \text{ m}^3/\text{s}$. Испитивања су изведена за две варијанте умирујућег базена.

За потребе ових мерења, на слапишту и зидовима слапишта постављен је велики број мерних места како би се добила што боља просторна представа о распореду притисака дуж карактеристичних пресека. Промена притиска на мерном месту претворена је давачем – сондом у промену електричног напона. На свим мерним местима мерено је истовремено, са временским кораком од 0,005 s и трајањем од 500 s.

4 Основе за процену хидродинамичког оптерећења

За процену карактеристика хидродинамичког оптерећења у слапишту примењен је стандардни поступак анализе, детаљно приказан у [1], [2] и [3].

Тренутна вредност притиска p , у некој тачки на контури слапишта, може се приказати као збир средње вредности притиска \bar{p} и вредности флукуационог одступања p' :

$$p = \bar{p} + p' \quad (1)$$

У том случају показатељ развијености флукуација је стандардна девијација, која се дефинише као квадратни корен из варијансе:

$$\sqrt{p'^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p'^2 dt} \quad (2)$$

При анализи притисака у слапишту битне су максималне p'_{\max} и минималне p'_{\min} вредности притиска. Ако се усвоји нормална (Гаусова) расподела вероватноће за флукуације притиска важи:

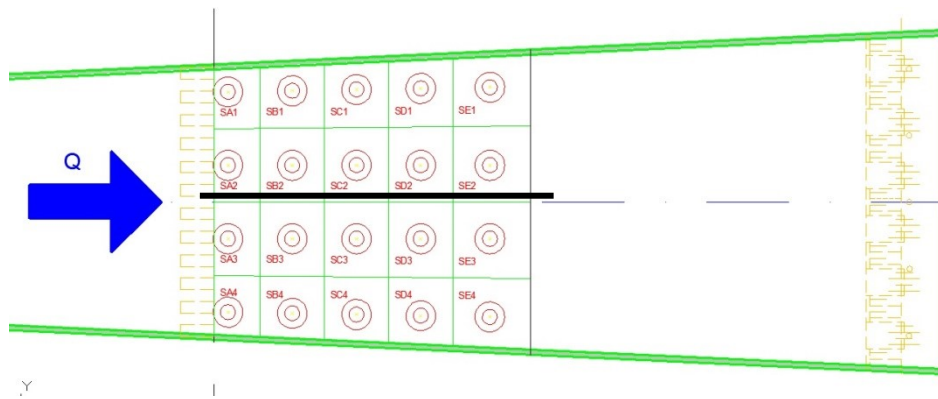
$$p'_{\max} = -p'_{\min} = K \sqrt{p'^2} \quad (3)$$

Вредност фактора K зависи од вероватноће појаве. Она, на пример, износи 3,09 за вероватноћу 99,9%, што значи да ће екстремни притисак бити надмашен само за 0,1% времена.

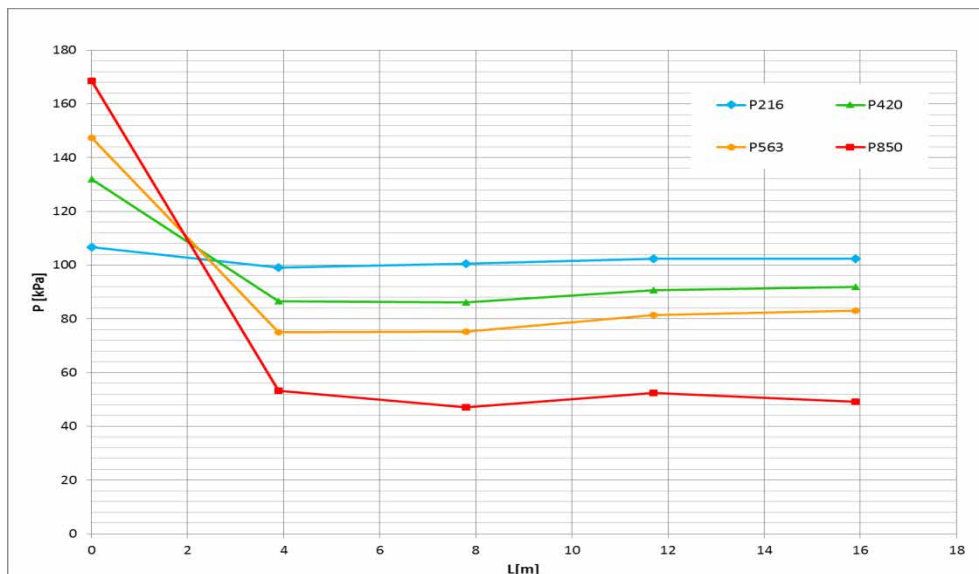
У овом раду вредности флукуација притиска су представљене преко стандардне девијације.

5 Резултати мерења

Прва серија мерења је урађена за решење слапишта приказано у пројекту бране, које је приказано раније. Положај мерних тачака у дну слапишта приказан је на слици 1.



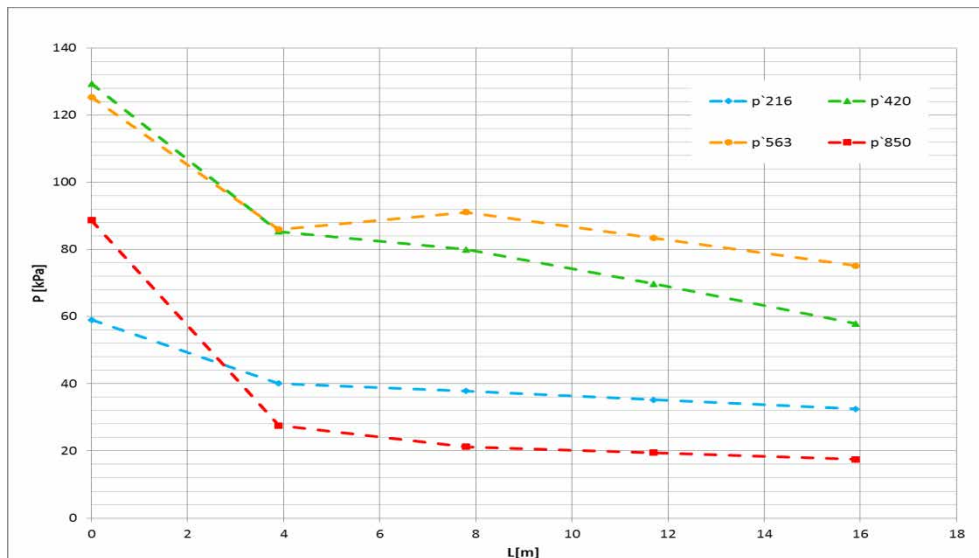
Слика 1. Мерне тачке на плочама у дну умирујућег базена за пројектно решење
 Figure 1. Measuring points on the bottom of the stilling basin, initial design



Слика 2. Промена средњих притисака дуж слапишта, пресек по средини слапишта, за различите протоке
 Figure 2. Average pressures along the center line of the stilling basin at tested discharges, initial design

Анализом вредности средњих притисака дуж слапишта (слика 2), у пресеку по средини слапишта (пресек представљен црном линијом на слици 1) закључује се да су притисци највећи на самом улазу у базен, док се после овог пресека вредност средњих притисака практично не мења, односно, због великих брзина не расту од узводног ка низводном делу слапишта [5]. Вредност средњих притисака у слапишту опада са порастом протока преко прелива, због повећања кинетичке енергије тока.

Вредности флукуација притисака дуж тока опадају (слика 3), док се са порастом протока повећавају. Међутим, за проток $Q = 850 \text{ m}^3/\text{s}$ флукуације су мање него за све разматране протоке.



Слика 3. Промена флукуација притисака дуж слапишта, пресек по средини слапишта, за различите протоке

Figure 3. Pressure fluctuations along the center line of the stilling basin at tested discharges

Промене средњих вредности притисака и флукуација на зидовима слапишта имају исти карактер као и на плочама.

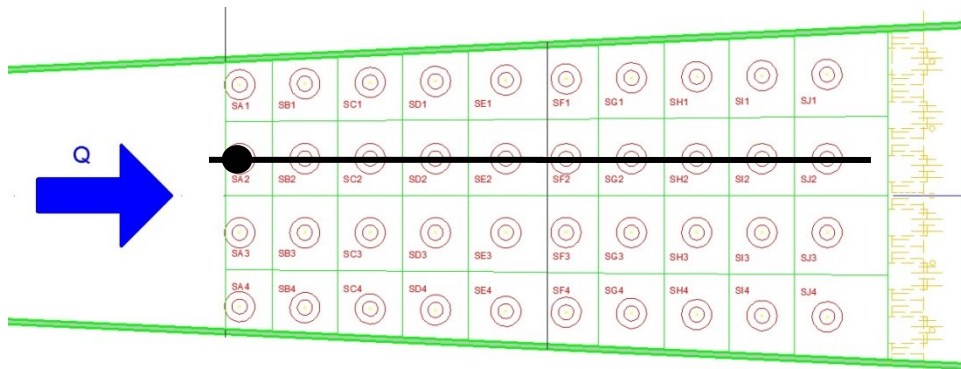
Хидрауличка моделска испитивања су показала да пројектовано решење умирујућег базена, не задовољава потребне и неопходне критеријуме сигурности објекта и захтева измене у циљу побољшања услова течења како у умирујућем базену тако и на излазу из њега, [4]. У циљу проналажења решења, које ће испунити све конструктивне и хидрауличке захтеве, урађене су модификације модела објекта на којима се кроз серије додатних мерења дошло до решења које обезбеђује ефикасно умирење млаза и излазне брзине које не угрожавају низводну деоницу, при читавом опсегу разматраних протока.

Усвојено решење је подразумевало одређене измене у геометрији: kota дна је спуштена за 2m (са 646,8 mm на 644,8 mm); уместо базена правоугаоног облика, усвојен је базен са променљивом ширином (на месту споја са брзотоком има ширину брзотока, 12 m, а затим се постепено шири до 20 m на крају); дужина брзотока је скраћена са 50 m на 44,2 m; узводни зуби су изостављени.

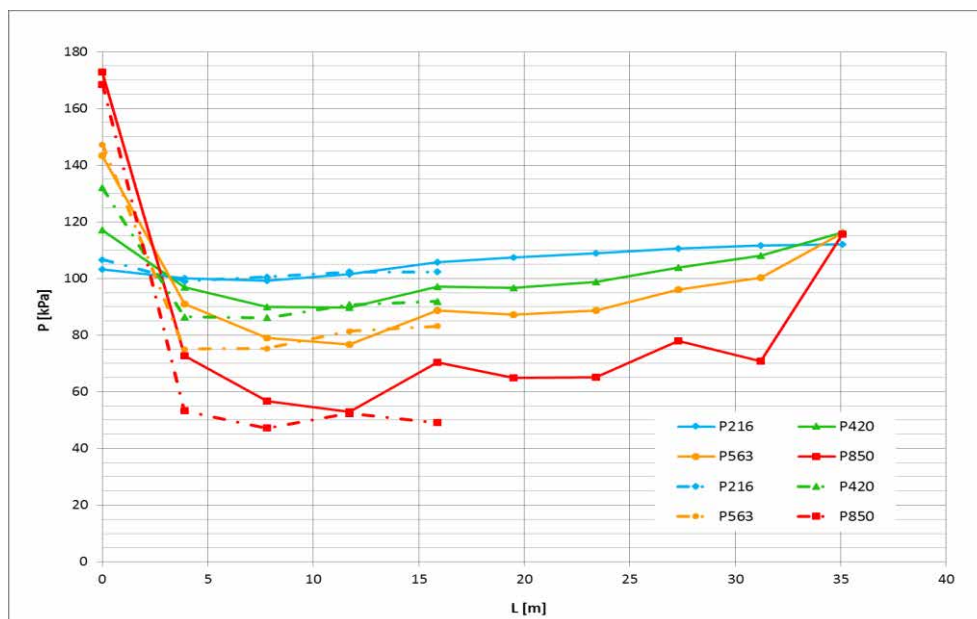
За усвојено решење урађена је још једна серија мерења хидродинамичких притисака. Положај мерних тачака у дну слапишта приказан је на слици 4.

За усвојено решење мерено је у већем броју тачака него за првобитно, па се могу упоредити само резултати у оном делу где се мерне тачке преклапају (почетак слапишта). Средњи притисци су приближних вредности за оба решења слапишта, за све разматране случајеве (слика 5).

Анализирани су добијени резултати у мерном месту непосредно иза брзотока (слика 4, црна тачка), у пресеку на средини.



Слика 4. Мерне тачке на плочама у дну умирујућег базена за усвојено решење
 Figure 4. Measuring points on the bottom of the stilling basin, proposed alternative

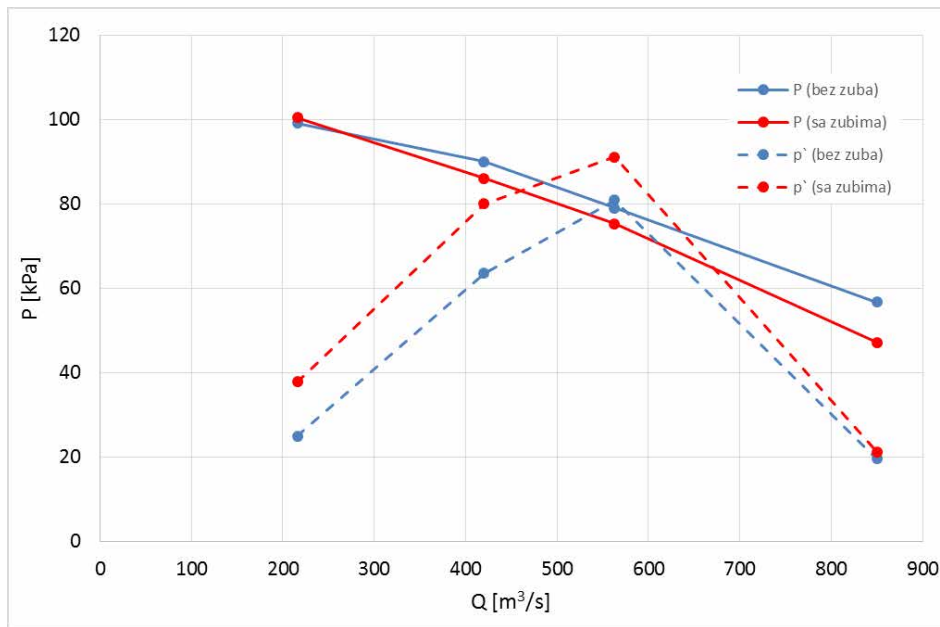


Слика 5. Промена средњих притисака дуж слапишта са (испрекидане линије) и без зуба (пуне линије), пресек по средини слапишта, за разне протоке
 Figure 5. Average pressures along the center line of the stilling basin, with chute blocks (dashed lines) and without chute blocks (solid lines), at tested discharges

За оба решења слапишта, средњи притисци на почетку слапишта опадају са порастом протока (слика 6). Флукуације притисака расту са повећањем протока преко прелива, с тим да се за проток $Q = 850 \text{ m}^3/\text{s}$ смањују, као што је већ уочено при испитивању првог решења умирујућег базена (слика 3). За решење слапишта са зубима флукуације притисака су нешто веће него у базену без зуба, док су средњи притисци приближно исти, па се може закључити да уклањање зуба не утиче много на притиске.

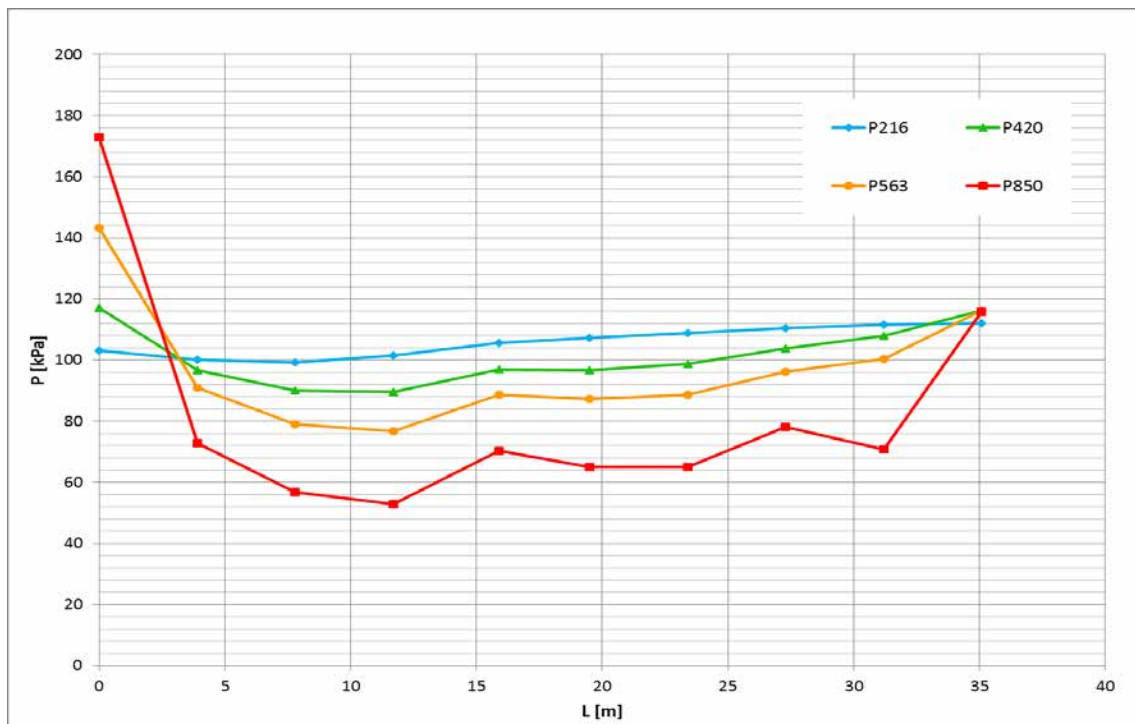
Ако се посматрају промене средњег притиска дуж слапишта (слика 7), уочава се да су притисци највећи на самом улазу у базен, након чега се нагло смањују, да би на даље, ка излазу благо расли, за све разматране протоке. Као и у првом решењу, са повећањем протока вредност средњих притисака се смањује.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 6. Промена средњих притисака (пуна линија) и флукуација (испрекидана линија), на мерном месту непосредно иза брзотока (тачка SB2), за случај са и без зуба, у зависности од протока.

Figure 6. Average pressures (solid line) and fluctuation (dashed line), measuring point immediately downstream from the chute (SB2), variants with and without chute blocks, at characteristic discharge rates

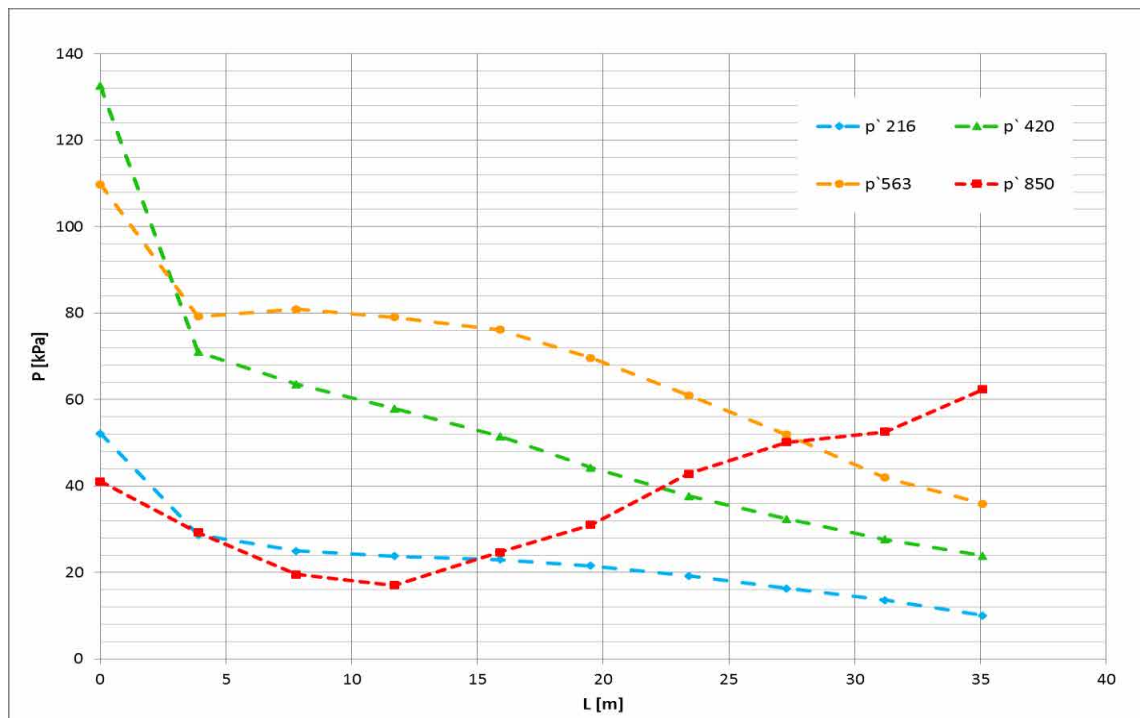


Слика 7. Промена средњих притисака дуж слапишта, пресек по средини слапишта, за различите протоке.

Figure 7. Average pressures along the center line of the stilling basin at tested discharges

Вредности флукуација притисака дуж тока опадају (слика 8), док се са порастом протока повећавају. За проток $Q = 850 \text{ m}^3/\text{s}$, као и у првом решењу, флукуације су мање него за све разматране протоке. Такође, за овај проток, флукуације расту у низводној половини слапишта, па се може закључити да при максималном могућем протоку у слапишту није могуће потпуно умирење преливеног тока, већ се део турбулентног млаза пропушта у низводно корито.

Средње вредности притисака највеће на улазу у слапиште (где млаз из брзотока пада у слапиште) и на излазу из слапишта (где се јављају највеће дубине). На улазу у слапиште се јављају највеће брзине, које дају виши ниво турбуленције, па су у овом делу и флукуације притисака највеће.



Слика 8. Промена флукуација притисака дуж слапишта, пресек по средини слапишта, за различите протоке

Figure 8. Pressure fluctuations along the center line of the stilling basin at tested discharges

6 Закључак

Моделска испитивања на физичком моделу бране Бени Слимане, мерењем и анализом различитих хидрауличких величина, омогућила су проверу пројектованог решења и дала смернице за усвајање коначног техничког решења.

На основу анализе хидродинамих притисака у умирујућем базену насуте бране Бени Слимане, изведени су следећи закључци:

- Промене средњих вредности притисака и флукуација на зидовима слапишта имају исти карактер као и на плочама.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Струјање у слапишту је просторно, што је последица ширења умирујућег базена.
- Средња вредност притисака опада са повећањем протока, због повећања брзине струјања.
- Вредности средњих притисака расту од узводног ка низводном крају слапишта.
- Вредности флукуација притисака се повећавају са порастом протока, осим за највећи испитани проток.
- Вредности флукуације притисака су највеће непосредно иза удара млаза, који излази из брзотока и смањују се низводно.

Захвалност

Аутори се захваљују Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, за финансијску подршку у оквиру пројеката технолошког развоја број ТР 37005, 37009, 37010 и 37014.

Литература

1. Хајдин, Г., *Прилози за процену флукуационог оптерећења на граничне површине флуидне струје – на основу измерених притисака у неколико тачака површине*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож, 1982.
2. Мушкатиновић, Ј., Јовић, С., *Анализа хидродинамичког оптерећења слапишта преливне бране*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож, 1982.
3. Савић, Љ., *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2009.
4. Старицац, Д., *Хидрауличка моделска испитивања бране Бени Слимане – Финални извештај*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2014.
5. Дамњановић М., Миловановић Б., Војт П., Капор Р., Кузмановић В., Савић Љ., *Утицај нивоа доње воде на хидродинамичке притиске у слапишту*, Међународна конференција, Савремена достигнућа у грађевинарству, Србија, Суботица, 24.-25. април 2014., Издавач: Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, ISSN 0352-6852, eISSN 2334-9573, str.132., 2014.
6. Starinac D., Kapor R., Savić Lj., Vojt P., Žugić D., Damnjanović M., Zindović B., Đajić P., (2014): *Air-Water Flow on a Labyrinth Spillway*, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, ISSN 2217-5237, Vol. 4, No. 3, pp. 11-20, 2014.
7. Starinac D., Vojt P., Žugić D., Damnjanović M., Žugić D., Kapor R., Savić Lj., Zindović B., Đajić P., (2015): *Scale Modeling of Beni Slimane Dam*, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, ISSN 2217-5237, Vol. 5, No. 1, pp. 9-22, 2015.

Анализа узгона на брану „Бајина башта“ на основу података осматрања

Јована Јосиповић¹
Бојан Миловановић²
Владан Кузмановић³
Љубодраг Савић⁴

АПСТРАКТ: У раду се анализира деловање узгона на брану "Бајина Башта" на основу резултата осматрања. Коришћено је више серија података осматрања за дужи временски период, како би се добила поуздана слика узгона у темељу објекта и оценила ефикасност примењених антифилтрационих мера.

Кључне речи: узгон, брана, мерења, пијезометар

Uplift analysis for the „Bajina bašta” dam based on observation data

ABSTRACT: The paper deals with uplift acting on „Bajina Bašta“ Dam, based on the observation data. Several long-time data series were analysed in order to obtain a reliable assessment of the uplift load at the dam foundation, and evaluate the efficiency of the applied measures.

Keywords: uplift, dam, measurement, piezometer

¹ Јована Јосиповић, дипл. инж. грађ., josipovicjovanabb@gmail.com

² Бојан Миловановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, bojanmil@mts.rs

³ Проф. др Владан Кузмановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, vladak@grf.bg.ac.rs

⁴ Проф. др Љубодраг Савић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, ljsavic@grf.bg.ac.rs

1 Увод

Хидроелектрана "Бајина Башта" (слика 1) највећи је хидроенергетски објекат на реци Дрини. Олакшана бетонска брана има висину од 90 m и дужину у круни 460 m. Акумулација „Перућац“, коју брана формира, дубине је око 60 m, има површину од 12,4 km² и запремину од 340.000.000 m³. Брана има 24 ламеле од којих пет преливних. Изграђена је од бетона МВ30. На брани је изведена инјекциона завеса, дубине 40 m и дренажни систем. На десној обали је машинска зграда са четири агрегата. Основне карактеристике ХЕ „Бајина Башта“ приказане су у табели 1.



Слика 1. Хидроелектрана "Бајина Башта"
Figure 1. Hydropower „Bajina Basta“

Табела 1. Основне карактеристике ХЕ "Бајина Башта"
Table 1. Basic characteristics of HP "Bajina Basta"

Средњи протицај	352,0	m ³ /s
Инсталисани протицај (кроз турбине)	644,0	m ³ /s
Кота нормалног успора	290	mnm
Кота максималног успора	291	mnm
Инсталисана снага	368	MW
Просечна годишња производња енергије	1,500	GWh

2 Осматрања на објекту

2.1 Осматрања олакшаних бетонских брана

Под осматрањем брана подразумева се скуп операција које имају за циљ мерење физичких величина неопходних да се у посматраном тренутку одреди стање објекта. За бетонске олакшане бране, у које спада и "Бајина Башта", од посебног значаја је утврдити следеће:

- узгон у темељној спојници,
- ротације појединих делова пресека у телу објекта,
- температуре бетона како за време грађења, тако и касније у експлоатацији,
- стање радазелница,
- притисак у појединим тачкама темељне спојнице,
- апсолутна померања објекта дуж темељне спојнице,
- локалне дилатације у унутрашњости и на површини објекта.

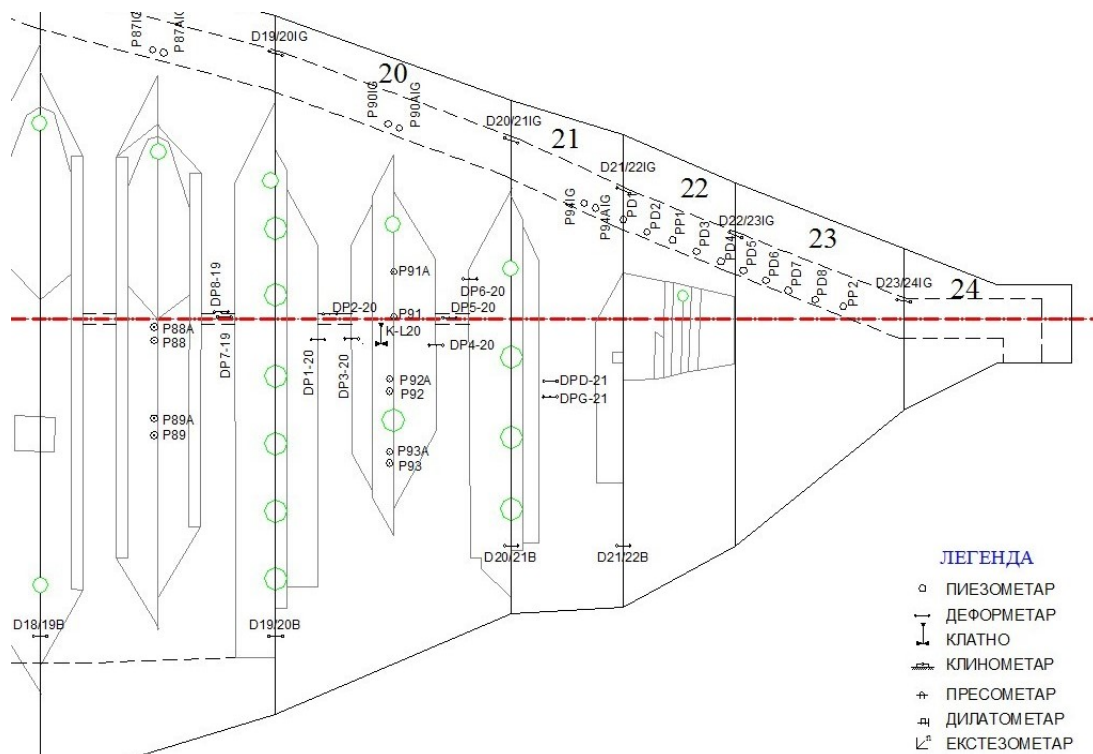
Код избора метода и инструмената за осматрање брана морају се имати у виду следећи критеријуми:

- поузданост,
- усакађеност са мереним величинама,
- рационалност,
- оптималан број инструмената,
- могућност мерења у кратком временском интервалу,
- једноставна обрада резултата.

Важно је да осматрања пруже поуздану слику о стању објекта.

2.2 Осматрања на брани "Бајина Башта"

Брана "Бајина Башта" спада у високе бране, па се њено осматрање врши периодично и ванредно, у складу са одговарајућом законском регулативом. На брани су заступљена сва три типа осматрања: визуелна, геодетска и инструментална.



Слика 2. Положај мерних инструмената на брани "Бајина Башта"

Figure 2. The position of the instruments on „Bajina Bašta“ Dam

За инструментална осматрања се користе:

- пијезометри,
- деформетри,
- нормални висак (клатно),
- клинометри,
- пресометри,
- дилатометри,
- екстензометри (розете),
- изоловани екстензометри,
- арматурни екстензометри.

Распоред мерних инструмената на брани уз леву обалу приказан је на слици 2.

2.3 Одређивање узгона у темељној спојници

Познавање стања узгона у темељној спојници неопходно је за сагледавање стабилности осматраног објекта. До њега се може поуздано доћи мерењем пијезометарских кота дуж пута филтрације испод објекта, што се најлакше постиже читавањем одговарајућих пијезометара (ако постоје).

На брани "Бајина Башта" постоје 182 пијезометра, који су распоређени по један, или у пару, на укупно 124 мерна места. Осим на самој брани, пијезометри су распоређени и по обалама и на пратећим објектима. Подела пијезометара према положају приказана је табели 2, а подела мерних места по положају у табели 3.

Табела 2. Подела пијезометара по положају
Table 2. Classification of piezometer positions

Положаји пијезометара		број	Удео (%)
1	у телу бране	93	51
2	у галерији	62	34
3	на екрану	8	4
4	у тунелу	8	4
5	на обалама	11	7
УКУПНО:		182	100

Табела 3. Подела мерних места по положају
Table 3. Classification of measuring-point positions

Положаји мерних места		број	Удео (%)
1	у телу бране	63	51
2	у галерији	38	31
3	на екрану	4	3
4	у тунелу	8	6
5	на обалама	11	9
УКУПНО:		124	100

Табела 4. Подела пијезометара по функционалности
 Table 4. Classification of piezometers based on functionality

Рад пијезометара		број	Удео (%)
1	очитава се и поуздан је	70	39
2	очитава се, али је непоуздан	25	14
3	само се повремено очитава	11	6
4	не очитава се	57	31
5	ван функције	19	10
УКУПНО:		182	100

Мерна места су изабрана тако да пруже поуздану слику узгона дуж 8 профила. Прегледом мерених вредности утврђено је да не постоје очитавања на свим пијезометрима. Неки пијезометри нису доступни, или су поломљени, па су ван функције. Други пијезометри се само повремено очитавају, што због залеђености, што због урастања у вегетацију, а што због неутврђених разлога. Постоје и пијезометри који се очитавају, али дају непоуздане податке: увек показују исто, дају веома различите вредности (иако се налазе на истом мерном месту), или су стално "суви". Стање функционалности пијезометара на брани "Бајина Башта" приказано је у табели 4.

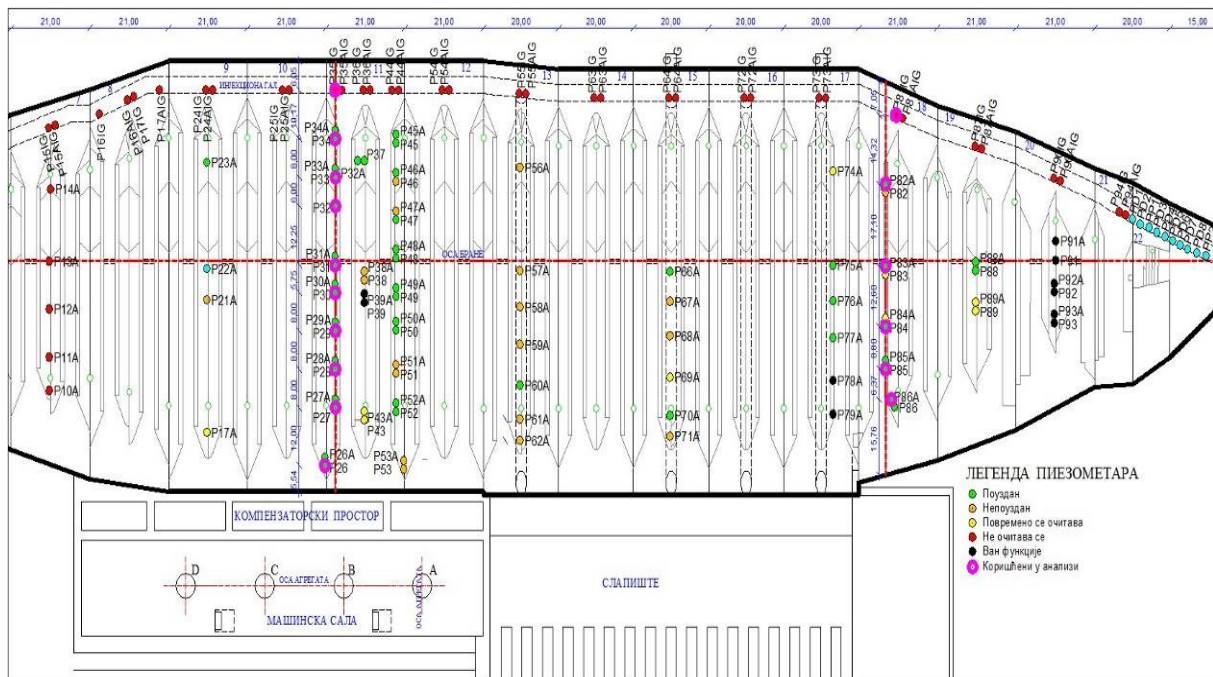
Због великог броја пијезометара са којих нема поузданих податка, многа мерна места остају необрађена па не могу послужити за утврђивање стања узгона. Доступност података са предвиђених мерних места приказана је на слици 3. Такође, постоји један број пијезометара који се не очитава, без навођења разлога. У извештајима нема података читања са пијезометара из инјекционе галерије, док на делу објекта према десној обали постоје подаци за 6 мерних места. Имајући у виду положај овог профила и велики број пијезометара у ламели 11, то је сасвим довољно за поуздано праћење узгона у зони машинске зграде и у ламелама близу десне обале.



Слика 3. Доступност података са предвиђених мерних места
 Figure 3. The availability of data from predicted measurement positions

3 Анализа узгона

Сагледавањем података очитаних на пијезометрима у периоду од јануара 2004. до децембра 2013. године (укупно 120 месечних очитавања), утврђено је да се стање узгона релативно поуздано може утврдити на 2 од предвиђених 8 профила (слика 4).



Слика 4. Функционалност пијезометара на мерним профилима
Figure 4. Functionality of piezometers along measuring profiles

Највећи проблем био је недостатак читавања пијезометара у инјекционој галерији, па су њихове вредности добијене екстраполацијом измерених података са два најближа пијезометра.

Према измереним вредностима на низводним пијезометрима може се закључити да на тело бране не делује пун потисак услед доње воде, што је вероватно последица антифилтрационих мера низводно од бране. Због тога је уместо коте доње воде у прорачуну потиска коришћена екстраполована кота, добијена на основу измерених података са два најнизовнија пијезометра.

Како су учињене претпоставке веома грубе, добијене вредности узгона могу користити пре свега за квалитативну анализу.

Очитане вредности на пијезометрима узете су као коте воде која хидростатички делује на брану у темељној спојници. На основу њих и вредности срачунатих екстраполацијом, као и на основу познате геометрије бране, нумеричким интегралњем добија се процена величине узгона у посматраним профилима.

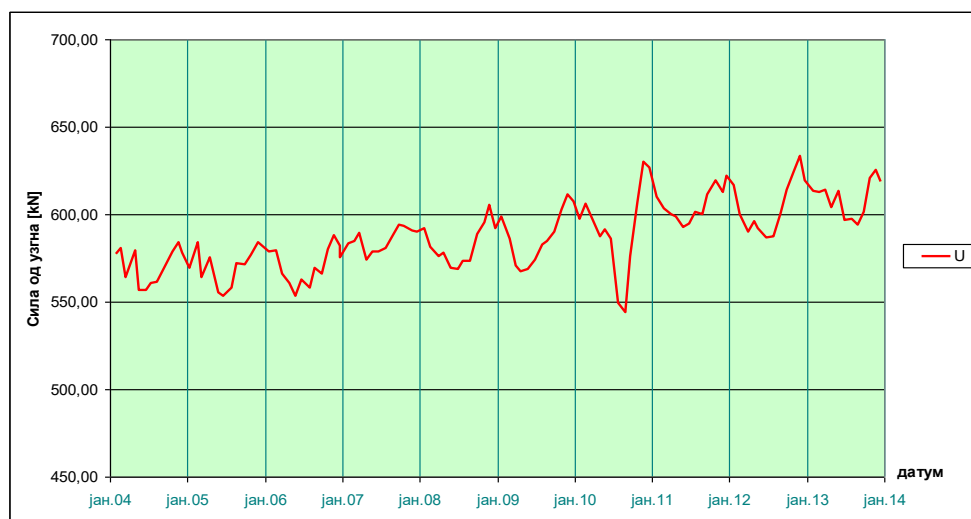
Анализирани профили налазе се у ламелама 11 и 18. Дијаграм оптерећења од узгона за профил у ламели 11 одређен је читањима на 9 пијезометара, уз екстраполацију оптерећења у галерији и на низводној ивици и са претпоставком да се на узводној ивици јавља хидростатички притисак горње воде (кота воде у акумулацији). За профил у ламели 18 на располагању су била 5 читавања на пијезометрима и важе исте претпоставке као и за профил у ламели 11.

Вредности узгона у профилима су срачунате за сваки месец посебно, а затим је одређена средња годишња вредност узгона, издвојене су максималне и минималне измерене вредности за сваку годину и одређена средња вредност узгона за читав интервал мерења.

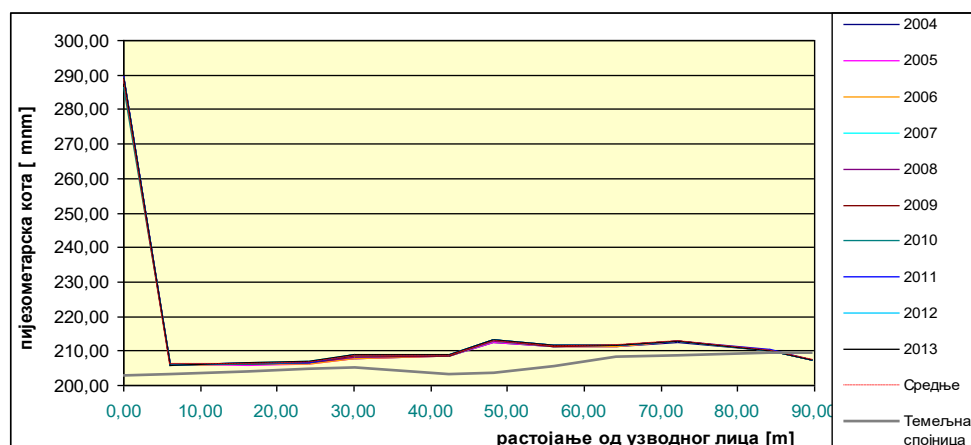
3.1 Анализа узгона за профил у ламели 11

На слици 5 приказана је промена мерених вредности узгона за профил у ламели 11, током разматраног периода. Може се приметити да на узгон има тренд благог пораста од 2006 године. Ипак његова вредност је вишеструко мања од 2250 kN, колико би се у профилу очекивало по критеријумима USBR-а при истим условима, што указује на изузетну ефикасност постојећих антифилтрационих мера.

С обзиром да је укупна варијација процењених вредности узгона током мерног периода око 15 % у односу на његову средњу вредност, може се закључити да је филтрација у профилу стабилна. Ово се јасно уочава са дијаграма средњих годишњих вредности узгона за профил у ламели 11 (слика 6).



Слика 5. Промена узгона за профил у ламели 11 током периода мерења
 Figure 5. Uplift changes along profile 11 during the measurement period

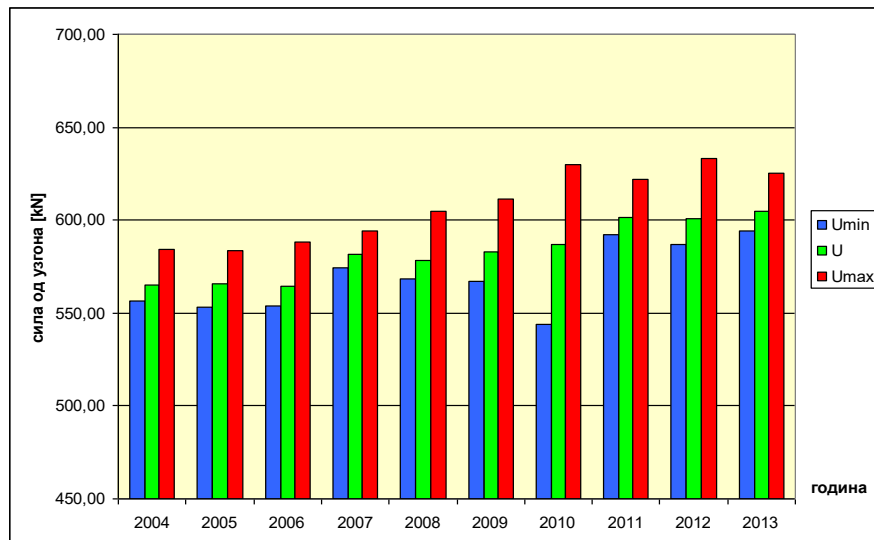


Слика 6. Дијаграми средњих годишњих узгона за профил у ламели 11
 Figure 6. Average annual uplift profile at block 11

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Анализом минималних и максималних узгона на годишњем нивоу може се закључити да они не коинцидирају са минималним и максималним котама воде у акумулацији, осим за 2010. годину, када су варијације горње воде биле екстремне.

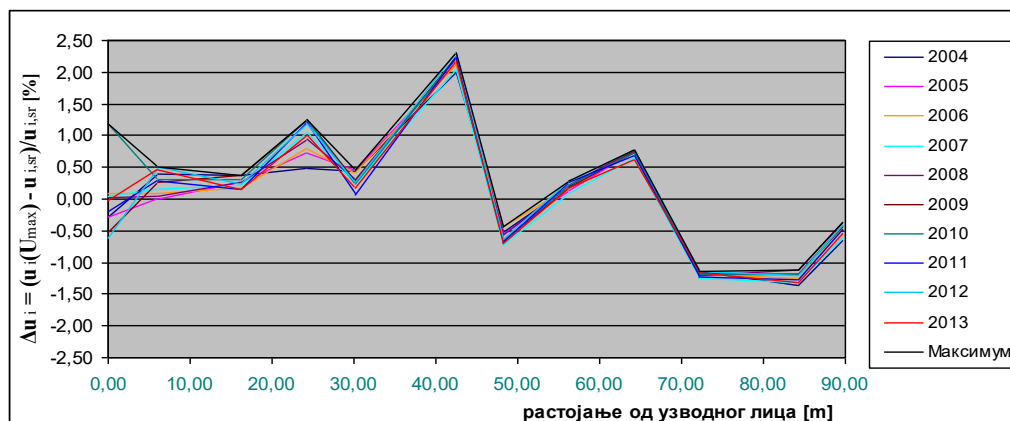
Дијаграм минималних, средњих и максималних годишњих вредности узгона, добијених на основу читања са пијезометара приказан је на слици 7.



Слика 7. Дијаграм минималних, средњих и максималних годишњих узгона за профил у ламели 11

Figure 7. Minimum, averaged and maximum annual uplift profile in block 11

Ради комплетнијег сагледавања слике узгона, најпре је одређена разлика нивоа у пијезометрима при максималном узгону, $u_i(U_{max})$, и средње вредности нивоа у пијезометрима, $u_{i,sr}$. Затим је ова разлика подељена са средњом вредношћу нивоа и добијен количник Δu_i . Са слике 8 се може приметити да Δu_i расте у узводним и средишњим пијезометрима, док у низводним углавном опада.

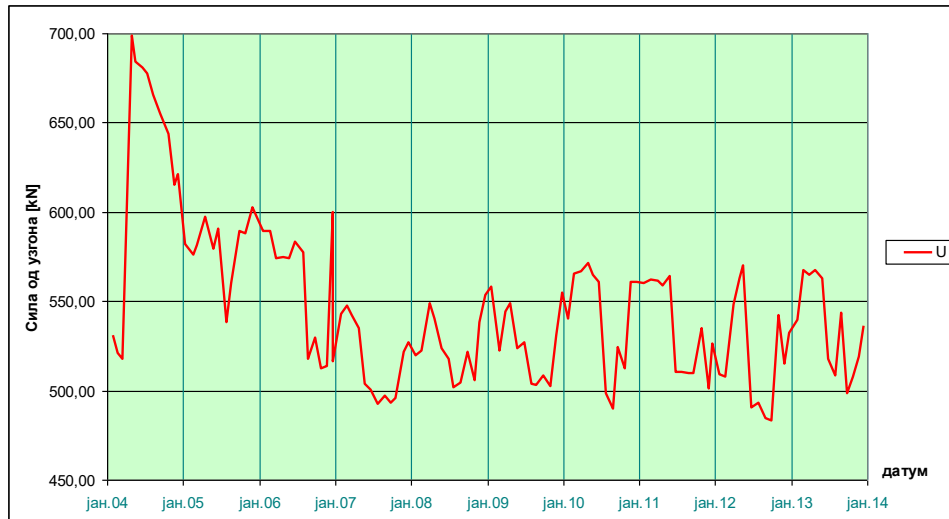


Слика 8. Дијаграм Δu_i за профил у ламели 11

Figure 8. Difference at piezometers at maximum uplift and the mean values for the profile 11

3.2 Анализа узгона за профил у ламели 18

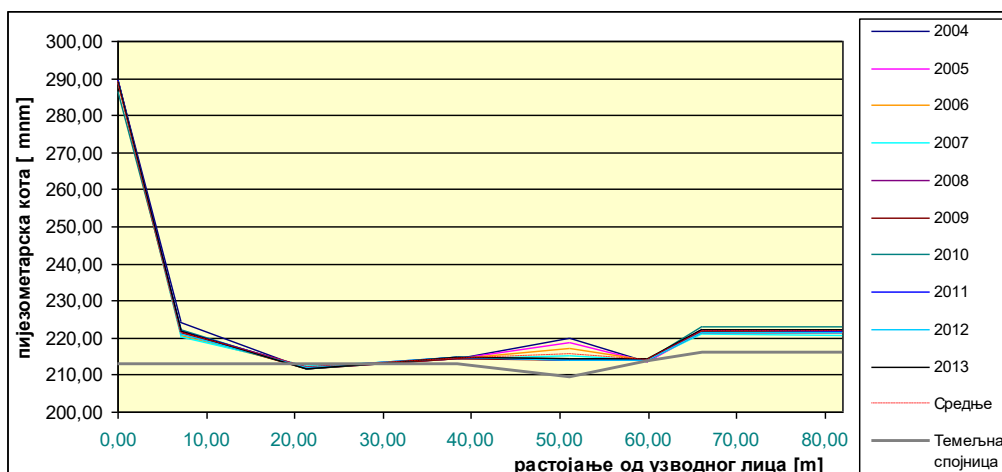
Слично узгону за профил у ламели 11, у ламели 18 филтрација је такође устаљена и узгон варира мање од 10 % (осим на почетку мерног периода), слика 9.



Слика 9. Промена узгона за профил у ламели 18 током периода мерења
 Figure 9. Changes in lift profile in block during the measurement period

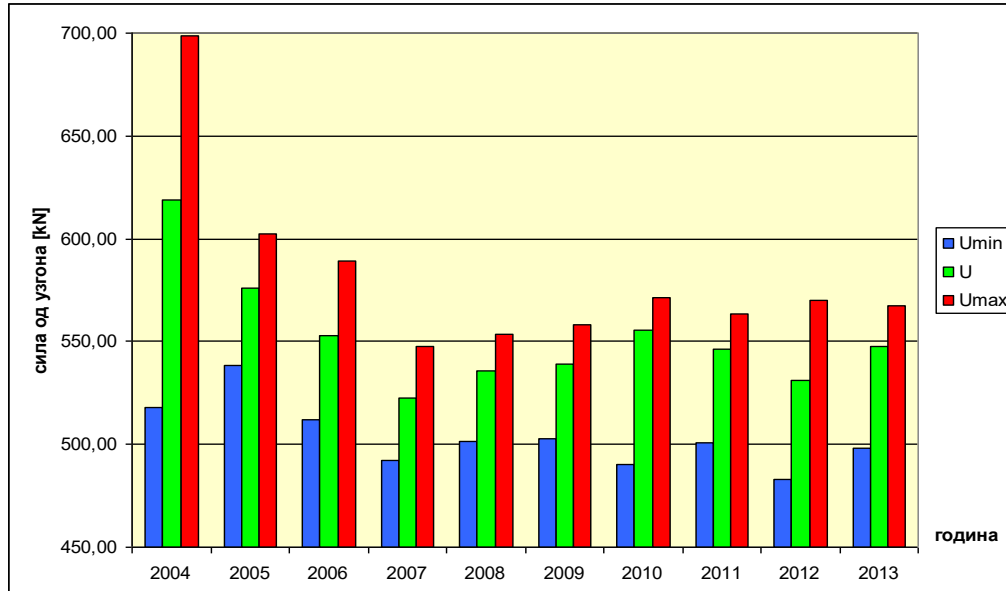
И у овом профилу вредност узгона је вишеструко мања од 1900 kN, колико би се у профилу очекивало по критеријумима USBR-а при истим условима. Нагли скок узгона почетком 2004. године вероватно је узрок интервенције у циљу поправке антифилтрационих мера, што је затим довело до смањења и стабилизације узгона.

Дијаграм средњих годишњих узгона више варира него за профил у ламели 11, посебно у централном делу (слика 10).



Слика 10. Дијаграми средњих годишњих узгона за профил у ламели 18
 Figure 10. Average annual uplift profile at block 18

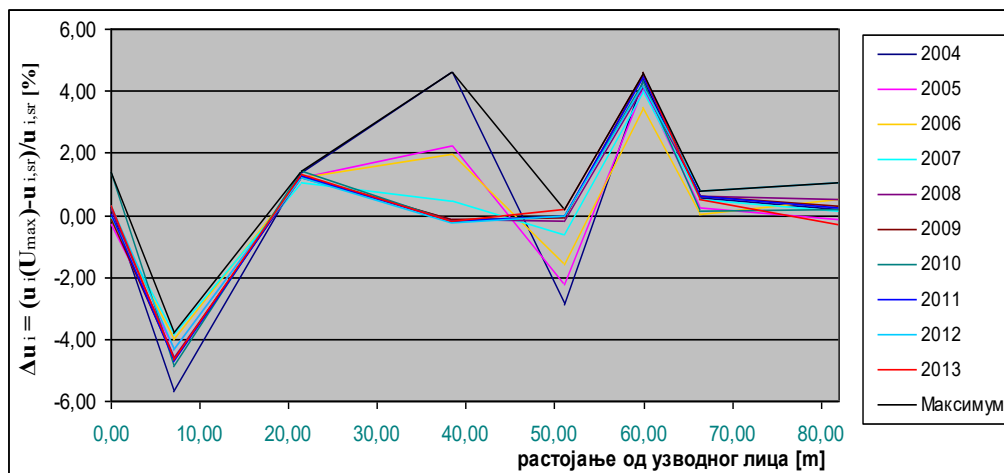
Разлике максималних и минималних вредности узгона за профил у ламели 18 сличне су као и у ламели 11 (слика 11), али зато знатно боље коинцидирају са максималним и минималним котама воде у акумулацији.



Слика 11. Дијаграм минималних, средњих и максималних узгона током године за профил у ламели 18

Figure 11. Minimum, averaged and maximum annual uplift profile in block 18

Разлике нивоа у пијезометрима при максималном узгону, $u_i(U_{max})$, и средњих вредности нивоа у пијезометрима, $u_{i,sr}$, код ламеле 18, приказана је на слици 12. Овде се не може сагледати генерални тренд промене Δu_i при максималном узгону.



Слика 12. Дијаграм Δu_i за профил у ламели 11 за профил у ламели 18

Figure 12. Difference at piezometers at maximum uplift and the mean values for the profile in block 18

4 Закључци

Анализирани су резултати осматрања нивоа у пијезометрима и деловање узгона на брану "Бајина Башта". Обухваћен је период од 2004. до 2013. године, на основу кога је добијена поуздана слика узгона у темељу објекта.

Закључено је да примењене антифилтрационе мере веома ефикасно снижавају пијезометарску линију дуж темељне спојнице. Сила узгона је вишеструко мања него што је предвиђено критеријумима USBR-а за одговарајуће коте нивоа горње и доње воде. Филтрација и вредности узгона су стабилни током времена.

На основу анализе великог броја пијезометара у профилу у ламели 11 следи да постоји тренд благог прираштаја узгона и нема коинциденције екстремних узгона и екстремних нивоа горње воде. У профилу у ламели 18 нема прираштаја узгона током времена и постоји коинциденција екстремних узгона и екстремних нивоа горње воде.

Из свега наведеног следи да мрежа пијезометара на брани "Бајина Башта" и после 50 година омогућава ефикасно праћење вредности изгона, али је и убудуће потребна редовна и брижљива анализа свих резултата мерења.

Литература

1. Verčon M., (1971), *Dams in Yugoslavia*, Yugoslav Committee on Large Dams, Dubrovnik.
2. Петровић П., (1997), *Хидротехничке конструкције*, Универзитет у Београду Грађевински факултет, Београд.
3. Миловановић Б. (2008), *Осматрање високих брана*, Семинарски рад, Београд
4. Савић Љ., (2009), *Увод у Хидротехничке грађевине*, Универзитет у Београду Грађевински факултет, Београд.
5. Резултати осматрања нивоа у пијезометрима на брани „Бајина Башта“ у периоду од 2004. до 2013. године

Приказ садржаја научног пројекта МПНТР ТР 37005 „Оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије“

Стеван Прохаска¹

АПСТРАКТ: У овом раду даје се кратак приказ предмета, садржаја и циљева истраживања научно-истраживачког пројекта који у основи финансира Министарство за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије. Предмет истраживања је оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије са аспекта очекиваних климатских промена сагласно сценаријима А1Б и А2. Пројекат је мултидисциплинаран јер обухвата теоријска и експериментална истраживања у области површинских и подземних вода, бујичних и ерозионих процеса, поплава и суша, као и анализу утицаја климатских промена на пољопривредну производњу ради израде смерница за побољшање и постизање бољих ефеката у тим условима. Део истраживања посвећен је оптимизацији коришћења водних ресурса, као и развоју савремене технологије и опреме с циљем ефикаснијег коришћења расположивог водног потенцијала у условима климатских промена.

Кључне речи: климатске промене, водни ресурси, површинске воде, научни пројекат, „нулто“ стање, поплаве, суше

Content overview of the MEST research project TR 37005 “Assessment of the climate change impacts on Serbian water resources”

ABSTRACT: This paper provides a short overview of the subject, contents and research objectives of the science project which is basically funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia. The subject of that research is the assessment of climate change impacts on water resources of Serbia in terms of expected climate changes according to scenarios A1B and A2. The project is multidisciplinary as it includes theoretical and experimental research in the field of surface waters and underground waters, torrentials and erosion, floods and droughts, as well as the analysis of the climate change impact on agricultural production in order to develop guidelines to improve and achieve better effects in those conditions. One part of the research is dedicated to optimization of the use of water resources, as well as to the development of modern technology and equipment with the aim of more efficient use of available water resources in terms of climate change.

Keywords: climate changes, water resources, surface waters, science project, "zero" status, floods, droughts

¹ Проф. др, дипл. грађ. инж, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Stevan.Prohaska@jcerni.co.rs

1 Уводне напомене

Основна преокупација овог приказа је упознавање шире стручно-научне јавности о концепцији рада, садржају и резултатима истраживања потенцијалног утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије. У вези с тим, Министарство за просвету, науку и технолошки развој је у оквиру реализације Програма истраживања у области технолошког развоја за период 2011–2015. године уговорило израду Пројекта ТР 37005 „Оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије“.

Координатор пројекта је: Институт за водопривреду „Јарослав Черни“. Организације учесници су:

- Институт за водопривреду „Јарослав Черни“
- Грађевински факултет у Београду
- Пољопривредни факултет у Београду
- Рударско-геолошки факултет у Београду и
- Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу.

Руководилац пројекта је проф. др Стеван Прохаска, дипл. грађ. инж.

На реализацији пројекта учествује око 50 истраживача из земље и иностранства. Корисници истраживања су Министарство за пољопривреду, шумарство и водопривреду, као и ЈП „Електропривреда Србије“.

Предвиђено је да се реализација пројекта ради по фазама и активностима. Основна идеја овог пројекта је сагледавање водних ресурса Србије у условима очекиваних климатских промена у наредном периоду до краја XXI века. За дефинисање „нултог“ стања водних ресурса (површинских и подземних вода) у Србији коришћени су официјелни подаци хидрометеоролошке службе, сведени на јединствен период обраде 1946–2006. године. За идентификацију временских закономерности у структури хидрометеоролошких појава неопходних за сагледавање будућих промена, коришћене су савремене методе применом теорије стохастичких процеса. Посебна пажња посвећена је утицају климатских промена на очекивано повећање учесталости и обима екстремних хидролошких ситуација (поплава и суша), анализи повећања њихове учесталости и трајања кишних и сушних периода. Заштити од поплава, идентификацији могућих мера прилагођавања и управљању поплавама, као и предлогу мера за управљање ризиком од поплава, затим подизању свести и едукацији у условима климатских промена, посвећена је посебна пажња у овом пројекту. Осим наведеног, посебно се теоријски и експериментално анализирају утицаји климатских промена на пољопривредну производњу и ради се на изради смерница за побољшање и постизање бољих ефеката у тим условима. Део истраживања посвећен је оптимизацији коришћења водних ресурса, као и развоју савремене технологије и опреме ради бољег коришћења расположивог водног ресурса.

2 Кратак приказ предмета, садржаја и циљева истраживања

Предмет истраживања предметног пројекта је оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије на основу сагледавања климатских промена према различитим будућим климатским сценаријима. Основа за ова истраживања су резултати оцене утицаја климатских промена на метеоролошке променљиве које су релевантне за хидролошки циклус отицаја, а који ће се добити у оквиру подпројекта 1 „Моделирање регио-

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

налних климатских промена“ Пројекта III 43 007 „Истраживање климатских промена и њиховог утицаја на животну средину – праћење утицаја, адаптација и ублажавање“. Конкретна веза између ова два пројекта остварује се преко подпројекта 8 „Водни ресурси Србије у условима климатских промена“ III Пројекта 43 007 и подпројекта 1 „Анализа климатских промена основних метеоролошких параметара хидролошког циклуса у Србији са гледишта најновијих истраживања код нас и у свету“ пројекта TP 37005. У конкретном случају, сва истраживања могућих утицаја климатских промена на основне параметре хидролошког циклуса разматрају се у оквиру подпројекта 1 III Пројекта. Те резултате преузима пројекат TP 37005 и врши даљу анализу и оцену могућих утицаја на водне ресурсе и све даље последице које су предмет истраживања осталих фаза и активности у оквиру пројекта TP 37005.

Садржај истраживања обухвата, осим наведеног, преузимања резултата из пројекта III 43007 што се тиче анализе могућих климатских промена по различитим сценаријима промене климе и анализу садашњег стања водних ресурса површинских и подземних вода на територији Србије. Осим тога, детаљно сагледавање основних карактеристика режима вода је предмет истраживања у овом пројекту, како са гледишта процене постојећег „нултог“ стања, тако и са аспекта евентуалних утицаја климатских промена које се очекују. Развој модела за квантитативну идентификацију структуре хидрометеоролошких појава с циљем анализе цикличности и периодичности са издвајањем детерминистичких и стохастичких компоненти и квантификација трендова, скокова и периодично-цикличних компоненти у третираним временским серијама су, такође, садржај овога пројекта. Предмет истраживања су и анализа трендова учесталости појава суша и поплава, квантификација екстремних хидролошких ситуација у условима климатских промена, као и дефинисање вероватноће коинциденције поплава и суша у краћим временским периодима. У садржај истраживања спадају, такође, и: развој методологија и израда софтвера за оцену утицаја климатских промена на водне ресурсе површинских и подземних вода и дефинисање конкретних утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије за различите временске пресеке у будућности. Заштита од поплава с циљем одрживог управљања поплавама у сливовима Дунава, Саве и Тисе, као и бујичним поплавама, у условима климатских промена, са подизањем свести и едукацијом становништва и стручњака су, такође, предмети студирања у оквиру овог пројекта. Пољопривредним сушама посвећена је већа пажња, посебно са аспекта утицаја на компоненте вертикалног биланса и њихове просторне дистрибуције у условима климатских промена. Успостављена су одређена експериментална истраживања утицаја климатских промена на квалитет и квантитет биљне производње, посебно са аспекта израде смерница за побољшање и постизање бољег ефекта биљне производње у условима климатских промена. Стимулација биљне производње применом различитих сценарија промене климе такође је предмет истраживања овог пројекта, а посебна пажња посвећена је развоју савремене технике и опреме ради бољег коришћења расположивих водних ресурса и развоју математичких модела за оптимизацију водних ресурса у пољопривредној производњи.

Циљ истраживања је сагледавање утицаја и израда смерница за рационалније коришћење водних ресурса (површинских и подземних вода) у новонасталим условима климатских промена. Посебна пажња се посвећује сагледавању „нултог“ стања у билансу и режиму површинских и подземних вода и откривању њихових унутарвременских структура са гледишта дефинисања природе цикличног смењивања сушних и влажних година. Један од циљева јесте стварање стратегије одрживог развоја у условима попла-

ва великих река и бујица у садашњем стању, као и у условима климатских промена које се очекују на нашем подручју. Подизање свести и едукација стручњака и становништва у тим условима је посебно апострофирана кроз овај пројекат. Са гледишта пољопривреде, посебан циљ је остваривање бољег коришћења расположивих водних ресурса и постизање задовољавајуће биљне производње у условима климатских промена. С тим циљем, посебна пажња је посвећена развоју нове савремене технике и опреме и успостављена су одговарајућа експериментална истраживања.

3 Опис структуре пројекта

Реализација овако сложеног пројекта подељена је у 14 основних фаза истраживања, и то:

- **Фаза 1.** Анализа климатских промена основних метеоролошких параметара хидролошког циклуса у Србији у XXI веку са гледишта најновијих истраживања код нас и у свету.
- **Фаза 2.** Дефинисање постојећег („нултог“) стања режима површинских вода са аспекта оцене потенцијалног утицаја климатских промена.
- **Фаза 3.** Дефинисање постојећег („нултог“) стања режима подземних вода са аспекта оцене потенцијалног утицаја климатских промена: а) алувијон; б) карст.
- **Фаза 4.** Стохастичко-пробабилистичка анализа расположивих дугогодишњих временских серија релевантних хидрометеоролошких појава у Србији.
- **Фаза 5.** Анализа трендова учесталости појава суша и поплава у условима климатских промена.
- **Фаза 6.** Развој методологије за оцену утицаја климатских промена на режим површинских вода.
- **Фаза 7.** Развој методологије за оцену утицаја климатских промена на режим подземних вода.
- **Фаза 8.** Дефинисање утицаја климатских промена на режим површинских вода на територији Србије.
- **Фаза 9.** Анализа утицаја климатских промена на режим подземних вода на територији Србије.
- **Фаза 10.** Анализа утицаја климатских промена на бујичне поплаве.
- **Фаза 11.** Заштита од поплава: одрживо управљање, подизање свести и едукација у условима климатских промена.
- **Фаза 12.** Оцена утицаја климатских промена на појаву суша и дужину сушних периода на територији Србије у 21 веку.
- **Фаза 13.** Сагледавање утицаја климатских промена на пољопривредну производњу и израда смерница за побољшање и постизање бољег ефекта у тим условима.
- **Фаза 14.** Развој модела за оптимизацију коришћења водних ресурса у пољопривредној производњи у новим условима и развој савремене технике и опреме ради бољег коришћења расположивих ресурса.

Пројекат ТР 37005 „Оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије“ у основи обухвата сагледавање утицаја климатских промена према различитим будућим климатским сценаријима, који се детаљно разматрају, анализирају и утврђују у

оквиру пројекта III 43007 „Истраживање климатских промена и њиховог утицаја на животну средину: праћење утицаја, адаптација и ублажавање“. Веза између та два пројекта остварује се преко подпројекта 8 „Водни ресурси Србије у условима климатских промена“ пројекта III 43007 и фазе 1 „Анализа климатских промена основних метеоролошких параметара хидролошког циклуса са гледишта најновијих истраживања код нас и у свету“ пројекта TP 37005. У конкретном случају, сва истраживања могућих климатских промена које могу имати реперкусија на основне параметре хидролошког циклуса разматрају се у подпројекту 1 „Регионални интегрисани геофизички модел и сценарији климатских промена на подручју Србије“ пројекта III 43007. Реперкусије тих могућих утицаја разматрају се у свим осталим фазама (од 2 до 14) у пројекту TP 37005.

4 Приказ досадашњих резултата пројекта само са аспекта површинских вода

Због обимности истраживања на овом пројекту основна преокупација овог приказа усмерена је само на аспект утицаја климатских промена на водне ресурсе. У конкретном случају, утицаји климатских промена на ресурсе површинских вода Србије анализирани су у следећим фазама овог пројекта: фаза 1, фаза 2, фаза 4, фаза 5, фаза 6 и фаза 8. Кратак приказ досадашњих резултата даје се у тексту који следи.

Фаза 1. Анализа климатских промена основних метеоролошких параметара хидролошког циклуса у Србији у XXI веку са гледишта најновијих истраживања

На територији Републике Србије дефинисане су карактеристичне серије месечних сума падавина на 437 падавинских станица, док су месечне серије осталих метеоролошких података, као што су: средње месечне и екстремне месечне температуре ваздуха, средње месечне влажности ваздуха, затим средње месечни напон водене паре, дефинисане на 56 метеоролошких станица. Преузети су резултати глобалног модела SINTEX-G, према сценаријима климе A1B (умерени) и A2 (најекстремнији по предвиђеним гасовима), скенирани коришћењем регионалног модела уз помоћ повезаног атмосферско-океанског модела EBU-POM, за територију Републике Србије, осредњени по репрезентативним сливовима. На основу тих података формиране су датотеке дневних података следећих климатских елемената: суме дневних падавина, средње дневне температуре ваздуха и суме дневних евапотранспирација и то за периоде 1961–2100. Ове серије дневних података прилагођене су као улаз за примену модела VNC којим ће се извршити прелиминарна оцена утицаја будућих климатских промена на водне ресурсе на неколико одабраних репрезентативних сливова на територији Републике Србије.

Фаза 2. Дефинисање постојећег („нултог“) стања режима површинских вода са аспекта оцене потенцијалног утицаја климатских промена

Са гледишта дефинисања садашњег стања водних ресурса одређене су основне квантитативне карактеристике режима вода на свим хидролошким станицама, где су периоди расположивих података били дужи од 30 година, што представља укупно преко 143 хидролошке станице. На свим тим станицама дефинисане су серије дневних и средње месечних протицаја, као и основни показатељи режима вода – просечних,

малих и великих вода (поплава). На основу тих података урађене су ГИС карте за основне елементе биланса површинских вода: годишњих сума падавина, евапотранспирације и речног отицаја (специфичног отицаја). Као резултат те активности добијени су подаци о расположивим ресурсима површинских вода по основним билансним јединицама, по сливовима и водним подручјима дефинисаним законом о водама, као и по административним територијама Републике Србије. На тај начин у потпуности је дефинисано „нулто“ стање за сва наведена водна подручја у Србији.

Фаза 4. Стохастичко-пробабилистичка анализа расположивих дугогодишњих временских серија релевантних хидрометеоролошких појава у Србији, скокова и/или периодичности у разматраним вишегодишњим серијама

За потребе извршења ове фазе пројекта сачињене су следеће базе података: Реке света, Реке Европе, Реке Србије, Метеоролошке станице Европе, Метеоролошке станице Србије, База индексâ сунчеве радијације и атмосферске циркулације.

База **Реке света** садржи 3.372 хидролошке станице које се налазе на свим већим рекама у свету. Садржи податке о средње дневним, максималним и минималним годишњим протицајима, као и податке о месецима у којима су се појавили екстремни. Број хидролошких станица је подједнако распоређен по континентима и сразмеран је сливној површини, односно величини земље у којој се налази. Дужине низова су од 60 до 200 година. За подручје Европе направљена је база дневних протицаја у сливу Дунава и његових притока – **Реке Европе**. Осим средње дневних протицаја, база садржи и апсолутне минималне и максималне протицаје током године. У бази се налази укупно 99 хидролошких станица из 13 земаља, кроз десет протиче Дунав, док остале припадају Дунавском сливу. База **Реке Србије** садржи податке о средње дневним и екстремним годишњим протицајима на 143 хидролошке станице. У бази **Метеоролошке станице Европе** сакупљене су најдуже забележене серије са дневним вредностима. У конкретном случају, база садржи: средње температуре ваздуха од 1756. године, минималне температуре ваздуха од 1763. године, максималне температуре ваздуха од 1763. године, суме дневних падавина од 1797. године, атмосферски притисак од 1775. године, број сунчевих сати од 1775. године, висину снежног покривача од 1858. године, облачност од 1861. године, правац ветра од 1870. године, и брзину ветра од 1877. године.

Сви подаци у бази су на дневном нивоу. Укупан број низова у бази је 8.542, док је укупан број станица 3.971. База **Метеоролошке станице Србије** садржи дневне податке о сумама падавина на 437 кишомерних станица, средње дневне температуре ваздуха, напону водене паре и влажности ваздуха на 56 климатолошких станица, 26 станица са подацима дневних сума евапотранспирације, 28 станица са дневном инсолацијом и 27 станица са подацима о брзини и правцу ветра. У бази података **индексâ сунчеве радијације и атмосферске циркулације** налазе се серије годишњих вредности сунчеве радијације (Волфов број) и месечне серије од 1749. године. Такође, у бази се налазе месечни индекси атмосферске циркулације Вангенгејма – W, E i C од 1865. године и индекса Североатланске циркулације од 1865. године.

За потребе квантитативне оцене унутрашње структуре наведених хидрометеоролошких процеса развијене су посебне процедуре које се базирају на практичној примени корелационе и спектралне теорије случајних процеса. У основи, базни елементи за откривање унутрашње структуре наведених временских серија представљају резултати прорачуна следећих карактеристика случајних процеса: хомогености и независности

временских серија; утврђивање постојања линеарних и нелинеарних трендова у разматраним временским серијама; аутокорелационе и кроскорелационе функције; спектралне и кроспектралне функције; периодограм, дисперзиона и хармонијска анализа. Сврха ових анализа је да се идентификује хомогеност и независност чланова разматраних веома дугих хидрометеоролошких временских серија, да се разоткрије (не)постојање природних и антропогених трендова, као и евентуалних трендова изазваних као последица климатских промена. Корелациона и спектрална анализа треба, као и периодограм анализа, са резултатима анализе примене Фуријеових трансформација, да укаже на постојање природне цикличности у разматраним хидрометеоролошким серијама и да идентификује евентуално нарушавање истих, уз оцену могућих узрочника тих промена.

У фази пројекта за потребе анализе цикличности развијене су рачунске процедуре које се базирају на прорачуну спектралних функција, периодограм анализе и примене Фуријеових трансформација. У конкретном случају, дефинисани су поступци за прорачун дискретног и непрекидног спектра, као и за идентификацију статистички значајних синусних компоненти помоћу Фуријеових функција. Основни задатак је идентификација статистички значајних периодичних компоненти у свим разматраним хидрометеоролошким серијама. Тестирање значајности идентификованих периода извршено је помоћу теста Фишера.

Конкретни прорачуни с циљем идентификације цикличних компоненти извршени су за наведене серије средње годишњих протицаја река света са најдужим периодима осматрања. На основу срачунатих резултата може се закључити да постоји велика разноврсност у заступљености вредности периода цикличности компоненти у процесима формирања средње годишњих протицаја на разматраним светским рекама. Детаљнијом анализом дошло се до закључка да су доминантне све врсте вишегодишње цикличности, од микроцикличности реда величине периода цикличности до 10 година, преко мезоцикличности, чији се периоди цикличности крећу од 10 до 40 година, до макроцикличности са периодима цикличности преко 100 година. Претходним филтрирањем временских серија применом методе *Lowess* одстрањују се микроцикличности у серијама, а потенцирају се макро- и мезоцикличне компоненте.

Фаза 5. Анализа трендова учесталости појава суша у условима климатских промена

За потребе дефинисања учесталости суша и поплава у условима климатских промена направљена је датотека трајања суша и поплава са основним карактеристикама за већину профила водомерних станица на територији Републике Србије. Основна преокупација истраживања у овој фази пројекта била је развој нове методе за прорачун условних вероватноћа појаве екстремних хидролошких ситуација (катастрофалних поплава и суша) на природним водотоцима у Србији. Наиме, са водопривредног аспекта веома је значајно познавање вероватноће да ће се екстремне хидролошке ситуације, какве су катастрофалне поплаве и суше, појавити на истом локалитету у релативно краћем временском периоду. Суштина ове методе је да се на основу расположивих серија максималних и минималних годишњих протицаја дефинишу коинциденције појаве ових догађаја у истој календарској години, да се на истом корелационом пољу идентификују изузетни екстремни (*outliers* – горњи и доњи) и да се на основу њих и формираног димензионалног закона расподеле коинциденције поплава и суша одреде вероватноће превазилажења дефинисаних горњих и доњих екстрема. За идентификацију неведених изузетака коришћен је Пилот и Харвејов тест.

Разрађена методологија коришћена је за идентификацију екстремних хидролошких ситуација на целој територији Републике Србије. У конкретном случају идентификација појаве историјских поплава и суша извршена је на 143 профила водомерних станица. Као репрезент поплава коришћени су подаци о апсолутно максималним годишњим протоцима, а за суше апсолутно минимални годишњи протоци и минимални средњи 30-дневни протоци. Практичном применом Пилот и Харвејовог теста добијено је да су се до сада на територији Србије појавиле историјске поплаве на 14 профила водомерних станица са повратним периодом од 77 до 1.000 година. Са гледишта минималних годишњих протока регистровано је укупно 26 историјских суша са повратним периодом од 80 до 1.500 година, а са становишта минималних тридесетодневних протока укупно 20 историјских суша са сличним вредностима повратних периода. У разматраном периоду осматраних података само на две станице су се појавиле историјске поплаве и хидролошке суше. Најизразитији пример је река Рашка у профилу в.с. Рашка. У конкретном случају класични повратни периоди регистрованих историјских догађаја су: за поплаву 539 година, а за сушу 238 година. Међутим, срачуната вероватноћа да ће се та два историјска догађаја (историјска поплава из 1979. године и историјска суша из 1951. године) десити у истој календарској години мања је од 0,001, што одговара повратном периоду од 10.000 година.

Фаза 6. Развој методологије за оцену утицаја климатских промена на режим површинских вода

Учесници на пројекту су се определили да ће оцену утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије извршити помоћу следећих модела: детерминистичких модела MIKE SHE и MIKE BASIN, непараметарског KnnCAD, статистичко-корелационог модела VNC – модел вишеструке нелинеарне стандардизоване корелације, као регресионог модела LIN-REG. Модели MIKE SHE и MIKE BASIN, као и непараметарски KnnCAD модел погодни су за симулацију хидролошких вредности краћих периода дискретизације времена, па самим тим и за оцену будућих промена екстремних хидролошких вредности, што је неопходно за сагледавање будућих катастрофалних поплава и суша. Модели VNC и LIN-REG, напротив, раде са вредностима променљивих дужег периода дискретизације времена и служе за оцену будућих стања расположивих водних ресурса на одређеном простору и у одређеном времену.

Модел VNC је, у конкретном случају, прилагођен симулацији речног отицаја у условима познавања утицаја климатских промена на спољне узрочнике, као што су падавине, температура ваздуха, евапотранспирација. У суштини, модел VNC базира на успостављању линеарних корелационих зависности између стандардизованих променљивих, различитих комбинација узрочно-последичних веза и наведених хидрометеоролошких временских серија. У конкретном случају као зависно променљива узет је протицај у профилу водомерне станице на којој се жели проценити утицај климатских промена на водни режим дате реке. За независно променљиве величине узимају се познате вредности временских серија, за које је стање у условима климатских промена процењено кроз активност 5 прве фазе овог пројекта. Модел LIN-REG представља у суштини једначину линеарног тренда у постојећим хидролошким временским серијама и екстраполацији истог за дужи временски период у будућности.

Фаза 8. Дефинисање утицаја климатских промена на режим површинских вода на територији Србије

Ова фаза истраживања рађена је паралелно у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ и на Архитектонско-грађевинском факултету у Нишу. У основи свих прорачуна је модел VNC, с тим што су у обе институције извршене одређене надградње.

У институту „Јарослав Черни“ углавном се примењује оригинална варијанта са просторним усаглашавањем његових параметара. Одабрана су четири слива на којима је анализиран утицај климатских промена на свим наведеним режимским карактеристикама речног отицаја. Досадашњи постигнути резултати су прелиминарног карактера, а дефинитиван став о утицају климатских промена на режим вода на територији Републике Србије биће дат на крају истраживачког периода.

На Архитектонско-грађевинском факултету ради се на даљем усавршавању двопараметарског модела за оцену утицаја климатских промена на режим вода. Двопараметарски модел који се ослања на нелинеарну корелацију и представља, у суштини, модификацију модела VNC, примењен је за генерисање серија средње месечних протока на неизученим сливовима. Значај рада је у могућности преношења генерисаних серија протока у условима климатских промена у профилима хидролошких станица на неизучене профиле. Модел је једноставан јер има само два параметра, а од улазних података потребни су само протоци у профилима хидролошких станица у дужем временском периоду и геоморфолошке карактеристике сливова.

Истраживања која су обављена у оквиру режима малих вода на природним водотоковима индиректно се баве утицајем урбанизације на хидролошки циклус. Та истраживања вршена су у сарадњи са истраживачима на пројекту TR 36042 „Оптимизација архитектонског и урбанистичког планирања и пројектовања у функцији одрживог развоја Србије“. У оквиру њих се разматра улога, значај и корист примене концепта интегрисаног управљања атмосферским водама у урбаном ткиву, који су новина за планерску праксу у нашој земљи. Тежиште истраживања је на примени *WSUD (Water Sensitive Urban Design)* концепта у стамбеним подручјима. Кроз анализу могућих случајева, показује се да су најзначајније користи концепта спречавање и ублажавање последица климатских промена кроз побољшање микроклиме, поспешивање инфилтрације итд.

Резултати истраживања на овом пројекту презентовани су на неколико научних скупова у земљи и иностранству, затим су објављени у међународним и домаћим стручним часописима и коришћени су у изради бројних студија, експертиза и пројеката на којима су били ангажовани истраживачи на овом пројекту.

Захвалница

Представљена истраживања се спроводе за потребе научног пројекта TR 37005 „Оцена утицаја климатских промена на водне ресурсе Србије“, који је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у периоду 2011–2015. године.

Analiza uticaja klimatskih promena na režim oticanja u slivovima reka Toplice i Kolubare

Mihailo Anđelić¹
Marija Ivković²

ABSTRAKT: U okviru programa pomoći vlade Norveške Republici Srbiji, u Republičkom Hidrometeorološkom Zavodu Srbije (RHMZ) implementiran je niz projekata u oblasti hidrologije. Poslednji projekat u nizu, realizovan 2012. i 2013. godine, imao je, pored ostalog, za cilj izradu studije o mogućem uticaju klimatskih promena na hidrološki režim oticanja i vodne resurse na primeru pilot slivova reke Kolubare i Toplice. Projektovane klimatske promene predstavljene su vremenskim serijama dnevnih temperatura (T) i padavina (P) do 2100 godine, koje su generisane korišćenjem 6 kombinacija poznatih globalnih i regionalnih klimatskih modela. Za simulaciju režima oticanja u pilot slivovima, odabran je IHMS/HBV hidrološki model. U radu je dat opis kalibracije HBV modela i njegovog korišćenja za simulaciju uticaja projekovanih klimatskih promena T i P na režim oticanja u slivovima Kolubare i Toplice. Prikazani su glavni rezultati simulacija i ključne karakteristike režima oticanja u ova dva sliva krajem 21.veka, koje mogu nastati kao rezultat projektovanih promena klime.

Ključne reči: klimatske promene, temperatura, padavine, hidrološki procesi, oticanje, vodni bilans, HBV model, kalibracija, simulacija rečnog oticanja, suše i male vode, velike vode.

Effects of climate change on runoff regime in the Kolubara and Toplica catchments

ABSTRACT: Several projects in the field of hydrology have been implemented at the Republic Hydro-meteorological Service of Serbia within the framework of the Norwegian support to the Republic of Serbia. The last project in the series, implemented in 2012 & 2013, had inter alia carried out a case study of climate change impact on hydrological regime in the two pilot catchments of the Kolubara and Toplica rivers. Climate change projections were represented by daily temperatures (T) and precipitation (P) time series until the year 2100, and have been generated by using 6 different combinations of global and regional climate models. Based on the calculated T and P series, the IHMS/HBV hydrological model was chosen for simulation of daily runoff series. The paper outlines procedures for calibration of the model and its use for runoff simulations in the two basins. The results of model calibration, runoff simulation and the effects of climate change on key characteristics of hydrological regime at the end of 21st century in the Kolubara and Toplica catchments are presented in more detail.

Key words: climate change, temperature, precipitation, hydrological processes, runoff, water balance, HBV model, calibration, river flow simulation, droughts and low flows, floods.

¹ Mr Mihailo Anđelić, dipl. građ. inž., nezavisni konsultant, ul. Lipovačka 66, 11460 Barajevo, mandjelic941@gmail.com

² Marija Ivković, dipl. građ. inž., Klimatski Centar RHMZ Srbije, marija.ivkovic@hidmet.gov.rs

1 Uvod

U periodu 2006-2013, u Republičkom Hidrometeorološkom Zavodu Srbije (RHMZ) je implementirano nekoliko projekata u oblasti hidrologije u okviru programa pomoći vlade Kraljevine Norveške Republici Srbiji. Osnovni cilj projekata bio je da se modernizuje hidrološka služba Srbije kroz modernizaciju i unapređenje rada Hidrološkog sektora RHMZ; u realizaciji ovih projekata učestvovali su hidrolozi iz Hidrološkog sektora RHMZ u partnerstvu sa stručnjacima Norveškog direktorata za vodne resurse i energiju (NVE) iz Osla, i uz angažovanje spoljnog stručnog konsultanta iz Srbije. Detaljne informacije o svim projektima iz ovog programa mogu se naći u Monografiji RHMZ[14]. Poslednji ‘norveški’ projekat u nizu, realizovan 2012. i 2013. godine, imao je između ostalog za cilj da izradi studiju o efektima projektovanih klimatskih promena na hidrološki režim oticanja i vodne resurse na primeru dva pilot sliva u Srbiji.

U studiji su analizirani slivovi reke Kolubare i Toplice, čije su fizičko-geografske i klimatske karakteristike obradjene u 2. poglavlju rada. Odabrani slivovi su različiti po svojim ključnim karakteristikama, a na njihov izbor značajan uticaj je imala i raspoloživost dovoljno dugih i pouzdanih vremenskih serija hidroloških i meteoroloških podataka.

Za izučavanje efekata mogućih klimatskih promena na hidrološke procese u odabranim slivovima korišćene su projekcije vremenskih serija dnevnih temperatura (T) i padavina (P) do 2100. godine. Između raspoloživih simulacija klimatskih promena, koje su generisane za A1B SRES/IPCC scenario [1,2] za region Evrope i Mediterana, u studiji je korišćeno 6 kombinacija globalnih (GCM) i regionalnih klimatskih modela (RCM) i to: dve GCM/RCM simulacije Nacionalnog centra za klimatske promene RHMZ [4] i četiri GCM/RCM simulacije iz poznatog ENSEMBLES projekta Evropske unije. U poglavlju 3 rada dat je sazet opis odabranih 6 GCM/RCM i analiza dobijenih rezultata simulacije vremenskih T i P serija za 3 klimatološke stanice locirane u slivu Kolubare (Valjevo) i Toplice (Kuršumlja i Niš).

Za projektovane dnevne serije T i P, simulacija režima oticanja u slivovima reke Kolubare i Toplice je sprovedena korišćenjem poznatog IHMS/HBV hidrološkog modela [3,4,12,13] koji transformiše padavine u oticaj sa vremenskim korakom od jednog dana. HBV je kontinualni semi-distribuirani hidrološki model, nije previše zahtevan u pogledu podataka potrebnih za kalibraciju parametara modela, i sa dobrim rezultatima u simuliranju glavnih komponenti vodnog bilansa sliva. Osim primene u izradi studija uticaja klimatskih promena, HBV model je nasao zapaženu primenu u svetu i u drugim oblastima hidrologije, najčešće za prognozu poplavnih talasa na malim i srednjim slivovima.

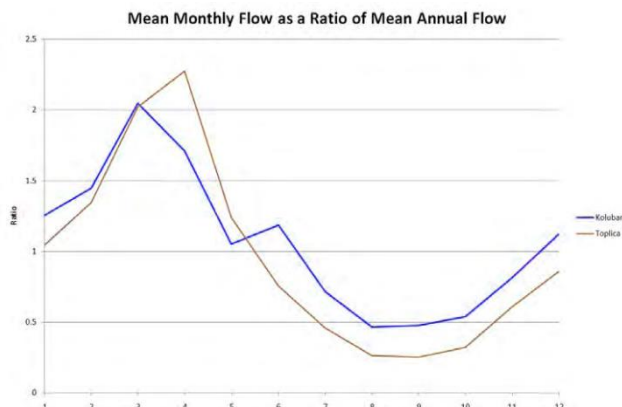
Ne upuštajući se dublje u opis klimatskih modela, čiji detalji se mogu naći u publikovanim rezultatima studije [8], težište ovog rada je na hidrološkim aspektima sprovedenih analiza; pored opisa slivova u poglavlju 2, u poglavlju 4 su detaljnije opisani postupci kalibracije HBV modela za slivove reke Kolubare i Toplice, kao i daljeg korišćenja kalibrisanog modela za simulaciju uticaja projektovanih klimatskih promena na režim oticanja. U poglavlju 5 pažnja je fokusirana na analizu rezultata simulacije rečnog oticanja i drugih komponenti vodnog bilansa, i na prikaz modifikovanih karakteristika hidrološkog režima oticanja na kraju 21. veka, koje bi nastale kao rezultat projektovanih klimatskih promena. U poglavlju 6 ukratko se sumiraju najnoviji rezultati istraživanja uticaja klimatskih promena na režim oticanja u slivu Toplice, koja su sprovedena u RHMZ Srbije po završetku norveškog projekta. Zaključna rasmatranja sa predlogom zaključaka dati su u poglavlju 7.

2 Karakteristike slivova reka Kolubara i Toplica

Kontinentalna klima na severu, umereno-kontinentalna na jugu, i planinska klima na visokim planinama u Srbiji zajedno sa različitošću reljefa, uslovljava različitosti u hidrološkim karakteristikama rečnih slivova.

U nižim predelima Srbije godišnja visina padavina se kreće u intervalu od 540 do 820 mm a na nadmorskom visinama preko 1000 m prosečno meri se od 700 do 1000 mm padavina. Veći deo Srbije ima kontinentalni režim padavina, sa većim količinama u toplijoj polovini godine, izuzev jugozapadnih krajeva gde se najviše padavina izmeri u jesenjem periodu. Najkišovitiji mesec u toku godine je juni, kada u proseku padne 12 do 13 % od ukupne godišnje sume padavina. Najmanje padavina beleži se u februaru i oktobru. Pojava snežnog pokrivača karakteristična je za hladniji deo godine od novembra do marta, a u januaru se beleži najveći broj dana sa snežnim pokrivačem [12].

Kako bi se obuhvatile sve moguće promene u hidrološkim režimima reka u Srbiji pod uticajem klimatskih promena, za analizu je izabran sliv sa snežnim i sliv sa mešovito snežno-kišnim režimom tečenja (slika 1). Sliv reke Toplica nalazi se pod uticajem procesa akumulacije i topljenja snega sa planine Kopaonik, dok na slivu reke Kolubara osim prolećnih velikih voda imamo i značajan uticaj kišnih epizoda u junu mesecu.



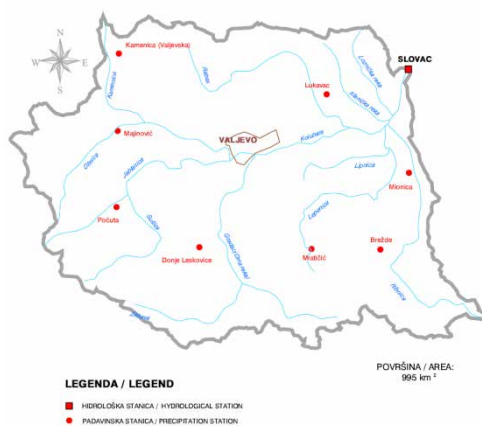
Slika 1. Srednje mesečni proticaji izraženi kao procenat u odnosu na godišnje vrednosti za slivove reka Kolubara i Toplica

Figure 1. Mean monthly discharge as ratio of mean annual discharge for the Kolubara and Toplica rivers

2.1 Sliv reke Kolubare

Reka Kolubara je najnižvodnija pritoka reke Save na njenom toku ka ušću u reku Dunav. Analiza je obuhvatila sliv reke Kolubara do hidrološke stanice Slovac sa ukupnom površinom od 991 km² (slika 2). Najveći srednje mesečni proticaji javljaju se u periodu mart-april, dok se visoke vrednosti javljaju ponovo u junu i julu. Malovodni periodi javljaju se tokom avgusta i septembra. Značajna karakteristika režima tečenja na ovom vodotoku je izražena razlika između maksimalnih i minimalnih srednje mesečnih vrednosti proticaja u toku godine.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2. Sliv reke Kolubara
Figure 2. Kolubara catchment

Kako se više od 60% sliva nalazi ispod 400 mnm, slivom prevladavaju nizije, dok se brdsko-planinske oblasti nalaze na najjužnijim delovima sliva. Oranice i livade su dominantna vegetacija do 400 mnm, koje zamenjuju vinogradi, voćnjaci i šume nakon 600 mnm. Prosečan višegodišnji proticaj na profilu Slovac je 8.35 m³/s, t.j. 266 mm/god što čini 38% od prosečne godišnje količine padavina. Prosek višegodišnjih maksimalnih vrednosti proticaja iznosi 119 m³/s. Za potrebe analize korišćeni su klimatološki podaci sa glavne meteorološke stanice Valjevo.



Slika 3. Sliv reke Toplica
Figure 3. Toplica catchment

2.2 Sliv reke Toplice

Reka Toplica je leva pritoka Južne Morave i analiza mogućeg uticaja klimatskih promena razmatrana je do profila hidrološke stanice Doljevac slivne površine od 2231 km² (slika 3). Režimom tečenja na vodotocima u južnom delu Srbije diktira ciklus akumulacije i topljenja snega.

To je razlog velikih međusezonskih razlika t.j. značajnih količina vode u prolećnom i veliki deficit vode u letnjem periodu. U martu i aprilu beleže se najveći srednjemesečni proticaji a u avgustu i oktobaru najmanje vrednosti. Prosečan godišnji protok na profilu je 8.36 m³/s, što je oko 20% ukupne količine padavina koja padne tokom godine na analizirani sliv.

Više od polovine površine sliva se nalazi ispod 800 mm, gde dominiraju livade, oranice i nisko rastinje, dok su viši delovi sliva pokriveni šumom. Za potrebe analize korišćeni su klimatološki podaci sa dve glavne meteorološke stanice Kuršumlija i Niš.

3 Korišćene projekcije klimatskih promena

Simulirane vremenske serije T i P, dobijene preko različitih projekcija promena klime, predstavljaju osnovni ulaz u hidroske modele za simulaciju efekata klimatskih promena na hidrološke procese u slivu. U svetu i kod nas, postoji veliki broj projekcija klime, dobijenih korišćenjem globalnih klimatskih modela (GCM); zajedničko za sve GCM modele je da imaju grubu prostornu rezoluciju (obično od 300 do 600 km između tačaka mreže) i kao takve nisu pogodna za simuliranje procesa oticanja u manjim slivovima. Do T i P serija sa visokom prostornom rezolucijom, kakve su potrebne za hidrološke analize, dolazi se dinamičkim 'deskaliranjem' (povećanjem horizontalne rezolucije - obično na 50 ili 25 km) rezultata T i P dobijenih preko GCM; u tu svrhu se koriste različiti regionalni klimatski modeli (RCM).

U studiji je korišćeno 6 kombinacija GCM/RCM a sve simulacije dnevnih T i P vremenskih serija sprovedene su za tri vremenska perioda dužine 30 godina, i to: (a) prošlost – period 1960-1990; (b) bliska budućnost – period 2001-2030; i daleka budućnost – period 2070-2100. Korišćene GCM/RCM kombinacije sumirane su u tabeli 1.

Od šest GCM/RCM modela navedenih u tabeli, rezultati simulacije dnevnih T i P za prva četiri su preuzeti iz evropskog projekta ENSEMBLES, dok su rezultati za poslednja dva rezultat zajedničkog rada Klimatskog centra RHMZ i Katedre za meteorologiju Prirodno-matematičkog fakulteta u Beogradu [7]. Svi detalji vezani za ENSEMBLES projekat i T i P serije simulirane u okviru projekta mogu se naći na sajtu <http://ensemblesrt3.dmi.dk>.

Tabela 1. GCM/RCM kombinacije korišćene u hidrološkim simulacijama. Institucije navedene u tabeli su bile odgovorne za simulacije T i P korišćenjem naznačenog RCM, na bazi graničnih uslova dobijenih simulacijom preko navedenog GCM.

Table 1. GCM/RCM combinations used in the hydrological simulations. The institution listed was responsible for running the simulation with the RCM model, based on boundary conditions derived from the indicated GCM

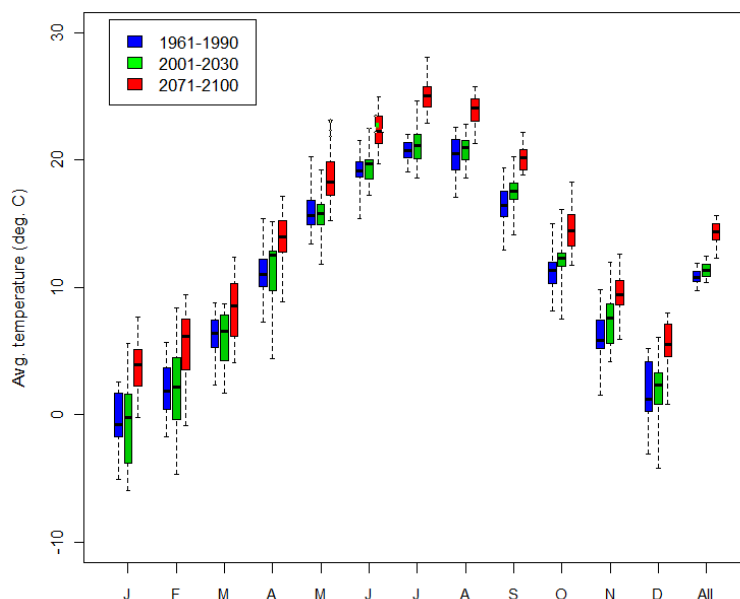
RCM	GCM	Institucija odgovorna za simulacije T i P	Skraćenica
HIRHAM5	ECHAM5	DMI (Danish Meteorological Institute)	ech-hirham
CLM	HadCM3Q0	ETH – Zurich	had-clm
RegCM3	ECHAM5	ICTP – Trieste	ech-regcm
HadRM3Q0	HadCM3Q0	Hadley Centre, UK	had-hadrm
RCM-SEEVCCC	ECHAM5	University of Belgrade & SEEVCCC	ech-ebupom
RCM-SEEVCCC	ECHAM4 (SINTEX)	University of Belgrade & SEEVCCC	stx-ebupom

RCM vrednosti za T i P imaju manje ili više izraženu sistematsku grešku modela i postoji nekoliko postupaka za korigovanje grešaka ovog tipa. Za korekciju sistematske greške RCM za generisane vrednosti T i P serija, u studiji su korišćenje transformacije izvedene iz teorijskih funkcija raspodele [8]. Za korekciju vrednosti T korišćena je normalna raspodela čiji su parametri određeni na osnovu srednjih dnevnih T serija, osmotrenih i generisanih preko RCM, za svaki mesec u godini posebno. Za korekciju vrednosti P uzeta je gama raspodela za modeliranje intenziteta padavina, dok je Bernulijeva funkcija korišćena za modeliranje verovatnoće kišnih epizoda (dana sa ili bez padavina); u studiji je odabrano da se korekcija padavina takođe sprovede za svaki mesec u godini posebno.

Detaljna analiza projekcija promena klime sprovedena je za tri glavne meteorološke stanice, i to: Valjevo u slivu Kolubare; Niš i Kuršumlja u slivu Toplice. U tu svrhu, za svaku od tri stanice na raspolaganju je bilo 18 korigovanih 30-godisnjih dnevnih serija za T i isto toliko za P - za svaku od 6 GCM/RCM kombinacija (tabela 1) i za sva tri usvojena 30-godišnja referentna perioda (1960-1990; 2001- 2030; i 2071-2100).

3.1 Projekcije promena temperature

Projektovane promene temperature mogu se interpretirati poređenjem korigovanih RCM vrednosti T za tri usvojena referentna 30-godisnja perioda; na slici 4 dat je primer promena T na mesečnom nivou za meteorološku stanicu Valjevo, sliv Kolubare, i za projekcije dobijene primenom GCM/RCM kombinacije ech-ebupom.



Slika 4. Raspodela srednjih mesečnih temperatura na stanici Valjevo - za tri referentna perioda i za projekcije dobijene preko modela ech-ebupom

Figure 4. Distribution of average monthly temperatures at Valjevo for the three periods for the ech-ebupom projection

Projekcije temperature preko svih 6 GCM/RCM kombinacija za tri meteorološke stanice (Niš, Kuršumlja i Valjevo) prikazane su i mogu se naći u studiji [8]. Slično kao na

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

prikazanom primeru za Valjevo i ech-ebupom, i ostale projekcije ukazuju da će doći do porasta temperature tokom cele godine i na sve tri meteorološke stanice – iako postoje razlike u projektovanim promenama, i po sezonama i u zavisnosti od korišćenog modela.

U tabeli 2 sumirane su sezonske razlike u projektovanim promenama temperature za letnji (april – septembar) i zimski period (oktobar – mart) za daleku budućnost (period 2071-2100) u poredjenju sa osmotrenim kontrolnim periodom 1961-1990.

Tabela 2. Projektovane promene prosečnih temperatura u letnjem i zimskom periodu za svaki od 6 korišćenih klimatskih modela i za sve tri meteorološke stanice

Table 2. Projected changes in average temperature during the summer vs. winter half-year periods for each RCM projection at each of the three climate stations

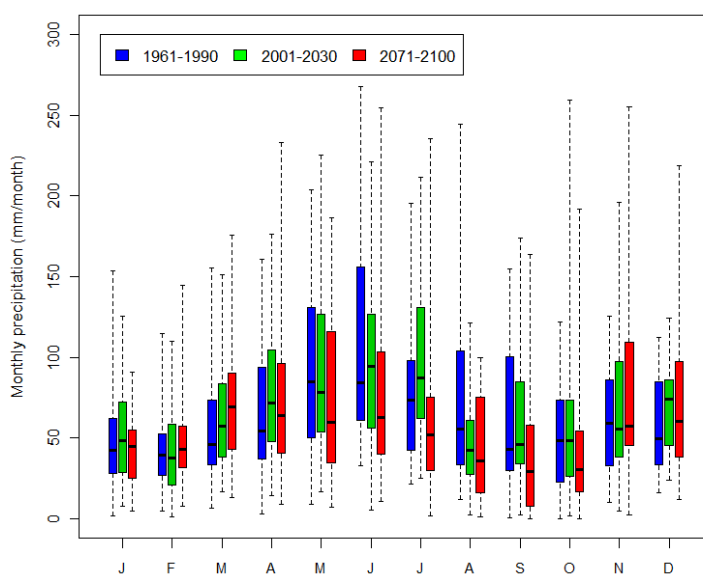
	April 1 – 30 September			1 October – 31 March		
	Kuršumlija	Niš	Valjevo	Kuršumlija	Niš	Valjevo
ech-hirham	+2.7	+3.0	+2.1	+3.5	+3.5	+3.1
had-clm	+3.3	+3.8	+3.2	+3.8	+3.8	+3.5
ech-regcm	+3.0	+3.4	+ 2.8	+3.6	+3.6	+3.4
had-hadrm	+4.7	+5.1	+4.2	+4.2	+4.1	+3.8
ech-ebupom	+3.2	+3.4	+3.3	+3.5	+3.3	+3.5
stx-ebupom	+4.2	+3.6	+5.4	+3.3	+2.4	+4.1

3.2 Projekcije promena padavina

Projektovane promene mesečnih padavina mogu se takodje interpretirati poredjenjem korigovanih RCM vrednosti P za tri usvojena referentna 30-godišnja perioda. Ove promene su ilustrovane na slici 5, na primeru za istu meteorološku stanicu (Valjevo) i za projekcije dobijene primenom istog ech-ebupom modela. Na prikazanom primeru uočava se da postoji velika varijabilnost mesečnih padavina - i za osmotreni kontrolni period 1961-1990 i za dva buduca perioda (2001-2030 i 2071-2100). Takodje, ova projekcija pokazuje da bi se na kraju 21. veka smanjile vrednosti medijane ukupnih mesečnih padavina u periodu Maj-Oktobar, dok su ove promene u zimskom periodu generalno minimalne u poredjenju sa varijacijama padavina u pojedinim mesecima. Projekcije P za svih 6 modela i sve tri meteorološke stanice mogu se naći u studiji [8].

U tabeli 3 sumirane su sezonske razlike u projektovanim promenama padavina za letnji i zimski period za buduci period 2071-2100 u poredjenju sa osmotrenim kontrolnim periodom 1961-1990. Modeli had-clm i had-hadrm predviđaju daleko veće smanjenje padavina u letnjem periodu.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 5. Raspodela ukupnih mesečnih padavina na stanici Valjevo za tri referentna perioda i za projekcije dobijene preko modela ech-ebupom
Figure 5. Distribution of monthly total precipitation values at Valjevo for the three periods for the ech-ebupom projection

Tabela 3. Projektovane promene prosečnih padavina u letnjem i zimskom periodu za svaki od 6 korišćenih modela i za sve tri klimatske stanice
Table 3. Projected changes in average precipitation during the summer & winter half-year periods for each RCM projection at each of the three climate stations.

	April 1 – 30 September			1 October – 31 March		
	Kuršumlija	Niš	Valjevo	Kuršumlija	Niš	Valjevo
ech-hirham	-18%	-24%	+1%	+14%	+17%	+21%
had-clm	-34%	-40%	-33%	+14%	+8%	+6%
ech-regcm	-11%	-11%	-3%	+5%	+11%	+8%
had-hadrm	-27%	-23%	-30%	+1%	+6%	+9%
ech-ebupom	-16%	-11%	-19%	+2%	+8%	+10%
stx-ebupom	+5%	-6%	-11%	+1%	-6%	+13%

4 Hidrološki HBV model

U toku prethodnih faza srpsko-norveške saradnje HBV hidrološki model je uveden u operativnu hidrološku praksu kao alat za najavu poplavnih talasa na malim i srednjim slivovima u Srbiji. Ovaj model je svoju primenu našao u preko 50 zemalja sveta i osim operativne primene koristi se i za analizu mogućeg uticaja klimatskih promena na režim tečenja.

SMHI/HBV model je razvila švedska hidrometeorološka služba SMHI i to je konceptualni model koji podsliv koristi kao primarnu hidrološku jedinicu i koji je komponovan od manjeg broja modula za simulaciju određene faze transformacije bruto/neto kiše u hidrogram oticaja. Model funkcioniše kao skup modula koji vrše interpolaciju ulaznih meteoroloških veličina, proračunavaju akumulaciju snega i njegovo topljenje, proračunavaju stvarnu evapotranspiraciju, računaju vrednost zemljišne vlage i određuju zapreminu oticaja i vrše njenu transformaciju u izlazni hidrogram. Vremenski posmatrano, SMHI\HBV je kontinualni, a prostorno semi-distribuirani model za proračun transformacije padavina u oticaj. Prostorna raspodela je u horizontalnom smislu određena podelom sliva na podslivove, a u vertikalnom smislu podelom na visinske zone po nadmorskoj visini, vrsti vegetacije i položaju jezera.

4.1 Kalibracija modela

Podaci o raspodeli površine sliva po visinskim zonama su za model pripremljeni korišćenjem ASTER Global Digital Elevation Model-a (ASTER GDEM)[11]. Podaci o vrsti vegetacije na analiziranim slivovima preuzeti su iz Global Land Cover 2000 projekta (GLC 2000)[5].

Zbog ograničenosti u količini podataka, oba sliva su modelirana kao jedinstvene celine. Slivovi su podeljeni u 10 visinskih zona za koje je sračunato procentualno učešće površina obraslih niskim i visokim rastinjem. Podaci o padavinama i temperaturama vazduha dostupne su na jednu, odnosno dve glavne meteorološke stanice u slivu reke Kolubare, odnosno reke Toplice.

Kao kriterijumi za kalibraciju uzeti su uslovi da kalibracioni i verifikacioni periodi za određivanje parametara modela oba sliva budu isti, kako bi se mogla uraditi komparativna analiza postignutih rezultata i postizanje što veće vrednosti Nash-Sutcliff-ovog koeficijenta efikasnosti uz što manje zapreminske greške. Svi ovi uslovi treba da obezbede stabilan hidrološki model tokom celokupnog simulacionog perioda.

Tabela 4. Rezultati kalibracije NVE/RHMZ
 Table 4. Calibration results NVE/RHMZ

Sliv	Kalibracioni period 1996 – 2009		Validacioni period 1986-1995	
	NS efficiency criterion	Acc. difference (mm)	NS efficiency criterion	Acc. difference (mm)
Toplica	071/0.74	0/-1.03	0,58/0.68	145/-182
Kolubara	0,56/0.62	0/0.32	0,41/0.54	102/-111

Za kalibracioni period izabran je period od 1996. do 2009. godine, dok je za verifikaciju izabran period od 1986. do 1995. godine. Nezavisne kalibracije sprovedene su u NVE i RHMZ-u. Kalibracioni postupak se razlikovao u tome što je NVE primenio postupak ručne, a RHMZ postupak automatske kalibracije. U obe institucije postignuta su skromna ali prihvatljiva slaganja (tabela 4). Kalibracija urađena 2010. godine za potrebe pripreme HBV modela za operativan rad - u kojoj su korišćeni podaci sa 7 padavinskih stanica na slivu reke Toplice i tri stanice na slivu reke Kolubare - dala je bolje rezultate, ukazujući da bi dodatni podaci o klimi unapredili rezultate modela u oba slučaja.

4.2 Simulacija hidroloških serija

HBV parametarski set dobijen kalibracijom u NVE je korišćen za simulaciju proticaja sa padavinama i temperaturama dobijenim iz dve RCM-SEEVCCC projekcije i četiri ENSEMBLES projekcije. HBV model, vremenske rezolucije od jednog dana, puštan je za tri vremenska perioda (1961-1990; 2001-2030; i 2069-2098 ili 2071-2100), gde je prva godina korišćena kao 'spin-up' period modela. Period od 1962. do 1990. godine predstavlja tzv. kontrolni period, to jest period sadašnje klime prema kom su merene buduće promene.

Parametarski set dobijen kalibracijom u RHMZ-u takođe je korišćen radi dobijanja hidroloških projekcija u bliskoj i dalekoj budućnosti. Kako odstupanja u dobijenim rezultatima nisu velika, u nastavku su prikazani rezultati simulacija sa parametarskim setom dobijenim postupkom ručne kalibracije, dok su RHMZ rezultati dostupni na <http://www.seevccc.rs/HBVclimate>.

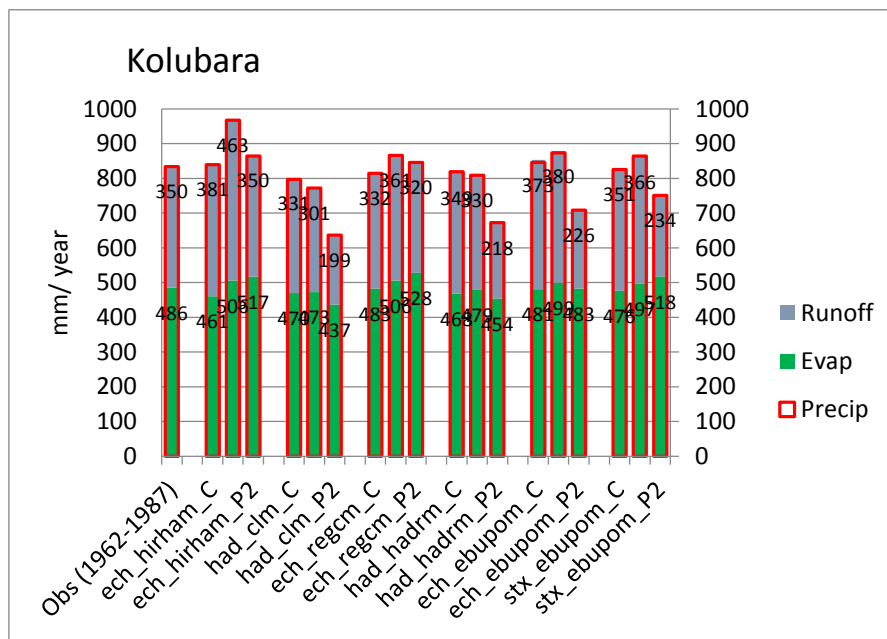
5 Uticaj klimatskih promena na proces oticanja

HBV model kalibrisan za slivove Kolubare i Toplice korišćen je za analizu potencijalnih promena režima oticanja u ova dva sliva pod uticajem projektovanih klimatskih promena. Svih 18 vremenskih serija dnevnih T i P - dobijenih preko 6 GCM/RCM modela za simulaciju promena klime za tri usvojena vremenska perioda od po 30 godina korišćeno je kao ulaz u HBV model za generisanje korespondentnih 18 vremenskih serija dnevnih proticaja Q i ostalih komponenti vodnog bilansa - zaliha vode u snegu, evapotranspiracije i zemljišne vlage.

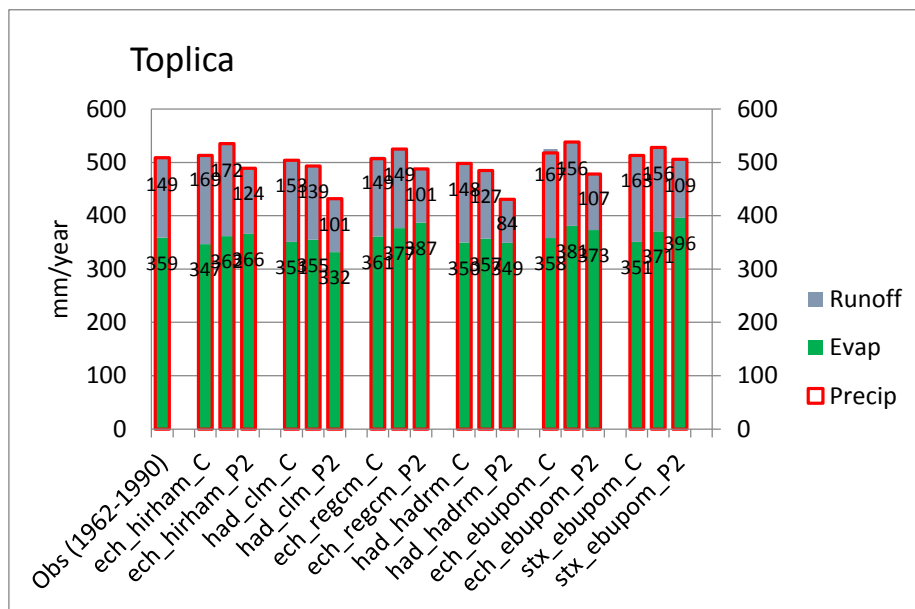
Analiza dobijenih rezultata je sprovedena upoređenjem glavnih komponenti vodnog bilansa (padavine P, oticanje Q, i evapotranspiracija E) osmotrenih u periodu 1961-1990 i simuliranih rezultata za kontrolni period od 30 godina (1962-1990) i dva buduća 30-godišnja perioda (2001-2030 i 2071-2100).

5.1. Projekcije promena vodnog bilansa u slivu

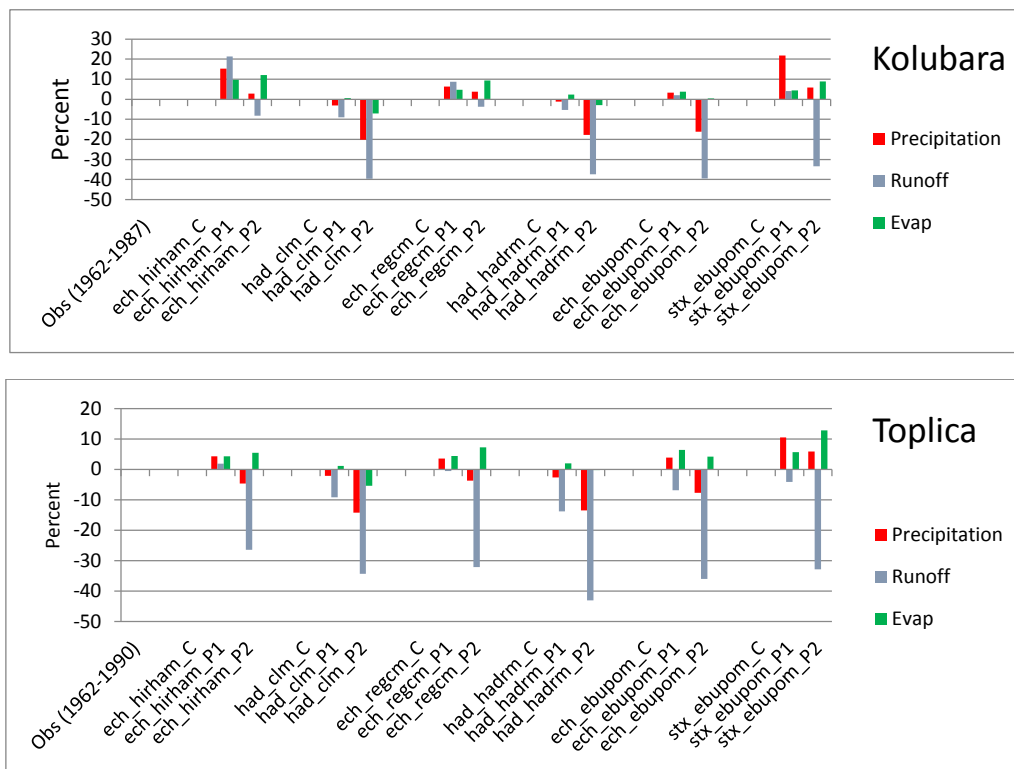
Na osnovu rezultata sprovedenih analiza, sadašnji i budući vodni bilans prezentirani su na slici 6 za sliv Kolubare i slici 7 za sliv reke Toplice. Može se zaključiti (slike 6 i 7) da se, generalno, u daljoj budućnosti, tj. krajem 21. veka, može očekivati značajno smanjenje oticanja - što je u saglasnosti sa očekivanim smanjenjem padavina u oba sliva (slika 8); signal za evapotranspiraciju je manje konsistentan iako većina projekcija ukazuje da će krajem stoleća doći do neznatnog povećanja srednje godišnje evapotranspiracije.



Slika 6. Srednji godišnji vodni bilans u [mm/godina] za sliv Kolubare. C označava kontrolni period 1962-1990; P1 period 2002-2030; P2 period 2072-2100
 Figure 6. Mean annual water balance fluxes (mm/year) in the Kolubara catchment. "C", "P1" and "P2" denote the periods 1962-1990, 2002-2030 and 2072-2100, respectively



Slika 7. Srednji godišnji vodni bilans [mm/godina] za sliv Toplice. "C" označava period 1961-1990; "P1" period 2002-2030; i "P2" period 2072-2100
 Figure 7. Mean annual water balance fluxes [mm/year] in the Toplica catchment. "C", "P1" and "P2" denote the periods 1962-1990, 2002-2030 and 2072-2100, respectively



Slika 8. Projektovane promene [u %] komponenti vodnog bilansa za slivove Kolubare i Toplice u poredjenju sa kontrolnim periodom; “C”, “P1” i “P2” imaju isto značenje kao na slikama 6 i 7

Figure 8. Projected changes [in %] of the water balance fluxes in the Kolubara and Toplica catchments, compared to the control period. “C”, “P1” and “P2” have the same meaning as in Figures 6 and 7.

Vrednosti prosečnog godišnjeg oticanja [mm/godina i m³/sec] za kontrolni i dva buduća perioda prikazane su u tabeli 5 za sliv Kolubare, i tabeli 6 za sliv Toplice. U tabelama su takođe prikazane vrednosti oticanja srecunate preko osmotrenih T i P podataka u periodu 1961-1990, pored vrednosti dobijenih preko 6 GCM/RCM projekcija za sva tri 30-godisnja perioda.

Rezultati pokazuju značajno smanjenje godišnjeg oticanja u oba sliva krajem stoleća u poredjenju sa kontrolnim periodom 1962-1990. U slivu Kolubare većina modela, sa izuzetkom had-clm i had-hadrm, pokazuje povećanje oticanja za period 2001-2030, dok svi modeli bez izuzetka ukazuju na značajno smanjenje oticanja krajem ovog stoleća. U slivu Toplice većina modela, sa izuzetkom jednog (ech-hirham), ukazuje na smanjenje oticanja u bliskoj budućnosti (2001-2030) ali svi bez izuzetka prognoziraju značajno smanjenje oticanja krajem veka.

Od dva analizirana sliva, modeli daju nešto konsistentnije rezultate za sliv Toplice, gde svi prognoziraju smanjenje padavina i oticanja krajem 21. veka. Nešto drugačija slika je za sliv Kolubare a glavni uzrok su projektovane promene u režimu padavina (slika 8); ovde dva modela (ech-hirham ech-regcm) predviđaju mali porast godisnjih padavina krajem stoleća i to rezultira u neznatnom smanjenju oticanja. Ostala 4 modela konsistentno prognoziraju značajno smanjenje padavina, što rezultira i u velikom smanjenjem oticanja u slivu. Medjutim, u celini gledano, dobijeni rezultati ubedljivo sugerišu da će se godišnje oticanje krajem stoleća smanjiti za 30% do 40% u oba sliva u poredjenju sa kontrolnim periodom.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 5. Prosečno godišnje oticanje Q [u mm/godina i m³/sec] i procentualne promene za dva buduća perioda u odnosu na kontrolni za sliv Kolubare

Table 5. Average annual runoff Q [in mm/yr and m³/s] and percent change in the two future periods relative to control for Kolubara catchment

	<i>Q - 1962-1990 (control) mm/yr m³/s</i>	<i>Q - 2002-2030 mm/yr m³/s</i>	<i>% of Q change from control</i>	<i>Q- 2072-2100 mm/yr m³/s</i>	<i>% of Q change from control</i>
Simulated from observed P,T	<u>350</u> 11.0				
ech-hirham	<u>381</u> 12.0	<u>463</u> 14.5	21	<u>350</u> 11.0	-8.2
had-clm	<u>331</u> 10.4	<u>301</u> 9.4	-9.1	<u>199</u> 6.3	-40
ech-regcm	<u>332</u> 10.4	<u>361</u> 11.3	8.7	<u>320</u> 10.1	-3.6
had-hadrm	<u>349</u> 11.0	<u>330</u> 10.4	-5.3	<u>218</u> 6.9	-37
ech-ebupom	<u>373</u> 11.7	<u>380</u> 11.9	2.1	<u>226</u> 7.1	-39
stx-ebupom	<u>351</u> 11.0	<u>366</u> 11.5	4.1	<u>234</u> 7.3	-33

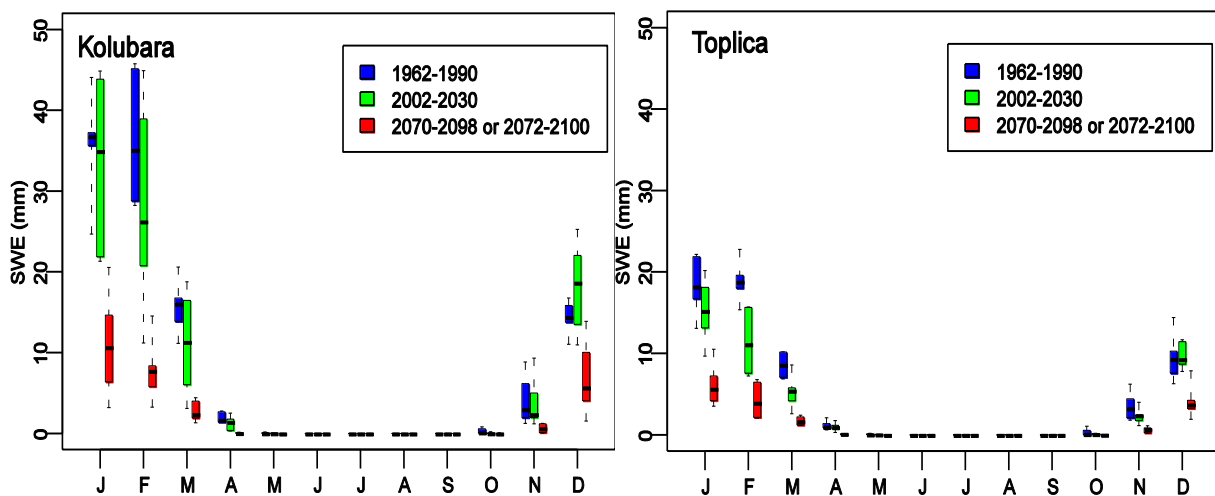
Tabela 6. Prosečno godišnje oticanje Q [u mm/godina i m³/sec] i procentualne promene za dva buduća perioda u odnosu na kontrolni za sliv Toplice

Table 6. Average annual runoff Q [in mm/yr and m³/s] and percent change in the two future periods relative to control for Toplica catchment

	<i>Q -1962-1990 (control) mm/yr m³/s</i>	<i>Q - 2002-2030 mm/yr m³/s</i>	<i>% of Q change from control</i>	<i>Q -2072-2100 mm/yr m³/s</i>	<i>% od Q change from control</i>
Simulated from observed P,T	<u>149</u> 10.5				
ech-hirham	<u>169</u> 11.9	<u>172</u> 12.2	1.8	<u>124</u> 8.8	-26
had-clm	<u>153</u> 10.9	<u>139</u> 9.9	-9.2	<u>101</u> 7.1	-34
ech-regcm	<u>149</u> 10.6	<u>149</u> 10.5	-0.6	<u>101</u> 7.2	-32
had-hadrm	<u>148</u> 10.4	<u>127</u> 9.0	-14	<u>84</u> 5.9	-43
ech-ebupom	<u>167</u> 11.8	<u>156</u> 11.0	-6.9	<u>107</u> 7.6	-36
stx-ebupom	<u>163</u> 11.5	<u>156</u> 11.0	-4.2	<u>109</u> 7.7	-33

5.2 Projektovane promene zaliha vode u snegu

Na slici 9 je prezentirana raspodela 6 vrednosti srednjih mesečnih zaliha vode u snegu; ove su dobijene preko HBV modela koristeći na ulazu T i P serije generisane primenom 6 klimatskih modela (stoga samo 6 vrednosti za svaki mesec). U pogledu promena zaliha snega u dva sliva, sve projekcije ukazuju na njihovu značajnu redukciju. Za mesec januar, sa najvećom količinom snega u kontrolnom periodu 1962 – 1990, klimatske projekcije ukazuju da bi krajem stoleća moglo doći do smanjenja zaliha za čak 70 do 80 procenata. Male razlike u projektovanim vrednostima temperature i padavina (preko 6 klimatskih modela) mogu da rezultiraju u velikoj varijabilnosti snežnih zaliha i dinamike otapanja, što je naročito uočljivo u slivu Kolubare za kontrolni period i blisku budućnost. Projektovane promene u snežnim zalihama i dinamici otapanja imaju uticaj na proces oticanja u zimskom i prolećnom periodu.



Slika 9. Raspodela mesečnih zaliha vode u snegu za sva tri perioda - slivovi Kolubare i Toplice

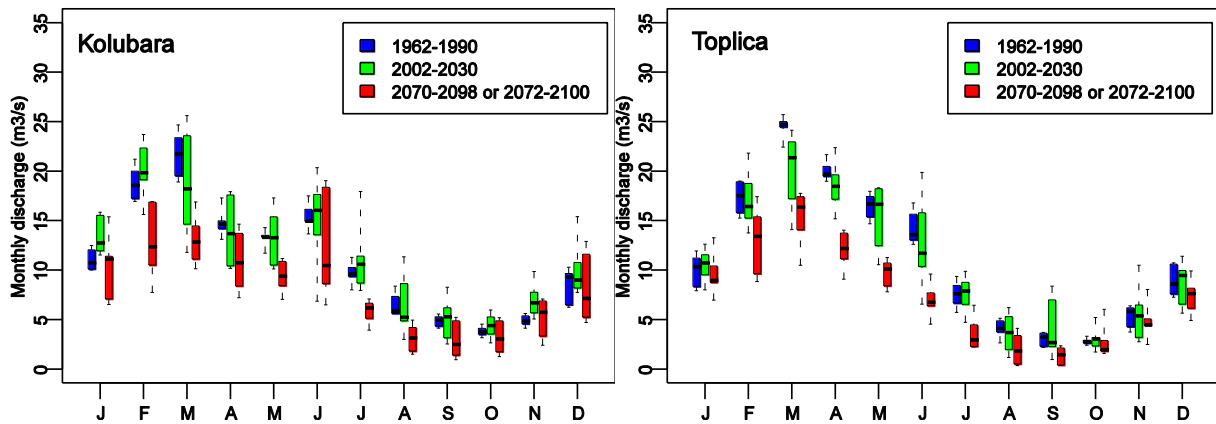
Figure 9. Distribution of average snow storage by month for each time period - the Kolubara and Toplica catchments

5.3 Projektovane promene rečnog oticanja - Q

Promene u raspodeli oticanja unutar godine mogu se sagledati na osnovu sračunatih srednjih dnevnih vrednosti proticaja po mesecima, sto je prikazano na slici 10 za oba sliva. Slicno kao kod zaliha snega, na slici 10 je prikazan raspon promena srednjih mesečnih vrednosti Q na osnovu simuliranih dnevnih Q dobijenih preko HBV modela (pri čemu su kao ulaz u model korišćene projekcije dnevnih T i P preko 6 klimatskih modela, tako da i ovde imamo svega šest Q vrednosti za svaki mesec).

Prezentirani rezultati generalno ukazuju na smanjenje Q tokom cele godine. Najveće smanjenje se očekuje u zimskim i prolećnim mesecima, što je delom uzrokovano smanjenjem zaliha snega u slivu (slika 10); očekivano, i varijabilnost Q je najviše izražena u ovim mesecima, kako za kontrolni tako i za oba buduća perioda. Iako se očekuje manje smanjenje Q u let-

njem i jesenjem periodu u poredjenju sa prolecnim i zimskim, i malo smanjenje proticaja u malovodnom letnjem periodu ima ozbiljnije posledice (po vodosnabdevanje, i sl.)

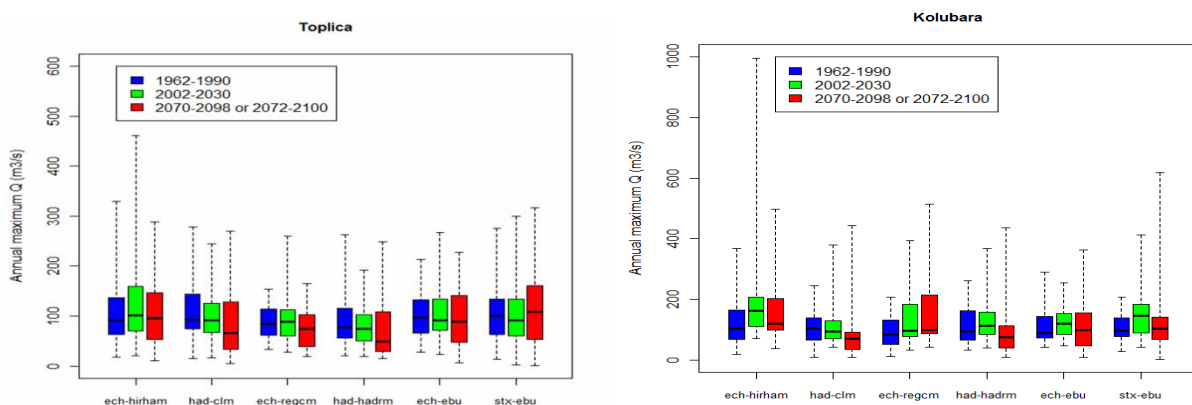


Slika 10. Raspodela srednjih mesecnih proticaja za šest GCM/RCM– HBV kombinacija, slivovi Kolubare i Toplice

Figure 10. Distribution of monthly mean discharge values for the six GCM/RCM-HBV combinations, the catchments of Kolubara and Toplica

5.4 Projektovane promene rezima maksimalnih proticaja - Q_{max}

Izvršena je ekstrakcija serije maksimalnih godisnjih proticaja - Q_{max} iz simuliranih dnevnih Q serija -za oba sliva, sva tri vremenska perioda i za svih 6 projekcija promena klime; dobijeni rezultati raspodele Q_{max} ilistrovani su na slici 11 za oba sliva. Na Kolubari, pet od šest klimatskih projekcija sugerise da će apsolutno maksimalna vrednost i serija godišnjih Q_{max} ($absQ_{max}$) biti veća krajem stoleća, dok četiri od šest projekcija indiciraju da će vrednost $absQ_{max}$ biti nešto veće i u bliskoj budućnosti (2002-2030) u poredjenju sa kontrolnim periodom.



Slika 11. Raspodela godišnjih Q_{max} serija za tri vremenska perioda i šest GCM/RCM-HBV kombinacija, slivovi Kolubare i Toplice

Figure 11. Distribution of annual Q_{max} series for the three time periods and the six GCM/RCM-HBV combinations, the catchments of Kolubara and Toplica

Međutim, sličan obrazac u povećanju godišnjih Q_{\max} nije očigledan iz simulacija za sliv Toplice, jer je ovde raspodela godišnjih Q_{\max} relativno ujednačena, tj. slična za sva tri perioda. Što se klimatskih modela tiče, uočava se da su za oba sliva najveće simulirane godišnje Q_{\max} vrednosti dobijene preko projekcije klimatskog modela ech-hirham za period 2002-2030.

Serijske godišnjih Q_{\max} (ilustrovane na slici 11), su nadalje korišćene za ocenu pojave desetogodišnjih i pedesetogodišnjih velikih voda, fitovanjem dvo-parametarske Gumbelove raspodele. Dobijeni rezultati su još manje konsistentni i na osnovu njih se ne može sa sigurnošću izvesti nekakav generalan zaključak o promenama režima velikih voda usled projektovanih klimatskih promena. Jedan od razloga za to svakako leži u činjenici da se analizirane serije godišnjih Q_{\max} baziraju, ne na trenutnim, već na srednjim dnevnim Q serijama simuliranim preko HBV modela (korišćenjem serije dnevnih padavina kao ulaz). U malim slivovima, teško da se može suditi o veličini trenutnih maksimalnih proticaja na osnovu dnevnih padavina i srednjih dnevnih Q ; po pravilu, trenutni maksimalni proticaji u ovakvim slivovima nastaju kao posledica pluskova kratkog trajanja.

Detaljniji opis rezultata ocene velikih voda 10- i 50-godišnjeg povratnog perioda u dva analizirana sliva mogu se naći u studiji [8].

5.5 Promene režima malih voda i sušnih epizoda

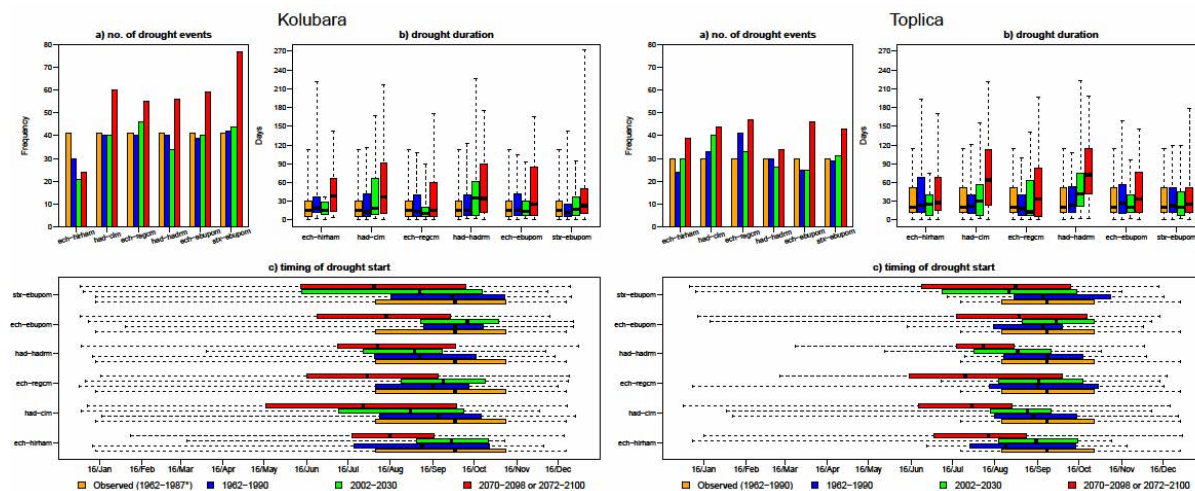
Posebna pažnja u studiji je bila posvećena analizi uticaja klimatskih promena na male vode i suše. Za selekciju malovodnih sušnih perioda u sva tri vremenska perioda korišćen je poznati metod praga (threshold level method), koji je, između ostalog, opisan i primenjen u radu [15]. Postupak se bazira na izboru praga i odgovarajućeg proticaja Q_{pr} ispod kojeg – tj. za sve vrednosti $Q < Q_{pr}$ - se uzima da je nastala suša, odnosno malovidni period. U studiji su sve dnevne serije Q prethodno filtrirane korišćenjem metoda 7-dnevnih pokretnih sredina kako bi se eliminisao efekat beznačajnih sušnih epizoda kratkog trajanja. Vrednost Q_{pr} za svaki sliv je definisana kao vrednost 90% kvantila funkcije gustine raspodele malih voda, koja je za oba sliva određena na osnovu dnevnih Q serija za kontrolni period 1962-1990; ovako određene vrednosti Q_{pr} za oba sliva su nadalje korišćene za analizu projektovanih promena u režimu suša i malih voda u periodima 2002-2030 i 2072-2100.

Za analizu projektovanih promena, korišćene su sledeće tri pokazatelja suša: (a) broj sušnih epizoda; (b) trajanje suše i (c) vreme kalendarskog početka suše. Rezultati sprovedenih proračuna i analiza su sumirani na slici 12 za oba sliva. Debela crna crta u tankim obojenim pravougaonicima na graficima pod (b) i (c) označava vrednost medijane, dok donja i gornja granica pravougaonika označava vrednost 25% odnosno 75% kvantila. Gornji i donji krajevi “brkova” oko pravougaonika označavaju: na grafiku (b) najkraće i najduže trajanje sušne epizode; na grafiku (c) krajevi “brkova” označavaju najraniji i najkasniji kalendarski početak suše. Rezultati prezentirani na slici 12 pružaju kvalitetne informacije o karakteristikama suša u kontrolnom i dva buduća perioda u analizirana dva sliva. Ovde će se ukratko ukazati na ključne poente; detaljnija diskusija dobijenih rezultata se može naći u studiji [8].

5.5.1 Sušne epizode

Rezultati za sliv Kolubare sugerišu da će se broj sušnih epizoda povećati u značajnoj meri krajem 21. veka; na to ukazuju sve korišćene klimatske projekcije izuzev ech-hirham, koji čak daje malo smanjenje u poređenju sa kontrolnim periodom. Sličan obrazac promena sušnih

epizoda dobijen je i za sliv Toplice – gde sve korišćene klimatske projekcije, bez izuzetka, pokazuju da će se krajem stoleća učestalost sušnih epizoda povećati. Generalno, sušne epizode dešavaju se češće u slivu Kolubare za sve analizirane periode.



Slika 12. Karakteristike suša u slivovima Kolubare i Toplice: (a) broj sušnih epizoda, (b) dužina suše i (c) kalendarski početak suše - izvedene na osnovu osmotrenih podataka i 6 projekcija klime u dva sliva za tri referentna perioda (1962-1990, 2002-2030 and 2070-2098).

Figure 12. Drought characteristics in the catchments of Kolubara and Toplica: (a) number of drought events, (b) drought duration and (c) timing of drought start - derived from observed data and the six climate projections for the three reference periods (1962-90, 2002-2030 and 2070-2098).

5.5.2 Trajanje suša

Na bazi rezultata većine korišćenih klimatskih projekcija, krajem 21. veka se očekuju značajno duži periodi suše u oba sliva. Četiri klimatske RCM projekcije bazirane na ECHAM GCM modelu (ech-irham, ech-regcm, ech-ebupom i stx-ebupom) ukazuju na kraće trajanje suše u periodu 2002-2030 u oba sliva, u odnosu na kontrolni period. Međutim, ostale dve RCM projekcije, bazirane na HadCM3Q0 GCM modelu (had-clm i had-rm) ukazuju da će suše trajati duže u istom periodu. U celini, u proseku suše traju duže u slivu Toplice.

5.5.3 Kalendarski početak suše

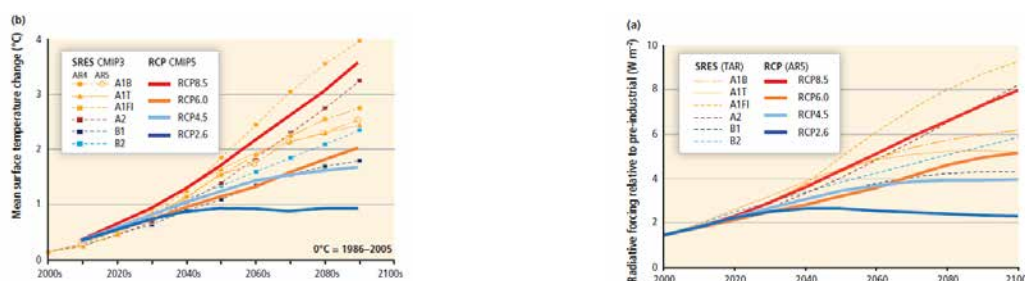
Analize su pokazale da će veliki broj suša krajem 21. veka kalendarski početi znatno ranije u poređenju sa kontrolnim periodom. Projekcije promena kalendarskog početka suše znatno više variraju za sliv Kolubare.

Treba takođe uočiti da su, generalno, karakteristike suša sračunate za kontrolni period 1962-1990 na bazi šest projekcija klime, veoma slične onima koje su dobijene analizom podataka osmatranja za isti period.

6 Dalja istraživanja

U studiji mogućeg uticaja klimatskih promena na vodni režim reka Toplica i Kolubara, razmatran je samo A1B SRES klimatski scenario uz smanjenje neodređenosti izborom više kombinacija globalnih i regionalnih modela.

Dalja istraživanja u RHMZ-u išla su u pravcu korišćenja NMM B regionalnog modela i analizom uticaja SRES A2 i RCP 8.5 klimatskih scenarija. SRES A1B scenario, koji se u mnogim studijama smatra standardnim, je srednje-umeren klimatski scenario dok se SRES A2 smatra ekstremnim scenarijom jer predviđa najveću emisiju ugljen dioksida od svih SRES projekcija. Ideja je bila da se dobijene hidrološke projekcije uporede sa hidrološkim projekcijama korišćenjem još jednog ekstremnog RCP 8.5 klimatskih scenarija (slika 13) i time dobije bolja slika o ekstremnom uticaju klimatskih promena na vodni režim reke Toplica.



Slika 13. Prikaz različitih SRES i RCP scenarija
 Figure 13. Overview of different SRES and RCP scenarios

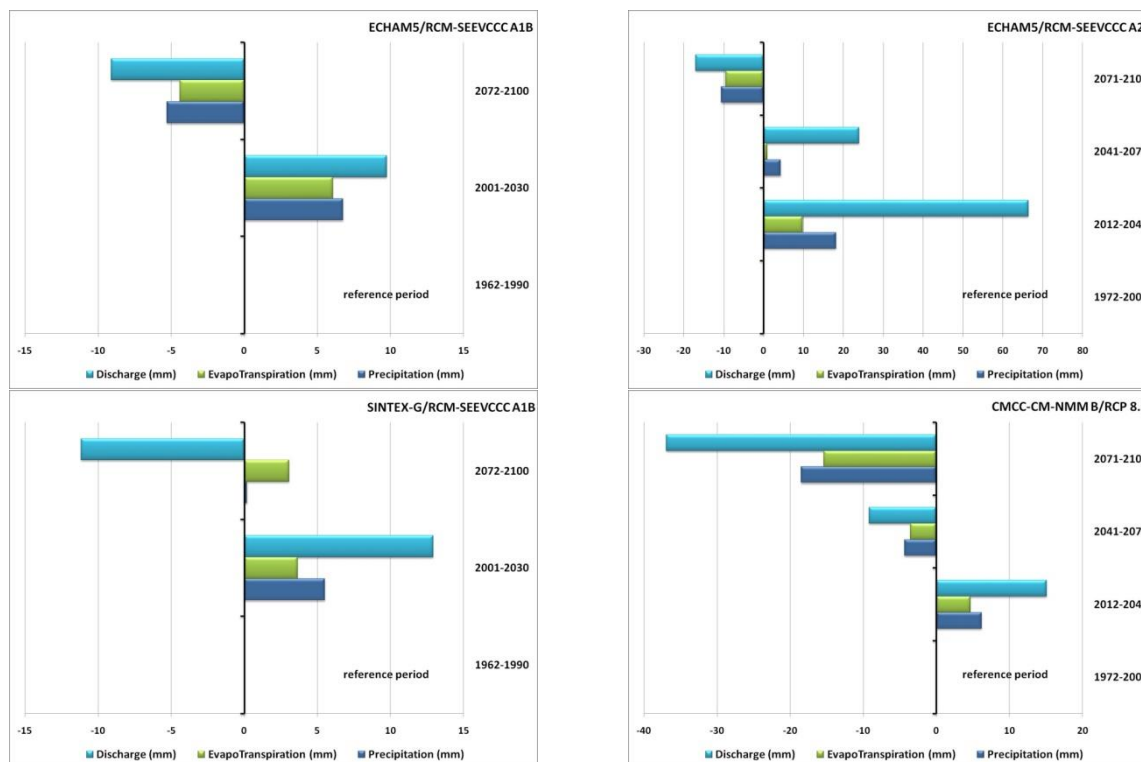
U bliskoj budućnosti i scenario SRES A2 i RCP 8.5 ukazuju na moguće povećanje padavina i proticaja na profilu Doljevac, koje je predviđeno i analizom uticaja A1B scenarija. Period od 2041. do 2071. godine obeležio bi deficit vode od -10% po ekstremnijem RCP scenariju dok A2 još uvek predviđa rast vrednosti proticaja za +23%. U periodu do 2100. godine oba scenarija upućuju na ozbiljan deficit vode na slivu Toplice od 17 do 37% (slika 14).

7 Zaključne napomene

Izvršene hidrološke analize uticaja klimatskih promena na vodne resurse u slivovima Kolubare i Toplice generalno ukazuju da će u oba sliva doći do smanjenja zaliha snega i značajnog smanjenja rečnog oticanja; smanjenje vodnih resursa će naročito biti izraženo krajem stoleća – u skladu sa očekivanim povećanjem evapotranspiracije i smanjenjem padavina.

Gledano u celini, u poređenju sa kontrolnim periodom prosečno godišnje oticanje krajem 21. veka će se u oba sliva najverovatnije smanjiti za 30 do 40%. Smanjenje se očekuje tokom cele godine, ali će više biti izraženo u zimskim i prolećnim mesecima a manje u letnjem periodu; međutim, imajući u vidu da su proticaji u letnjem periodu na većini reka u centralnoj Srbiji već sada najčešće mali, kad-kad i kritični, očekivano dalje smanjenje oticanja u ovom periodu imalo bi ozbiljne i višestruko negativne posledice.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 14. Promene vodnog bilansa u zavisnosti od modela i scenarija
Figure 14. Water balance change with different models and scenarios

Kod velikih voda, većina projekcija za sliv Kolubare ukazuje da će maksimalna vrednost proticaja u seriji godišnjih Q_{max} biti veća i u bliskoj (2002-2030) i u daljoj budućnosti (2072 -2100) u poređenju sa kontrolnim periodom. Ovakav obrazac nije očigledan za sliv Toplice, gde je raspodela velikih voda relativno ujednačena za sva tri analizirana perioda. Generalno, dobijeni rezultati za velike vode se smatraju najmanje pouzdani s obzirom da su sve analize rađene na osnovu serija srednjih dnevnih proticaja.

Kad su upitanju suše i malovodni periodi, rezultati za oba sliva nedvosmisleno pokazuju da će se krajem stoleća broj sušnih epizoda i dužina malovodnog perioda značajno povećati, a da će sušne epizode u najvećem broju slučajeva početi kalendarski ranije u godini u poređenju sa kontrolnim periodom. Ovakve pesimistične projekcije su bez sumnje posledica očekivanog značajnog povećanja temperatura i smanjenja padavina u letnjem periodu.

Koliko je autorima poznato, ovakav tip analiza nije još uvek sproveden na sistematski način za slivove na teritoriju Srbije, iako je to odavno urađeno u velikom broju zemalja u svetu. Otuda preporuka da se ovom poslu pristupi što pre; svedoci smo da klimatske promene ne čekaju a neblagovremeno prilagođavanje negativnim efektima klimatskih promena na vodnih resurse može imati nesagledive posledice po celokupan socioekonomski razvoj zemlje.

Na kraju, ali ne manje važno, autori i ovom prilikom žele da izraze zahvalnost svim kolegama iz RHMZ Srbije i NVE sa kojima su imali čast i veliko zadovoljstvo da rade tokom realizacije ove studije [8], kao i svih ostalih projekata iz oblasti hidrologije [15] koje je finansirala vlada Norveške.

Literatura

1. Arnell, N. W. (2003): *Effects of IPCC SRES emission scenarios on river runoff: a global perspective*. Hydrology and Earth System Sciences 7, pp. 619-641.
2. Arnell, N. W. (2004): *Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios*. Global Environmental Change 14, pp 31-52.
3. Bergstrom S., Forsman A. (1973): *Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model*, Nordic Hydrology, 4, pp 147-170.
4. Bergström, S., (1976): *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut 1976, Stockholm.
5. EEA (2000): *CORINE Land Cover Technical Guide – Addendum 2000*, Technical report No. 40, European Environment Agency.
6. Farr, T.G. et al. (2007): *The shuttle radar topography mission*. Reviews of Geophysics, 45, p. RG2004.
7. Gualdi, S., Rajkovic, B., Djurdjevic, V., Castellari, S., Scoccimarro, E., Navarra, A., Dacic, M., (2008): *Simulations of climate change in the Mediterranean Area*. Final scientific report available at: http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/4675/1/SINTA_Final_Science_Report_October_2008.pdf
8. Haddeland, I. (Editor), Langsholt, E., Lawrence, D., Wong, W. K., Andjelic, M., Ivkovic, M., Vujadinovic, M. (2013): *Effects of climate change in the Kolubara and Toplica catchments, Serbia*. Report No. 62, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo.
9. Lawrence D., Haddeland I., Langsholt E. (2009): *Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation*, Report 01, Oslo.
10. Lindstrom G., Johannon B., Persson M., Gardelin M., Bergstrom S. (1997): *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model*, Journal of Hydrology, 201, pp 272-288
11. METI and NASA (2011): *Release of Version 2 ASTER Global Digital Elevation Model*, U.S. Geological Survey, Washington. (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>)
12. RHMZ Srbije(2015): http://www.hidmet.gov.rs/podaci/meteorologija/ciril/Klima_Srbije.pdf
13. SMHI (2006): *HBV/IHMS Manual ver. 5.10.*, Stockholm
14. SMHI (2011): *IHMS Integrated Hydrological Modelling System featuring HBV*. Manual V. 6.2., Stockholm.
15. Stevanović S. (Editor), Andjelic, M., Tolan, A., Harsten, S., Osvold, O., Hisdal, H., Langsholt, E., Catovic, S., Palmar, B., Vladikovic, D. (2013): *Unapredjenje hidrosloške službe Srbije kroz projekte koje su u periodu 2006 – 2013 realizovali Norveški direktorat za vodne resurse i energiju (NVE) i Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ)*. Monografija RHMZ i NVE, Beograd.
16. Wong, W.K., Beldring, S., Engen-Skaugen, T., Haddeland, I. and Hisdal, H. (2011): *Climate Change effects on spatiotemporal patterns of hydro-climatological summer droughts in Norway*. Journal of Hydrometeorology, 12, pp. 1205-1220.

Problemi u proceni uticaja klimatskih promena hidrološkim modeliranjem: primeri slivova Moravice i Crnog Timoka

Jasna Plavšić¹
Filip Muhić²
Aleksandar Petrović³
Andrijana Todorović⁴

APSTRAKT: U radu se prikazuju rezultati analize uticaja klimatskih promena na hidrološke režime reke Moravice do hidrološke stanice Gradina i reke Crni Timok do hidrološke stanice Bogovina. Za potrebe ove analize razvijeni su hidrološki modeli za oba sliva pomoću modela HBV-light. Modeli su kalibrisani i verifikovani na osnovu raspoloživih osmatranja padavina, temperatura i protoka do 2013. godine. Za procenu uticaja klimatskih promena korišćeni su rezultati simulacija padavina i temperatura regionalnim modelom EBU-POM prema scenarijima A1B i A2 emisije gasova staklene bašte iz Četvrtog izveštaja IPCC. Simulacije klime za lokacije meteoroloških stanica na razmatranim slivovima najpre su verifikovane za istorijski period, a zatim upotrebljene za simulaciju oticaja u budućnosti u periodima 2014-2050 i 2051-2100. Pored rezultata koji ukazuju na generalnu tendenciju smanjenja oticaja do kraja 21. veka, u radu se ukazuje na probleme koji se u ovom postupku javljaju, čime se daje osnova za kritičko sagledavanje dobijenih rezultata.

Ključne reči: klimatske promene, hidrološki režim, reka Moravica, reka Crni Timok

Problems in assessing climate change impact by hydrologic modelling: case studies of the Moravica and Crni Timok basins

ABSTRACT: The analysis of climate change impact on hydrologic regime of the Moravica River basin to Gradina and the Crni Timok River basin to Bogovina is presented in the paper. Hydrologic models for the two basins were developed using the HBV-light model for this purpose. The models are calibrated and validated against the observed precipitation, temperature and runoff data before 2013. The impact assessment is based on the precipitation and temperature simulated by the regional EBU-POM climate model under the A1B and A2 gas emission scenarios from the 4th IPCC Assessment Report. The simulated climate at locations of the meteorological stations are first verified against the observed climate, and then used for simulation of future hydrologic regime for 2014-2050 and 2051-2100. In addition to the results that indicate a general runoff decrease, the paper describes the problems associated with the impact assessment procedure and provides a basis for a critical review of the results on the impacts.

Keywords: climate change, hydrologic regime, the Moravica River, the Crni Timok River

¹ Dr Jasna Plavšić, v. prof., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, P. fah 42, 11120 Beograd, Srbija, jplavsic@grf.bg.ac.rs

² Filip Muhić, master inženjer građevinarstva, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, P. fah 42, 11120 Beograd, Srbija, muhic.filip@gmail.com

³ Aleksandar Petrović, master inženjer građevinarstva, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, P. fah 42, 11120 Beograd, Srbija, alekp111@gmail.com

⁴ Andrijana Todorović, asistent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, P. fah 42, 11120 Beograd, Srbija, andrijana@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Увод

Климатске промене, које се највише огледају кроз пораст просечних температура на планети у последњих 30-так година, сматрају се сувише интезивним да би биле природне, па се сматра да су настале као утицај начина живота људи, односно модерне цивилизације. Као главни кривци за климатске промене издвојени су гасови стаклене баште, а посебно угљен-диоксид. Ови гасови апсорбују већу количину Сунчеве енергије у атмосфери, што повећава температуру ваздуха. Осмотрено повећање просечне глобалне температуре ваздуха и океана данас се наводи као глобално отопљавање, које је уз видљиво топљење снега и леда и подизање нивоа мора јасан показатељ промене климе (IPCC, 2013).

Утицај климатских промена на водне ресурсе постао је предмет великог броја истраживања током последње две деценије. Промене у глобалном хидролошком циклусу за сада нису доказане, али се предвиђа повећање евапотранспирације, а самим тим и убрзавање кружења воде у природи.

За процену утицаја климатских промена на хидролошки режим река генерално се користе два приступа. Први приступ се заснива на анализи трендова осмотрених података (Плавшић и Обушковић, 2012). Овакав приступ може да буде прихватљив у неком релативно краћем временском периоду, док екстраполација трендова у далеку будућност није поуздана с обзиром да је познато да климатски параметри и утицај имају, поред тренда, и сложени циклични карактер (Стојковић и сар., 2012, 2014).

Други приступ се заснива на симулацијама хидролошког режима помоћу хидролошких модела за које се, као улаз, користе климатски параметри добијени симулацијама из климатских модела. Предност овог приступа је та што се може применити и за хидролошке симулације и у даљој будућности. Недостатак овог приступа је у томе што се модел калибрише на основу података из периода осматрања, односно за услове који су важиви у периоду осматрања, док нема гаранција да ће исти услови важити и у будућности.

У овом раду приказују се резултати хидролошког моделирања и анализе утицаја климатских промена на режим два слива: реке Моравице до хидролошке станице Градина и реке Црни Тимок до станице Боговина. За хидролошко моделирање примењен је модел HBV-light. Модели оба слива калибрисани су и верификовани на основу осмотрених падавина, температура и утицаја у периоду до 2013. године. Утицај климатских промена је затим процењен коришћењем модела и климатских параметара симуларних помоћу регионалног модела EBU-POM (Ђурђевић & Рајковић, 2010) према сценаријима А1В и А2 емисије гасова стаклене баште (IPCC, 2000). Симулације климатских параметара за локације метеоролошких станица на разматраним сливовима најпре су верификоване за период осматрања, а затим употребљене за симулацију будућег хидролошког режима у периодима 2014-2050 и 2051-2100. На конкретним примерима два разматрана слива, исказало се неколико проблема у поступку процене утицаја климатских промена. Ови проблеми се наглашавају како би се омогућило критичко сагледавање резултата и допринело процени неизвесности у добијеним променама хидролошког режима два слива у будућности.

2 Подаци и методологија

2.1 Слив Моравице до Градине

Река Моравица је притока Западне Мораве, а површина слива до станице Градина износи 735 км² (слика 1). Станица Градина је основана 1973. године, од када се на њој мери проток. Низводна станица Ариље, до које површина слива износи 830 км², има дужи низ протока и коришћена је за попуњавање недостајућих података на станици Градина. За моделирање су коришћени подаци о дневним падавинама са падавинских станица Осоница, Кушићи, Косовица и Ивањица, као и подаци о средњим дневним температурама са станица Ивањица и Пожега.



Слика 1. Слив реке Моравице и распоред станица на делу сливу до станице Градина.

Подаци осматрања су били на располагању за период од 1988-2013, али су сви нивои имали недостајуће податке. Нивои дневних падавина нису попуњавани, већ су падавине на сливу одређене методом Тисенових полигона на основу расположивих података у сваком појединачном дану (тј. коришћене су различите поделе полигона за различите комбинације станица). Низ температура на станици Ивањица је попуњен једноструком линеарном регресијом са температурама на станици Пожега. У низу протока на хидролошкој станици Градина подаци су највише недостајали у периоду од 2005. до 2008, па је низ попуњен коришћењем степене регресије са низводном станицом Ариље (Петровић, 2014, 2015). Поред тога, на располагању су биле и месечне вредности потенцијалне евапотранспирације (РЕТ) од 1988. до 2006. године за станицу Пожега одређене у РХМЗ методом Пенман-Монтита (ФАО; Allen et al., 1998).

Просечне годишње падавине на сливу Моравице до станице Градина у вишегодишњем периоду 1988-2013 процењене су на 906 мм, док просечан годишњи отицај износи 385 мм или 42,5%.

2.2 Слив Црног Тимока до Боговине

Слив Црног Тимока до станице Боговина налази се у источној Србији и припада сливу реке Тимок (слика 2). Површина слива до Боговине износи 467 km². За моделирање су коришћене дневне падавине са падавинских станица Бољевац, Луково и Подгорац, од којих је последња мало изван слива. Подаци о средњим дневним температурама су презети са станице Зајечар која је најближа метеоролошка станица са мерењем температуре. Хидролошка станица Боговина је основана 1956, а проток се мери од 1962. године.



Слика 2. Слив Црног Тимока и распоред станица на делу слива до станице Боговина.

Подаци су генерално били на располагању од 1962. године. Низови осматрених протока и температура су непрекидни и није постојала потреба за попуњавањем недостајућих података. Са друге стране, све падавинске станице имале су периоде без забележених података, али је тај проблем решен применом различитих комбинација Тисенових полигона (Мухић, 2015). Потенцијална евапотранспирација на месечном нивоу је срачуната модификованом Харгривсовом методом (Трајковић, 2007), при чему су коришћени подаци о максималним и минималним месечним температурама на станици Зајечар.

На сливу Црног Тимока до станице Боговина, просечне годишње падавине процењене су на 776 мм, док је просечан годишњи отицај 372 мм или 48%.

2.3 Методологија

Поступак анализе утицаја климатских промена на хидролошки режим на два разматрана слива састојао се од следећих корака: 1) калибрација и верификација хидролошког модела, 2) верификација симулиране климе за период осматрања, 3) хидролошке симулације са симулираном климом за референтни период и два будућа периода, и 4) процена утицаја климатских промена на количине вода.

Калибрација и верификација хидролошког модела. За формирање хидролошког модела за разматране сливове коришћен је софтверски пакет HBV-light (Seibert & Vis, 2012). HBV-light је концептуални модел за континуалне хидролошке симулације, настао као упрошћена верзија модела HBV (Lindström et al., 1997). Ако се слив подели на зоне према висинама и према заступљености вегетације, модел се користи као семи-дистрибуиран. Циклус отицаја моделира се са четири модула: модул за снег, модул за незасићено земљиште, модул за засићено земљиште и модул за пропагацију таласа. Детаљнији опис модела може се наћи у радовима Ивковић и сар. (2012) и Петровића (2014). За прорачун отицаја модел користи улазне податке о дневним падавинама и температурама на сливу, као и податке о потенцијалној евапотранспирацији на месечном нивоу.

Просечне падавине на оба слива су одређене применом методе Тисенових полигона на основу расположивих података са падавинских станица. Овако одређене падавине се везују за одређену надморску висину, док се у моделу падавине коригују према надморској висини појединих зона са градијентом који је параметар модела. Подаци о температурама су коришћени само са по једне станице на сваком сливу, док се температура мења у моделу са надморском висином и са градијентом који је такође параметар модела.

Калибрација модела је у оба случаја спроведена применом аутоматске процедуре са оптимизационим алгоритмом који је уграђен у модел HBV-light. При оптимизацији параметара модела коришћене су композитне критеријумске функције које комбинују коефицијент ефикасности Неш-Сатклифа за протоке и логаритмоване протоке (са тежинама 0,20 и 0,80 за слив Моравице и једнаким тежинама за слив Црног Тимока).

Верификација симулиране климе за период осматрања. Овај корак је неопходан да би се установило да ли резултати климатског моделирања према изабраним сценаријима репродукују осмотрене падавине и температуре на сливу. Свака разлика између симулиране и осмотрене климе представља неизвесност у коначним оценама која потиче од климатског моделирања. Познато је да се у климатском моделирању спроводе разни поступци корекција резултата моделирања као што је *downscaling* и корекција расподеле симулираних вредности. Уколико су ове интервенције добро урађене, просечне вредности би требало да буду очуване, па чак и средишњи део расподеле. Репродукција крајева расподеле и екстрема обично није задовољавајућа, тако да би верификацију симулиране климе требало свакако урадити ако је циљ да се анализирају велике и мале воде.

Хидролошке симулације са симулираном климом за референтни период. Климатски модели и хидролошки модели имају своје неизвесности, а у комбинацији дају збирну неизвесност која се може проценити поређењем резултата хидролошких симулација.

Ако се пореди осмотрени отицај са симулираним добијеним из осмотреног улаза, добиће се увид у неизвесност хидролошког модела. Поређењем хидролошких симулација са осмотреним улазом и улазом из климатских модела, стиче се увид како се неизвесности климатског модела пропадају кроз хидролошки модел. Евидентно је да опција поређења осмотреног отицаја са симулираним на основу улаза из климатских модела садржи обе неизвесности и као таква је најтежа за интерпретацију.

Процена утицаја климатских промена на количине вода. Утицај климатских промена на количине вода у будућности треба проценити поређењем историчких симулација, а то су хидролошке симулације са улазом из климатских модела за референтни период и за будућност.

У табелама 1 и 2 приказани су карактеристични периоди за анализу на два слива: периоди калибрације и верификације хидролошког модела, референтни период за процену утицаја промене климе и два будућа периода.

Табела 1. Карактеристични периоди за анализу на сливу Моравице до Градине (периоди се односе на хидролошке године са почетком од 1. новембра)

Расположиви осмотрени подаци (ОСМ)	1988-2013	Калибрација (КАЛ)	1988-2000
		Верификација (ВЕР)	2000-2013
Утицај климатских промена		Референтни период (РЕФ)	1962-2013
		Ближа будућност (БУД1)	2014-2050
		Даља будућност (БУД2)	2051-2100

Табела 2. Карактеристични периоди за анализу на сливу Црног Тимока до Боговине (периоди се односе на хидролошке године са почетком од 1. новембра)

Расположиви осмотрени подаци (ОСМ)	1963-2007	Калибрација (КАЛ)	1975-1992
		Верификација (ВЕР)	1965-1975 1993-2003
Утицај климатских промена		Референтни период (РЕФ)	1963-2013
		Ближа будућност (БУД1)	2014-2050
		Даља будућност (БУД2)	2051-2100

3 Резултати и дискусија

3.1 Калибрација и верификација хидролошког модела

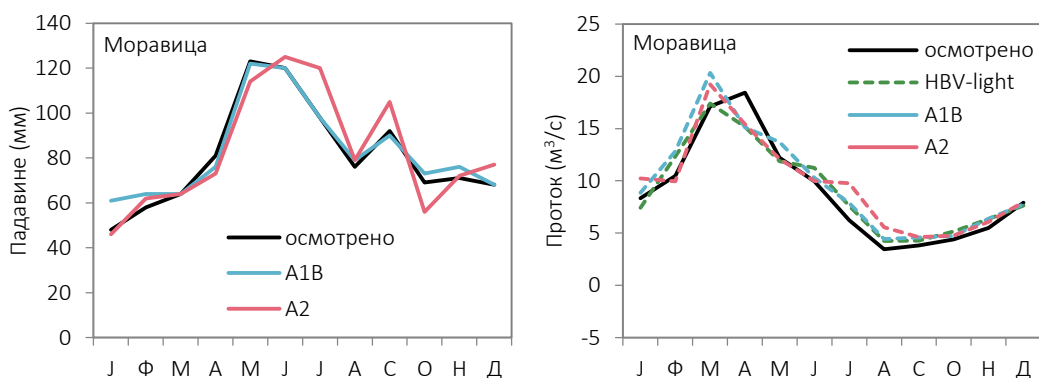
Иако је циљ сваке калибрације да се добије што боље слагање симулираних хидрограма са осмотреним, при калибрацији модела за потребе анализе климатских промена од превасходног је значаја да модел репродукује просечан отицај на сливу и његову унутаргодишњу расподелу (Todorović & Plavšić, 2015). У случају оба разматрана слива у овом погледу су се јавили одређени проблеми. И поред поновљених покушаја, репродукција унутаргодишње расподеле отицаја на сливу Моравице моделом није била идеална, док је нешто боље слагање унутаргодишње расподеле постигнуто на рачун лошијих показатеља слагања (тј. Неш-Сатклифове ефикасности). Проблеми су се углавном односили на репродукцију отицаја услед снега, при чему је симулирани отицај од снега

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

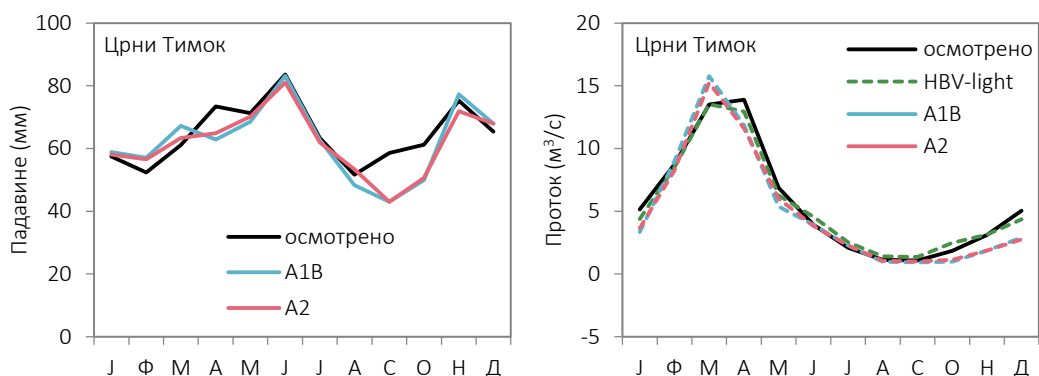
стизао раније него осмотрени. Разлози за ове проблеме се највероватније крију у приступу који модел HBV-light користи у модулу за снег за прорачун губитака на евапотранспирацију, и неким нереалним вредностима параметара које се добијају аутоматском калибрацијом. Због пословично непоузданих података са падавинских станица, постоји могућност и да расположиви подаци не одсликавају добро падавински режим на сливу.

У случају слива Црног Тимока, присуство карста на сливу није могло да буде описано директно у моделу како због концептуалних ограничења модела, тако и због недостатка одговарајућих података. У случају овог слива, слагање симулираних хидрограма са осмотреним је било на сасвим задовољавајућем нивоу, али биланс вода на сливу није могао да се репродукује. Овакав резултат је последица тога да HBV-light нема контролу биланса у односу на осмотрене податке и прецењује евапотранспирацију упркос слагању у количини отицаја. Тако је за овај слив са просечним годишњим падавинама на сливу од 776 мм и годишњим отицајем од 372 мм (а сходно томе и са просечном евапотранспирацијом од око 400 мм годишње), моделом добијен приближно исти отицај, али знатно већа евапотранспирација од око 530 мм.

Иако ови резултати упућују на опрез, солидна репродукција просечних отицаја и унутаргодишње расподеле отицаја (видети слике 3 и 4 десно) дозволила је наставак анализа на ова два слива. Просечне разлике у средњим месечним протоцима на сливу Моравице износе 13%, а на сливу Црног Тимока 14%.



Слика 3. Верификација падавина из климатских модела (лево) и резултати симулираних средњих месечних протока (десно) за период ОСМ – слив Моравице.



Слика 4. Верификација падавина из климатских модела (лево) и резултати симулираних средњих месечних протока (десно) за период ОСМ – слив Црног Тимока.

3.2 Верификација климатских улаза и хидролошких симулација у периоду осматрања

Верификација падавина и температура из климатских модела према два сценарија у периодима расположивих осматрања на два слива показала је да се симулиране температуре у просеку добро слажу са осмотреним температурама. Мала одступања јављају се једино за јануарске температуре на сливу Моравице према сценарију А2.

Слагање унутаргодишње расподеле падавина из климатских модела са осмотреним показује већа одступања (слике 3 и 4 лево). На сливу Моравице та су одступања значајнија за сценарио А2 и јављају се у периоду од јула до октобра. На сливу Црног Тимока значајна одступања се јављају за оба сценарија од августа до октобра. Просечне разлике на сливу Моравице износе 5% и 9% за сценарија А1Б и А2, а на сливу Црног Тимока 8% и 7%.

Имајући у виду ова неслагања у падавинама, за слагање унутаргодишње расподеле протока се може рећи да прати оно што се дешава у улазним величинама. На сливу Моравице (слика 3 десно) у летњем периоду добијају већи отицаји са симулираним климатским улазом према А2 него са осмотреним, а на сливу Црног Тимока (слика 4 десно) у јесен се добијају знатно мањи средњи месечни протоци услед мањих симулираних падавина по оба сценарија. Просечне разлике средњих месечних протока добијених са осмотреним и симулираним климатским улазом на сливу Моравице износе 7% и 14% за сценарија А1Б и А2, а на сливу Црног Тимока 24% и 21%.

3.3 Утицај промене климе у будућности

Према резултатима климатских модела, на локацијама метеоролошких станица Ивањица и Зајечар које су коришћене у хидролошким моделима за два разматрана слива очекује се пораст средњих годишњих температура од 0,7 до 1°C у ближој будућности и од око 3°C у даљој будућности према оба климатска сценарија.

Процењене промене падавина на два разматрана слива приказане су у табелама 3 и 4 и на сликама 5 и 6. У ближој будућности два сценарија показују супротне тенденције, али очекиване промене су мале. По сезонама и на годишњем нивоу промене падавина према сценарију А1Б не прелазе десетак процената у апсолутној вредности на оба слива, док су промене према сценарију А2 израженије на сливу Црног Тимока, и то у погледу повећања јесењих и зимских падавина (за 16% односно 12%). У даљој будућности, међутим, промене падавина су значајније и оба сценарија указују на смањење падавина и на годишњем нивоу и по сезонама (осим зимских падавина на Црном Тимоку и пролећних падавина на Моравици). Најдрастичније је летње смањење падавина од око 30% на оба слива и по оба сценарија. На сливу Моравице се очекује веће смањење падавина него на сливу Црног Тимока.

Резултати хидролошких симулација са климатским пројекцијама показују (табеле 3 и 4 и слике 7 и 8) да тенденције у отицају прате тенденције у падавинама, с тим да су промене у отицају појачане у односу на промену у падавинама. Најдрастичнији пример је у даљој будућности на сливу Моравице где се за 16% мање падавина према А1Б очекује 36% мање отицаја. Међутим, и за 9% више падавина на сливу Црног Тимока према А2 очекује се 21% више отицаја, што показује да хидролошки модел само појачава промене, а не и да потцењује или прецењује отицај.

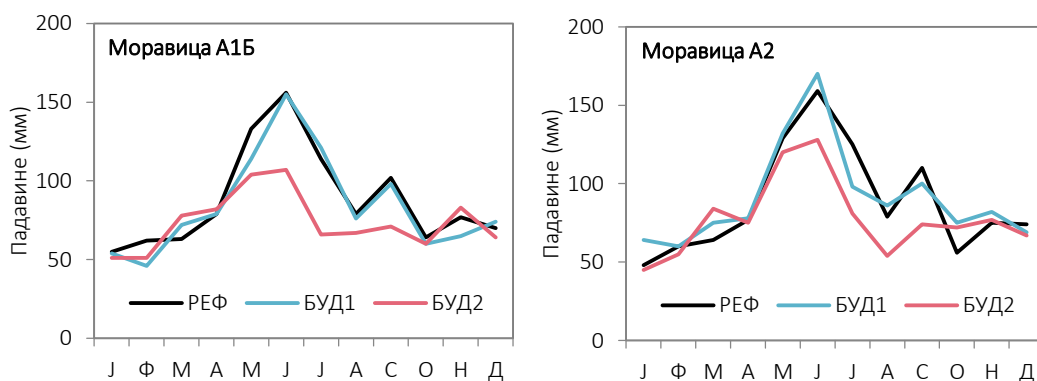
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Табела 3. Промена падавина и отицаја у будућности за слив Моравице (у %).

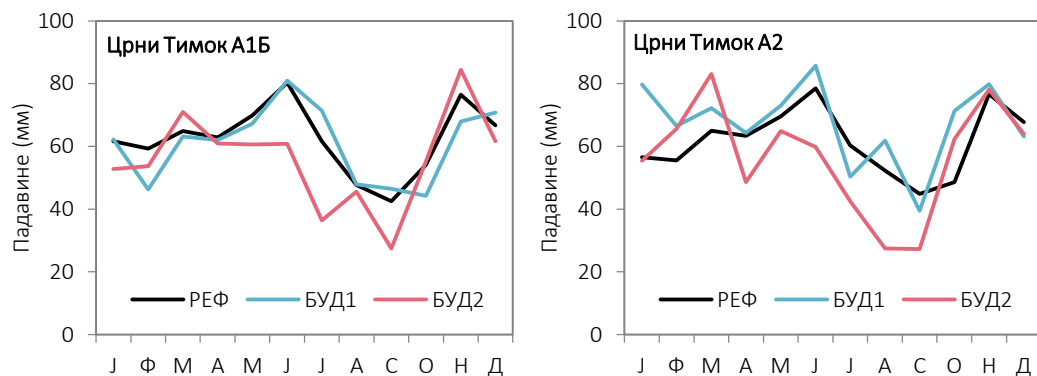
Сезона	2013-2050 (БУД1)				2051-2100 (БУД2)			
	Падавине		Отицај		Падавине		Отицај	
	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
Зима (ДЈФ)	-7.0	6.0	-4.5	18.0	-11.2	-8.2	-18.1	-18.4
Пролеће (МAM)	-3.6	5.6	-18.4	2.6	-4.0	3.3	-32.3	-22.4
Лето (ЈЈА)	0.9	-2.5	-10.4	-1.0	-31.2	-27.5	-53.3	-35.0
Јесен (СОН)	-8.2	6.6	-8.2	9.4	-11.9	-7.5	-37.7	-28.1
Годишње	-3.8	3.1	-11.8	5.8	-16.1	-11.7	-35.5	-25.9

Табела 4. Промена падавина и отицаја у будућности за слив Црног Тимока (у %).

Сезона	2013-2050 (БУД1)				2051-2100 (БУД2)			
	Падавине		Отицај		Падавине		Отицај	
	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
Зима (ДЈФ)	-4.4	16.4	6.3	46.4	-10.4	2.9	-2.0	4.9
Пролеће (МAM)	-2.6	5.9	-30.0	5.6	-2.5	-0.7	-39.2	-29.3
Лето (ЈЈА)	5.6	3.5	-11.6	13.6	-24.7	-32.1	-46.0	-43.5
Јесен (СОН)	-8.3	12.1	17.3	76.7	-3.4	-1.4	5.1	-9.9
Годишње	-2.3	9.3	-15.5	21.5	-10.3	-8.1	-27.2	-21.1

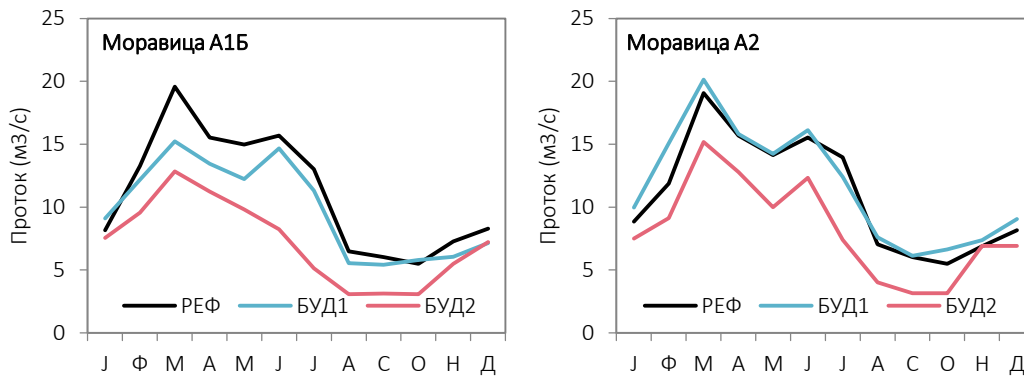


Слика 5. Промена падавина у будућности према климатском сценарију А1Б (лево) и А2 (десно) за слив Моравице.

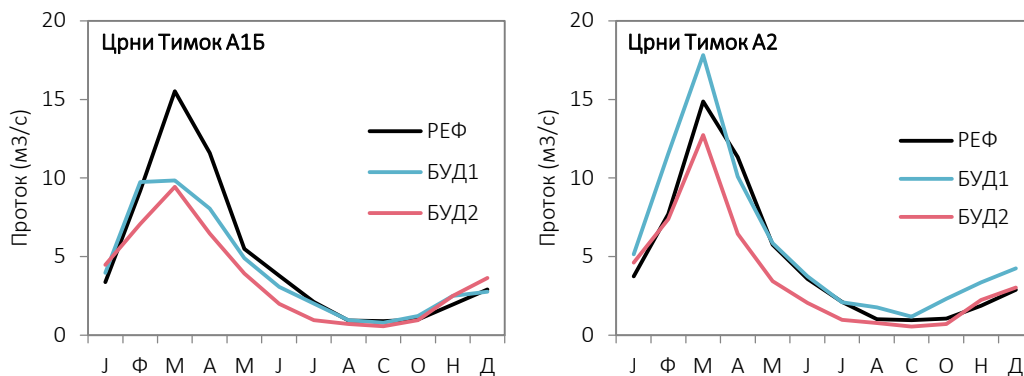


Слика 6. Промена падавина у будућности према климатском сценарију А1Б (лево) и А2 (десно) за слив Црног Тимока.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 7. Промена отицаја у будућности према климатском сценарију А1Б (лево) и А2 (десно) за слив Моравице.



Слика 8. Промена отицаја у будућности према климатском сценарију А1Б (лево) и А2 (десно) за слив Црног Тимока.

Због различитих смерова промена отицаја у ближој будућности према два климатска сценарија (између -12% и +6% на сливу Моравице и између -16% и +21% на сливу Црног Тимока), очигледно је да је немогуће донети валидан закључак о тенденцијама без великих неизвесности. На нивоу сезона промене према два сценарија су такође контрадикторне, а и када су истог знака, неизвесности су огромне. На пример, на сливу Црног Тимока симулације указују на повећање јесењег отицаја између 17% и 77%.

Неизвесност је мања за даљу будућност, што делује парадоксално, где се смањење отицаја јавља као јасан сигнал на оба слива. Веће смањење отицаја се очекује на сливу Моравице (између 26% и 36%) него на сливу Црног Тимока (између 21% и 27%). Као и код падавина, очекује се промена у унутаргодишњој расподели отицаја, при чему је та прерасподела другачија на два разматрана слива. На сливу Моравице најмање смањење отицаја се очекује током зиме (око 18%), а највеће током лета (између 35% и 53%). На сливу Црног Тимока се не очекују промене током зиме и јесени, док је смањење значајно у преосталим сезонама (између 29% и 39% у пролеће и око 45% у лето).

4 Закључци

На примеру два разматрана слива може се закључити да постоји више фактора који утичу на неизвесности пројекција утицаја климатских промена на хидролошки режим. Најпре, нивози падавина који су резултат климатског моделирања не репродукују идеално просечан падавински режим на сливу у периоду осматрања, мада просечне разлике од око 7-8% вероватно не превазилазе неизвесности у мерењу падавина на станицама и у оцени прадавина на сливу.

Међутим, разлике које се јављају између симулираних и осматрених падавина се различито пропадају кроз хидролошке симулације. На сливу Моравице разлике између отицаја симулираног са осматреним падавинама и оним из климатских модела се мало повећава у односу на разлике у падавинама: са 5% за падавине на 8% за отицај за сценарио А1Б и са 9% за падавине на 14% за отицај за сценарио А2. С друге стране, на сливу Црног Тимока неизвесност у симулираним падавинама се значајније пропада кроз модел: са 8% за падавине на 24% за отицај за сценарио А1Б и са 7% за падавине на 21% за отицај за сценарио А2. С обзиром да је неизвесност хидролошког модела слична на два слива (13-14%), разлози за овако велику пропагацију неизвесности на Црном Тимоку у поређењу са Моравицом се можда могу тражити у проблемима који су постајали на овом сливу у вези са репродукцијом биланса вода због присуства карста. Међутим, веома сложени услови на сливу и велики број фактора који на то утичу захтевају детаљнију анализу овог проблема.

Комбинована неизвесност климатског и хидролошког моделирања на сливу Моравице је, очекивано, већа од обе појединачне неизвесности и износи 15% односно 18% за два климатска сценарија А1Б и А2. На сливу Црног Тимока комбинована неизвесност је такође већа од обе појединачне неизвесности за сценарио А1Б и износи 28%, али за сценарио А2 износи 18%, што је мање од 21% колико износи неизвесност падавина пропагирана кроз хидролошки модел.

Процентуалне промене у средњим годишњим протоцима на два разматрана слива превазилазе неизвесности у моделирању, осим у случају блиске будућности на сливу Црног Тимока према сценарију А2. Имајући у виду да моделирање указује на смањење расположивих количина воде, све упућује на закључак да је веома важно да се будућа истраживања усмере на смањивање неизвесности у проценама утицаја климатских промена на водне ресурсе кроз поузданије климатско и хидролошко моделирање. Такође, укључивање више климатских сценарија би помогло да се неизвесности боље процене.

Захвалност

Рад је настао у оквиру истраживања у пројекту технолошког развоја ТР 37005 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја под називом „Утицај климатских промена на водне ресурсе Србије“. Аутори се захваљују Републичком хидрометеоролошком заводу Србије за стављање на располагање података за истраживање. Аутори се такође захваљују проф. др Стевану Прохаски из Института „Јарослав Черни“ на корисним сугестијама, доц. др Владимиру Ђурђевићу са Физичког факултета Универзитета у Београду на припреми климатских сценарија, проф. др Весни Ристић-Вакањац са Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

на консултацијама везаним за слив Црног Тимока и асист. Александри Илић са Грађевинско-архтектонског факултета Универзитета у Нишу на техничкој помоћи.

Литература

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization, Rome. Dostupno na <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>.
2. IPCC (2000) Emission Scenarios, Nakićenović N. and Swart R. (eds.), International Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
3. IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
4. Đurđević V., Rajković B. (2010) Development of the EBU-POM coupled regional climate model and results from climate change experiments, in *Advances in Environmental Modeling and Measurements*. Eds. Mihajlovic T.D., Lalic B. Nova Publishers, pp.23-32.
5. Ivković, M., Plavšić, J., Vladiković, D. i Jerinić, J. (2012) Primena modela HBV za hidrološku prognozu na slivu reke Jadar. *Vodoprivreda*, 44(4-6), 257-263.
6. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. (1997) Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology*, 201, 272–288.
7. Мухић Ф. (2015) Примена модела HBV-light за оцену утицаја климатских промена на сливу Црног Тимока до Боговине, мастер рад, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, 66 стр.
8. Петровић А. (2014) Моделирање слива реке Моравице до Градине помоћу модела HBV-light, дипломски рад, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, 78 стр.
9. Петровић А. (2015) Примена модела HBV-light за оцену утицаја климатских промена на сливу реке Моравице до Градине, мастер рад, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, 89 стр.
10. Plavšić J., Obušković Z. (2012) Problemi u analizi trenda u hidrometeorološkim serijama pri ispitivanju uticaja klimatskih promena, *Zbornik radova 16. naučnog savetovanja SDHI i SDH*, 523-537.
11. Seibert J., Vis M.J.P. (2012) Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.
12. Stojković, M., Plavšić, J., Prohaska, S. (2012) Stohastička analiza serija srednje godišnjih proticaja na stanicama na Dunavu, *Zbornik radova 16. naučnog savetovanja SDHI i SDH*, 538-554.
13. Stojković M., Plavšić J., Prohaska S. (2014) Dugoročne promene godišnjih i sezonskih proticaja: primer reke Save, *Vodoprivreda*, 46(1-6), 39-48.
14. Trajković S. (2007) Jednostavna empirijska formula za proračun referentne evapotranspiracije, *Vodoprivreda*, 39: 397-400.
15. Todorović A., Plavšić J. (2015) The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *Journal of Water and Climate Change*, doi: 10.2166/wcc.2015.086.

Утицај климатских промена на хидролошке режиме на сливовима Колубаре, Топлице и Млаве

Андријана Тодоровић¹
Јасна Плавшић²

АПСТРАКТ: У овом раду анализиран је утицај климатских промена на хидролошке режиме слива реке Колубаре до водомерне станице (в.с.) Словац, реке Топлице до в.с. Дољевац и реке Млаве до в.с. Велико село. Утицај климатских промена је оцењен поређењем статистика симулираних хидролошких величина током три периода у будућности (до 2100. године), са статистикама током референтног периода (1961-1990). За израду хидролошких коришћене су климатске пројекције са два климатска сценарија (А1В и А2) и хидролошки модел HBV-light са десет оптимизованих скупова параметара. На овај начин добијене су расподеле релативних промена хидролошких величина у будућности у односу на референтни период. У овом раду су разматране су промене у запремини годишњег отицаја, у великим, средњим и малим водама и садржај воде у земљишту током три периода у будућности: блиска будућност (2015-2040), средина 21. века (2040-2070) и далека будућност (2070-2100).

Кључне речи: климатске промене, HBV-light, слив реке Колубаре, слив реке Топлице, слив реке Млаве

Climate change impact on hydrologic regimes of the Kolubara, Toplica and Mlava river catchments

ABSTRACT: An analysis of climate change impact on hydrologic regimes of three catchments in Serbia is presented: the Kolubara River catchment upstream of the Slovac stream gauge, the Toplica River catchment upstream of the Doljevac stream gauge and the Mlava River catchment upstream of the Veliko Selo stream gauge. The impact of climate change is assessed by comparing different statistics of hydrologic variables simulated over three future periods to the corresponding statistics simulated over the baseline period (1961-1990). To account for the uncertainties stemming from the emission scenarios and hydrologic models, the hydrologic projections are developed with the outputs of a chain of Global and Regional Climate Models (GCM-RCM chains) run under two emission scenarios (A1B and A2), and with ten parameter sets of the HBV-light hydrologic model. In this way, distributions of the relative changes in the hydrologic variables are obtained. In this paper changes in high, median and low flows annual runoff and soil moisture are estimated for three future periods, namely near future (2015-2040), mid-21st century (2040-2070) and distant future (2070-2100).

Keywords: climate change, HBV-light, the Kolubara River catchment, the Toplica River catchment, the Mlava River catchment

¹ Андријана Тодоровић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, andrijana@hikom.grf.bg.ac.rs

² В. проф. др Јасна Плавшић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, jplavsic@grf.bg.ac.rs

1 Увод

Анализа утицаја климатских промена обично подразумева примену модела падавине-отицај за симулацију хидролошког режима у будућим периодима на основу климатских пројекција, односно предикција климатских величина за претпостављени сценарио пораста концентрације гасова стаклене баште (енгл. *greenhouse gases* – GHG). Климатске пројекције се добијају применом глобалних климатских модела (енгл. *General Circulation Models* – GCM), који симулирају климатске величине за претпостављени сценарио пораста концентрације гасова стаклене баште. Просторна резолуција резултата GCM-а је веома ситна, па се за потребе хидролошког моделирања резолуција мора укрупнити (енгл. *downscaling*). Укрупњавање резолуције GCM-а се најчешће врши применом тзв. регионалних климатских модела (енгл. *Regional Climate Models* – RCM), који имају знатно финију просторну резолуцију. Резултати GCM-а дефинишу почетне и граничне услове за RCM, а резултати интеграција глобалних и регионалних модела (енгл. *GCM-RCM chain*), односно расподеле симулираних величина, се коригују (енгл. *bias correction*) према расподелама осматрених података у неком референтном периоду (енгл. *baseline period*). За референтни се најчешће усваја период 1961-1990. На овај начин се добијају климатске пројекције (временске серије) које имају довољно фину резолуцију да се могу користити као улазни подаци за моделе падавине-отицај (нпр. Xu, 1999; Merz et al., 2011). Поступак израде хидролошких пројекција приказан је на слици 1. Како су за корекцију резултата интеграција потребна осматрања, за израду хидролошких пројекција су најчешће доступне само падавине и температуре, док се потенцијална евапотранспирација (*PET*) може одредити посредно, на основу пројекција температуре.

Утицај климатских промена на водне ресурсе се оцењује поређењем статистика хидролошких величина током будућег периода са вредностима тих статистика током референтног периода (нпр. просечни годишњи отицај или 95. перцентил протока). Међутим, GCM-RCM интеграције не могу да репродукују временске серије метеоролошких величина ни током референтног ни у будућим периодима, што утиче и на симулиране хидрограме, а самим тим и њихове на статистике (Refsgaard et al., 2014; Todorovic & Plavsic, 2015a). Стога се пореде статистике хидролошких величина (нпр. протока) у будућем периоду са статистикама током референтног периода које су добијене са симулираним метеоролошким улазом, а утицај климатских промена се најчешће квантификује као релативна промена.

Хидролошке пројекције се обично врше се неколико сценарија пораста концентрације GHG, са неколико GCM-RCM интеграција и више хидролошких модела различитих структура и / или са различитим скуповима параметара. На овај начин се добијају интервалне оцене релативних промена статистика хидролошких величина у будућности у односу на референтни период, које се могу представити њиховим и емпиријским функцијама расподеле (Todorovic & Plavsic, 2015a).

У овом раду су приказане хидролошке пројекције до 2100. године за сливове река Колубаре, Топлице и Млаве. Разматране су промене у великим и малим водама, средњим протоцима, просечном годишњем отицају и у просечном садржају воде у земљишту. Климатске пројекције су добијене са једном GCM-RCM интеграцијом, која је коришћена за симулацију климе за два сценарија пораста концентрације GHG. За хидролошке симулације коришћен је концептуални хидролошки модел HBV-light.



Слика 1. Анализа утицаја климатских промена на водне ресурсе – схема.
 Figure 1. Analysis of climate change impact on water resources – an outline.

2 Методологија

2.1 Слинови и подаци

У овом раду симулиране су хидролошке величине за три слива у Србији: слив реке Колубаре до водомерне станице (в.с.) Словац, реке Топлице до в.с. Дољевац и реке Млаве до в.с. Велико Село (Слика 2 и Табела 1). На овим сливовима доминирају листопадне шуме и пољопривредно земљиште, док је проценат урбанизованог земљишта занемарљив (мање од 2% од укупне површине слива) (Todorović, 2015).

За моделирање утицаја са ових сливова коришћена су осматрања дневних падавина и просечних дневних температура са станица Ваљево (Колубара), Копаоник, Куршумлија, Прокупље и Ниш (Топлица), и Црни Врх, Жагубица и РЦ Петровац (Млава, слика 3). Подаци о овим метеоролошким станицама дате су у табели 2.



Слика 2. Слинови реке Колубаре, реке Топлице и реке Млаве.
 Figure 2. The Kolubara, Toplica and Mlava River catchments.

Табела 1. Водомерне станице Словац (река Колубара), Доњевац (река Топлица) и Велико Село (река Млава).

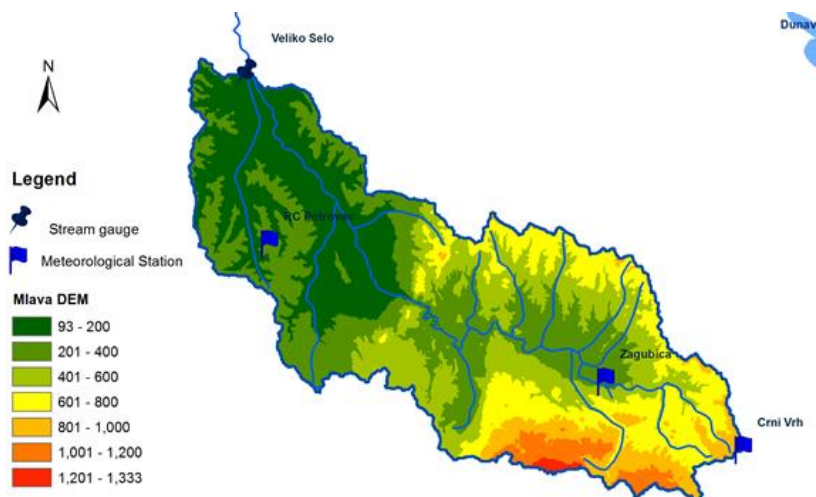
Table 1. The Slovac (Kolubara), Doljevac (Toplica) and Veliko Selo (Mlava) stream gauges.

Река	Водомерна станица	Површина слива [km ²]	Удаљеност од ушћа [km]	Расположиви подаци	Просечни протоци [m ³ /s]
Колубара	Словац	995	88	1954-2013	9.8
Топлица	Доњевац	2052	2.5	1980-2013	8.77
Млава	Велико Село	1277	48.2	1987-2013	7.5

Табела 2. Расположиви подаци о падавинама и температурама.

Table 2. Precipitation depths and temperatures available for hydrologic modelling purposes.

Слив	Станица	Надморска висина [m n.m.]	Географска ширина	Географска дужина	Расположиви подаци	Просек у периоду осматрања
Колубара	Ваљево	176	43 ° 11 '	21 ° 49 '	1951-2013	785.2 [mm] 11.3 [°C]
	Копаник	1711	43 ° 17 '	20 ° 48 '	1967-2013	939.4 [mm] 3.4 [°C]
Топлица	Куршумлија	383	43 ° 08 '	21 ° 16 '	1961-2013	639.1 [mm] 10.3 [°C]
	Прокупље	266	43 ° 14 '	21 ° 36 '	1951-2013	552.5 [mm] 10.9 [°C]
	Ниш	204	43 ° 20 '	21 ° 54 '	1947-2013	591.3 [mm] 11.8 [°C]
Млава	РЦ Петровац	282	44 ° 20 '	21 ° 20 '	1972-2013	689.5 [mm] 11.5 [°C]
	Жагубица	314	44 ° 12 '	21 ° 47 '	1972-2013	627.7 [mm] 10 [°C]
	Црни Врх	1027	44 ° 08 '	21 ° 58 '	1981-2013	759 [mm] 6.8 [°C]



Слика 3. Слив реке Млаве: метеоролошке и в.с. Велико Село.

Figure 3. The Mlava River catchment: meteorological stations and the Veliko Selo stream gauge.

2.2 Хидролошки модел HBV-light

За израду хидролошких пројекција коришћен је концептуални хидролошки модел HBV - light (Seibert & Vis, 2012), који је заснован на моделу HBV (Bergström, 1976; Bergström et al. 1992; Lindstrom, 1997).

Модел HBV-light намењен је континуалним хидролошким симулацијама, које се најчешће врше са дужином рачунског корака 1 дан, односно са дневним подацима. HBV-light садржи модуле за симулацију влаге у земљишту, за снег и за трансформацију отицаја. Постоји неколико алтернативних структура модела HBV-light (Seibert & Vis, 2010), а у овом раду је коришћена верзија са два резервоара подземних вода (слика 4).

Улазни подаци. За хидролошке симулације потребни су подаци о дневним падавинама, средњим дневним температурама и протоцима који се изражавају у mm / dan. Дневне вредности потенцијалне евапотранспирације (*PET*) се не уносе у модел као временска серија, већ као дневне вредности за сваки месец просечне године.

У модел је могуће унети податке са само једне падавинске, односно температурне станице, па се просторно осредњавање ових података мора урадити екстерно. Просечне падавине и температуре на сливу одређене су методом Тисенових полигона, уз корекцију за сваку висинску зону према методологији приказаној у Panagoulia (1995). Модел HBV-light омогућава корекцију осмотрених падавина и температура са надморском висином, при чему је претпостављен линеарни пораст висине падавина (PCALT, %/100 m) и линеарно смањење температуре са надморском висином (енгл. *lapse rate* TCALT, °C/100 m). Градијенти PCALT и TCALT су параметри који се оптимизују у калибрацији модела.

Потенцијална евапотранспирација (*PET*) је рачуната помоћу Намон-ове методе (Намон, 1961), која није захтевна у смислу потребних улазних података (метода за прорачун *PET* која је базирна на температурама), и за коју је потврђено да даје поуздана резултате за потебе хидролошких модела (Oudin et al., 2005). Према овој методи дневна *PET* се рачуна као:

$$PET = \left(\frac{DL}{12} \right)^2 \exp \left(\frac{T_a}{16} \right) \quad (1)$$

где је T_a просечна дневна температура и DL потенцијална дневна инсолација (изражена у h dan⁻¹). Вредност DL зависи од географске ширине φ станице на којој је осмотрена температура, и соларне деклинације δ (обе величине се изражавају у радијанима), и рачуна се за сваки дан из израза (Spitters et al., 1986):

$$DL = \frac{24}{\pi} \arccos \left(-\tan(\varphi) \tan(\delta) \right) \quad (2)$$

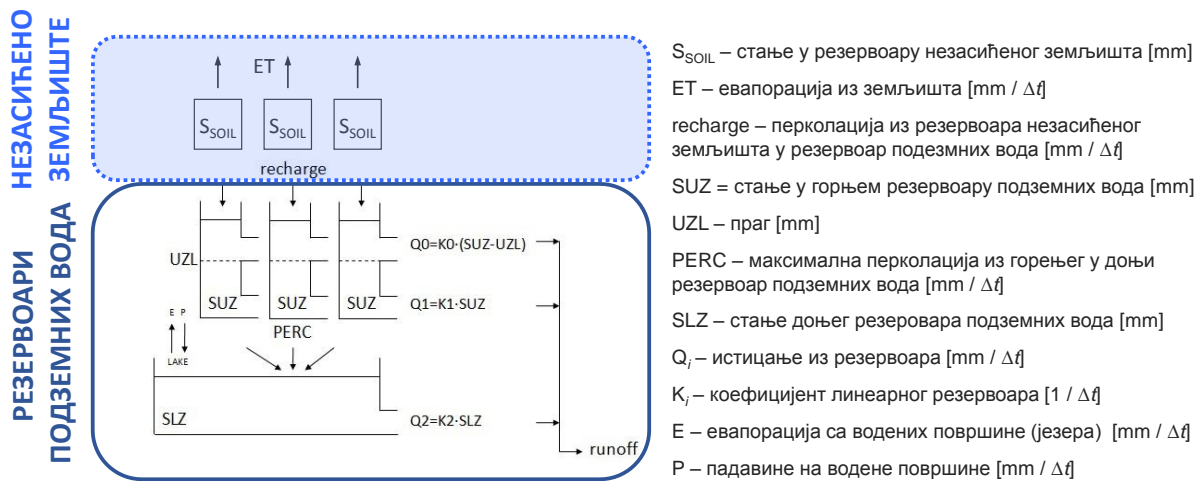
$$\delta = 0.4093 \sin \left(\frac{2\pi}{365} (D_n + 284) \right) \quad (3)$$

где D_n означава редни број дана у години.

Модул за снег. Падавине при температурама мањим од граничне (T_T) сматрају се снегом и као такве представљају улаз у резервоар снега. Модел HBV-light омогућава да се осмотрене падавине при овим температурама коригују, како би се компензовале грешке у осмотреним падавинама и сублимација снега, која се у моделу не симулира. Топљење снега се одређује применом методе степен-дан (енгл. *degree-day*). Ова метода подразумева да је топљење снега пропорционално разлици између температуре ваздуха

и температуре топљења снега која је у овом моделу једнака граничној TT , с тим да се део отопљеног снега (параметар CFR) задржава у снежном покривачу (Seibert & Vis, 2012). Такође, део отопљеног снега се може поново замрзнути при температурама мањим од TT . Симулације стања резервоара снега се врше независно за сваку висинску зону на сливу, с обзиром да свака зона има свој вектор улазних података (падавине и температуре се коригују за сваку зону према надморској висини), али су параметри модела исти за све зоне.

Симулација влаге у земљишту се састоји из симулације влаге у незасићеној зони земљишта и у резервоарима подземних вода. (горњи и доњи резервоар подземних вода, Слика 4). Биланс незасићене зоне земљишта чине падавине и / или отопљени снег, евапотранспирација и перколација у горњи резервоар подземних вода (енгл. *recharge*). Евапотранспирација и перколација зависе од садржаја влаге у земљишту, а максимални капацитет резервоара земљишта одређује параметар FC . Биланс горњег резервоара чине перколација из незасићене зоне земљишта и два истицања, док се биланс доњег резервоара подземних вода састоји из перколације из горњег резервоара и базни отицај. Истицања из резервоара подземних вода описана су једначинама линеарних резервоара. Као и са модулом за снег, свака висинска зона има свој резервар незасићене зоне земљишта и горњи резервоар подземних вода, и сопствени вектор улазних података (температуре и падавине и / или количине отопљеног снега), али су параметри модела исти за све зоне.



Слика 4. Схематски приказ структуре модела HBV-light.
 Figure 4. Scheme of the HBV-light model structure.

Трансформација отицаја у моделу HBV-light базира се на једначинама линеарног резервоара. Постоје два истицања из горњег резервоара подземних вода, при чему се Q_0 јавља само уколико у резервоару постоји више од UZL mm воденог талога (Слика 4). Коефицијенти резервоара ($1/\Delta t$) се разликују тако да је $K_0 > K_1 > K_2$. Три компоненте отицаја се сабирају у укупни отицај са слива, који се може додатно трансформисати преко троугаоне функције време-површина чија је база једнака $MAXBAS \cdot \Delta t$. Веће вредности $MAXBAS$ резултују расплињавањем и смањењем пикова поплавних таласа.

Ова функција омогућава да се симулирани боље прилагоде осмотреним хидрограмима, односно доприносе већој флексибилности модела (нпр. Schaepli et al., 2014).

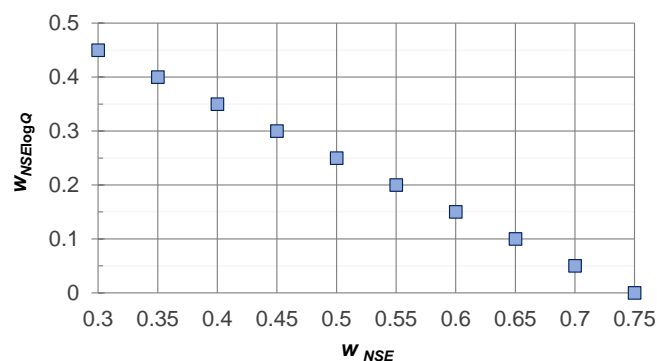
2.3 Калибрација и евалуација хидролошког модела

Хидролошки модел је калибрисан аутоматски применом уграђеног GAP алгоритма (енгл. *Genetic Algorithm and Powel local method*). Овај једнокритеријумски оптимизациони алгоритам се састоји из генетског алгоритма који проналази оптимални регион, и локалног оптимизационог алгоритма (*Powel method*), који додатно оптимизује критеријумску функцију у том региону (Seibert, 2000). Поступак калибрације почиње случајним одабиром N скупова из унапред дефинисаних опсега параметара.

У овом раду модели су калибрисани према композитној критеријумској функцији која садржи Неш-Сатклифов коефицијент ефикасности срачунат на основу протока (NSE , Nash & Sutcliffe, 1970) и логаритмованих протока ($NSE_{\log Q}$), и волуметријске грешке (VE). Композитна критеријумска функција OF дата је изразом:

$$OF = w_{NSE} \cdot NSE + w_{NSE_{\log Q}} \cdot NSE_{\log Q} + 0.25 \cdot VE \quad (4)$$

Ове критеријумске функције су одабране тако да се добије свестран хидролошки модел који може да репродукује динамику формирања отицаја и запремину отицаја, што је посебно важно у анализи утицаја климатских промена. Вредност Неш-Сатклифовог коефицијента преваходно одређује слагање осмотрених и симулираних протока у домену великих вода (нпр. Lindstrom, 1997; Hartmann & Bardossy, 2005; Krause et al., 2005; Moriasi et al., 2007; Criss & Winston, 2008; Gupta et al., 2009). Учешће $NSE_{\log Q}$ у композитној критеријумској функцији омогућава квантификацију слагања у домену малих вода (Oudin et al., 2006; Shafii & Smedt, 2009; de Vos et al., 2010; Pokhrel & Gupta, 2010; Singh et al., 2011), док VE одражава слагање запремина осмотреног и симулираног отицаја (Criss & Winston, 2008). Све критеријумске функције имају циљну вредност 1, што значи да је потребно максимизовати функцију OF . Критеријумској функцији VE је додељена тежина 0.25, док су тежине које су додељиване функцијама NSE (w_{NSE}) и $NSE_{\log Q}$ ($w_{NSE_{\log Q}}$) систематски вариране како је приказано на слици 5.



Слика 5. Тежине које се додељују критеријумским функцијама NSE и $NSE_{\log Q}$ у оптимизацији десет скупова параметара модела HBV-light.

Figure 5. Weights appointed to NSE and $NSE_{\log Q}$ objective functions in optimisation of parameter sets of the HBV-light hydrologic model.

Калибрациони и евалуациони периоди за хидролошки модел приказани су у табели 3. Све симулације почињу са хидролошком годином (од 1. октобра до 30. септембра наредне године), па нема преклапања између калибрационих и евалуационих периода. Свакој симулацији претходи једна хидролошка година намењена „загревању“ модела (енгл. *warm-up, spin-up*).

Табела 3. Калибрациони и евалуациони периоди (хидролошке године).
Table 3. Calibration and evaluation periods (water years).

СЛИВ	КАЛИБРАЦИОНИ ПЕРИОД	ЕВАЛУАЦИОНИ ПЕРИОД
Колубара	1961-1990	2000-2013
Топлица	1981-2000	2000-2013
Млава	1988-2000	2000-2013

2.4 Израда хидролошких пројекција до 2100. године

Хидролошке пројекције израђене су са хидролошким моделом HBV-light (са 10 оптимизованих скупова параметара) и са климатским пројекцијама до 2100. године. Период од 2100 године је подељен на три периода: блиска будућност (2015-2040), средина 21. века (2040-2070) и далека будућност (2070-2100). Све симулације су вршене са дневним рачунским кораком током хидролошких година, уз једну хидролошку годину пре сваке симулације за „загревање модела“.

Климатске пројекције су добијене применом GCM-RCM интеграције ECHAM5-EBU-ROM са сценаријима пораста концентрације гасова стаклене баште A1B и A2 (IPCC, 2000). Регионални климатски модел EBU-ROM обухвата Евро-медитеранску област и има хоризонталну резолуцију атмосферске компоненте $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, односно $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ за океанску компоненту (потпуно повезани атмосферско-океански модел, Djurdjevic & Rajkovic, 2008, 2010). Расподеле резултујућих падавина и температура су кориговане према осмотреним подацима на метеролошким станицама. Релативне промене у годишњим падавинама, просечним годишњим температурама и годишњој PET (оцењена методом Намон-а) на три разматрана слива током три будућа периода у односу на референтни (1961-1990) дате су у табели 4, док су просечне месечне вредности током ових периода на сливу реке Топлице приказане на слици 6. Климатске пројекције указују на константан пораст температура и на знатно смањење висина падавина у далекој будућности. Пораст температура и у прва два периода је нешто мањи према сценарију A2, иако овај сценарио подразумева већи пораст концентрације гасова стаклене баште у атмосфери у односу на сценарио A1B (IPCC, 2000). Пројекције падавина према ова два сценарија се знатно међусобно разликују: према сценарију A2 се предвиђа повећање падавина у првом, и приближно исте висине падавина у другом будућем периоду, док је према сценарију A1B предвиђено смањење падавина у свим будућим периодима. Изузетак је слив реке Млаве, где оба сценарија дају приближно исте резултате. На неизвесност у пројекцијама падавина указују и разлике између средњих месечних осмотрених и симулираних падавина (Слика 6).

Утицај климатских промена на сливовима анализиран је поређењем симулираних великих и малих вода (95. и 5. перцентил низа симулираних дневних протока, респективно), средњих вода (медијана низа протока), просечног годишњег отицаја и просечног симулираног садржаја влаге у земљишту у будућем у односу на референтни

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

период. Садржај влаге је приказан релативно, у односу на оговарајући максимални капацитет резервара земљишта (10 различитих оптимизованих вредности FC). Релативне промене хидролошких величина су приказане као емпиријске функције расподеле које су срачунате применом Вејбулове формуле (Kottegoda & Rosso, 2008).

Табела 4. Релативне промене у годишњим падавинама, средњим годишњим температурама и годишњој PET на сливовима реке Колубаре, Топлице и Млаве током три будућа у односу на референтни период (1961-1990) према сценаријима А1В и А2.

Table 4. Changes in annual precipitation depths, mean annual temperatures and annual PET in the Kolubara, Toplica and Mlava River catchments according to A1B and A2 GHG emission scenarios over three future periods relative to the baseline period (1961-1990).

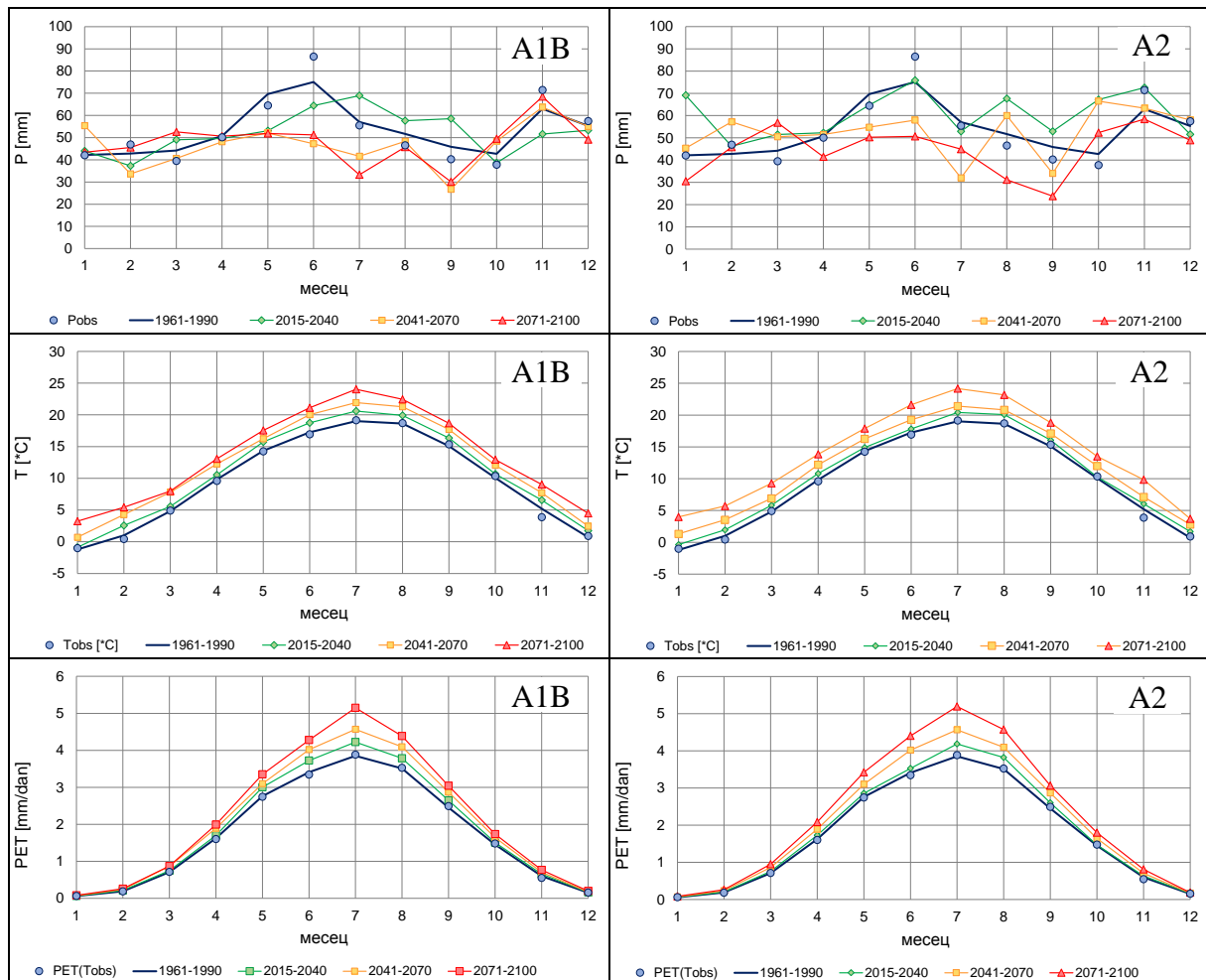
ПЕРИОД	ε [%]	Колубара		Топлица		Млава	
		A1B	A2	A1B	A2	A1B	A2
2015-2040	P_{god}	-6.6	3.5	-2.2	13.2	-2.3	-2.4
	$T_{sr, god}$	10.7	8.2	11.6	9.3	12.4	12.1
	PET_{god}	8.0	6.0	8.0	6.0	8.6	2.6
2041-2070	P_{god}	-10.8	1.0	-12.4	-1.4	-11.1	-11.4
	$T_{sr, god}$	23.2	20.1	25.7	22.6	26.5	26.1
	PET_{god}	16.4	13.4	16.7	13.8	17.6	11.0
2071-2100	P_{god}	-12.1	-14.6	-10.7	-16.4	-6.5	-8.0
	$T_{sr, god}$	36.2	40.6	39.3	44.1	40.2	40.4
	PET_{god}	25.9	29.3	25.7	29.2	27.7	21.1

3 Резултати

3.1 Ефикасност хидролошког модела

Ефикасност модела са 10 оптимизованих скупова параметра током калибрационих и евалуационих периода приказана је на слици 7. Резултати за три слива су означени другим бојама, док је величина симбола сразмерна вредности критеријумске функције VE , односно показује колико је добро модел репродуковао запремину отицаја.

Резултати показују да модел веома добро репродукује запремину осмотреног отицаја, како у периодима калибрације тако у током евалуационих периода. Вредности критеријумске функције NSE се могу сматрати задовољавајућим, с обзиром да су за симулације коришћени дневни подаци (Langsholt et al., 2013; Todorović & Plavšić, 2014; Todorovic & Plavsic, 2015a, 2015b; Todorović, 2015). Вредности NSE су релативно високе и током евалуационих периода. Карактеристични су резултати добијени за слив реке Млаве, где је ефикасност модела према овој критеријумској функцији виша у евалуационом него у калибрационом периоду. Ефикасност модела у репродуковању хидрограма у домену малих вода (NSE_{logQ}) је такође задовољавајућа, са изузетком скупова у чију оптимизацију NSE_{logQ} није укључена. Највиша ефикасност у домену малих вода постигнута је за слив реке Топлице, а најнижа за слив реке Млаве.



Слика 6. Просечне месечне падавине, температуре и *PET* на сливу реке Топлице у референтном и три будућа периода према сценаријима А1В (лево) и А2 (десно).

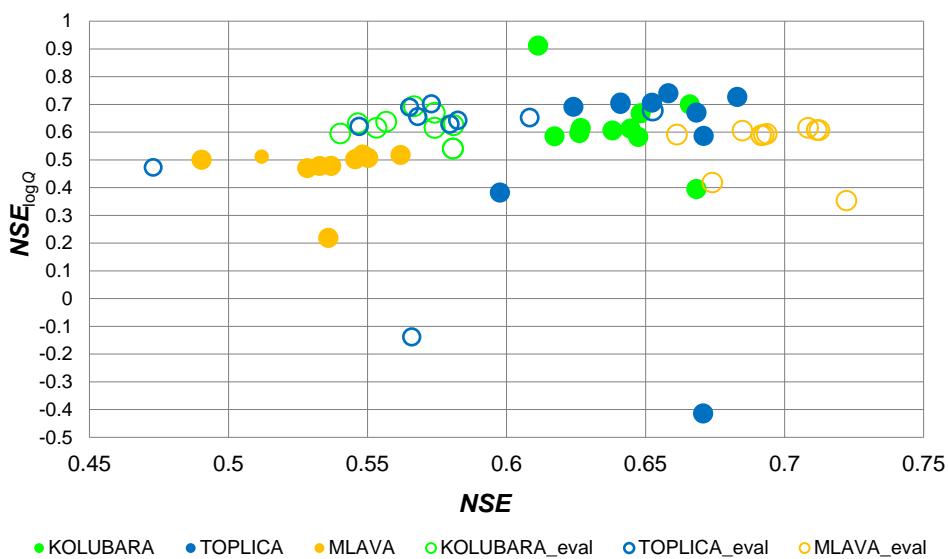
Figure 6. Monthly precipitation depths, mean monthly temperatures and monthly PET rates in the Toplica River catchment over the record, baseline and three future periods according to A1B (left panels) and A2 (right panels) GHG scenarios.

3.2 Хидролошке пројекције до 2100. године

Емпиријске расподеле релативних промена у великим ($Q_{95\%}$) и малим водама ($Q_{5\%}$), просечном протоку ($Q_{50\%}$) и просечном годишњем отицају, и у просечном релативном садржају воде у земљишту приказани су на сликама 8, 9 и 10, респективно. Расподеле су добијене на основу 20 релативних промена током будућих периода у односу на референтни (2 климатска сценарија и 10 скупова параметара модела HBV-light).

На сливовима река Колубаре и Топлице се предвиђа пораст средњих протока и запремине отицаја у прва два периода према сценарију А2, док се према А1В предвиђа смањење ових величина. У далекој будућности се предвиђа њихово значајно смањење. На сливу реке Млаве у се не очекује промена средњих протока у блиској будућности, док се значајније смањење средњих протока и просечног годишњег отицаја очекује од средине 21. века. Пројекције у домену великих вода се разликују за три слива: на сливу

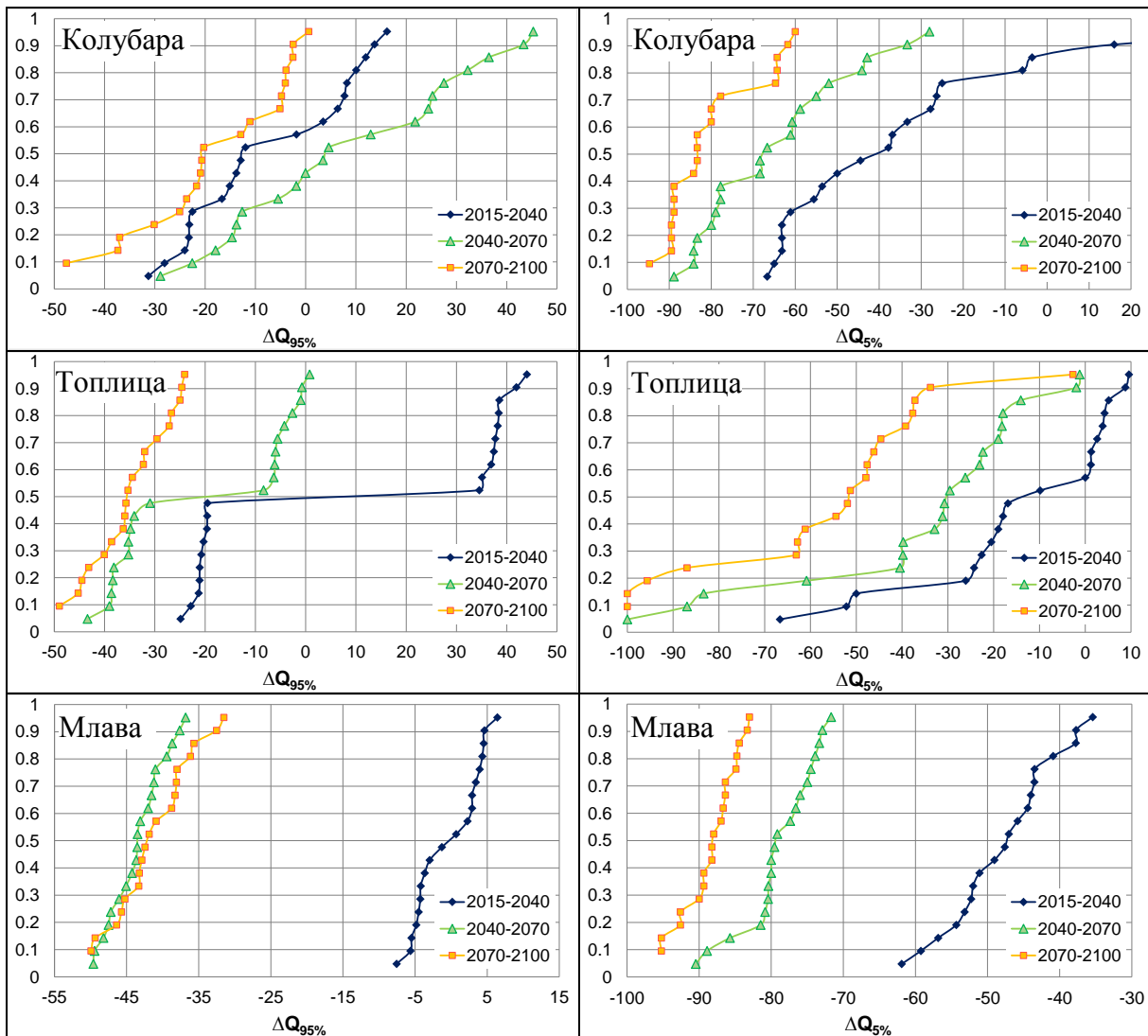
реке Колубаре се очекује благо смањење, затим повећање и значајније смањење у далекој будућности. На сликовима реке Топлице и реке Млаве се не очекује промена у блиској будућности, док се у даљој будућности очекује њихово смањење. Пројекције промена у великим водама за слив реке Млаве за средину 21. века и за далеку будућност се међусобно веома мало разликују. Не очекују се промене у малим водама у блиској будућности на сликовима реке Колубаре и Топлице, што се у складу са климатским пројекцијама падавина за ове сликове. Међутим, све комбинације сценарија и параметара модела указују на значајно смањење малих вода на сва три слива од средине 21. века. Пројекције за релативни садржај влаге у земљишту се такође слажу са пројекцијама падавина: у блиској будућности се просечни садржај влаге неће значајније мењати, али се од средине 21. века очекује његово смањење.



Слика 7. Резултати калибрације и евалуације хидролошког модела HBV-light за сликове реке Колубаре, реке Топлице и реке Млаве. Величина кружића на дијаграму је сразмерна вредности критеријумске функције VE.

Figure 7. The results of the HBV-light model calibration and evaluation in the catchments of the Kolubara, Toplica and Mlava Rivers. Size of the circles in the graph indicates value VE objective function.

За емпиријске расподеле на сликама 8, 9 и 10 карактеристично је да обухватају велики распон вредности релативних промена, које се често разликују и у знаку (нпр. релативна промена у $Q_{95\%}$ у блиској будућности на сливу реке Топлице или средином 21. века на сливу реке Колубаре). Ово указује на велике неизвесности у хидролошким пројекцијама услед промене климе. На слици 11 су приказане релативне промене у средњим годишњим протоцима на в.с. Словац у блиској будућности које су добијене са појединачним и са оба климатска сценарија. Расподеле за појединачне сценарије одражавају неизвесност услед оцена параметара хидролошког модела, док расподела са свих 20 комбинација обухвата и неизвесности услед климатских сценарија. Расподеле са појединачним сценаријима су знатно уже, што указује да су неизвесности услед параметара хидролошког модела мање у односу на климатске сценарије.



Слика 8. Релативне промене у великим ($Q_{95\%}$ - лево) и малим водама ($Q_{5\%}$ - десно) у три будућа у односу на референтни период (1961-1990) на сливовима реке Колубаре (горе), Топлице (средина) и Млаве (доле).

Figure 8. Changes in high ($Q_{95\%}$ - left panels) and low flows ($Q_{5\%}$ - right panels) in the Kolubara (top), Toplica (mid) and Mlava River catchment (bottom panels) over three future periods relative to the baseline period (1961-1990).

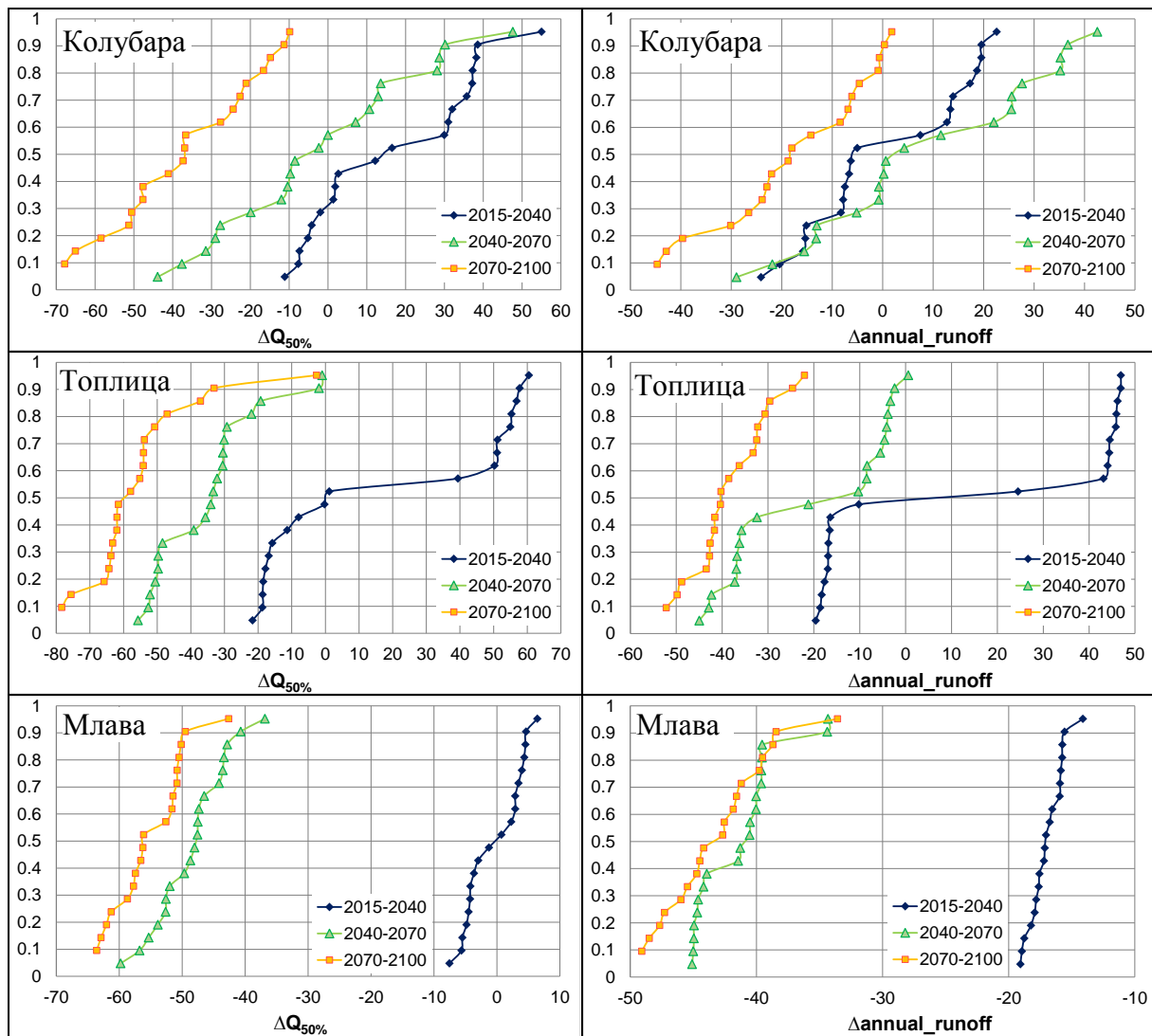
4 Закључна разматрања

У овом раду су приказане хидролошке пројекције за период 2015-2100 за слив реке Колубаре до водомерне станице (в.с.) Словац, слив реке Топлице до в.с. Дољевац и слив реке Млаве до в.с. Велико село. За израду хидролошких пројекција коришћене су климатске пројекције са сценаријима пораста концентрације гасова стаклене баште А1В и А2, и хидролошки модел HBV-light са десет скупова оптимизованих параметара (укупно двадесет комбинација). Анализиране су релативне промене у великим ($Q_{95\%}$) и

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

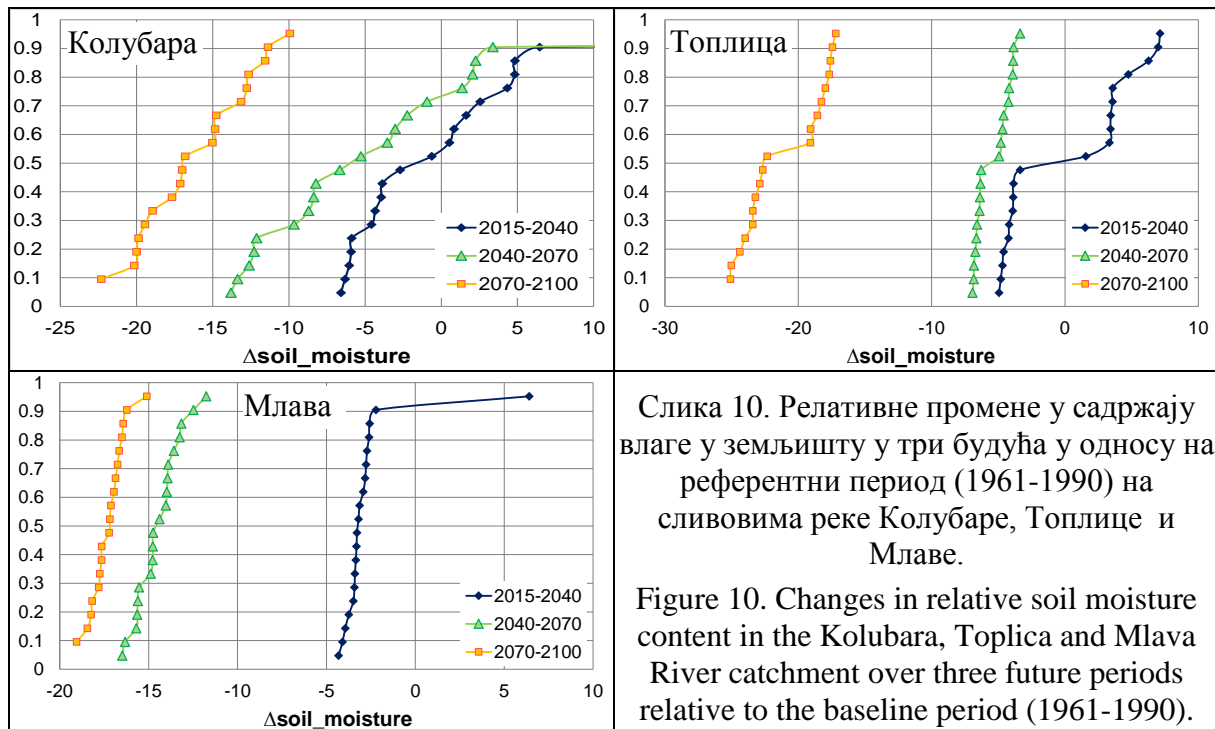
малим водама ($Q_{5\%}$), просечним протоцима ($Q_{50\%}$), просечном годишњем отицају и релативном садржају влаге у земљишту. Релативне промене су оцењене за три будућа периода: за блиску будућност (2015-2040), средину 21. века (2040-2070) и за далеку будућност (2070-2100).

Резултати симулација указују на тренд смањења количине воде на сва три слива у далекој будућности, што је у складу са климатским пројекцијама према којима ће доћи до смањења количине падавина и повећања *PET* услед пораста температура. Опадајући трендови су посебно изражени за мале воде, док се у блиској будућности и средином 21. века може очекивати и пораст великих вода.



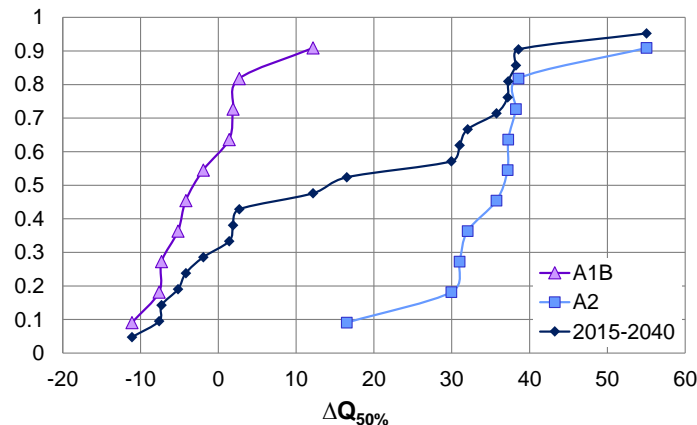
Слика 9. Релативне промене у средњим протоцима ($Q_{50\%}$ - лево) и просечном годишњем отицају у три будућа у односу на референтни период (1961-1990) на сливовима реке Колубаре (горе), Топлице (средина) и Млаве (доле).

Figure 9. Changes in median flows ($Q_{50\%}$ - left panels) and annual runoff in the Kolubara (top), Toplica (mid) and Mlava River catchment (bottom panels) over three future periods relative to the baseline period (1961-1990).



Слика 10. Релативне промене у садржају
 воде у земљишту у три будућа у односу на
 референтни период (1961-1990) на
 сливовима реке Колубаре, Топлице и
 Млаве.

Figure 10. Changes in relative soil moisture
 content in the Kolubara, Toplica and Mlava
 River catchment over three future periods
 relative to the baseline period (1961-1990).



Слика 11. Релативне промене у просечним годишњим протоцима у блиској будућности
 у односу на референтни период на в.с. Словац добијене са А1В, А2 и са оба сценарија.

Figure 11. Relative changes in median flows at the Slovak stream gauge in the near future
 obtained with A1B, A2 and both GHG emission scenarios.

Велики распон вредности релативних промена који емпиријске расподеле покривају указују на велике неизвесности у хидролошким пројекцијама, које су пре свега узроковане сценаријима пораста концентрације гасова стаклене баште.

У овом раду су процене утицаја климатских промена оцењене на основу два сценарија емисије гасова стаклене баште и десет скупова модела HBV-light. Међутим, други извори неизвесности као што су интеграције глобалних и регионалних климатских модела или структуре хидролошких модела нису разматране. Хидролошке предикције би требало да буду израђене са неколико сценарија (укључујући и *RCP – Representative Concentration Pathways*), више GCM-RCM интеграција, као и више

хидролошких модела различитих структура са више скупова оптималних параметара како би се добиле поузданије оцене утицаја климатских промена. Такође, *PET* је симулирана методом Намон-а, док друге методе нису разматране. Имајући у виду значај *PET* за водни биланс на сливу, потребно је да се анализира „осетљивост“ пројекција на избор методе за одређивање *PET*. Даља истраживања су неопходна како би се неизвесности у хидролошким пројекцијама тачније оцениле и евентуално редуковале примењујући Бајесов принцип.

Захвалница

Истраживање приказано у овом раду подржано је од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја (пројекат ТР37005). Коришћени подаци добијени су од Републичког хидрометеоролошког завода Србије. Климатске пројекције добијене су од Виртуелног центра за климатске промене за југоиточну Европу (SEEVCCC). Аутори се посебно захваљују доц. др Владимиру Ђурђевићу за конструктивне савете.

Литература

1. Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*.
2. Bergström, S., Harlin, J., & Lindström, G. (1992). Spillway design floods in Sweden: I. New guidelines. *Hydrological Sciences Journal*, 37(5), 505–519.
3. Criss, R. E., & Winston, W. E. (2008). Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22, 2723–2725.
4. de Vos, N. J., Rientjes, T. H. M., & Gupta, H. V. (2010). Diagnostic evaluation of conceptual rainfall – runoff models using temporal clustering. *Hydrological Processes*, 24(20), 2840–2850.
5. Djurdjevic, V., & Rajkovic, B. (2008). Verification of a coupled atmosphere-ocean model using satellite observations over the Adriatic Sea. *Annales Geophysicae*, 26(7), 1935–1954.
6. Djurdjevic, V., & Rajkovic, B. (2010). Development of the EBU-POM coupled regional climate model and results from climate change experiments. In T. D. Mihajlovic & B. Lalic (Eds.), *Advances in Environmental Modeling and Measurements (Environmental Research Advances)*. Nova Science Publishers Inc.
7. Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80–91.
8. Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evaporation. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Division, J.o.H.* (pp. 107–120).
9. Hartmann, G., & Bardossy, A. (2005). Investigation of the transferability of hydrological models and a method to improve model calibration. *Advances in Geosciences*, 5, 83–87.
10. IPCC. (2000). *IPCC EMISSIONS SCENARIOS*. (N. Nakicenovic & R. Stewart, Eds.). Cambridge University Press. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>
11. Kottegoda, N. T., & Rosso, R. (2008). *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers* (Second Edi.). Oxford, United Kingdom: Blackwell Publishing.
12. Krause, P., Boyle, D. P., & Base, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
13. Langsholt, E., Lawrence, D., Wong, W. K., Andjelic, M., Ivkovic, M., & Vujadinovic, M. (2013). *Effects of climate change in the Kolubara and Toplica catchments, Serbia*. Oslo, Norway.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

14. Lindstrom, G. (1997). A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model. *Nordic Hydrology*, 28(3), 153–168.
15. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeval.pdf>
16. Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., & Michel, C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7), W07410, 1–10.
17. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290–306.
18. Panagoulia, D. (1995). Assessment of daily catchment precipitation in mountainous regions for climate change interpretation. *Hydrological Sciences Journal*, 40(3), 331–350.
19. Pokhrel, P., & Gupta, H. V. (2010). On the use of spatial regularization strategies to improve calibration of distributed watershed models. *Water Resources Research*, 46(1), 1–17.
20. Refsgaard, J. C., Madsen, H., Andréassian, V., Arnbjerg-Nielsen, K., Davidson, T. A., Drews, M., ... Christensen, J. H. (2014). A framework for testing the ability of models to project climate change and its impacts. *Climatic Change*, 122, 271–282.
21. Schaeffli, B., Nicótina, L., Imfeld, C., Da Ronco, P., Bertuzzo, E., & Rinaldo, A. (2014). SEHR-ECHO v1.0: a Spatially Explicit Hydrologic Response model for ecohydrologic applications. *Geoscientific Model Development*, 7(6), 2733–2746.
22. Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Science*, 4(2), 215–224.
23. Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2010). *HBV-light HELP*. Retrieved from <http://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/services/hbv-model>
24. Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325.
25. Shafii, M., & Smedt, F. De. (2009). Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11), 2137–2149.
26. Singh, R., Wagener, T., van Werkhoven, K., Mann, M. E., & Crane, R. (2011). A trading-space-for-time approach to probabilistic continuous streamflow predictions in a changing climate – accounting for changing watershed behavior. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3591–3603.
27. Spitters, C. J. T., Toussaint, H. a. J. M., & Goudriaan, J. (1986). Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(1-3), 217–229.
28. Todorović, A. (2015). *Impact of Calibration Period na Parameter Estimates in Conceptual Hydrologic Models of Various Structures*. University of Belgrade. Retrieved from <http://uvidok.rcub.bg.ac.rs/handle/123456789/448>
29. Todorovic, A., & Plavsic, J. (2015a). Assessment of the Uncertainties in Flow Projections under Climate Change. In *IWA Young Water Professionals - East Meets West*. Belgrade: International Water Assosiation.
30. Todorovic, A., & Plavsic, J. (2015b). The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *Journal of Water and Climate Change*. doi:10.2166/wcc.2015.086
31. Todorović, A., & Plavšić, J. (2014). Mogućnost primene modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije. *Vodoprivreda*, 46(1-6), 117–128.
32. Xu, C. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 23(2), 229–249.

Poređenje različitih pristupa za sagledavanje uticaja klimatskih promena na vodne resurse u slivu reke Crnice

Vesna Tripković¹
Aleksandra Ilić²
Stevan Prohaska³
Borislava Blagojević⁴

APSTRAKT: U ovom radu je prikazana uporedna analiza projektovanog uticaja klimatskih promena na vodne resurse sliva reke Crnice (289 km²) primenom dva tipa modela. SHETRAN kao fizičko baziran distributivni model ovde je korišćen za simulaciju protoka. Potrebne podloge za formiranje modela su: elevacija, klimatski podaci (padavine i potencijalna evapotranspiracija), tipovi zemljišta i vegetacioni pokrivač. Model VNC je razvijen u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi” iz Beograda. Zasniva se na određivanju zavisnosti između standardizovanih promenljivih koristeći različite kombinacije uzročno-posledičnih veza između hidroloških i meteoroloških vremenskih serija. Osnovu za određivanje ovog tipa zavisnosti predstavlja teorija višestruke nelinearne korelacije. Ovi modeli su korišćeni sa scenarijima projektovanih klimatskih promena u proceni za koliko će se protok verovatno promeniti u budućnosti. Scenario A1B je odabran kao umeren i A2 kao jačeg intenziteta. Analiza je sprovedena za dva buduća perioda 2013-2050 i 2051-2100 u poređenju sa referentnim periodom 1961-2012.

Ključne reči: standardna nelinearna korelacija, protok, klimatski model, vodni resursi, klimatske promene

Different approaches to assess the impacts of climate change on water resources in the Crnica river catchment

ABSTRACT: This paper presents a comparative analysis of the projected climate change impacts on water resource in the Crnica river catchment (289 km²) using two types of models. SHETRAN as a fully distributed, physically based model is used here to simulate water flow. The spatial data required by SHETRAN includes a Digital Elevation Model (DEM), land use map and soil map. The meteorological variables include rainfall and potential evapotranspiration data. Model VNC was developed at the Institute for Water Resources "Jaroslav Černi" in Belgrade. It is based on the determination between standardized variables using different combinations of cause-effect relationship between hydrological and meteorological time series. The basis for the determination of this type of dependence is the theory of the multiple nonlinear correlation. These models were used with projected climate change scenarios to assess how discharge is likely to change in the future. The emission scenarios medium A1B and high A2 were selected. The analysis was conducted for two future periods 2013-2050 and 2051-2100 compared with the reference period 1961-2012.

Keywords: standard nonlinear correlation, discharge, climate model, water resources, climate change

¹ Dr Vesna Tripković, dipl. inž. geol., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, vesna.tripkovic@jcerni.co.rs

² Ass. Aleksandra Ilić, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

³ Prof. dr Stevan Prohaska, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

⁴ Doc. dr Borislava Blagojević, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, b.blagojevic@eunet.rs

1 Uvod

Prvi nacionalni izveštaj o klimatskim promenama, ukazao je da će prema scenarijima buduće klime, 21. vek biti okarakterisan značajnim smanjenjem godišnjih suma padavina. Takođe, u izveštaju se napominje da promena klime može dovesti do intenzivnih pojava ekstremnih događaja, kao što su poplave i suše u pogledu obima, učestalosti i intenziteta. Preliminarne procene uticaja klimatskih promena na vodne resurse Republike Srbije pokazuju da se u predstojećem periodu (do 2100. godine) može u dogoročnom trendu očekivati smanjenje protoka voda na nacionalnom nivou.

Prognozirane promene u količinama padavina i temperaturi vazduha imaće negativan uticaj na sadašnji sistem upravljanja vodnim resursima. Za rečne tokove postoje dostupne informacije o vodostajima koje se koriste za određivanje ukupne raspoloživosti vode, dok su podaci o vodnim resursima veoma ograničeni.

Cilj istraživanja ovog rada je uvid u potencijalne uticaje i mogućnost stvaranja smernica za efikasnije korišćenje vodnih resursa (površinskih i podzemnih voda) u okolnostima koje donose klimatske promene. Takođe, cilj je da se stvori strategija održivog razvoja u vezi sa aktuelnim poplavama i bujicama, kao rezultat klimatskih promena u Srbiji.

Primenom programskog paketa SHETRAN i njegovim povezivanjem sa GIS-om formiran je fizičko baziran distributivni model, pomoću koga je prikazan protok reke Crnice. Ovaj model je korišćen za poređenje potencijalne količine protoka sa rezultatima dobijenih sa VNC modelom.

Procena buduće klime prikazana je po rezultatima klimatskog modeliranja po najčešće korišćenim scenarijima Međunarodnog panela za klimatske promene, IPCC [1]). Scenariji klimatskih promena na osnovu dve emisije scenarija (A1B i A2) klimatskog modela su korišćeni za generisanje hidroloških scenarija za sliv reke Crnice za dva vremenska perioda (2013-2051 i 2051-2100).

2 Prikaz modela

2.1 SHETRAN model

SHETRAN model je razvijen u laboratoriji WRSRL (Water Resources Systems Research Laboratory) Univerziteta u Njukaslju u Velikoj Britaniji i vodi poreklo od Système Hydrologique Européen (SHE) [2, 3]. To je fizičko baziran, prostorno distributivan model koji je primenljiv za simulaciju kretanja vode, sedimenata i transporta nanosa u slivnom području [4, 5]. SHETRAN se može primeniti na širok spektar rečnih basena razmera od velikih (2500 km²) sa višestrukim podslivovima do pojedinačnih ili parcijanih susednih rečnih basena, pojedinačnim izdvojenim jedinicama kao brda i područja slivova (0.94 km²) [6].

Kretanje vode i infiltracija kroz nezasićenu sredinu se modeliraju primenom jednačine Richard čime su regulisani zemljišno-hidraulički parametri (matrični potencijal i hidraulička propustljivost zemljišta koji se izračunavaju korišćenjem jednačine Brooks i Corey [7]). Ova zona predstavlja sastavni deo podpovršinskog toka gde su podpovršinski tok i transport direktno povezani sa površinskim tokom i transportom.

Aplikaciju programskog paketa SHETRAN da simulira protok za slivna područja različite razmere u Velikoj Britaniji i uticaj klimatskih promena na vodne resurse unutar

slivnog područja je prikazan u radu Tripković [8]. Ovaj model je izabran za razvoj modela reke Crnice zbog svoje dostupnosti i iskustva. Detaljniji opis jednačina i prirode programskog paketa SHETRAN sa svim svojim prednostima i slabostima, potrebnim podacima i njenim širokim spektrom aplikacija, dostupna je na drugim mestima u literaturi [9, 10] i ovde se neće ponavljati.

2.2 VNC model

Osnovu modela VNC čine linearne korelacione zavisnosti između standardizovanih promenljivih hidroloških i meteoroloških vremenskih serija koje su u uzročno-posledičnim vezama [11].

Model se bazira na teoriji nelinearne standardizovane korelacije i prostorne korelacione analize. Prva ideja je bila napraviti alat pomoću kojeg će biti moguća prostorna interpolacija podataka na mestima gde ne postoje merenja ali je, kasnije, prilagođen za potrebe popunjavanja prekida i produžavanja serija hidroloških i meteoroloških podataka na mernim stanicama.

Kao zavisno promenljiva, obično se uzima protok na hidrološki neizučenom profilu (prostorna interpolacija) ili na profilu mernog mesta gde postoje prekidi u merenjima. Kao nezavisno promenljive veličine uzimaju se poznate vrednosti vremenskih serija: protoka na hidrološkim stanicama u širem regionu i/ili različite klimatske veličine, kao što su padavine, srednje temperature vazduha, vlažnost vazduha, napon vodene pare i dr.

Saglasno polaznoj postavci uspostavlja se linearna zavisnost između standardizovanih promenljivih, zavisno i nezavisno promenljivih (1):

$$U_{j0} = \alpha_{01} \cdot U_{j1} + \alpha_{02} \cdot U_{j2} + \dots + \alpha_{0i} \cdot U_{ji} + \dots + \alpha_{0L} \cdot U_{jL} \quad (1)$$

Koeficijenti α_{0i} se određuju po relaciji (2):

$$\alpha_{0i} = \frac{D_{0i}}{D_{00}} \quad (2)$$

gde je D_{00} determinanta standardizovanih koeficijenata korelacije r_{ji} (3), dok je D_{0i} minor koji se dobija zamenom j -te kolone koeficijentima r_{0i} .

$$D_{00} = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1L} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{L1} & r_{L2} & r_{L3} & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Koeficijenti korelacije r_{0i} (4) između podataka za stanicu $i = 0$ i ostalih stanica $i = 1, 2, 3, \dots, L$ se određuju na osnovu nizova podataka za sinhroni period merenja dužine M .

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$r_{0i} = \frac{\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{j=1}^M U_{j0} \cdot U_{ji}}{\sigma^2(M)} \quad (4)$$

gde je:

$$\sigma^2(M) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{j=1}^M U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (5)$$

Koeficijenti korelacije između i -te i k -te stanice za koje postoji niz sinhronih merenja dužine N , određuju se prema jednačini (6):

$$r_{ik} = \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji} \cdot U_{jk}}{\sigma^2(N)} \quad (6)$$

Gde je:

$$\sigma^2(N) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (7)$$

Da bi se odredio konačan broj članova jednačine linearne regresije neophodno je odrediti težinske koeficijente δ_{oi} (8) svih stanica (parametara) i uporediti ih za zadatim kriterijumom.

$$\delta_{oi} = \frac{|r_{oi} \cdot \alpha_{oi}|}{R_o^2} \quad (8)$$

gde je R_o empirijski koeficijent višestruke korelacije (9):

$$R_o^2 = \sum_{i=1}^L |r_{oi} \cdot \alpha_{oi}| \quad (9)$$

Prvi kriterijum koji mora biti ispunjen je (10):

$$\sum_{i=1}^L \delta_{oi} = 1 \quad (10)$$

Drugi kriterijum (11) određuje da li iz jednačine nelinearne regresije između standardizovanih promenljivih treba eliminisati ili zadržati član:

$$\delta_{oi} \begin{cases} > 2 \cdot \frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2}, & \sigma_{R_0}^2 = \frac{1-R_0^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{zadržati} \\ \leq 2 \cdot \frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2}, & \sigma_{R_0}^2 = \frac{1-R_0^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{eliminirati} \end{cases} \quad (11)$$

Uspostavlja se analitička zavisnost između merenih vrednosti osnovne veličine i njenih standardizovanih promenljivih, X_{j0} i U_{j0} na osnovu podataka za period dužine M .

Uspostavljena analitička zavisnost se primenjuje za određivanje nedostajućih (projektovanih) vrednosti X_{ji} ($j = M + 1, M + 2, \dots, N$) na osnovu poznatih vrednosti standardizovanih promenljivih U_{j0} dobijenih iz linearne veze. Ova zavisnost je primenjena ne bi li se odredili projektovani protoci u uslovima promenjene klime [12].

Prvo je potrebno, koristeći jednačinu (1) formirati zavisnost (12) a potom koristeći uspostavljenu zavisnost analogno proceduri produžavanja nizova formirati vremensku seriju u uslovima promenjene klime poštujući kriterijume (10) i (11).

$$U(Q_o) = \alpha_{o1} \cdot U_1(P) + \alpha_{o2} \cdot U_2(T) + \alpha_{o3} \cdot U_3(E) \quad (12)$$

gde je:

Q_0 - srednjemesečni protok na hidrološkoj stanici čije se slivno područje razmatra,

P - srednjemesečna suma padavina na slivu,

T - srednjemesečne temperature vazduha na slivu,

E - srednjemesečna potencijalna evapotranspiracija na slivu.

3 Karakteristike istražnog područja

Za prikaz uticaja klimatskih promena na vodne resurse razmatran je sliv reke Crnice (289 km²) (slika 1). Reka Crnica je duga nepunih trideset kilometara i uliva se u Veliku Moravu kod Paraćina. Izvire u prostranoj udolini kod rudarskog naselja Sisevac i istočno od Sisevca nastavlja se u Daršljivicu koja se uvlači u Kučaj još za 3,2 km, te je ukupna dužina Crnice sa Daršljivicom 31,8 km. Sliv pomenute reke prostire se između Gornjovelikomoravske kotline na zapadu i Kučaja i Samanjca na istoku. Teče od SI ka JZ inverzno prema Velikoj Moravi i smeštena je uz SZ granicu sliva. Najveća pritoka Crnice je Grza.

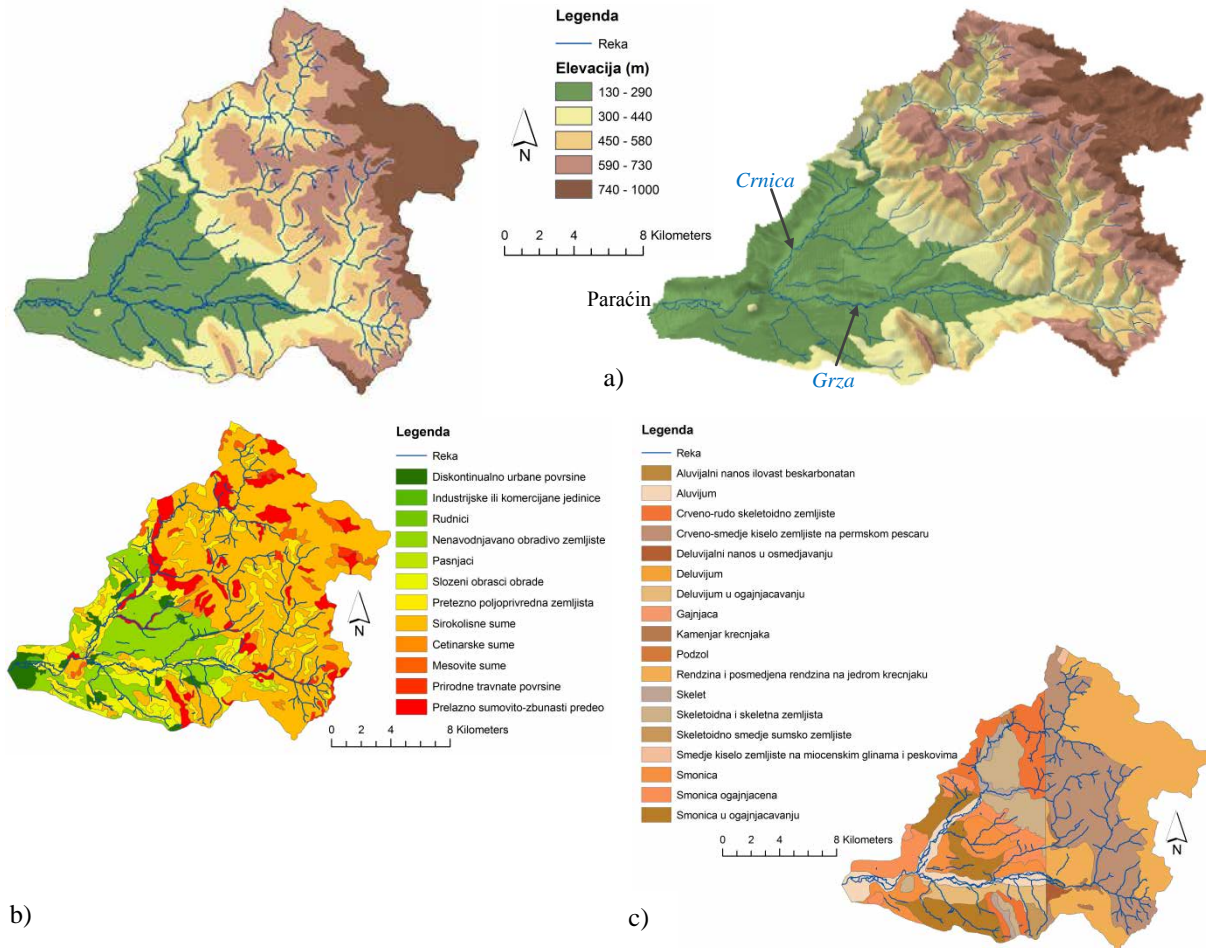
U slivu ima stena različitog postanka i starosti. Najzastupljenije su sedimentne stene, ali postoji i prisustvo metamorfni i magmatskih stena. Najzastupljeniji su krečnjaci koji zauzimaju površinu od oko 34 % sliva i pripadaju zagaćenom tipu karsta. Odlikuje ga veliki broj vrtača koji podseća na boginjavi karst. Reka Crnica izvire u snažnom mlazu ispod ogromne stene, na južnom delu Kučajskih planina. Na izvoru je reka potpuno bela od krečnjačkih stena, pa se zato nekad zvala Belica.

Na osnovu digitalizovane karte vegetacije (slika 1b) može se uočiti da su na slivu prisutne šume, nenavodnjavano obradivo zemljište, pretežno poljoprivredna zemljišta sa prirodnom vegetacijom i urbane površine. Dominatno je prisustvo šuma koje zauzimaju oko

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

50% površine sliva. Druge po zastupljenosti su pretežno poljoprivredna zemljišta sa većim površinama sa oko 13%.

Za definisanje zemljišnih karakteristika sliva korišćena je digitalizovana pedološka karta (slika 1c). Na slivnom području Crnice je dominantno smeđe šumsko zemljište na krečnjaku, rigolitično zemljište, smonica na različitim podlogama i aluvijalno zemljište.



Slika 1. Glavni prostorni podaci o karti slivnog područja reke Crnice: a) elevacija (digitalni model terena); b) aktuelna karta vegetacije i c) pedološka karta

Figure 1. Main spatial data on the map of the Crnica catchment: a) elevation (digital elevation model); b) actual land use map and c) soil use map

Reka Crnica nikad ne presušuje, čak i u vreme najvećih suša. Za vreme velikih prolećnih kiša ima karakter prave bujičarske reke karakteristične za brdsku oblast Srbije. U donjem toku podužni padovi su relativno mali i rastu u pravcu izvorišnog dela sliva. Idući uzvodno, rastu i nagibi padina rečne doline. Strmi nagibi gornjeg dela sliva su pošumljeni, dok se na blažim nagibima u donjem delu sliva nalaze livade i oranice.

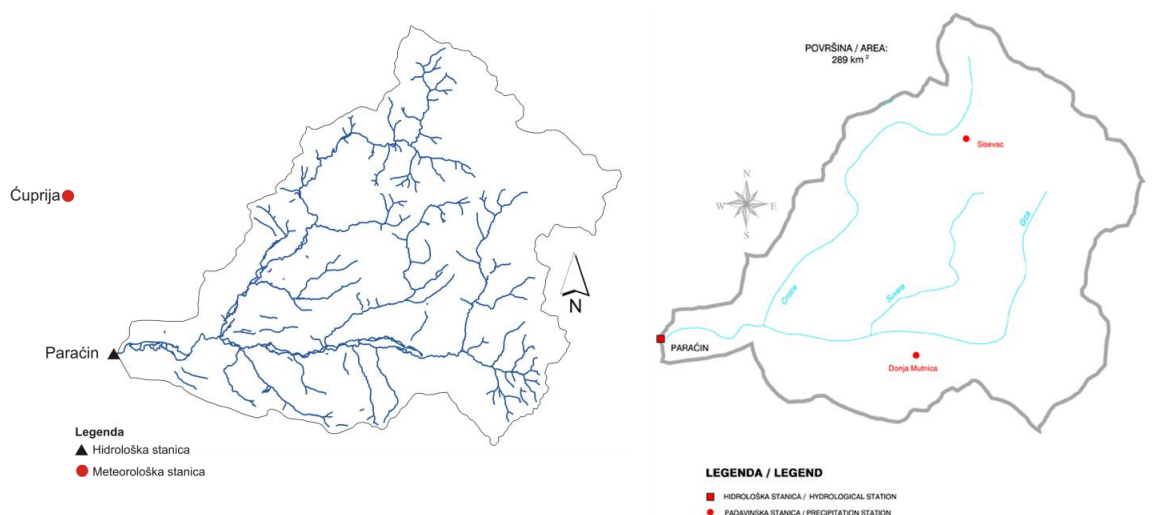
4 Podaci i metode

Ulazni podaci za SHETRAN model su: časovne sume padavina, dnevna potencijalna evapotranspiracija, elevacija terena, rečna mreža, tipovi zemljišta i vegetacione karakteristike slivnog područja. Za potrebe VNC modela ulazni podaci su: mesečne sume padavina, mesečna potencijalna evapotranspiracija i srednjemesečne temperature. Za potrebe kalibracije modela korišćen je osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin na reci Crnici. U tabeli 1 prikazani su statistički parametri vremenskih serija za padavine (P), evapotranspiraciju (E), temperaturu (T) i protok (Q).

Tabela 1. Statistički parametri vremenske serije za referentni period 1961-2012
 Table 1. Statistical parameters of time series for the reference period 1961-2012

Parametar	1961 – 2012			
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)
Sre	656,45	876,93	10,99	3,38
σ	118,18	59,36	0,68	1,07
Cv	0,18	0,07	0,06	0,32
Cs	0,18	0,36	0,30	0,85
Min	432,60	772,77	9,78	1,56
Max	910,00	1034,14	12,38	6,89

Raspoložive dnevne/mesečne sume padavina sa meteorološke stanice Čuprija, mesečna potencijalna evapotranspiracija i osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin (slika 2) dobijeni su od Republičkog Hidrometeorološkog Zavoda Srbije (RHMZS). Na samom slivu nije bila raspoloživa nijedna meteorološka/padavinska stanica sa podacima.



Slika 2. Sliv Crnice sa hidrološkom i meteorološkom stanicom
 Figure 2. Crnica catchment with the hydrological and meteorological station

Elevacija terena za slivno područje Crnice kao digitalni model terena (rawdem) ćelije grida 45m x 45m dobijeni su od Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi”. Digitalizovana karta vegetacije u sivu Crnice definisana je na osnovu analize baze podataka Corine Land Cover 2006. Za definisanje i digitalizaciju pedoloških karakteristika sliva korišćena je kao osnova Pedološka karta Republike Srbije razmere 1:50.000 (Institut za proučavanje zemljišta Beograd - Topčider, 1958. i 1970.).

Za SHETRAN model potrebni su časovni podaci padavina koji bi predstavljali dobru prostornu reprezentaciju unutar samog sliva. Na osnovu toga, za simulacioni period dnevne sume padavina koje su jedine bile dostupne sa meteorološke stanice Čuprija su (eng. disaggregated) razvrstani u časovni vremenski korak koristeći vezu između trajanja kiše i dnevne sume padavina. Mesečna potencijalna evapotranspiracija je izračunata na osnovu metode Penmana, a zatim (eng. disaggregated) razvrstana u dnevne vrednosti.

Primenom GIS alatki u okviru programskog paketa ArcView 9.3, izvršena je priprema i obrada ulaznih podataka o fizičkim karakteristikama sliva prikazanim na slici 1 (topografske, pedološke i vegetacione). Elementarna ćelija grida u modelu predstavlja površinu veličine 405m x 405m. Slivno područje reke Crnice u modelu je prikazano matricom elemenata sastavljenom od 64 kolona i 53 redova.

Kalibrisani modeli su procesuirani sa vremenskim serijama dnevnih/mesečnih padavina, temperature vazduha, evapotranspiracije i vlažnosti kao rezultat klimatskog modela. Za ocenu klimatskih promena na vodne resurse koriste se rezultati simulacija klimatskih modela. Ovde su korišćeni rezultati povezanog regionalnog klimatskog modela za atmosferu i okean EBU-POM (Eta Belgrade University-Prinstone Ocean Model) [13, 14]. Svi klimatski modeli pa tako i EBU-POM zbog kompleksnosti klimatskog sistema nose određeni stepen aproksimacije različitih geofizičkih procesa zbog kojih modelski rezultati sadrže i određeni nivo greške/odstupanja u odnosu na osmotrene uslove.

Posmatrana su tri perioda pod različitim scenarijima koncentracija gasova staklene bašte i to: referentni period od 1961. do 2012. godine, period bliske budućnosti (od 2013. do 2050.godine) i budući period (od 2051. do 2100. godine) za A1B i A2 klimatske scenarije. Po predviđenim koncentracijama gasova staklene bašte, A1B scenario se može nazvati umerenim, a A2 scenarijom jačeg intenziteta [15]. Nakon toga izvršena je analiza režima voda slivnog područja Crnice, koja podrazumeva primenu statističkih metoda sa ciljem analize suficita i deficita voda iz projektovanih protoka, proizašlih iz analize režima voda.

5 Kalibracija modela

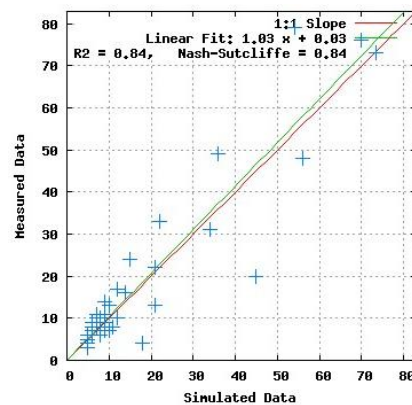
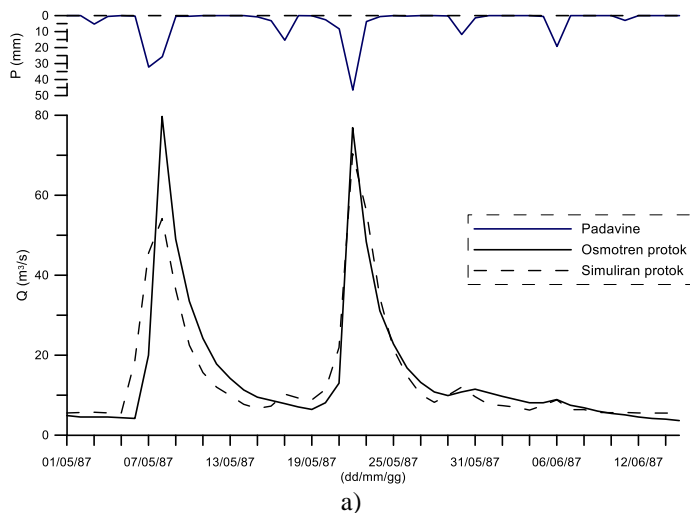
5.1 Kalibracija SHETRAN modela

SHETRAN model je najosetljiviji na ulazne parametre padavine i potencijalnu evapotranspiraciju [8]. Međutim, ovi vremenski ulazi se ne prilagođavaju tokom kalibracije. U slivnom području reke Crnice model je kalibrisan korišćenjem 5 parametara čija se vrednost određuje tako da odgovara realnim uslovima i da doprinese što boljem slaganju simuliranog i osmotrenog protoka sliva. Tabela 2 prikazuje ključne parametre modela koji se koriste u procesu kalibracije SHETRAN modela na koji se simulacije najosetljivije.

Tabela 2. Kalibrisani parametri
Table 2. Calibrated parameters

Parametar	Opis
K_x, K_y, K_z	hidraulička provodljivost (m/day)
θ_{sat}	poroznost
θ_{res}	rezidualna vlažnost zemljišta
n	van Genuchten n parametar
α	van Genuchten α parametar (cm^{-1})

Praksa u hidrološkom modeliranju je da raspoložive podatke vremenskih serija podelimo na dva seta [16]. Jedan set podataka se koristi za kalibraciju, a drugi za verifikaciju. Model zahteva određeni period vremena zagrevanja (eng. warm up) dok se ne dostigne reprezentativna vrednost. Model je kalibrisan za period 01.05. – 16.06.1987. koristeći osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin (slika 3). Kalibracija je obavljena ručno (eng. manual) podešavajući vrednosti parametara u cilju da se postigne bolja saglasnost između simuliranih i osmotrenih vrednosti.



b) Measured Data – osmotreni podaci
Simulated Data – simulirani podaci

Slika 3. Osmotren i simuliran srednje dnevni protok tokom majskog poplavnog talasa za slivno područje Crnice: a) kalibracioni period i b) regresiona analiza protoka (crvena linija: linija jednake vrednosti; zelena linija najbolje usklađena linija)

Figure 3. Observed and simulated daily mean discharge during flood in May in the Crnica catchment: a) calibration period and b) regression analysis of discharge (red line: line of equal value; green line: best-fit line)

Za ocenu efikasnosti modela korišćene su dve standardne statističke performanse: koeficijent determinacije (R^2) i koeficijent Nash-Sutcliffe (NSE) [17].

Koeficijent determinacije R^2 (eng. coefficient of determination) je proporcija varijacija između dve varijable protumačena linearnom regresijskom vezom (13).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \overline{Q_m})(Q_0^t - \overline{Q_0})]^2}{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \overline{Q_m})^2 \sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (13)$$

gde je:

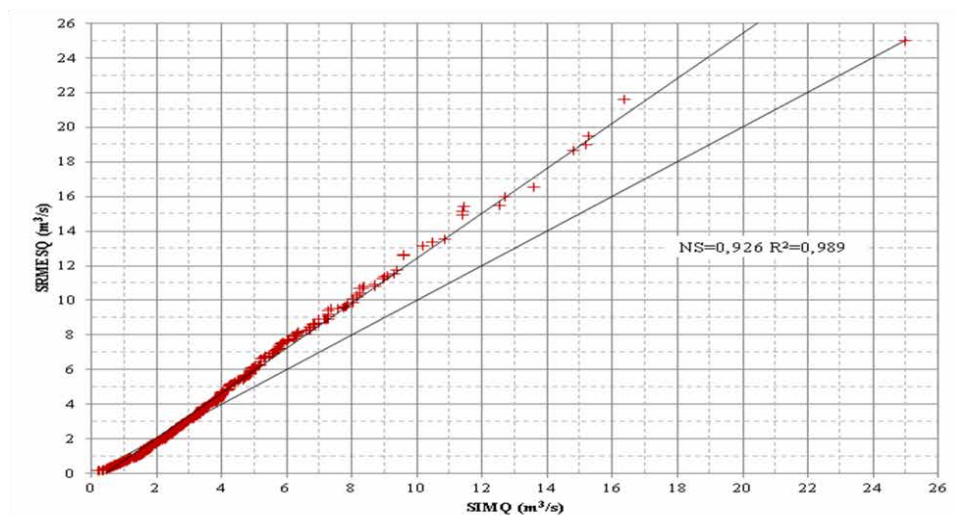
- Q_0 - osmotren protok,
- Q_m - simuliran protok,
- Q_0^t - osmotren protok za vreme t .

Koeficijent efikasnosti modela, Nash-Sutcliffe se često koristi da proceni efikasnost predviđanja hidroloških modela [17]. Daje se formulom (14):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (14)$$

Vizuelna inspekcija simuliranog i osmotranog hidrograma protoka i korelativne zavisnosti ukazuje na zadovoljavajuće slaganje. Slika 3a pokazuje da je simuliran majski pik talasa malo ispod osmotrenog. Vrednost koeficijenta determinacije (R^2) za simulirani u odnosu na osmotren protok je 0,84 (slika 3b). Prema Henriksen i drugima [18] vrednost R^2 spada u opseg veoma dobrog modela. Nash-Sutcliffe koeficijent je 0,84 što ukazuje na dobre rezultate modela prema van Liev i Garbrecht [19] kriterijumima.

Verifikacija modela je obuhvatla različite periode poplavnih talasa za koji su postojali časovni podaci osmotrenog protoka. Pri kalibraciji i verifikaciji hidrološkog modela osnovni cilj je bio da maksimalne modelirane vrednosti pika talasa odgovaraju njihovim maksimalnim osmotrenim časovnim vrednostima, kao i da se prati oblik hidrograma u skladu sa prirodom hidroloških procesa na slivu.



Slika 4. Kalibracija modela VNC
Figure 4. VNC model calibration

5.2 Kalibracija VNC modela

Model je kalibrisan na osnovu izmerenih podataka u periodu 1961-2012. Za kalibraciju modela su korišćeni srednjemesečni protoci na hidrološkoj stanici Paraćin, mesečna suma padavina, srednjemesečne temperature i mesečna evapotranspiracija na meteorološkoj stanici Čuprija. Ocena kalibracije modela se može videti na slici 4. Kao što je prikazano statistička dobrota prilagođavanja po Nash-Sutcliffe (NSE=0,926) pokazuje da model daje realnu sliku prirodnog srednjemesečnog protoka na slivu Crnice.

Oba modela su pokazala zadovoljavajuće performanse tokom kalibracije. Za ove modele, simulirani protok nije od interesa već komparativna analiza projektovanog protoka za različite klimatske scenarije.

6 Uticaj klimatskih promena na vodni režim reke Crnice

6.1 Rezultati i diskusija

Na osnovu zadovoljavajućih vrednosti ocene rezultata SHETRAN i VNC modela i u kalibracionom i u verifikacionom periodu, model sliva reke Crnice se mogao koristiti za analizu uticaja klimatskih promena na vodni režim. U tabelama 3 i 4 su prikazani statistički parametri za padavine (P), evapotranspiraciju (E) i temperaturu (T) dobijenih iz EBU-POM regionalnog klimatskog modela, koji su korišćeni kao ulazni parametri za pomenute modele.

Dobijeni podaci pokazuju da prema scenariju A1B promene srednje godišnjih padavina idu od +1,32% za period 2013-2050 do -10,91% za period 2051-2100, dok u slučaju A2 ova promena je od +7,83% do -6,54% (tabela 5). Može se očekivati prosečni porast evapotranspiracije u periodu bliske budućnosti da bude u proseku oko 8,62% sa dostizanjem vrednosti od 9,52% do kraja 21. veka u odnosu na referentni period. Tokom perioda 2013-2050 i 2051-2100 scenario A1B daje porast temperature za prvi period do 1,12°C a za drugi period do 3,13°C (tabela 5). Prema scenariju A2 porast tokom prvog perioda je neznatno niži i iznosi oko 0,81 °C, dok se u drugom periodu prema ovom scenariju može, takođe, očekivati porast do 3,31°C.

Tabela 3. Statistički parametri projektovanih serija za scenario A1B i A2, 2013-2050
 Table 3. Statistical parameters of the projected series for scenario A1B and A2, 2013- 2050

Parametar	2013-2050: A1B			2013-2050: A2		
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	P (mm)	E (mm)	T (°C)
Sre	665,13	952,51	12,11	707,85	960,41	11,80
σ	149,90	93,17	0,73	184,50	91,00	0,71
Cv	0,23	0,10	0,06	0,26	0,10	0,06
Cs	0,289	-0,04	-0,15	0,87	0,36	0,18
Min	358,07	748,43	10,60	432,44	774,82	10,52
Max	1046,71	1157,55	13,43	1159,44	1190,66	13,53

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 4. Statistički parametri projektovanih serija za scenario A1B i A2, 2051-2100
Table 4. Statistical parameters of the projected series for scenario A1B and A2, 2051-2100

Parametar	2051-2100: A1B			2051-2100: A2		
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	P (mm)	E (mm)	T (°C)
Sre	584,85	878,88	14,12	613,53	878,73	14,30
σ	130,02	102,73	0,93	172,21	112,55	1,15
Cv	0,222	0,12	0,07	0,28	0,13	0,08
Cs	0,31	-0,41	-0,06	0,26	-0,103	-0,06
Min	368,04	595,97	12,14	311,74	632,65	12,04
Max	890,35	1056,87	16,10	1027,31	1140,66	16,44

Tabela 5. Projektovane promene padavina (P), evapotranspiracije (E) i temperature (T) dobijene klimatskim modelom
Table 5. Projected changes of precipitation (P), evapotranspiration (E) and temperature (T) by climate model

Period Scenario	1961-2012	2013-2050				2051-2100			
		A1B		A2		A1B		A2	
P (mm)	656,45	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
EBU-POM	-	665,13	+1,32	707,85	+7,83	584,85	-10,91	613,53	-6,54
E (mm)	876,93	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
EBU-POM	-	952,51	+8,62	960,41	+9,52	878,88	+0,22	878,73	+0,21
T (°C)	10,99	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$
EBU-POM	-	12,11	+1,12	11,80	+0,81	14,12	+3,13	14,30	+3,31

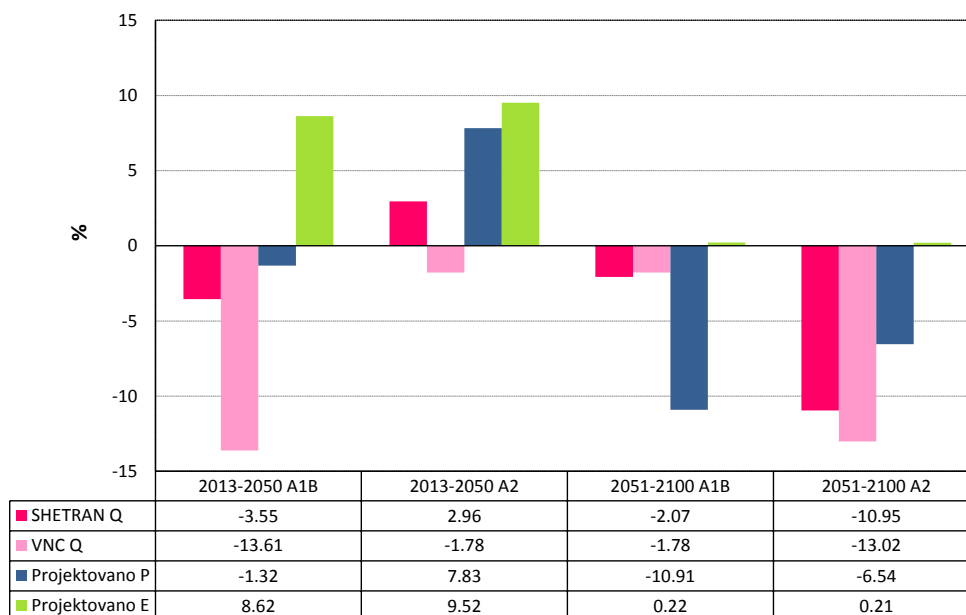
Upoređivanjem rezultata scenarija sa rezultatima drugih klimatskih modela za Srbiju (EU ENSEMBLES) može se videti da i drugi klimatski modeli pokazuju sličnu tendenciju odnosno suficit početkom i značajni deficit u godišnjim količinama padavina u drugoj polovini veka.

U tabeli 6 i slici 5 dat je primer procentualne promene srednje godišnjeg protoka za periode 2013-2050 i 2051-2100 po oba klimatska scenarija u odnosu na period 1961-2012, za slivno područje reke Crnice. Na osnovu oba klimatska scenarija, do kraja 21. veka može se očekivati smanjenje prosečne godišnje vrednosti protoka za 10 do 13% u odnosu na period od 1961. do 2012. godine.

Tabela 6. Projektovane promene protoka (Q) dobijene SHETRAN i VNC modelom
Table 6. Projected changes of discharge (Q) by SHETRAN and VNC model

Period Scenario	1961-2012	2013-2050				2051-2100			
		A1B		A2		A1B		A2	
Q (m ³ /s)	3,38	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
SHETRAN	-	3,26	-3,55	3,48	+2,96	3,31	-2,07	3,01	-10,95
VNC	-	2,92	-13,61	3,32	-1,78	3,32	-1,78	2,94	-13,02

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 5. Očekivane promene protoka, padavina i evapotranspiracije za sliv Crnice u odnosu na vrednosti iz referentnog perioda (Q-protok, P-padavine, E-evapotranspiracija)

Figure 5. Expected changes in discharge, precipitation and evapotranspiration for the Crnica catchment compared to the values of the referent period (Q-discharge, P-precipitation, E-evapotranspiration)

Sa slike 5 se uočava da protok za A2 scenario do 2050. godine po SHETRAN modelu prati trend projektovanih padavina. Najveći deficit voda iz projektovanih protoka je očekivan za A2 scenario od 2051. do 2100. godine od 10,95% po SHETRAN i 13,02% po VNC modelu. Upoređivanjem ova dva modela, najveće odstupanje za Q imamo za period 2013-2050: A1B, a najbolje slaganje za period 2051-2100: A1B. Nepouzdanost modela može nastati iz nekoliko izvora: strukture modela, parametara, početnih uslova, osmotrenih podataka i procene modela.

Jedan od mogućih objašnjenja za relativno male promene protoka između scenarija i između scenarija i referentne vrednosti za protok je namena korišćenja zemljišnog pokrivača koji se neće radikalno menjati. Takođe, treba napomenuti da protok zavisi i od mnogih drugih faktora uključujući topografiju, klimu, hidrogeološka svojstva stenskih masa, pogotovo karsta koji je razvijen na ovom slivu, kao i hidrološko-hidrauličku povezanost površinskih i podzemnih voda.

Aplikacijom ova dva modela možemo zaključiti da u vezi primene ovih modela u istraživanju klimatskih scenarija za slivno područje reke Crnice, SHETRAN je poželjan jer je pokazano realnije performanse za sve scenarije. Ovaj model je izabran jer je već korišćen u drugim studijama uticaja klimatskih promena [6, 8, 20, 21]. Prednost VNC modela u odnosu na SHETRAN je da VNC ima kraće vreme proračuna što ga čini pogodnim za simulaciju dužeg vremenskog niza klimatskih scenarija.

Dostupnost vodnih resursa za period 2051-2100 za slivno područje reke Crnice je ugrožena prema projekcijama koje ukazuju na smanjenje protoka. Manji protok znači manje razblaživanje mogućih zagađivača u reci i u kombinaciji sa višom temperaturom, može

dovesti verovatno do smanjenja kvaliteta vode. To će uticati na životnu sredinu reke i korisnika vode. Porast temperature i smanjenje padavina u budućem periodu verovatno će usloviti nestašicu vode, a time dovesti do povećanja potražnje vode za navodnjavanje u poljoprivredi.

7 Zaključak

Uticaj klimatskih promena na vodni režim slivnog područja je od velikog značaja za strateško planiranje upravljanja vodnim resursima. Ovo istraživanje ukazuje da oba scenarija (A1B i A2) pokazuju porast godišnjih količina padavina tokom perioda 2013-2050. Međutim, za period posle 2050. godine oba scenarija imaju negativan trend u godišnjim količinama padavina koji se pojačavaju idući ka 2100. godini. Na osnovu analiza scenarija klimatskog modela promene klime za sliv reke Crnice može se očekivati po oba scenarija povećan trend temperature. Projektovane promene u temperaturnom polju i režimu padavina neminovno će uticati i na promenu vodnog režima na pomenutom slivu. Smanjenje količine padavina u odnosu na period 1961. do 2012. godine, uzrokuje značajno smanjenje prosečne godišnje vrednosti protoka do kraja 21. veka u odnosu na protok u referentnom periodu.

Zahvalnost

Istraživanje predstavljeno u ovom radu je sprovedeno za potrebe naučnog projekta TR 37005: „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ i III43007: „Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu: Praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“, koji je finansiralo Ministarstvo nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije za period 2011-2015.

Literatura

1. IPCC, (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L, Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J. and. Hanson C.E, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
2. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., (1986a), *An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeèn, SHE. 1: Hystory and physolophy of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of hydrology, 87: 45-49.
3. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., (1986b), *An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeèn, SHE. 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of hydrology, 87: 61-67.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

4. Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., (2000), *SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system*, Journal of Hydrologic Engineering, 5(3): 250-258.
5. Ewen J., Bathurst J.C., Parkin G., O'Connell P.E., Birkinshaw S.J., Adams R., Hiley R., Kilsby C.G., Burton A., (2002), *SHETRAN: Physically-based distributed river basin modelling system*. In: *Mathematical Models of Small Basin Hydrology and Applications*, Singh V.P. and Frevert D.K. (eds.), Water Resources Publications LLC: 43-68.
6. Bathurst J.C., Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., Cooper J.D., (2004), *Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts: 3. Blind validation for internal and outlet responses*, Journal of Hydrology, 287(1-4): 74-94.
7. Brooks R.H., Corey A.T., (1964), *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology Papers 3, Colorado State University, Fort Collins.
8. Tripković V., (2013), *Quantifying and upscaling surface and subsurface runoff and nutrient flows under climate variability*, PhD thesis, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK.
9. Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., (2000), *SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system*, Journal of Hydrologic Engineering, 5(3): 250-258.
10. Birkinshaw S.J., James P., Ewen J., (2010), *Graphical User Interface for Rapid Set-up of SHETRAN Physically-Based River Catchment Model*, Environmental Modelling and Software, 25: 609-610.
11. Prohaska S., (2006), *Hidrologija II*, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd.
12. Prohaska S., Djurđević, V., Ilić A., Vukelić, V., Koprivica, A., (2013) *Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in Serbia*, 6th International Conference on Water Resources and Environment Research ICWRER 2013, 3-7 June, Koblenz, Germany, Conference Proceedings, pp. 502-514.
13. Djurdjevic V., Rajkovic B., (2008a), *Verification of a coupled atmosphere-ocean model using satellite observations over the Adriatic Sea*. Annals of Geophysics 26:1935-1954.
14. Djurdjevic V., Rajkovic B., (2008b), *Air-sea interaction, Fluid mechanics of environmental interfaces*, Editors: Gualtieri C. and Mihajlovic T.D., Taylor and Francis.
15. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B, Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., (2000), *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 599pp.
16. Klemes V., (1986), *Operational testing of hydrological simulation models*, Hydrol. Sci. J., 31(1): 13-24.
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V., (1970), *River flow forecasting through conceptual models 1. A discussion of principles*, Journal of Hydrology, 10: 182-190.
18. Henriksen H., Troldborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T., Refsgaard J., Madsen B., (2003), *Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark*, Journal of Hydrology, 280: 52-71.
19. Van Liew M.W., Garbrecht J., (2003), *Hydrologic simulation of the Little Washita river experimental basin using SWAT*, Journal of the American Water Resources Association, 39(2): 413-426.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

20. Bathurst J.C., Kilsby C., White S., (1996), *Modelling the impacts of climate and land use change on basin hydrology and soil erosion. In: Mediterranean Europe. Mediterranean Desertification and Land Use*, Brandt C.J. and Thornes J.B. (eds.) Chichester, John Wiley and Sons Ltd. 355–387.
21. Mourato S., Moreira M., Corte-Real J., (2014), *Water availability in southern portugal for different climate change scenarios subjected to bias correction*, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 8(1): 109-117.

Uticaj klimatskih promena na vodne resurse – projekat CCWaters, rezultati pilot područja reke Pek

Dejan Dimkić¹
Stevan Prohaska
Bojan Stanković
Predrag Pajić
Željka Rudić

APSTRAKT: Međunarodni projekat CCWaters je razmatrao uticaj klimatskih i drugih promena na vodne resurse u Jugoistočnoj Evropi, sa akcentom na resurse vode za piće. Učestvovali su predstavnici Austrije, Italije, Slovenije, Hrvatske, Mađarske, Rumunije, Srbije, Bugarske i Grčke. Razmatrane su klimatske promene po scenariju A1B, kao i moguće promene u korišćenju zemljišta na pilot područjima. Za vodne resurse su različiti partneri odabirali i različite tipove podzemnih voda, a par pilot područja je razmatralo i površinske. Pristup je bio da svaka zemlja odabere nekoliko pilot područja, za koja će da usvoji metodologiju rada, po kojoj će da odredi dati uticaj. Dalje, na osnovu dobijenih rezultata uticaja klimatskih i promena u korišćenju zemljišta, a na osnovu socioekonomskih predviđanja, urađen je predlog razvoja datog područja. Dobijeni rezultati variraju od neznatnog povećanja kapaciteta resursa u budućnosti do smanjenja za preko 50% u do kraja XXI veka. Poređenje rezultata sa drugim istraživanjima u okviru Naučnog projekta TR37005 je moguće, i delimično je urađeno. Pored opšteg prikaza rezultata svih pilot područja u prvom delu rada, u drugom delu rada se daje, relativno detaljno, usvojena metodologija i dobijeni rezultati za aluvijalna izvorišta u slivu reke Pek.

Ključne reči: CCWaters, raspoloživost vodnih resursa, klimatske promene, reka Pek, potrebe za vodom.

Climate change impact on water resources – CCWaters project, results from pilot areas of the Pek river catchment

ABSTRACT: International project CCWaters has considered climate change and other impacts on water resources in south east Europe, with focus on drinking water sources. Representatives from Austria, Italy, Slovenia, Croatia, Hungary, Romania, Serbia, Bulgaria and Greece took a part in this project. Scenario A1B were chosen for climate change analysis, and land use changes have been considered on the pilot areas. As water resource, different partners have choosed different types of groundwater, and in few pilot areas have been considered surface water sources, as well. Aproach was that for each pilot area, authors choose their own methodology for working. Further, based on the results of climate and land use changes impact on water resources, and additionally based on socio-economic expectations, suggestion for further development of analyzed region were done. Obtained results vary, from small increase in water resources to decrease of more than 50% at the end of XXI century. Comparison of the results with other investigations in the frame of Scientific project TR37005 is possible, and partially done. In addition to general overview of the results of all pilot areas, in the second part of the paper is given, quite in details, accepted methodology and obtained results for alluvial sources in the Pek river catchment.

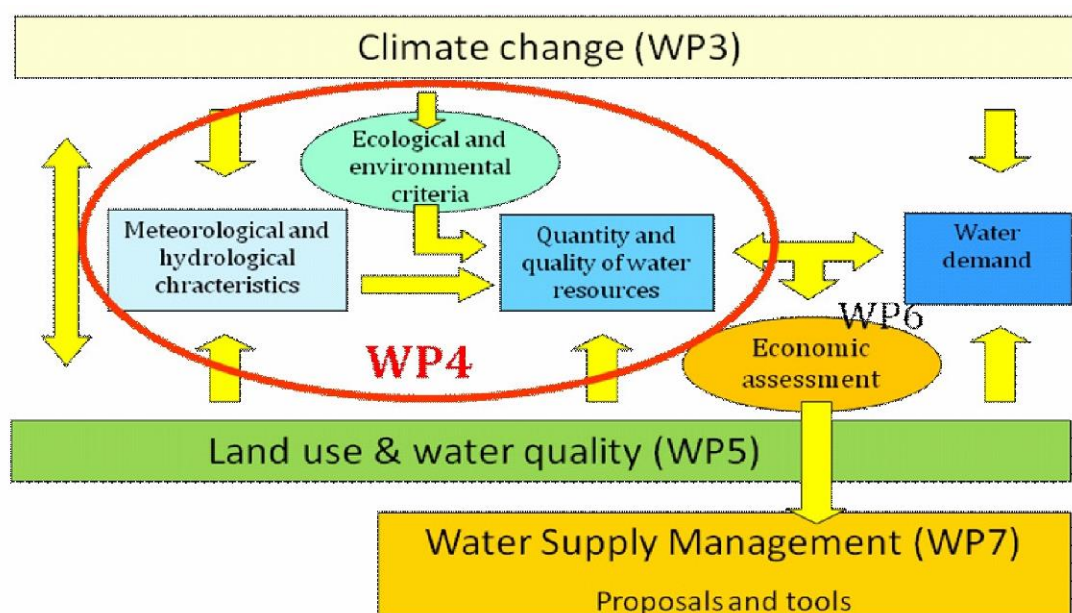
Keywords: CCWaters, availability of water resources, climate change, river Pek, water demand.

¹ dipl.ing, Dejan Dimkić, Šef odseka za vodno planiranje i klimatske promene, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ulica Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava – Beograd; dejan.dimkic@jcerni.co.rs

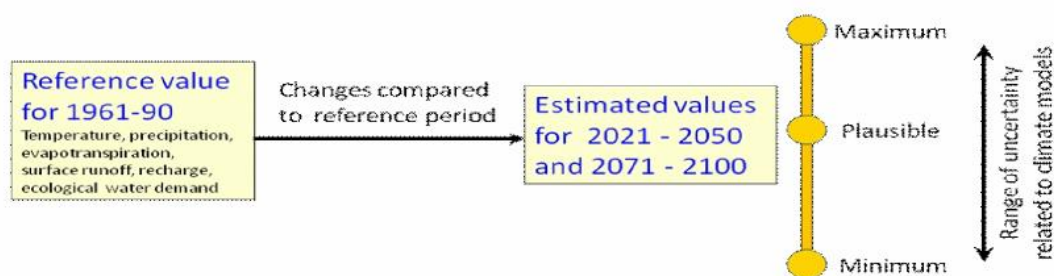
1 Uvod – generalno o projektu

Međunarodni projekat CCWaterS je bio podeljen u dva administrativna (Menadžment i Finansije) i 5 tehničkih paketa: WP3 – Klimatske promene; WP4 – Raspoloživost vodnih resursa; WP5 – Promene kod korišćenja zemljišta; WP6 – Socioekonomske promene; i WP7 – Predlog najpovoljnijih tehničkih rešenja. Sama šema povezanosti paketa je data na slici 1. Iz šeme se razumljivo vidi da je WP4 »centralni« tehnički paket.

Za klimatske, parametre povezane sa promenom klime, kao i neke druge, razmatrane su minimalne, maksimalne i najočekivanije vrednosti u budućnosti (slika 2).



Slika 1 Organizaciona struktura tehničkih paketa
 Figure 1 Organisation scheme of the technical packages



Slika 2 Periodi i parametri projekcije
 Figure 2 Periods and parameters of projection

2 Analizirana test područja

Razmatrani su različiti tipovi resursa na 20 test područja (slika 3), od kojih su 5 u Srbiji: karstna izvorišta na Staroj planini i Beljanici i aluvijalna izvorišta Beograda, Nišave i Peka.



Slika 3 Razmatrana test područja u projektu CCWaters
 Figure 3 Considered test areas in CCWaters project

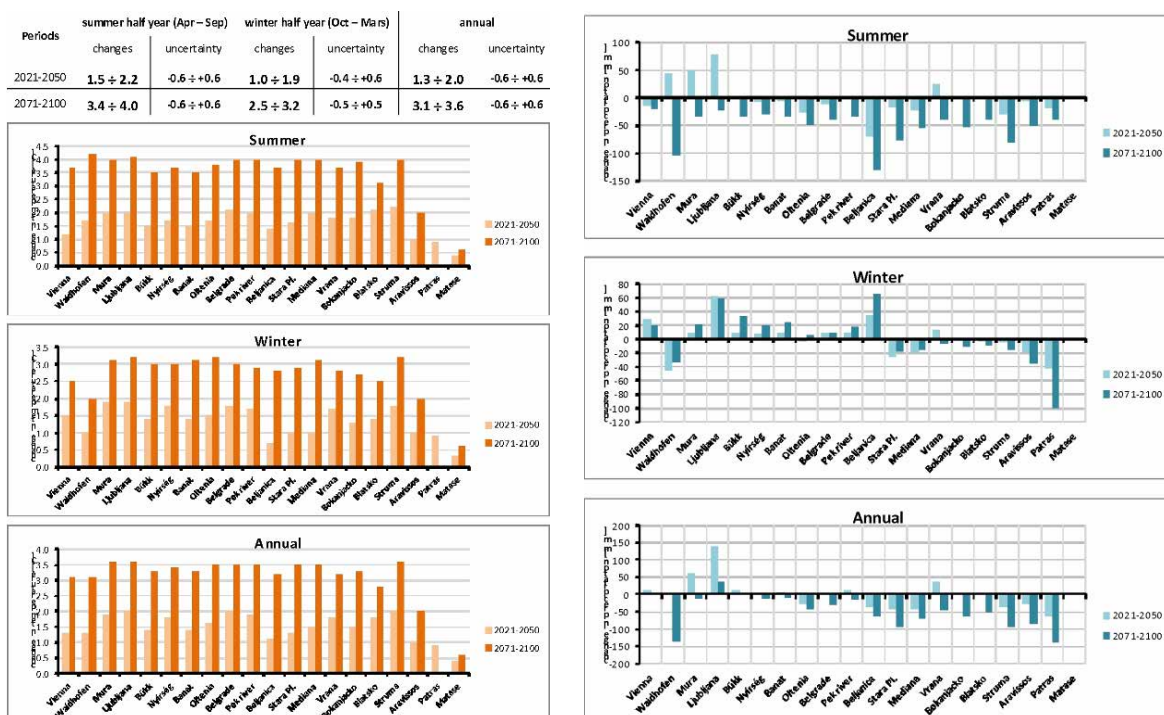
3 Radni paketi WP3, WP5 I WP6

U radnom paketu WP3 Klimatske promene prognoze klimatskih promena su urađene za scenario A1B, a klimatski modeli su bili Aladin, Promes i RegCM3. Bazni period je bio 1961-1990, a projektni 2021-2050 kao bliža i 2071-2100 kao dalja budućnost. Na slici 4 dat je prikaz dobijenih rezultata za temperaturu i padavine po test područjima za letnji i zimski period, kao i na godišnjem nivou.

Radni paket WP5 Promene u korišćenju zemljišta obuhvata promene u smislu pokrivenosti terena, u smislu korišćenja voda za navodnjavanje i u smislu mogućih promena u kvalitetu voda. Obradivač svakog test područja je prema proceni sadašnjeg i pretpostavljenog budućeg stanja na području određivao ove komponente.

Slično kao i za WP5, i u radnom paketu WP6 Socio-ekonomske promene Obradivač svakog test područja je prema proceni sadašnjeg i pretpostavljenog budućeg stanja na području određivao buduću broj stanovnika i njihove potrebe za vodom.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 4 Rezultati dobijenih promena po test područjima za temperaturu i padavine
Figure 4 Results of obtained changes on test areas for temperature and precipitation

4 Radni paket WP4 raspoloživost vodnih resursa

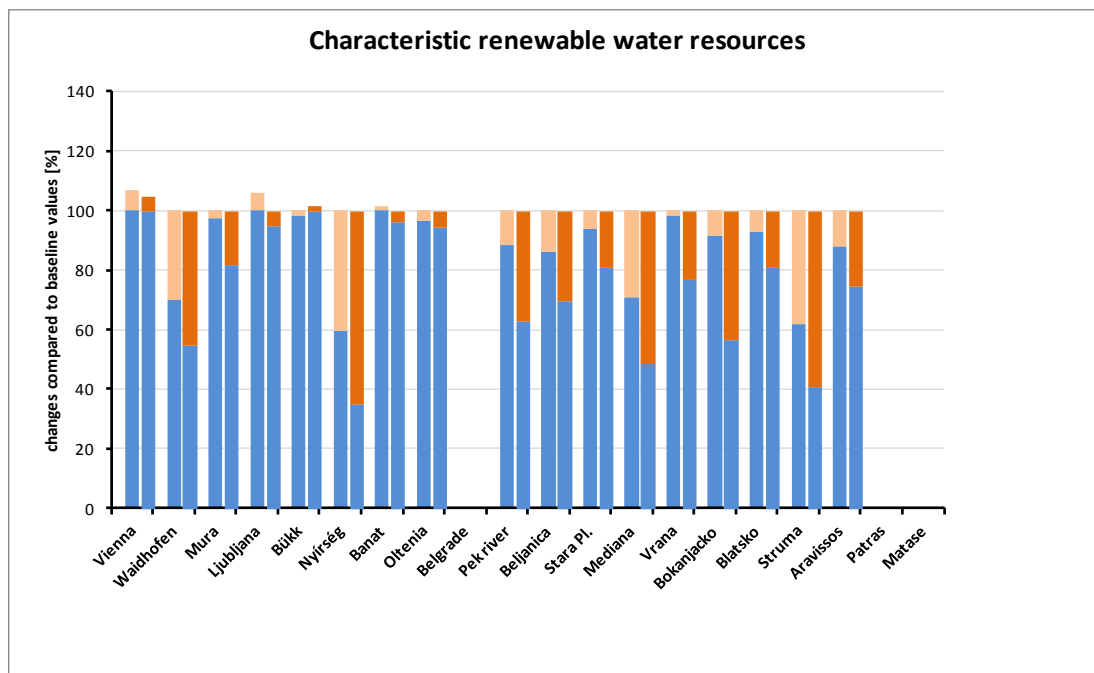
Na osnovu odabrane metodologije rada i dobijenih vrednosti u drugim radnim paketima, određivana je raspoloživost vodnih resursa. Na slici 5 dati su rezultati u procentima dobijenih budućih kapaciteta u poređenju sa baznim periodom 1961-1990. Prvi graf kod svakog od test područja predstavlja period 2021-2050, a drugi 2071-2100.

Urađeni su i „Vodni eksploatacioni indeksi“, koji predstavljaju količnik potreba za vodom i raspoloživosti vodnog resursa, u odnosu na potrebe u pijaćoj vodi i u odnosu na ukupne potrebe u vodi (slike 6 i 7).

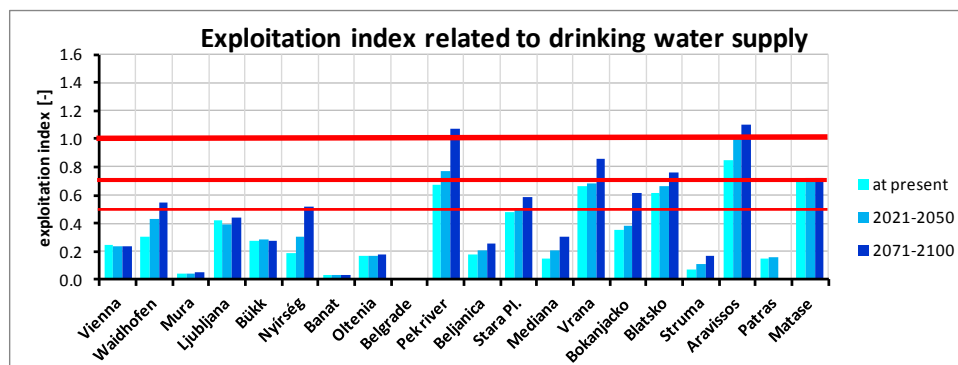
5 Test područje reke Pek

Analizirane su moguće promene vezano za aluvijalna izvorišta Jelak-Veliko Gradište i Mlaka-Kučevo. Površina sliva iznosi 1230 km², a naseljava ga oko 45,000 stanovnika.

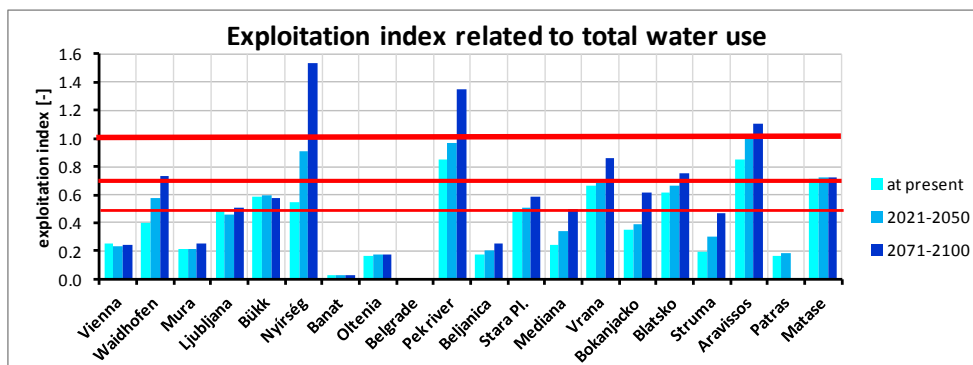
Potrebe za vodom za piće su u granicama: za Kučevo 25 l/s, a za Veliko Gradište 40 l/s. Za vreme letnjih meseci, potrebe se značajno povećavaju u V. Gradištu, koje se već susretalo sa nestašicom vode u ovom periodu, dok Kučevo, uprkos približavanja kapaciteta resursa i potreba, nije osetio nestašicu vode. Potrebe za vodom za navodnjavanje opadaju ili su na istom nivou već duži period. Na tri hidrološke stanice: Debeli Lug (pored Majdanpeka), Kučevo i Kusiće (pored V. Gradišta) beleži se trend opadanja od oko -40% / 100 god.



Slika 5 Dobijeni rezultati raspoloživosti vodnih resursa u budućnosti
 Figure 5 Obtained results of water resources availability in the future



Slika 6 Količnik potreba za vodom za piće i raspoloživosti resursa
 Figure 6 Quotient of the drinking water demand and source availability



Slika 7 Količnik ukupnih potreba za vodom i raspoloživosti resursa
 Figure 7 Quotient of the total water demand and source availability

6 Primenjena metodologija za aluvijalna izvorišta u slivu Peka

Da bi poređenje sadašnjih i budućih kapaciteta imalo smisla usvojeni su sledeći ulazni okviri:

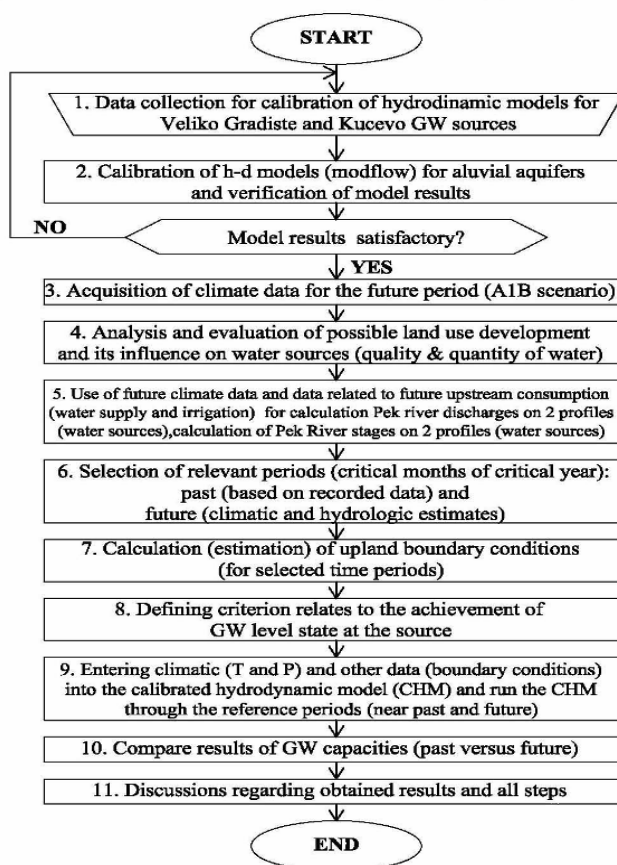
- Izvorište vode za piće ostaje isto danas i u budućnosti - bez novih bunara i njihovog kolmiranja, bez erozije i morfoloških promena u neposrednom okruženju (reka, samo izvorište i zaleđe),
- Promene u budućnosti, u odnosu na sadašnjost, se razmatraju u domenu temperatura, padavina, uzvodnih potreba za vodom (i vodosnabdevanje i melioracije) i kao posledica klimatskih promena, evapotranspiracija i granični uslovi od strane reke i zaleđa.

Primenjena metodologija je data algoritmom na slici 8, a u narednom tekstu se bliže pojašnjuju pojedini koraci:

Koraci 1 i 2. Kalibracija modela aluvijalnih izvorišta podzemnih voda „Jelak“ i „Mlaka“ su urađeni u programu Modflow. U okviru vertikalnog bilansa određivana je infiltracija i evapotranspiracija. Za infiltraciju je korišćen empirijski nomogram (slika 9) za određivanje maksimalne infiltracije - kada je nivo podzemnih voda (NPV) jednak površini terena. Kada je NPV niži od 4m u odnosu na teren, uzima se da nema infiltracije, a ako je nivo NPV između 0 i -4m od terena uzimana je linearna vrednost.

Za maksimalnu vrednost evapotranspiracije (kada je NPV na površini terena) uzimana je prosečna vrednost iz trinaestogodišnjih osmotranja u tom području korelacije evapotranspiracije i temperature, datih nomogramom (slika 10).

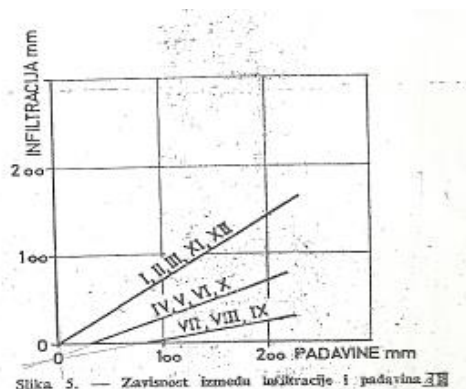
METHODOLOGY FOR ANALYZING CLIMATE CHANGE IMPACTS ON ALUVIAL WATER SOURCES IN PEK C.A.



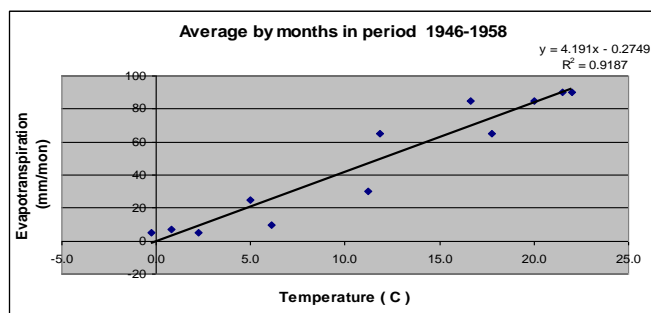
Slika 8 Metodologija (koraci)
 Figure 8 Methodology (steps)

Slično kao i za infiltraciju, kada je NPV niži od 3m u odnosu na teren, uzima se da nema evapotranspiracije, a ako je nivo NPV između 0 i -3m od terena uzimana je linearna vrednost.

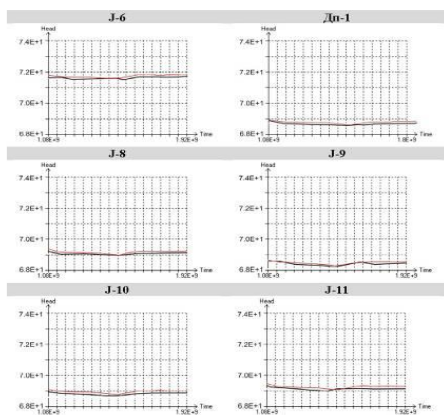
Rezultati kalibracije su prikazani na slikama 11 (Jelak) i 12 (Mlaka).



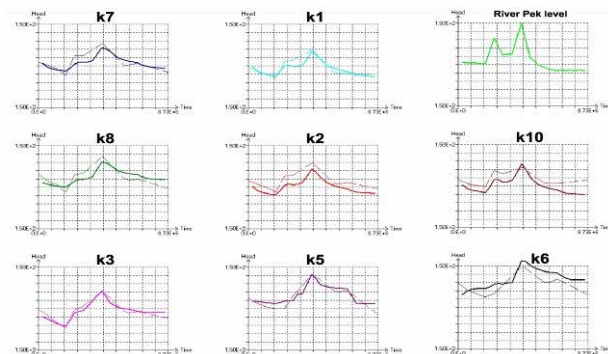
Slika 9 Nomogram infiltracija–padavine
Figure 9 Graph infiltration–precipitation



Slika 10 Nomogram evapotranspiracija – temperatura
Figure 10 Graph evapotranspiration – temperature



Slika 11 Rezultati kalibracije NPV za Jelak
Figure 11 Calibration results of GWL for Jelak

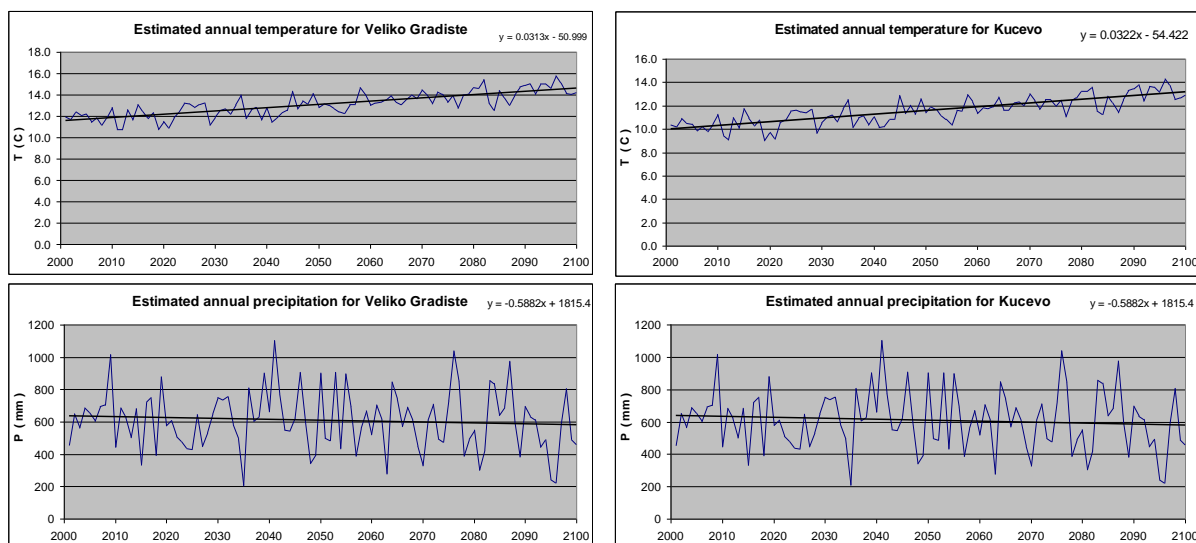


Slika 12 Rezultati kalibracije NPV za Mlaku
Figure 12 Calibration results of GWL for Mlaka

Korak 3. Za područje Peka, primenjeni klimatski model CNRM-RM5 predviđa prosečno povećanje temperature od 3.1 do 3.2 °C/100 godina i smanjenje padavina od oko -9 %/100 godina. Prosek osmotrenog temperaturnog trenda za Srbiju iznosi is 0.6 °C/100 godina, dok je za ovaj region nezatno niži, a prosek osmotrenog trenda padavina za Srbiju je oko nule (bez trenda ili minimalno negativan), dok je za ovaj region oko -10 %/100 godina. Rezultati klimatskog modela za temperaturu i padavine su prikazani na slici 13.

Korak 4. Trend kvaliteta vode reka u Srbiji, pa i reke Pek, je u pravcu smanjenja ili stagnacije zagađenja po većini od analiziranih parametara. Taj trend će se verovatno nastaviti, pa i još poboljšati, imajući u vidu da je za očekivati u skorijoj budućnosti izgradnja i postrojenja za tretman otpadnih voda svih većih naselja u Srbiji koji ih sad nemaju (u slivu Peka to su naselja Majdanpek, Kučevo i Veliko Gradište). Kako je već danas ova reka unutar predviđene klase vodotoka po pitanju kvaliteta, po ovom aspektu je dosta izvesno da će se očuvati “dobar status voda”. Pitanje potencijalnog akcidentnog zagađenja se nije razmatralo.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 13 Rezultati klimatskog modela za temperaturu i padavine za V.Gradište i Kučevo
Figure 13 Climate model results for temperature and precipitation for V.Gradište and Kučevo

Usvojena je pretpostavka da se Land use u okviru sliva u budućnosti neće bitno menjati, tako da neće uticati na promenu koeficijenta oticaja u bilansu voda u slivu uzvodno, ali promene uzimanja vode u budućnosti za potrebe navodnjavanja na sektoru uzvodno od datog izvorišta su uzete u obzir. Kao i za potrebe za vodom za piće, razmatrane su tri opcije: optimistička (sa aspekta vodnog bilansa) – podrazumeva sasvim blago smanjenje potreba za vodom (OO); srednja - podrazumeva sasvim blago povećanje potreba za vodom (SO); pesimistička - podrazumeva malo značajnije povećanje potreba za vodom (PO). Ove opcije su opisane u narednom koraku.

Korak 5. Granicni uslov na reci za HD model određujemo, nakon što sračunamo protok, preko uspostavljene zavisnosti protok – nivo vode u reci. On je određen preko većeg broja osmotrenih podataka (slike 16 i 17).

Usled nedostataka podataka za računanje vodnog bilansa na zadatim profilima izvorišta, odlučeno je da se protok za vremenske preseke u budućnosti odredi na sledeći način:

$$\begin{array}{c}
 P_{2001}^{2100}, T_{2001}^{2100} \\
 \downarrow \\
 \text{VNC} \\
 \downarrow \\
 Q_{1960}^{2006}, P_{1960}^{2006}, T_{1960}^{2006} \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow Q_{VNC} = f(P, T) \rightarrow Q_{VNC,2001}^{2100}
 \end{array}
 \quad (1)$$

VNC – Dvoparametarska korelaciona funkcija

VNC – Twoparameters correlation funktion

$Q_{VNC,2001}^{2100}$ sadrži u sebi uticaj od dosadašnje potrošnje (vodosnabdevanje i melioracije) i ET, ali ne sadrži dodatni uticaj povećane potrošnje (vodosnabdevanje i melioracije, verovatno i deo ET), usled dodatnog nelinearnog uticaja povišene neregistrovane temperature. Pa je:

Samo za više, neregistrovane temperature

$$\begin{array}{c}
 \downarrow \\
 Q_{future,2001}^{2100} = Q_{VNC,2001}^{2100} - \Delta H_{UW} - \Delta H_{UM} - \Delta ExtraET
 \end{array}
 \quad (2)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

ΔH_{UW} – extra (dodatno u odnosu na sadašnje stanje) korišćenje vode za piće (zavisno od budućih temperatura i meseca u toku godine); Prosečni godišnji prosek trenda promene potrošnje: $A_w = -0,2$ l/s/y (OO), $A_w = +0,1$ l/s/y (SO) i $A_w = +0,5$ l/s/y (PO). Zbog osetljivosti potrošnje u odnosu na mesec u godini (K_m) i usled varijacije temperature (K_t) za jedan mesec (od godine do godine), ovi koeficijenti se moraju uključiti, a dati su u tabelama 1 i 2.; $\Delta H_{UW} = A_w \cdot K_m \cdot K_t$

ΔH_{UM} – extra (dodatno u odnosu na sadašnje stanje) korišćenje vode za navodnjavanje (zavisno od budućih temperatura, padavina i meseca u toku godine); Prosečni godišnji prosek trenda promene potrošnje: $A_m = 0,0$ l/s/y (OO), $A_m = +0,3$ l/s/y (SO) i $A_m = +1,0$ l/s/y (PO). Zbog osetljivosti potrošnje u odnosu na mesec u godini (K_m) i usled varijacije temperature (K_t) i padavina (K_p) za jedan mesec (od godine do godine), ovi koeficijenti se moraju uključiti, a dati su u tabelama 1,2 i 3; $\Delta H_{UM} = A_m \cdot K_m \cdot K_t \cdot K_p$

$\Delta ExtraET$ - Mi ne znamo koliko može biti $\Delta ExtraET$, pa čak ni da li je opravdano uključiti ga u jednačinu (2). Zato se i on zadaje kroz tri opcije: bez $\Delta ExtraET$ (OO), $\Delta ExtraET$ je oko 10% od realnog Extra ET (SO) i $\Delta ExtraET$ je oko 20% od realnog Extra ET (PO), ali sve ovo samo za mesece u budućnosti za koje je dobijena prognoza temperature veća od bilo koje zabeležene u periodu 1960-2006.

Tabela 1. Varijacija (K_m) potreba za vodom kroz mesece (za prosečnu godinu)

Table 1. Variation (K_m) of water demand through months (for average year)

(K_m)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ΔH_{UW}	0,85	0,85	0,90	0,95	1,05	1,10	1,20	1,20	1,10	1,00	0,95	0,85
ΔH_{UM}^1	0,00	0,00	0,00	0,91	3,63	2,72	2,72	1,82	0,20	0,00	0,00	0,00

¹ 0,00 znači $K_m = 0,00$; 1,10 znači $K_m = 1,10$

Tabela 2. Varijacija (K_t) potreba za vodom kroz mesece (u zavisnosti od razlike temperature u tom mesecu u datoj godini od proseka T za dati mesec)

Table 2. Variation (K_t) of water demand through months (depending on difference of temperature in the month of that year from T average of that month)

(K_t)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ΔH_{UW}	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 13\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 25\%$	$\pm 20\%$	$\pm 13\%$	$\pm 10\%$
ΔH_{UM}^2	$\pm 0\%$	$\pm 0\%$	$\pm 13\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 25\%$	$\pm 20\%$	$\pm 13\%$	$\pm 10\%$

² $\pm 0\%$ znači $K_t = 1,00$; -10% znači $K_t = 0,90$; $+10\%$ znači $K_t = 1/0,9 = 1,11$;

Tabela 3. Varijacija (K_p) potreba za vodom kroz mesece (u zavisnosti od sume padavina u datom mesecu)

Table 3. Variation (K_p) of water demand through months (depending of precipitation sum in that month)

(K_p)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
ΔH_{UM}^3	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5	0÷2.5

³ za $P > 120$ mm/mon $\rightarrow K_p = 0,0$; za $P = 0$ mm/mon $\rightarrow K_p = 2,5$; između linearno;

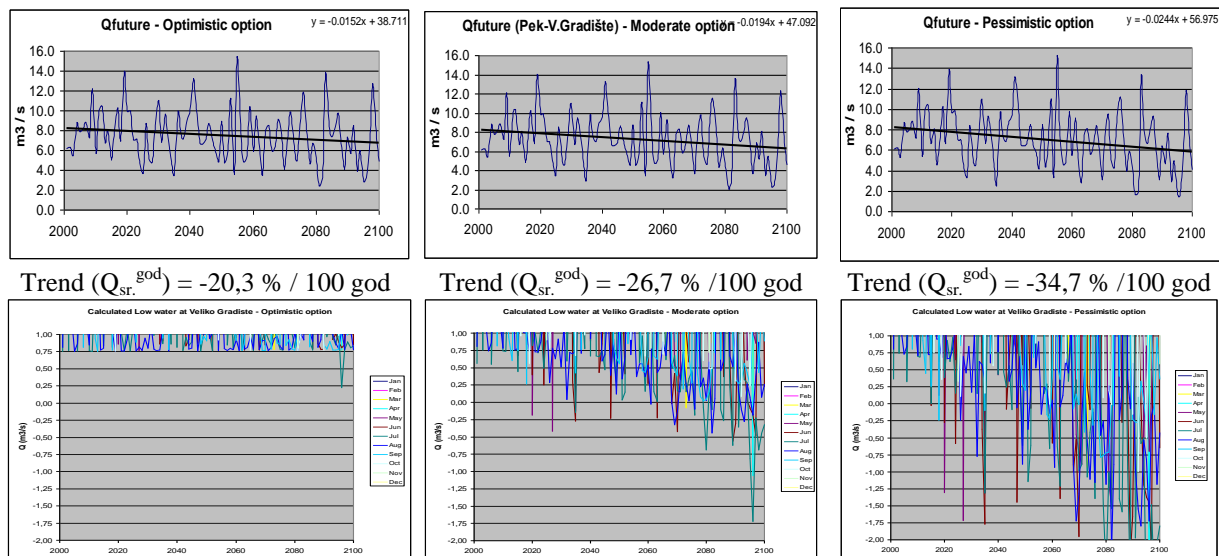
Ovi koeficijenti su određeni empirijski, iskustveno ili ekspertskom ocenom. Oni sigurno povećavaju tačnost proračuna protoka u reci u uslovima pretpostavljenih klimatskih promena, a konkretne vrednosti su, naravno podložne diskusiji.

Na slikama 14 i 15 dat je prikaz srednjegodišnjih i srednjemesečnih (samo za male vode) protoka u Peku na profilima V.Gradište i Kučevo, u skladu sa svim prethodno iznetim u

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

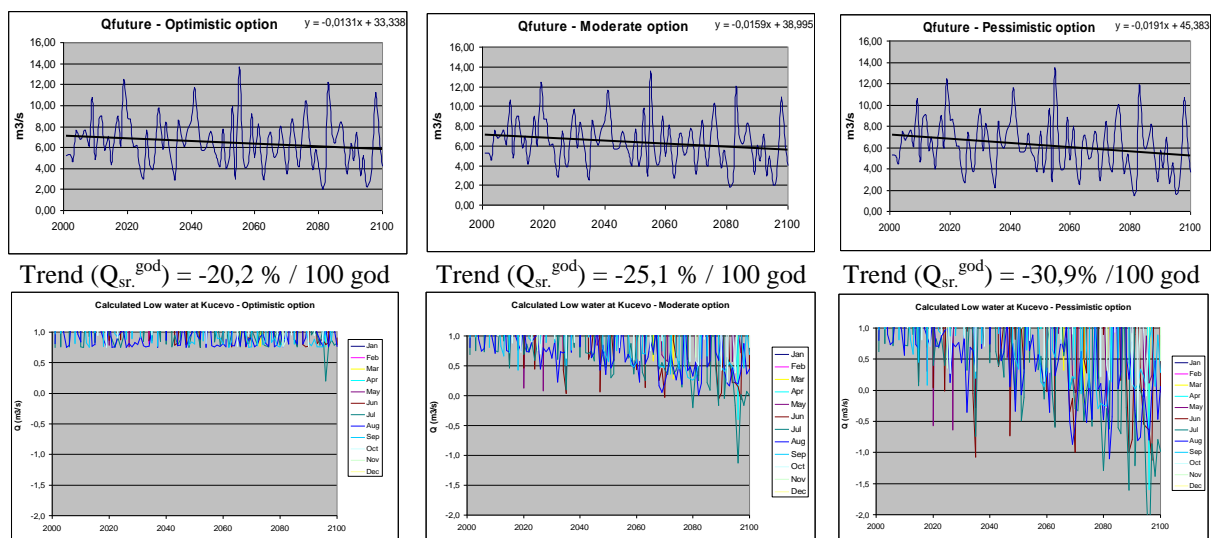
tekstu, za OO, SO i PO opciju. Negativan protok u nekom mesecu znači da bi pod datim uslovima i pretpostavkama reka Pek u tom mesecu bila bez vode.

Nivoi u reci Pek su određeni preko uspostavljene zavisnosti Protok – Nivo (slike 16 i 17).



Slika 14 Protok u Peku (profil V. Gradište), srednjegodišnje i mesečne vrednosti (samo za male vode)

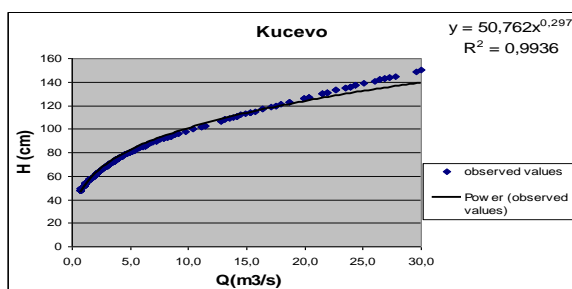
Figure 14 River Pek discharge (profile V. Gradište), annual and monthly values (only for low water)



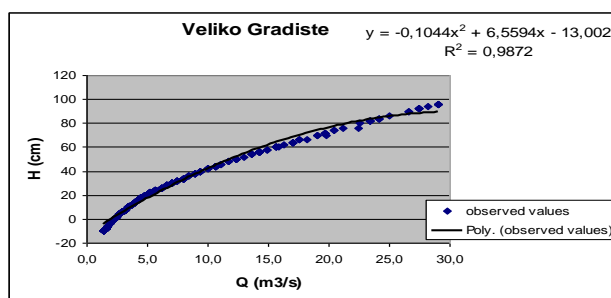
Slika 15 Protok u Peku (profil Kučevo), srednjegodišnje i mesečne vrednosti (samo za male vode)

Figure 15 River Pek discharge (profile Kučevo), annual and monthly values (only for low water)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 16 Zavisnost protok – nivo za V. Gradište
Figure 16 Graph discharge–level for V. Gradište



Slika 17 Zavisnost protok – nivo za Kučevo
Figure 17 Graph discharge–level for Kučevo

Korak 6. U skladu sa graficima na slici 13, kao buduće kritične godine izabrane su 2035 (bliža perspektiva) i 2096 (dalja perspektiva). Po istom kriterijumu izabrane su iz prošlosti hidrološki najnepovoljnije 1962 i 1992 (profil V. Gradište) i 1961 i 1992 (profil Kučevo).

Korak 7. U toku kalibracije (koraci 1 i 2), dobijeno je da dotok iz zaleđa iznosi oko 30 l/s/km za Jelak (V. Gradište) i 18 l/s/km za Mlaku (Kučevo). Za buduće računске periode, za dotok iz zaleđa je usvojeno da je njegov trend smanjenja približno isti do malo manji od dobijenog opadajućeg trenda za reku Pek, za iste ostale uslove.

Tabela 4 Ulazne vrednosti T i P za V. Gradište i Kučevo za sve računске periode
Table 4 Input data for V. Gradište and Kučevo for all accounting periods

The T and P inputs into the HD model of Jelak–V. Gradište and of Mlaka–Kučevo, are shown in the Tables.

Jelak ALWS	Veliko Gradište - 1962							
Type of data	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Temperature (°C)	2.0	12.1	16.9	18.0	20.5	22.6	17.1	12.1
Precipitation (mm)	129.5	61.9	14.6	22.7	54.7	18.5	32.2	7.6
Veliko Gradište - 1992								
Temperature (°C)	6.4	11.5	16.3	19.3	21.1	24.9	16.5	11.9
Precipitation (mm)	12.1	61.6	18.1	133	30.3	4.1	60.9	113.8
Veliko Gradište - 2035								
Temperature (°C)	4.9	10.6	23.0	28.0	28.4	25.7	21.9	16.2
Precipitation (mm)	38.3	36.9	1.1	1.7	1.1	1.9	22.1	9.5
Veliko Gradište - 2096								
Temperature (°C)	12.2	22.5	25.1	25.6	30.9	28.7	20.4	14.5
Precipitation (mm)	1.1	7.6	64.9	18.4	4.1	3.9	23.7	24.5
Mlaka ALWS	Kučevo - 1961							
Type of data	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Temperature (°C)	6.0	12.4	12.8	18.5	18.7	19.1	15.9	11.9
Precipitation (mm)	18.3	88.7	130.4	68.1	62.8	13.7	9.8	22.9
Kučevo - 1992								
Temperature (°C)	4.8	10.2	14.5	17.7	19.7	24.2	15.4	10.7
Precipitation (mm)	9.5	65.4	28.7	125.6	30.8	0.5	50.1	91.8
Kučevo - 2035								
Temperature (°C)	4.3	10.9	21.7	28.8	29.1	26.6	21.8	16.0
Precipitation (mm)	29.9	40.6	1.3	3.7	1.3	1.3	23.7	14.3
Kučevo - 2096								
Temperature (°C)	12.4	22.0	24.2	25.5	31.5	29.2	20.4	14.8
Precipitation (mm)	1.3	10.2	84.6	12.1	3.9	12.4	31.4	32.7

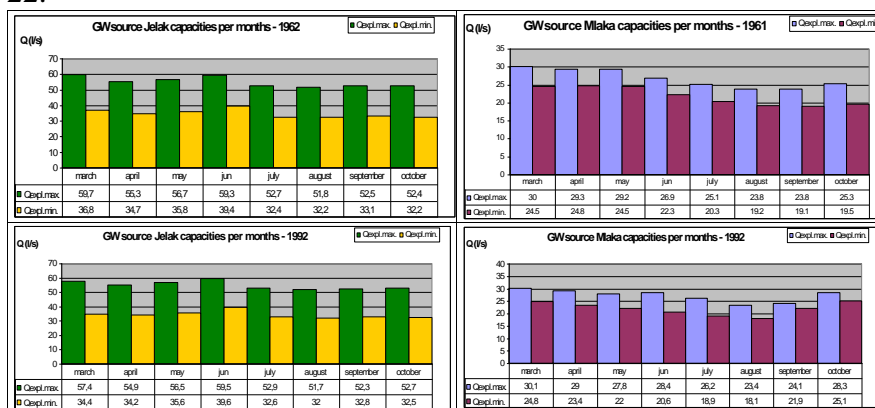
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Korak 8. Kao kriterijumi za definisanje kapacitativnosti izvorišta uzeta su dva stanja nivoa podzemnih voda, za koja su urađeni proračuni HD modela, a koji su isti za sve periode (prošle i buduće) i opcije (pesimistička, srednja i optimistička). Prvi je vrlo malo iznad podine (prosek za 5 bunara ≈ 68.2 m.a.s.l. na profilu Jelak i prosek za 3 bunara ≈ 149.5 m.a.s.l. na profilu Mlaka), što korespondira **maximumu** kapacitativnosti izvorišta u datim uslovima, i drugi za oko 0.5 m viši (Jelak ≈ 68.7 m.a.s.l. i Mlaka ≈ 150.0 m.a.s.l.), što korespondira manjoj vrednosti kapacitativnosti izvorišta u datim uslovima (**min.** na graficima rezultata).

Korak 9. Razmatra se period za svaku od godina od marta do oktobra, a prikaz ulaznih podataka u ovom radu se daje samo za temperaturu i padavine (tabela 4).

7 Rezultati - sliv Peka

Korak 10. Rezultati proračuna za prošli period (koji se na nekim slikama naziva i sadašnji) se daje na slici 18, a za buduće na slikama 19 i 20. Komparacija ovih vrednosti daje se na slikama 21 i 22.



Slika 18 Rezultati proračuna izdašnosti za prošli period za oba izvorišta
Figure 18 Accounting results of capacity for the past period for both sources



Slika 19 Rezultati proračuna izdašnosti za odabrane godine iz budućnosti za Jelak
Figure 19 Accounting results of capacity for the selected period in future for Jelak

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 20 Rezultati proračuna izdašnosti za odabrane godine iz budućnosti za Mlaku
Figure 20 Accounting results of capacity for the selected period in future for Mlaka

			Future vs. present capacity of the Jelak source (Veliki Gradište)										
Option	Years	Rate of abstr.	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Aver	Min	Max
Optimistic	2035/1962	Max.	0.87	0.89	0.96	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.94	0.87	0.97
		Min.	0.85	0.84	0.95	0.94	0.99	1.00	1.00	1.02	0.95	0.84	1.02
	2035/1992	Max.	0.91	0.89	0.97	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.95	0.89	0.97
		Min.	0.90	0.85	0.96	0.94	0.99	1.00	1.01	1.01	0.96	0.85	1.01
	2096/1962	Max.	0.73	0.74	0.78	0.80	0.76	0.79	0.83	0.79	0.78	0.73	0.83
		Min.	0.66	0.70	0.76	0.73	0.77	0.81	0.81	0.79	0.75	0.66	0.81
2096/1992	Max.	0.76	0.74	0.78	0.79	0.75	0.79	0.83	0.78	0.78	0.74	0.83	
	Min.	0.70	0.71	0.76	0.73	0.77	0.82	0.82	0.78	0.76	0.70	0.82	
Moderate	2035/1962	Max.	0.81	0.80	0.87	0.89	0.88	0.92	0.89	0.90	0.87	0.80	0.92
		Min.	0.78	0.76	0.81	0.84	0.87	0.90	0.83	0.90	0.84	0.76	0.90
	2035/1992	Max.	0.84	0.81	0.88	0.89	0.88	0.92	0.89	0.90	0.88	0.81	0.92
		Min.	0.84	0.77	0.81	0.84	0.87	0.90	0.84	0.89	0.84	0.77	0.90
	2096/1962	Max.	0.65	0.65	0.69	0.72	0.69	0.70	0.74	0.72	0.70	0.65	0.74
		Min.	0.61	0.65	0.69	0.66	0.73	0.73	0.74	0.74	0.70	0.61	0.74
2096/1992	Max.	0.68	0.65	0.69	0.72	0.69	0.70	0.74	0.71	0.70	0.65	0.74	
	Min.	0.66	0.66	0.69	0.66	0.73	0.74	0.75	0.73	0.70	0.66	0.75	
Pessimistic	2035/1962	Max.	0.77	0.77	0.75	0.78	0.76	0.78	0.80	0.77	0.77	0.75	0.80
		Min.	0.72	0.73	0.73	0.73	0.77	0.78	0.78	0.78	0.75	0.72	0.78
	2035/1992	Max.	0.80	0.78	0.75	0.78	0.75	0.79	0.80	0.77	0.78	0.75	0.80
		Min.	0.77	0.74	0.73	0.72	0.76	0.78	0.79	0.77	0.76	0.72	0.79
	2096/1962	Max.	0.59	0.59	0.62	0.65	0.63	0.64	0.68	0.65	0.63	0.59	0.68
		Min.	0.58	0.61	0.65	0.63	0.69	0.69	0.70	0.70	0.65	0.58	0.70
2096/1992	Max.	0.61	0.59	0.62	0.65	0.63	0.64	0.68	0.65	0.64	0.59	0.68	
	Min.	0.62	0.62	0.65	0.62	0.68	0.69	0.71	0.69	0.66	0.62	0.71	

Slika 21 Poređenje rezultata izdašnosti za odabrane godine za Jelak (budućnost / prošlost)
Figure 21 Comparison of results for selected years for Jelak (future / past)

			Future vs. present capacity of the Mlaka source (Kučevo)										
Option	Years	Rate of abstr.	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Aver	Min	Max
Optimistic	2035/1961	Max.	1.03	0.88	0.84	0.90	0.96	1.01	1.02	0.98	0.95	0.84	1.03
		Min.	1.04	0.85	0.80	0.87	0.96	1.01	1.03	1.03	0.95	0.80	1.04
	2035/1992	Max.	1.02	0.89	0.88	0.85	0.92	1.03	1.00	0.87	0.93	0.85	1.03
		Min.	1.03	0.90	0.89	0.94	1.03	1.07	0.89	0.80	0.94	0.80	1.07
	2096/1961	Max.	0.79	0.61	0.59	0.60	0.61	0.66	0.74	0.76	0.67	0.59	0.79
		Min.	0.74	0.52	0.49	0.49	0.49	0.55	0.65	0.74	0.59	0.49	0.74
	2096/1992	Max.	0.78	0.62	0.62	0.57	0.58	0.67	0.73	0.68	0.66	0.57	0.78
		Min.	0.73	0.55	0.55	0.53	0.52	0.59	0.57	0.58	0.58	0.52	0.73
Moderate	2035/1961	Max.	0.99	0.83	0.75	0.79	0.88	0.95	0.95	0.91	0.88	0.75	0.99
		Min.	1.00	0.79	0.71	0.74	0.85	0.93	0.94	0.95	0.86	0.71	1.00
	2035/1992	Max.	0.99	0.84	0.79	0.75	0.84	0.96	0.94	0.82	0.87	0.75	0.99
		Min.	0.99	0.84	0.79	0.81	0.92	0.98	0.82	0.74	0.86	0.74	0.99
	2096/1961	Max.	0.73	0.54	0.53	0.54	0.54	0.59	0.68	0.72	0.61	0.53	0.73
		Min.	0.68	0.44	0.42	0.43	0.42	0.47	0.59	0.68	0.52	0.42	0.68
	2096/1992	Max.	0.73	0.55	0.56	0.51	0.52	0.60	0.68	0.64	0.60	0.51	0.73
		Min.	0.67	0.47	0.47	0.46	0.45	0.50	0.52	0.53	0.51	0.45	0.67
Pessimistic	2035/1961	Max.	0.96	0.78	0.70	0.76	0.82	0.88	0.88	0.86	0.83	0.70	0.96
		Min.	0.96	0.73	0.64	0.70	0.79	0.84	0.85	0.88	0.80	0.64	0.96
	2035/1992	Max.	0.96	0.79	0.73	0.72	0.79	0.89	0.87	0.77	0.81	0.72	0.96
		Min.	0.95	0.77	0.72	0.76	0.85	0.90	0.74	0.68	0.80	0.68	0.95
	2096/1961	Max.	0.73	0.53	0.51	0.53	0.54	0.58	0.68	0.75	0.61	0.51	0.75
		Min.	0.67	0.43	0.40	0.42	0.41	0.46	0.59	0.68	0.51	0.40	0.68
	2096/1992	Max.	0.73	0.54	0.53	0.50	0.52	0.59	0.67	0.67	0.59	0.50	0.73
		Min.	0.66	0.45	0.45	0.45	0.44	0.49	0.52	0.53	0.50	0.44	0.66

Slika 22 Poređenje rezultata izdašnosti za odabrane godine za Mlaku (budućnost / prošlost)
Figure 22 Comparison of results for selected years for Mlaka (future / past)

8 Zaključna razmatranja za aluvijalna izvorišta u slivu Peka

Korak 11. Projekat CCWaters i primenjena metodologija ima, po logici stvari, dosta pretpostavki i proračuna. Svaka prognoza je podložna neizvesnostima u pretpostavkama i nepreciznostima u proračunima. Potrebno je njih sagledati i dati kritički osvrt. Prognoza je utoliko bolja ukoliko ima više potvrda u do sada osmotrenim vrednostima, i posebno, trendovima. U nastavku se daje komentar prema glavnim paketima i delatnostima obrađenim u okviru ovog projekta za aluvijalna izvorišta u slivu Peka.

1. Klimatske prognoze. Uzimanje bilo kog scenarija razvoja emisija GHG i povećanja temperature je podložno diskusiji. Od realnosti ove, početne, pretpostavke jako puno zavise sve dalje prognoze. Usvojen je scenario A1B [1, 2]. Za područje Peka usvojeni klimatski model CNRM-RM5 daje prognozu povećanja srednjegodišnje temperature za 3.1 do 3.2 °C/100 god. Sadašnji temperaturni trend regiona kome pripada Pek C.A. je oko 0.4 °C/100 god (prosečni za Srbiju je malo veći). Ovo povećanje srednjegodišnjeg trenda se pokušava objasniti pretpostavkama koje u sebi ima klimatski scenarijo. Kod padavina, za područje Peka usvojeni klimatski model daje prognozu smanjenja padavina za -9 %/100god., što vrlo dobro odgovara sadašnjem trendu padavina u regionu kome pripada Pek C.A. Raspored mesečnih trendova vrlo diskutabilan: prognoziran je najveći trend smanjenja za mesece juli, avgust i septembar (reda -55, -45 i -25 %/100god.), što je znatno nepovoljnije od prognoziranog godišnjeg trenda, a ostvareni trendovi u julu, avgustu i septembru u regionu Peka su reda -20, +30 i +50 %/100 god. Posmatrano kroz kritične periode za vodosnabdevanje (juli-oktobar), prognozirani klimatski parametri, uz pretpostavku ispravno odabranog A1B scenarija, daju osetno oštrije (nepovoljnije)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- vrednosti od onoga što se može zaključiti analizom osmotrenih trendova u ovom periodu godine.
2. Prognoze vezane za promene u korišćenju zemljišta. Kao što je napisano, pretpostavka je da se Land use neće bitnije menjati u budućnosti. Neizvesnosti u pogledu ove pretpostavke postoje, ali obzirom da nisu zabeleženi neki značajniji trendovi (osim donekle smanjenja obradivih površina), čini se kao jedino opravdana.
 3. Prognoze vezane za hidrologiju reka i vodni bilans. Promena korišćenja voda za potrebe navodnjavanja i vodosnabdevanja je posmatrana kroz optimističku, srednju i pesimističku opciju. Iako su date u relativno širokim granicama, one ne utiču previše na hidrološke trendove i vodni bilans (max. pomeraju hidrološki trend Peka sa reda -20%/100god. na reda -25%/100god.). Prognozirani srednjegodišnji hidrološki parametri daju znatno povoljnije trendove od onoga što se može zaključiti analizom osmotrenih trendova, a posmatrano kroz kritične periode za vodosnabdevanje (juli-oktobar), prognozirani hidrološki parametri daju približne ili nešto oštrije vrednosti.
 4. Prognoze vezano za modele izvorišta podzemnih voda, uključujući i granične uslove. Kalibracija oba Hidrodinamička modela se čini dosta dobrom. Veća preciznost proračuna bi se mogla tražiti u domenu zadavanja graničnih uslova iz zaleđa (zbog senzitivnosti rezultata kapaciteta izvorišta na ovaj granični uslov), pod uslovom postojanja znatno većeg fonda podataka od onih sa kojima se raspolagalo.

Ukupna ocena dobijenih rezultata za razmatrana aluvijalna izvorišta. Ukupno gledano, smatramo da su dobijeni rezultati opadanja kapaciteta aluvijalnih izvorišta u dolini Peka približni do neznatno veći od onih koji bi se mogli očekivati na osnovu analize svih razmatranih parametara i trendova. Poredjenjem dobijenih rezultata za dva aluvijalna izvorišta, uočavamo nešto veću senzitivnost izvorišta Mlaka (Kučevo) od izvorišta Jelak (Veliko Gradište) na klimatske promene (to se vidi, pre svega, kroz odnos kapaciteta za 2096. godinu naspram godina koje reprezentuju sadašnje stanje). Možda bi objašnjenje moglo da se traži u manjoj vodopropusnosti izvorišta Mlaka, kao i blizini reke Dunav izvorištu Jelak.

U cilju boljeg sagledavanja klimatskih promena u jugoistočnoj Evropi, konstatujemo da su, unutar Srbije, klimatske promene imale do sada najveći uticaj na smanjenje protoka u Istočnom delu Srbije, gde su registrovani najizraženiji trendovi smanjenja padavina i protoka u rekama [3, 4].

Literatura

1. Synthesis Report of the IPCC (Nov. 2007.) www.ipcc.ch
2. IPCC Spatial Report on Emissions Scenarios (SRES, 2000). www.ipcc.ch
3. Climate change impacts on the river hydrology in Serbia – National Study, Institute for the development of water resources “Jaroslav Černi”, 2010-2012.
4. Republic Hydro Meteorological Service of Serbia www.hidmet.gov.rs

Uticaj klimatskih promena na bujične poplave i eroziju zemljišta sa osvrtom na poplave u 2014. godini

Milutin Stefanović¹

Mileta Milojević²

Aleksandar Drobnjak³

APSTRAKT: U proteklih 10 godina (posebno se izdvajaju 2006, 2008, 2010, 2011. i 2014.) u Srbiji su zabeleženi učestali poplavni događaji, od kojih su neki prevazišli zabeležene vodostaje, dotoke i trajanje. Zabeležene su vanredno velike štete od poplava uglavnom na područjima koja nisu šticeana, a zaštitni sistemi su bili više puta na ozbiljnom testu izdržljivosti, posebno na vodocima sa bujičnim režimom. Da li treba da krivimo i klimatske promene za takve pojave? Kao rezultat promene klime, uobičajene vremenske prilike izostaju. Slučajevi ekstremnih suša i poplava sve su češći, ozbiljniji i skuplji. Klimatske promene nesumnjivo utiču na pojavu poplava, ali u kojoj tačno meri, još nije precizno utvrđeno. Svakako da su šume, kao prirodni činilac, vrlo važne i imaju veliki uticaj na klimatske promene. Da li su ekstremno duge kiše, koje su pale u toku maja i septembra meseca 2014. godine i prouzrokovale bujične nadolaske i destruktivno delovale na opštine zapadne, srednje i istočne Srbije bile pod uticajem klimatskih promena? U radu će biti prikazani činioci koji utiču na klimatske promene, analize poslednjih bujičnih poplava, uzroci i njihove posledice, kao i spremnost sistema zaštite od poplava na ekstremne padavine, koje nisu retka posava u proteklim godinama.

Ključne reči: Klimatske promene, bujične poplave, šume

Climate change impacts on torrential floods and soil erosion with emphasis on 2014 floods in Serbia

ABSTRACT: Over the past 10 years (especially 2006, 2008, 2010, 2011 and 2014), frequent floods have occurred in Serbia, some of which have exceeded previously recorded water levels, discharges and durations. Exceptional damages have been caused by the floods, mostly in unprotected areas, while the endurance of flood protection systems has been put to the test multiple times especially on torrential rivers. Are climate changes to blame for these events? As a result of climate change, normal weather conditions are less frequent. Extreme droughts and floods are becoming more frequent, more serious and more expensive. Climate changes undoubtedly affect floods, but the extent has not been precisely determined. Forests, as a natural factor, are surely important and have a large effect on climate change. Were the extreme rainfall events that occurred in May and September 2014, that caused flash floods and destruction in west, central and eastern Serbia, influenced by climate change? This paper showcases factors that influence climate change, analyses of recent flash floods, their causes and consequences, as well as the readiness of the flood protection system to extreme rainfall.

Keywords: climate changes, torrential floods, forests

¹ Milutin Stefanović, dipl.inž. šum, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, milutin.stefanovic@jcerni.co.rs

² Mileta Milojević, dipl.inž. šum., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, mmvodomar@yandex.com

³ Aleksandar Drobnjak, dipl.inž.šum, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, alexandar_1203@hotmail.com

1 Uvod

Uzrok klimatskih promena je neograničeno sagorevanje fosilnih goriva-uglja, nafte i prirodnog gasa - što su takođe i uzročnici oslobađanja CO₂ u atmosferu u sve većoj meri. Zbog ovoga, sloj gasova staklene bašte oko Zemlje postaje deblji, što čini Zemlju sve toplijom.

Uticao globalnog zagrevanja očigledan je od ekvatora pa do polova: koralni grebeni su ugroženi povišenim temperaturama mora, šume se povlače na veću nadmorsku visinu, na hladnije lokacije, polarnim medvedima se usled topljenja polarnog leda smanjuje stanište, glečeri se tope na svakom kontinentu.

Jedna od oblasti koja se najbrže zagreva na Zemlji je regija u kojoj živimo, Dunavsko-Karpatiski basen, a uticaj klimatskih promena evidentan je i u Srbiji. Posledice klimatskih promena kod nas su:

- U mnogim područjima, porast temperature i suša ograničavaju poljoprivrednu proizvodnju, a to je jedan od najvažnijih sektora srpske ekonomije. Područja istočne Srbije i Vojvodine posebno su ugrožena sušama.
- Količine vode za piće, a samim tim i tehničke vode će se bitno smanjiti, jer porast temperature još više ugrožava već pogođene resurse podzemnih voda u Srbiji.
- Šumski požari su češći i ozbiljniji.
- Očekuje se smanjenje snežnog prekrivača i dužine zimskog perioda, što utiče na rezerve vode u zemljištu.
- Poplave će biti sve češće i imaće razorniji efekat, pogotovo bujične poplave.

2 Klimatske promene kao jedan od činilaca poplava u svetu

Kada je reč o riziku od poplava u Evropi, klimatske promene imaju sve veći značaj. U mnogim slučajevima, rizik od poplava je i rezultat toga gde i kako ljudi biraju da žive. Nesumnjivo da sve veći troškovi zbog poplava proteklih decenija mogu se pripisati delom i tome što više ljudi živi u plavnim područjima.

Prema podacima iz Evropske Unije, jedna petina evropskih gradova, sa više od 100.000 stanovnika je izložena riziku od poplava. Analitičari ocenjuju da će zbog porasta broja stanovnika u svetu sve više ljudi morati da živi u područjima gde su česte ekstremne vremenske nepogode.

Da bi se utvrdila tačna uloga klimatskih promena u poplavama u proteklim decenijama, potrebno je da se prikupe pouzdaniji i dugoročni podaci za reke sa režimima prirodnog toka. U svakom slučaju, verovatno je da će se zbog viših temperatura vazduha pojačati hidrološki ciklus, izazivajući češće i jače poplave u mnogim oblastima. Iako su kvantitativne projekcije učestalosti i intenziteta poplava nepotpune, udeo klimatskih promena u materijalnim troškovima zbog prirodnih katastrofa će rasti u budućnosti, jer će u mnogim oblastima biti sve više vremenskih nepogoda.

Oko dve trećine materijalne štete od prirodnih katastrofa potiče od poplava, oluja i drugih hidro-meteoroloških pojava, a ti troškovi stalno rastu od 1980. Troškovi zbog vremenskih nepogoda su u porastu uglavnom zbog promene namene zemljišta, povećanja broja stanovnika, većeg ekonomskog bogatstva, ljudskog delovanja u područjima pod

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

rizikom. Prema evropskoj Direktivi o poplavama koja je stupila na snagu 2007. od članica se traži da do 2013. naprave mape plavnih područja i da pripreme planove za upravljanje rizicima od poplava usmerenih na prevenciju, zaštitu i pripremu do 2015. U aprilu 2013. Evropska komisija je usvojila nacrt strategije za prilagođavanje klimatskim promenama.

Kako je navela Evropska agencija za zaštitu životne sredine (EEA), mere prilagođavanja mogu se u najširem smislu svrstati u "sive" poput tehnoloških i inženjerskih projekata, "zelene" mere koje podrazumevaju ekološki pristup u korišćenju prirodnih resursa.

3 Kako klimatske promene utiču na bujične poplave u Srbiji

Postavlja se pitanje, da li klimatske promene utiču na poplave u Srbiji? Klimatske promene, gledajući celu jugoistočnu Evropu, svakako da stvaraju jako nestabilnu hidrometeorološku situaciju.

Teritoriju Srbije ugrožava veliki broj bujičnih tokova od onih veličine jaruga do velikih bujičnih reka. Danas je najveći obim šteta od bujičnih poplava i erozije nastao na području koje je pretežno brdovitog reljefa sa većim procentom planinskih područja. Razlog je jednostavan. To su područja sa velikom gustinom naseljenosti i pratećom infrastrukturom. Rast urbanizacije nije pratio udgovarajući obim radova na uređenju bujica i zaštite od erozije, pa štete od bujičnih poplava progresivno rastu.

Takođe, neadekvatno gazdovanje šumama rezultira slobodno oticanje pale kiše sa površina koje su obrasle rastinjem.

Poslednje poplave u Srbiji koje su se desile maja i septembra 2014. spadaju u red bujičnih poplava. Veće štete od poplava su nanele bujice, nego veliki tokovi, poput Save, Drine, Morave i drugih većih tokova.

Glavni uzrok obilnih padavina, koje su na nekim lokacijama nadmašile trećinu ukupnih godišnjih količina padavina, bio je neubičajeno sporo premeštanje prostranog dubokog ciklona iz oblasti Mediterana preko Balkanskog poluostrva. Pored toga, područje Republike Srbije je već bilo izloženo jednom izuzetno vlažnom periodu sa dosta padavina. Naime, od 14. aprila do 05. maja 2014. godine u većini mesta u Republici Srbiji izmereno je između 120 i 170 l/m² padavina. Već te padavine su prouzrokovale poplave širom zemlje, pri čemu je pričinjena velika materijalna šteta.

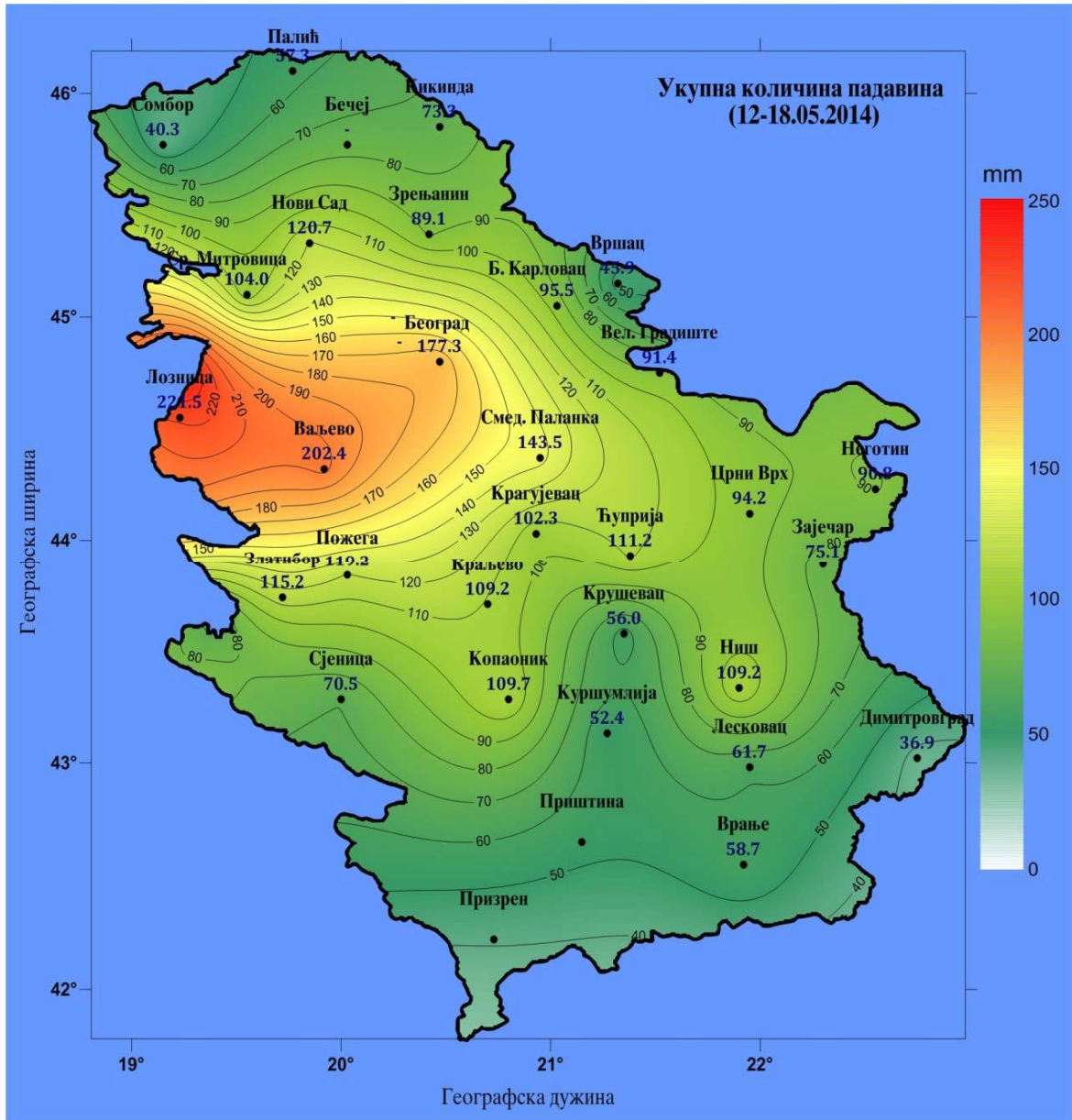
Kiša koja je usledila, padala je neprekidno od 13. do 16. maja, a zabeležene količine padavina bile su rekordne. U većini krajeva su se kretale od 50 l/m² do 100 l/m², u zapadnoj Srbiji od 170 l/m² do 220 l/m², a u nekim mestima u okolini Valjeva prelazile su 300 l/m².

Velike količine padavina prouzrokovale su veliko oticanje i poplave na malim vodotocima koji su u urbanim delovima zapadne, srednje i istočne Srbije napravile velike štete.

Gradovi Krupanj, Osečina, Loznica, Valjevo, Mali Zvornik, Ljubovija pogođeni su katastrofalnim bujičnim poplavama. Spiranje zemljišta i pokretanje nanosa rezultiralo je zatrpavanje rečnih korita bujica, koje su se izlivala i uništavale pokretnu i nepokretnu imovinu, infrastrukturu, poljoprivredne površine. Šteta je procenjena na oko 1,5 milijardu €.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

U periodu od 13. do 16. maja 2014. godine srušeni su svi mogući dosadašnji padavinski rekordi, što dovoljno govori o ekstremnoj dubini ciklona (Slika 1).



Slika 1. Izohijete ukupne količine padavina na teritoriji Republike Srbije u periodu od 12. do 18. maja 2014. godine (izvor RHMZS)

Figure 1. Izohijete of total precipitation in the territory of the Republic of Serbia in the period from 12. to 18. May 2014 (source RHMZS)

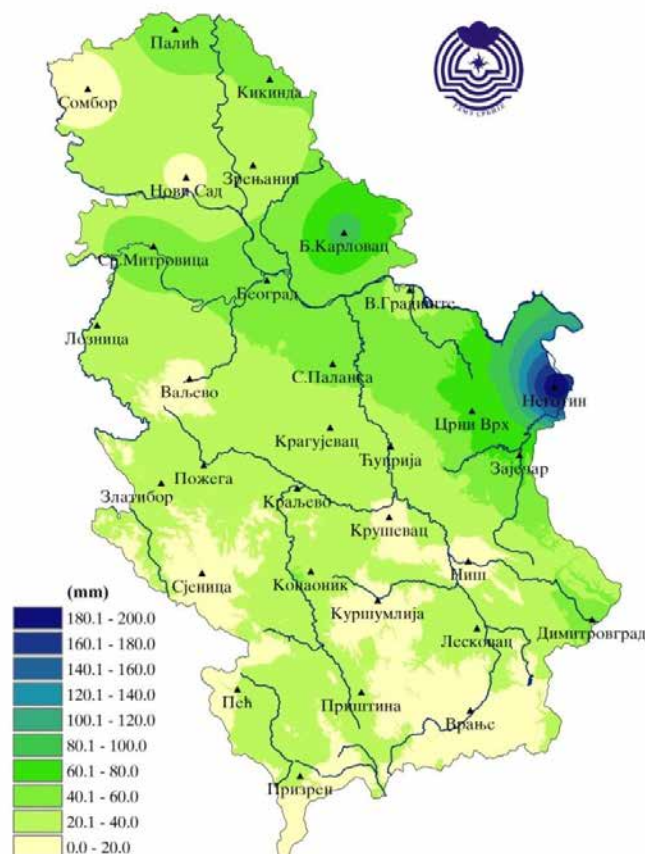
Tokom 15. i 16. septembra 2014. godine, na delu priobalja akumulacionog prostora HE Đerdap 1 i 2, nakon obilnih padavina i do sada nezabeleženog intenziteta na ovim prostorima,

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

dogodile su se ekstremne poplave. Najmanje količina padavina iznosila je 160mm za 24 časa, odnosno 160 l/m², a na nekim mestima, i do 300 l/m².

Raspored padavina na teritoriji Republike Srbije registrovan tokom perioda 15.09-21.09.2014. godine, na kome se jasno vidi koliko su u kratkom periodu ekstremne padavine zahvatile područje Negotina, Kladova i Majdanpeka, prikazan je u nastavku ovog teksta, na slici 2.

Velike štete od ekstremnih bujičnih poplava nanete su naseljima Tekija, Podvrška, Velika Kamenica, Grabovica.



Slika 2. Prostorna raspodela količina padavina u mm za period od 15. do 21. septembra 2014.godine (izvor RHMZS)

Figure 2. The spatial distribution of rainfall in mm for the period from 15. to 21. September 2014 (source RHMZS)

4 Kako ublažiti uticaj klimatskih promena na pojavu poplava

Poznata je činjenica da šuma kao prirodni resurs predstavlja značajan faktor stabilnosti klimatskih elemenata i pojava, te na taj način ima veliki uticaj na stabilnost svih ekosistema. Pored njene osnovne funkcije, prečišćavanje vazduha i smanjenje štetnih gasova sa efektom

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

staklene bašte, šume imaju uticaja i na količinu i raspored padavina, površinsko, podpovršinsko i podzemno oticanje, formiranje izvorišta, kao i kvalitet i količinu vode. Svedoci smo da se poslednjih godina, usled naglih klimatskih promena, sve učestalije javljaju prirodne nepogode koje nanose ogromne štete kako u ruralnim, tako i u urbanim sredinama ne samo naše države, već i čitave Evrope. Poplave koje su se dogodile prošle godine u našem regionu, predstavljaju samo jedan od faktora prirodnog disbalansa koji, sa druge strane, može biti ublažen u narednom periodu preduzimanjem niza potrebnih mera.

Najefikasniji način odbrane od prirodne nepogode kao što je poplava, predstavlja intenzivno pošumljavanje kao vid obogaćivanja šumskog fonda, kao i prevođenje niskih, izdanačkih šuma u visoke, a sve to sa ciljem da u kritičnim područjima ublažimo česte pojave izlivanja rečnih tokova. Šuma, kao zaštitni plašt, ima značajnu hidrološku i vodozaštitnu ulogu na pomenutim terenima sklonim poplavama.

Sa druge strane, voda predstavlja značajan faktor u razvoju šumske sastojine, jer omogućava proces fotosinteze pri čemu se stvara biomasa. Na taj način, šume u velikoj meri modifikuju hidrološke prilike nekog područja, odnosno kvalitativne i kvantitativne pokazatelje vode.

Naime, drveće određene sastojine sa svojim krošnjama, putem intercepcije (zadržavanje vode na lišću pri čemu se jedan deo usvaja a jedan deo isparava), u mnogome smanjuje količinu vode koja dopre do površine zemljišta, a istovremeno utiče i na redukciju vlažnosti tla putem transpiracije. Na taj način, preostala količina vode koja ostane neiskorišćena od strane korenovog sistema biljaka, umereno otiče u vodotoke i time se sprečava formiranje bujičnih tokova tj. naglog povećanja nivoa vode. Bitan faktor je i činjenica da su šumska zemljišta mnogo poroznija i propustljivija za vodu u odnosu na poljoprivredna zemljišta i goleti, pa na taj način predstavljaju dobar rezervoar za vodu.

Tako, na površinama kod kojih nemamo dovoljnu obraslost šumskim pokrivačem, naročito na strmim terenima, dolazi do pojave da kompletan atmosferski talog, koji dospe na površinu zemljišta, velikom brzinom stigne do rečnih korita stvarajući poplave, pri čemu su ugrožena domaćinstva i obradive površine u neposrednoj blizini vodenih tokova. Pored gore navedenog, u poplavljenim područjima dolazi i do indirektnih šteta po samo zemljište, kao što su erozija, odnošenje humusa i hranljivih materija, zakišeljavanje, uništavanje poljoprivrednih useva itd., a i kvalitet vode naglo opada, jer u nju dospevaju polutanti i čestice isprane procesom erozije. Svi ovi negativni procesi se odigravaju uglavnom zbog neposojanja vegetacije koja bi svojim korenovim sistemom filtrirala i zadržava vodu pre nego što stigne u rečno korito.

Posebnu pažnju treba usmeriti na poboljšanje šumskog fonda kako u privatnim šumama kojih je na području Srbije oko 50 % od ukupne površine pod šumom, tako i na goletima gde u potpunosti izostaje šumski pokrivač. Nestručnim i učestalim sečama šumski fond privatnih šuma značajno je osiromašen poslednjih godina, pri čemu, upravo ta područja predstavljaju pogodan faktor za nastanak potencijalnih poplava. U šumama gde je došlo do prekidanja sklopa, a naročito na površinama gde je izvršena čista seča, u velikoj meri dolazi do povećanja vlažnosti tla u kišnim mesecima usled smanjene transpiracije.

U obzir treba uzeti i zatečeno stanje šuma u privatnoj svojini, gde imamo veliki procenat degradiranih izdanačkih šuma, čija je vodno-retencijska sposobnost umanjena (smanjena sposobnost zadržavanja vode). Takve šume, nekim od postupaka indirektna i direktna konverzije, treba u što kraćem vremenskom periodu prevesti u visoke (semenske) šume koje su mnogo produktivnije kada je zaštita od bujica u pitanju.

5 Zaključak

Gradovi u Evropi, više nego naselja u ruralnim područjima, moraju da se zaštite od globalnog zagrevanja iz ekonomskih razloga, ali i da bi zaštitili stanovništvo, objavila je Evropska agencija za životnu sredinu (EEA). Više od polovine evropskih gradova nema dovoljno zelenih površina, a specifična struktura urbanih zona dodatno menja uticaj klimatskih promena. Gradovi moraju da počnu da ulažu kako bi se prilagodili klimatskim promenama, jer će ih odlaganje samo više koštati, upozorava EEA.

Kao rezultat globalnih klimatskih promena, u narednom periodu može se očekivati sve učestalija pojava izlivanja reka, naročito u prolećnom periodu kada je aktuelno otapanje snega sa većih nadmorskih visina. Blagovremeni pristup rešavanju ovog problema, putem povećanja šumovitosti u okolini vodotoka, može dati dugoročne rezultate koji ne zahtevaju velika finansijska sredstva. Kada uporedimo finansijska sredstva potrebna za podizanje šumskih kultura u odnosu na novčane gubitke uzrokovane svakom novom poplavom, onda možemo doći do zaključka da je preventiva daleko delotvorniji vid odbrane od ove atmosferske nepogode.

Napomena

Istraživanje predstavljeno ovim radom je deo naučnog projekta "Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije" - TR37005 (2011-2015) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

Literatura

1. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Zavod za zaštitu od bujica i erozije, (2014), Glavni projekat zaštite naselja Tekija u opštini Kladovo od bujičnih voda
2. Republički hidrometeorološki zavod Srbije, (septembar 2014), Nedeljni klimatološki bilten
3. Ekološko šumarske organizacije "EKOŠUM", (2014), Manojlović Aleksandar
4. FAO: <http://www.fao.org/>

Novi metodološki okvir SDTS za dugoročne projekcije mesečnih proticaja u uslovima klimatskih promena

Milan Stojković¹
Jasna Plavšić²
Stevan Prohaska³
Jovan Despotović⁴
Dragutin Pavlović⁵

APSTRAKT: U ovom radu je predstavljen novi hidrološki model SDTS (*Stochastic Decomposition of Time Series*) za modeliranje i dugoročnu projekciju mesečnih proticaja. Dekompozicija vremenskih serija je sprovedena korišćenjem pretpostavke da se mesečni proticaji sastoje od determinističkog i stohastičkog dela. Deterministički deo se definiše korišćenjem (1) kompozitnog trenda, (2) determinističke komponente i (3) sezonske komponente. Ostatak predstavlja stohastička komponenta koja se modelira kao funkcija nezavisnih serija koje uključuju padavine i temperature. Model je primenjen na slivu reke Lim na hidrološkoj stanici Prijepolje. Parametar efikasnosti modela SDTS sugeriše veoma dobro slaganje između osmotrenih i modeliranih proticaja. Model SDTS je primenjen za određivanje dugoročnih projekcija po A1B i A2 klimatskim scenarijima. Rezultati sugerišu da se može očekivati smanjenje godišnjih proticaja od 6.9% i 5.1% u bliskoj budućnosti. Očekuje se da će se godišnji proticaji sredinom 21. veka smanjiti u rasponu od 12.4% do 1.1%. Daleka budućnost doneće najveće opadanje u godišnjim proticajima u iznosu od 18.4% do 22.4%.

Ključne reči: dugoročne hidrološke projekcije, stohastičko modeliranje, klimatske promene

A novel methodological framework SDTS for long term projection of monthly flows in term of climate change

ABSTRACT: This paper presents a novel hydrological model SDTS (*Stochastic Decomposition of Time Series*) for modelling and long-term projection of monthly flows. The decomposition of time series is conducted under assumption that monthly flow rates consist of deterministic and stochastic part. The deterministic part is defined by (1) a composite trend, (2) deterministic component and (3) seasonal component. The remainder of monthly time series is a stochastic part that is modelled as function of the independent time series including monthly precipitation and temperature. The model is applied to the Lim River basin at the Prijepolje hydrological station (h.s.). The efficiency parameter of the SDTS model suggests a very good agreement between the modelled and observed monthly flows. The SDTS model is then applied to the long-term hydrological projections using the climate input derived under the A1B and A2 emission scenarios. The results suggest that a decrease of annual flows of 6.9% and 5.1% can be expected in the near future. The annual flows in mid-21st century are expected to decrease by 12.4% and 1.1%. The distant future will bring a drop in annual flows from 18.4% to 22.4%.

Keywords: long-term hydrological projection, stochastic modelling, climate change

¹ Milan Stojković, dipl.građ.inž., istraživač saradnik, Jaroslav Černi, Beograd, milan.stojkovic@jcerni.co.rs

² Dr Jasna Plavšić, vanredni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd

³ Dr Stevan Prohaska, redovni profesor, Jaroslav Černi, Beograd

⁴ Dr Jovan Despotović, vanredni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd

⁵ Dr Dragutin Pavlović, docent, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd

1 Uvod

Vodni resursi su naročito vulnerabilni u odnosu na klimatske promene [8]. U klimatskom sistemu se dešavaju dugoročne promene koje značajno utiču na hidrološki ciklus, dovode do povećanja evapotranspiracije, promena intenziteta padavina što posledično uzrokuje promene u zalihama površinskih voda [13]. Osim toga, globalno zagrevanje utiče na prostornu i vremensku raspodelu vodnih resursa, a očekuje se da se takve tendencije nastave i tokom budućeg perioda [10]. Da bi se ocenile buduće promene u vodnim resursima u hidrološkoj praksi postoje dva ustaljena pristupa [18]. Jedan od njih, koji je široko korišćen u skorije vreme, predstavlja korišćenje fizičkih zasnovanih hidroloških modela, kojima se padavine i temperature iz klimatoloških projekcija globalnih i regionalnih klimatskih modela, preko tehnike *downscaling*, prevode na prostornu skalu slivnog područja. Zatim se korišćenjem hidroloških modela dugoročne klimatske projekcije pretvaraju u oticaje na slivu [12]. Drugi način određivanja uticaja klimatskih promena na vodne resurse predstavlja korišćenje empirijskih ili statističkih modela [3], [16], [18]. Ovi modeli, isto kao i deterministički hidrološki modeli, koriste parametre klimatskog modeliranja na slivnom području da bi se empirijskim ili statističkim vezama, ocenjenim tokom perioda osmatranja hidrometeoroloških procesa, odredile dugoročne projekcije proticaja.

2 SDTS model

2.1 Modeliranje serija mesečnih proticaja tokom perioda osmatranja

Za dekompoziciju i modeliranje vremenske serije proticaja na mesečnom nivou, koja uvažava mesečnu cikličnost, predložen je SDTS model koji je razvijen i prikazan u ovom radu. Vremenske serije mesečnih proticaja predstavljaju procese u kojima postoji izražena vremenska zakonomernost, pre svega sezonska periodičnost. Osnovna pretpostavka je da se vremenske serije mesečnih proticaja mogu, sa gledišta unutrašnje strukture procesa, razložiti na dve osnovne komponente: determinističku, koja je isključivo u funkciji vremena, i stohastičku, koja se može aproksimirati nekim stohastičkim modelom. Deterministička komponenta u vremenskoj seriji mesečnih proticaja se pojavljuje u vidu trenda ili skoka, dok se za preostali deo determinističke komponente smatra da ima cikličan karakter na različitim vremenskim skalama. Na nivou godišnjih vrednosti cikličnost se ogleda kroz nagomilavanje sušnih i kišnih perioda, tako da ona predstavlja višegodišnju cikličnost. Kod vremenskih serija mesečnih proticaja najuticajnija je pojava sezonske cikličnosti, iako i višegodišnja cikličnost može biti izražena. U predloženom modelu stohastička komponenta u vremenskim serijama mesečnih proticaja zasniva se na kros-korelacionoj zavisnosti sa klimatskim parametrima.

Dekompozicija vremenske serije $Q(t)$ na mesečnom nivou u modelu SDTS izvršena je na sledeći način:

$$Q(t) = Q_{DET}(t) + Q_{STOCH}(t) + \varepsilon_t(t) = [Q_{Tw}(t) + Q_P(t) + Q_S(t)] + Q_{STOCH}(t) + \varepsilon_t(t). \quad (1)$$

gde $Q(t)$ predstavlja mesečne proticaje, $Q_{Tw}(t)$ je komponenta složenog kompozitnog trenda, $Q_P(t)$ je dugogodišnja makroperiodična komponenta, $Q_S(t)$ je sezonska komponenta, $Q_{STOCH}(t)$

je stohastička komponenta i $\varepsilon_i(t)$ je greška modeliranja. Shema SDTS modela prikazana je na slici 1.

U tabeli 1 prikazan je način dekomponovanja vremenske serije mesečnih proticaja na determinističku, stohastičku i slučajnu komponentu zasnovan na osnovnim postulatima stohastičke hidrologije [9], [14]. Osim toga, prikazane su korišćene metode za modeliranje komponentnih delova, vremenske serije za njihovu ocenu kao i vremenska diskretizacija koja je korišćena prilikom modeliranja.

Tabela 1. Dekompozicija vremenskih serija mesečnih proticaja korišćenjem SDTS modela.
Table 1. The decomposition of monthly flow time series using SDTS model.

Komponenta hidrološke mesečne serije proticaja:		Korišćene metode:	Vremenske serije za ocenu komponentata:	Vremenska skala:
Deterministička komponenta Q_{DET}	Kompozitni trend Q_{Tw}	LMW (<i>Linear moving window</i>) metoda	Godišnji proticaji $Q(t)$	godišnja
	Makroperiodična komponenta Q_P	LOESS metoda, Furijeova transformacija, <i>low-pass</i> filter	Reziduali prve vrste: $Q'(t) = Q(t) - Q_{Tw}(t)$	godišnja
	Sezonska komponenta Q_S		Reziduali druge vrste: $Q''(t) = Q(t) - Q_{Tw}(t) - Q_P(t)$	mesečna
Stohastička komponenta Q_{STOCH}		Transfer funkcija (TF) po metodi <i>prewhitening</i>	Reziduali treće vrste: $Q'''(t) = Q(t) - [Q_{Tw}(t) + Q_P(t) + Q_S(t)]$	mesečna
Slučajna komponenta (greška modeliranja) $\varepsilon(t)$		Testovi normalnosti: Jarque-Bera, PPCC	Greška modeliranja: $\varepsilon(t) = Q(t) - [Q_{DET} + Q_{STOCH}]$	mesečna

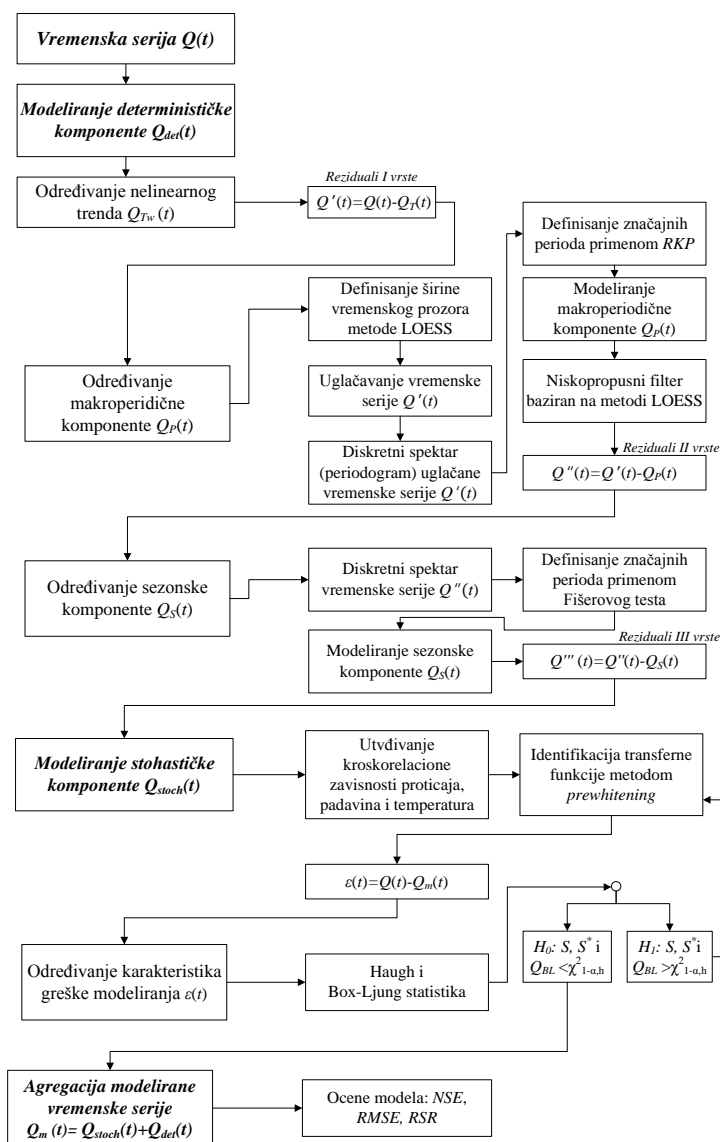
Kada je određena deterministička $Q_{DET}(t)$ i stohastička $Q_{STOCH}(t)$ komponenta mesečnih serija proticaja tada je moguće odrediti modelirane mesečne serije proticaja primenom modela SDTS na osnovu polazne jednačine (1). Agregacija svih komponenti može da se iskaže sledećim izrazom:

$$\hat{Q}(t) = \hat{Q}_{DET}(t) + \hat{Q}_{STOCH}(t) = \left[\hat{Q}_{Tw}(t) + \hat{Q}_P(t) + \hat{Q}_S(t) \right] + \hat{Q}_{STOCH}(t),$$

$$\hat{Q}(t) = \hat{Q}_{Tw}(t) + \hat{Q}_P(t) + \left[\sum_{i=1}^{q_s} (\hat{a}_{Si} \sin(2\pi \hat{f}_i t) + \hat{b}_{Si} \cos(2\pi \hat{f}_i t)) + \hat{\sigma}_Q \left[(Y(t-1) + \frac{\hat{\omega}_1(B)}{\hat{\delta}_1(B)} x_{1t} + \frac{\hat{\omega}_2(B)}{\hat{\delta}_2(B)} x_{2t} + \frac{\hat{\theta}(B)}{\hat{\phi}(B)} a_t) \right] \right], \quad (2)$$

$$t = 1, 2, \dots, N.$$

Pri tome su komponente $\hat{Q}_{Tw}(t)$ i $\hat{Q}_P(t)$ određene korišćenjem godišnjih vremenskih serija, a komponente $\hat{Q}_S(t)$ i $\hat{Q}_{STOCH}(t)$ su modelirane sa mesečnom vremenskom diskretizacijom. Po formiranju modela, određuje se greška modeliranja $\varepsilon(t)$ tako što se od serije osmotrenih mesečnih proticaja $Q(t)$ oduzme ukupna modelirana serija mesečnih proticaja $\hat{Q}(t)$ iz izraza (2). Treba naglasiti da je detaljan prikaz korišćenih metoda za modeliranje mesečnih proticaja SDTS modelom, kao i detaljan prikaz svih oznaka u jednačini (2), dat u literaturi [14].



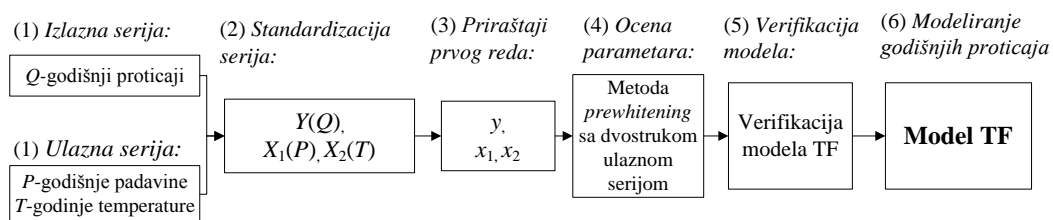
Slika 1. Shema SDTS modela za modeliranje i dugoročnu projekciju mesečnih proticaja
 Figure 1. Scheme of SDTS model for modeling and long-term projection of monthly flow

2.2 Dugoročne projekcije mesečnih proticaja do kraja 21. veka

Cilj razvoja modela SDTS je da se koristi za dugoročne projekcije mesečnih proticaja. Dugoročne projekcije mesečnih proticaja mogu da posluže da se definiše stanje vodnih resursa do kraja 21. veka. Deterministička komponenta SDTS modela može da se predstavi kao funkcija vremena. Međutim, na primeru primene modela makroperiodične komponente na stanici Oršava na Dunavu sa korakom unazad pokazalo se da nije opravdana ekstrapolacija višegodišnje cikličnosti na duži period [14]. Shodno tome zaključeno je da iskazivanje godišnje determinističke komponente kao funkcije vremena i njeno razvijanje do kraja 21.

veka nije opravdano. Isto tako, prilikom definisanja dugoročnih promena godišnjih proticaja u budućnosti neophodno je sagledati projekcije klimatskih parametara.

Kao rezultat ovih razmatranja, formiran je *inicijalni* stohastički model na godišnjem nivou, zasnovan na TF [2], kojim se godišnje padavine i temperature transformišu u godišnje proticaje. Ovom prilikom koriste se TF sa dvostrukom ulaznom meteorološkom serijom (serije padavina i temperature), a za ocenu parametara modela koristi se metoda *prewhitening*. Ista metoda primenjena je prilikom modeliranja stohastičke komponente mesečnih proticaja. Na slici 2 prikazana je shema *inicijalnog* hidrološkog modela koji se koristi za ocenu buduće determinističke komponente.



Slika 2. Shema *inicijalnog* hidrološkog modela za ocenu budućih vrednosti godišnje determinističke komponente

Figure 2. Scheme of *initial* hydrological model for the assessment of future values of annual deterministic component

Modeliranje serija godišnjeg proticaja korišćenjem *inicijalnog* hidrološkog modela sastoji se iz šest delova. Na prvom koraku potrebno je definisati ulazne godišnje serije padavina P i temperatura T , kao i izlaznu seriju godišnjih proticaja Q tokom sinhronog perioda osmatranja. Zatim se na narednom koraku sprovodi postupak standardizacije ulaznih i izlaznih vremenskih serija Y , X_1 i X_2 . Treći korak obuhvata formiranje priraštaja prvog reda standardizovanih serija y , x_1 , x_2 čime se postiže potrebna stacionarnost. Na narednom koraku se vrši ocena parametara TF korišćenjem *prewhitening* metode sa dvostrukom ulaznom serijom. Na petom koraku se vrši verifikacija modela TF ispitivanjem zastale autokorelisanosti i kros-korelisanosti greške modela ε . Poslednji korak podrazumeva modeliranje vremenskih serija godišnjih proticaja korišćenjem verifikovanog modela TF.

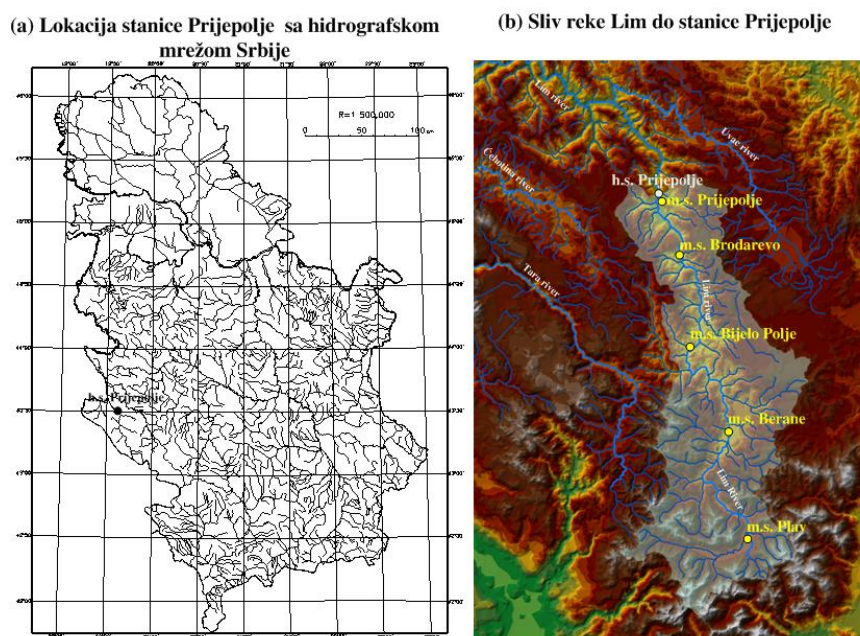
Na osnovu inicijalnih projekcija godišnjih proticaja korišćenjem ovog modela određuje se deterministička komponenta dugoročnih hidroloških projekcija na godišnjem nivou. Po analogiji sa modelom SDTS, smatra se da se tako definisana deterministička komponenta dugoročnih projekcija sastoji od nelinearnog trenda i makroperiodične komponente. Preostali deo determinističke komponente u modelu SDTS predstavlja sezonsku komponentu koja se prikazuje na mesečnom nivou. Ocena značajnih talasa sezonske komponente izvršena je za period osmatranja mesečnih proticaja. Sezonska komponenta se tako predstavlja kao funkcija vremena i razvija do kraja 21. veka. Pošto se očekuje promena unutargodišnje raspodele padavina u budućnosti, u skladu s tim promenama koriguje se i buduća sezonska komponenta proticaja [14].

Osim projekcija determinističke komponente potrebno je odrediti dugoročne projekcije stohastičke komponente $Q_{STOCH}(t)$. Stohastička komponenta ima matematičko očekivanje koje je jednako nuli, ali predstavlja zavisnu seriju koja se modelira putem padavina i temperatura.

Dugoročne projekcije stohastičke komponente utvrđuju se na osnovu postojeće TF ocenjene tokom perioda osmatranja, u kojoj se umesto istorijskih serija padavina i temperatura koriste serije projekcija iz klimatskog modela. Na taj način dobijaju se vrednosti stohastičke komponente za period 2013–2100.

3 Podaci

Studija je sprovedena na slivu reke Lim na hidrološkoj stanici Prijepolje sa dostupnim hidrometeorološkim podacima za period 1950–2012 (Slika 3a). Mesečne serije proticaja, padavina i temperatura vazduha preuzete su od Hidrometeorološkog zavoda Srbije. Srednje mesečne meteorološke serije na slivu određene su korišćenjem Thiessenovih poligona na osnovu pet meteoroloških stanica (Slika 3b).



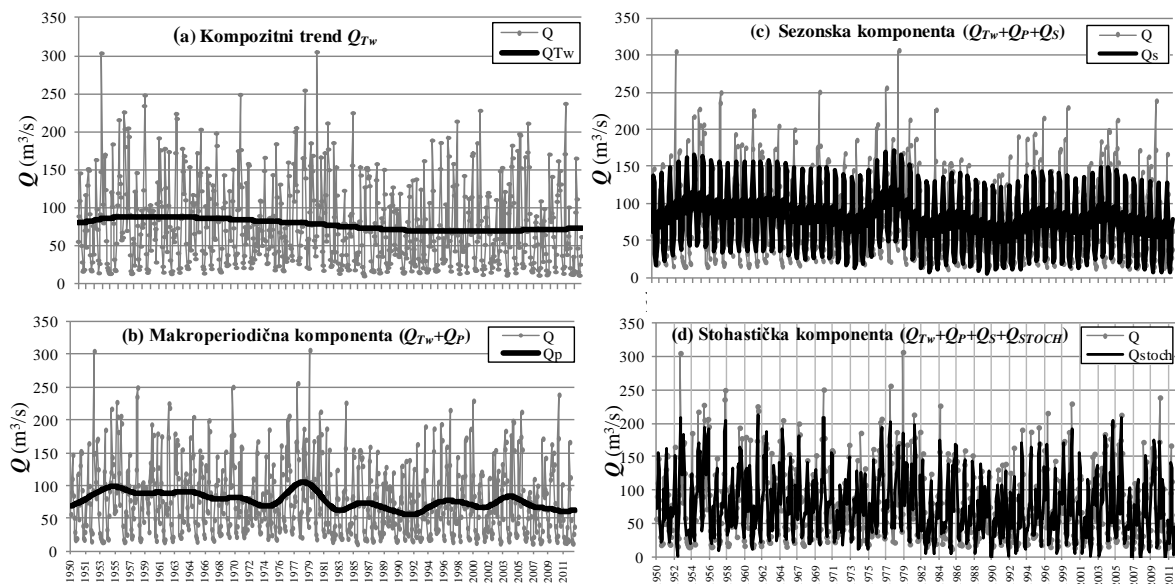
Slika 3. (a) Lokacija hidrološke stanice Prijepolje sa hidrografskom mrežom Srbije; (b) Sliv reke Lim do hidrološke stanice Prijepolje sa korišćenim meteorološkim stanicama.

Figure 3. (a) Location of hydrological station Prijepolje with hydrographic net of Serbia; (b) Catchment of the River Lim to the hydrological station Prijepolje with used meteorological stations.

4 Rezultati

SDTS model je primenjen na slivu reke Lim na hidrološkoj stanici Prijepolje. Na prvom koraku je utvrđena deterministička godišnja komponenta, tj. kompozitni trend Q_{Tw} i makroperiodična komponenta Q_P , u skladu sa tabelom 1. Na osnovu rezultata zaključeno je da se kompozitni trend Q_{Tw} sastoji od periodične komponente male amplitude i velikog perioda

oscilovanja, kao i njegove linearne komponente. Promene pozitivne i negativne faze kompozitnog trenda odvijaju se približno na polovini vremenske serije godišnjih proticaja (slika 4b). Osim toga, makroperiodična komponenta Q_P određuje smenu vlažnih i sušnih višegodišnjih perioda. Ona se određuje kada se reziduali dobijeni odstranjivanjem kompozitnog trenda iz serije godišnjih proticaja uglašaju regresionom tehnikom LOESS (*locally weighted scatterplot smoothing*). Zatim se makroperiodična komponenta Q_P modelira primenom Furijeove transformacije. Na osnovu modelirane komponente Q_P utvrđuje se da je tokom kasnih 70-ih godina 20. veka započeo sušni period koji je trajao sve do početka 90-ih godina (slika 4b). Korišćenjem niskopropusnog (*low-pass*) filtra godišnja deterministička komponenta, koja se sastoji iz kompozitnog trenda i makroperiodične komponente, transformisana je na mesečnu vremensku skalu. Oduzimanjem determinističke komponente od serije mesečnih proticaja dobijeni su reziduali iz kojih se određuje sezonska komponenta (tabela 1). Sezonska komponenta je modelirana primenom Furijeove transformacije pri čemu su izolovane značajne periode od 12, 6 i 4 meseca.



Slika 4. Modeliranje mesečnih proticaja na stanici Prijepolje korišćenjem SDTS modela: Q -osmotreni proticaj, Q_{Tw} -kompozitni trend, Q_P -makroperiodična komponenta, Q_S -sezonska komponenta, Q_{STOCH} -stohastička komponenta.

Figure 4. Monthly discharge modeling at the station Prijepolje using SDTS model: Q -observed discharge, Q_{Tw} -composite trend, Q_P -macroperiodic component, Q_S -seasonal component, Q_{STOCH} -stochastic component.

Da bi se modelirala stohastička komponenta Q_{STOCH} , ukupna deterministička komponenta Q_{DET} na mesečnoj vremenskoj skali oduzima se od mesečne serije proticaja Q komponenta (tabela 1). Zatim se ovi reziduali koriste za ocenu parametara TF po metodi *prewhitening*. TF stohastičke komponente na profilu stanice Prijepolje je sledeća:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$Q_{STOCH}: \hat{y}_t = \frac{(0.398 + 0.247B)x_{1t}}{1 + 0.434B + 0.352B^2} + (0.419 - 0.153B^2)x_{2t} + (1 + 0.008B)a_t. \quad (3)$$

gde je y_t transformisana stohastička komponenta, x_{1t} i x_{2t} su priraštaji prvog reda serije mesečnih padavina i temperatura, a_t je slučajna vremenska serija i B je vremenski operator, pri čemu je $B^j x_t = x_{t-j}$. Verifikacija TF iz jednačine 3 izvršena je na osnovu Haughove [6] statistike gde je utvrđeno da je greška modela TF slučajna serija na pragu poverenja $\alpha=0.05$, tj. nekorelisana sa ulaznim vremenskim serijama padavina i temperatura.

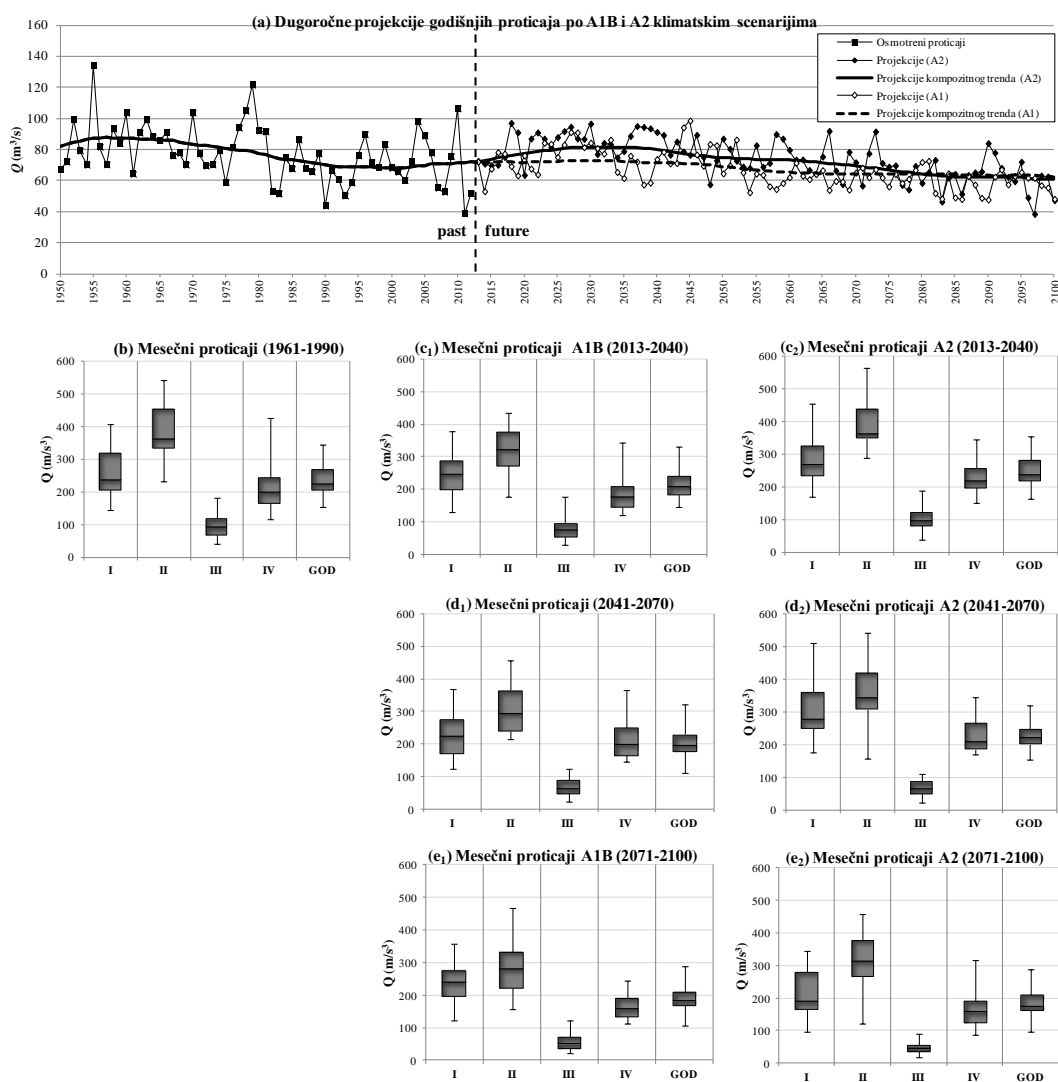
Kada su određene sve komponente SDTS modela tada se vrši njihova agregacija prema jednačini 1 (slika 4d). Za određivanje slaganja modeliranih i osmotrenih serija korišćen je Nash-Sutcliffe koeficijent efikasnosti čija vrednost $NSE=0.829$ sugeriše da su serije modelirane veoma dobro u skladu sa referentnim vrednostima [11].

Da bi se odredile dugoročne projekcije mesečnih proticaja na stanici Prijepolje neophodno je sagledati rezultate klimatskog modeliranja regionalnih klimatskih modela. Klimatske projekcije su određene korišćenjem EBU-POM regionalnog klimatskog modela na razmatranim meteorološkim stanicama (slika 3b) za scenarije A1B and A2 [4]. Projekcije padavina i temperatura za period do kraja 21. veka korišćene su da bi se odredile vrednosti godišnje determinističke komponente SDTS modela. Za tu svrhu korišćen je inicijalni hidrološki model baziran na TF sa dvostrukom ulaznom serijom (slika 2). Parametri TF inicijalnog modela godišnjih proticaja su sledeći:

$$Q': \hat{y}_t = \frac{(0.615 - 0.187B - 0.337B^2)x_{1t}}{1 + 0.482B + 0.318B^2} + (-0.418B + 0.120B^2)x_{2t} + (1 + 0.113B)a_t. \quad (4)$$

gde je y_t transformisana serija godišnjeg proticaja, x_{1t} i x_{2t} su priraštaji prvog reda godišnjih serija padavina i temperatura i a_t je slučajna vremenska serija. Verifikacija TF iz jednačine 4 pokazala je grešku modeliranja slučajne serije na pragu značajnosti $\alpha=0.05$.

Na narednom koraku potrebno je na osnovu jednačine 4 odrediti inicijalne projekcije godišnjih proticaja \tilde{Q}' korišćenjem godišnjih klimatoloških serija iz klimatskog modela EBU-POM prema klimatskim scenarijima A1B i A2. Kada je određena serija \tilde{Q}' tada se na ovim serijama primenjuje SDTS model da bi se odredile dugoročne projekcije godišnje determinističke komponente (kompozitni trend \tilde{Q}'_{Tw} i makroperiodična komponenta \tilde{Q}'_p). Poslednji deo determinističke komponente je sezonska komponenta \tilde{Q}'_s koja se određuje za tri višegodišnja perioda: 2013–2040 (bliska budućnost), 2041–2070 (dalja budućnost), 2041–2070 (daleka budućnost). Pretpostavlja se da će promene sezonske komponente pratiti buduće promene unutargodišnje raspodele padavinama. U tom slučaju komponenta sezonskog ciklusa se ne menja tokom istog višegodišnjeg perioda, ali je promenljiva u odnosu na različite periode. Dugoročne projekcije stohastičke komponente \tilde{Q}'_{STOCH} određuju se primenom jednačine (3) kada se umesto osmotrenih parametara koriste padavine i temperature iz klimatskog modeliranja prema scenariju A1B i A2. U skladu sa jednačinom (1) vrši se agregacija dugoročnih projekcija svake pojedinačne komponente i određuju se dugoročne projekcije mesečnih proticaja za stanicu Prijepolje za period 2013–2100. prema klimatskim scenarijima A1B i A2 (slika 5a).



Slika 5. Dugoročne projekcije proticaja u skladu sa klimatskim scenarijima A1B i A2 na stanici Prijepolje: godišnje projekcije Q (a), sezonski proticaji za referentni period (1961–1990) (b), sezonski proticaji za blisku budućnost (2013–2040) (c), sezonski proticaji za dalju budućnost (2041–2070) (d), sezonski proticaji za daleku budućnost (2071–2100) (e)

Figure 5. Long-term discharge projections according to climate scenarios A1B and A2 at the station Prijepolje: annual projections Q (a), seasonal discharges for the reference period (1961–1990) (b), seasonal discharges for the near future (2013–2040) (c), seasonal discharges for the further future (2041–2070) (d), seasonal discharges for the far future (2071–2100) (e).

Dugoročne projekcije proticaja ukazuju na smanjenje godišnjih vrednosti do kraja 21. veka u odnosu na referentni period (1961–1990) na stanici Prijepolje (slika 5b). Medijana godišnjih proticaja će se umanjiti u rasponu 6.1%–13.6% za period 2013–2100 (slika 5a). Projekcije proticaja tokom bliže budućnosti (2013–2040) sugerišu umanjjenje medijane godišnjih vrednosti od 6.9% po A1B scenariju i uvećanje od 5.1% prema A2 scenariju (slika 5c). Dalja budućnost (2041–2070) donosi smanjenje medijane godišnjih proticaja od 12.4% i

1.1% u skladu sa scenarijima A1B i A2 (slika 5d). Najveće smanjenje medijane godišnjih proticaja očekuje se tokom perioda daleke budućnosti u iznosu od 18.4% do 22.4% u skladu sa scenarijima A1B i A2 (slika 5e).

Promena unutargodišnje raspodele padavina i povećanje temperatura u budućnosti donosi značajnu promenu u unutrašnjoj strukturi hidrološkog procesa. Uticaj klimatskih promena na vodne resurse sagledan je tokom zimske, prolećne, letnje i jesenje sezone. Buduće promene proticaja po sezonama kvantifikovane su na bazi referentnog perioda (1961–1990). Najveća redukcija sezonskog proticaja očekuje se tokom letnje i jesenje sezone (slika 5c-5e). Osim toga, blagi porast medijane sezonskih proticaja može da se očekuje tokom zimske sezone (slika 5d). U dalekoj budućnosti očekuje se najveće smanjenje proticaja, a posebno tokom letnje sezone (slika 4e).

5 Zaključak

Promena klimatskih parametara dovodi do promene u hidrološkom režimu, a predviđa se da će se promene u hidrološkim serijama nastaviti i tokom budućeg perioda na prostoru jugoistočne Evrope [1], [7],[8], [5], [17]. U ovoj studiji prikazan je novi metodološki okvir nazvan SDTS model. Cilj predložene metodologije je da se koristi u vodoprivrednim studijama prilikom ocene uticaja klimatskih promena na dugoročne promene vodnih resursa. Model je primenjen u slivu reke Lim na stanici Prijepolje pri čemu su modelirane serije pokazale dobro slaganje sa osmotrenim serijama. Model je zatim korišćen za dugoročne projekcije mesečnog proticaja u skladu sa klimatskim scenarijima A1B i A2 za period do kraja 21. veka. Rezultati hidrološkog modeliranja pokazuju da se u budućnosti može očekivati smanjenje godišnjih i sezonskih proticaja. Najveće smanjenje proticaja očekuje se tokom letnje sezone, a za period daleke budućnosti (2071–2100). Isto tako, rezultati pokazuju da se u budućnosti može očekivati blago povećanje proticaja tokom zimskih meseci.

Literatura

1. Arnell, N., (2003), *Effects of IPCC SRES emissions scenarios on the river runoff: a global perspective*. Hydrology and Earth System Sciences, 7(5), pp 619-641.
2. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., (2008), *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Fourth Edition. John Wiley & Sons, INC., Publication. USA.
3. Dibike, Y.B., Coulibaly, P., (2005), *Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models*. Journal of Hydrology, 307, 145-163.
4. Đurđević, V., Rajković, B., (2008), *Verification of a coupled atmosphere-ocean model using satellite observations over the Adriatic Sea*. Annales Geophysicae. 26(7), pp 1935-1954.
5. Haddeland, I., (2013), *Effects of climate change in the Kolubara and Toplica catchments, Serbia*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate. Norway.
6. Haugh, L.D., (1976), *Checking the independence of two covariance-stationary time series: a univariate residual cross correlation approach*. J. Am. Statist. Assoc. 71(354), pp 378-385.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

7. ICPDR. (2012), *Danube Study – Climate Change Adaptation*, Final Report. International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna, Austria.
8. IPCC. (2013), *Fifth Assessment Report (AR5)*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva 2. Switzerland. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>
9. Yevjevich, V., (1984), *Structure of Daily Hydrologic Series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, U.S.A
10. Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N., et al., (2008), *The implications of projected climate change for freshwater resources and their management*. Hydr. Sci. Jour. 53 (1), pp 3-10.
11. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., (2007), *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE. 50(3): 885-900.
12. Simonović, S.P., (2010), A new methodology for the assessment of climate change impacts on a watershed scale. Current Science, 98(8), pp 1047-1055.
13. Simonović, S.P., (2013), *Floods in a Changing Climate, Risk Management*, Part of International Hydrology Series, Cambridge University Press. New York. USA
14. Stojković, M., (2015a), *Dugoročne promene u stohastičkoj strukturi hidroloških vremenskih serija*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu. Građevinski fakultet. Srbija.
15. Stojković, M., Prohaska, S., Plavšić, J., (2015b), *Stochastic structure of annual discharges of large European rivers*. J. Hydrol. Hydromech. 63(1), pp 63-70.
16. Tisseuil, C., Vrac, M., Lek, S., Svan L., Wade, A.J., (2010), *Statistical downscaling of river flows*. Journal of Hydrology. 385, pp 279-291.
17. World Bank, (2014), *Water Climate and Adaptation Plan for the Sava River Basin. Draft Final Report*. Annex 1. Development of the Hydrologic Model for the Sava River Basin. (ed. J.Plavšić)
18. Zeng, X., Kundzewicz, Z.W., Zhou, J, Su, B., (2012), *Discharge projection in the Yangtze River basin under different emission scenarios based on the artificial neural networks*. Quaternary International. 282 (19), pp. 113-121.

Uticaj klimatskih promena na poljoprivrednu proizvodnju i mere ublažavanja

Ružica Stričević¹
Nevenka Đurović
Marija Čosić
Ivan Bogdan
Miloš Pavlović
Enike Gregorić

APSTRAKT: Do kraja ovog veka očekuje se da će klima u Srbiji biti toplija i sušnija po klimatskom scenariju SRES A1B, a još naglašenije promene se mogu očekivati po SRES A2 scenariju. Očekuje se da će se klimatske prilike u skorijoj budućnosti zadržati na dosadašnjem nivou, kao i varijacije prinosa. Sredinom i krajem veka, očekuju se izraženiji negativni efekti, pogotovo po scenariju A2, tako da je potrebno razvijati navodnjavanje. Preporučuje se primena mera ublažavanja nepovoljnih klimatskih uticaja, poput uvođenja novih hibrida i sorti tolerantnijih na sušu, mulčiranja, zasene ili primenom drugih metodologija. Primenom savremene merne tehnike i metoda, uz ostale mere ublažavanja efekata suše može se održati i unaprediti poljoprivredna proizvodnja na području Srbije.

Ključne reči: Klimatske promene, navodnjavanje, mere ublažavanja suše

Climate change impact on field crop production and mitigation measure proposals

ABSTRACT: Hotter and drier climate is expected to be till the end of the century according to the climatic scenarios SRES A1B, and even more emphasized changes are expected by SRES A2. In a near future, climate variability will be as previous last few decades, as well as crop yield variability. Stronger negative effects are expected in mid to end of the century, especially by the A2 scenario. Therefore, irrigation is to be developed for all summer crops/orchards. Mitigation measures to unfavourable drought effects are proposed, such as introduction of new breedings tolerant to drought, mulching, shadowing. Usage of innovative measuring technique, deficit irrigation, and other methods could mitigate negative effect of climate change, and advanced crop and horticultural production in Serbia.

Key words: Climate change, irrigation, mitigation measure, agriculture

¹ Dr Ružica Stričević, red. prof., sruzica@agrif.bg.ac.rs; Dr Nevenka Đurović, vanr. prof., marasn@agrif.bg.ac.rs; Dr Marija Čosić, asistent, c.marija@agrif.bg.ac.rs; Dr Enike Gregorić, docent, enikag@agrif.bg.ac.rs; Miloš Pavlović, dipl.inž.mast., doktorant, milos.pavlovic84@yahoo.com; Univerzitet u Beogradu - Poljoprivredni fakultet, Nemanjina 6, 11080 Zemun; Ivan Bogdan, dipl.inž. mast., doktorant, Ivan.Bogdan@mkagriculture.rs, Univerzitet u Beogradu - Poljoprivredni fakultet, Zemun i MK agriculture, Trg Marije Trandafil 7, 21000 Novi Sad

1 Uvod

Globalni porast temperature, koji je evidentan, utiče na uslove života na našoj planeti i na promenu klime, pa presudan značaj za opstanak svih životnih sistema ima voda u zemljištu, atmosferi, biljnim tkivima i organima. Svako odstupanje od optimalnog sadržaja ima za posledicu narušavanje fizioloških procesa u biljnom organizmu, a u uslovima dugotrajne suše, često dolazi i do uvenuća.

Poljoprivredna proizvodnja se u Srbiji nesmetano odvijala uz stalan porast prinosa od šezdesetih godina prošlog veka, ali ne zbog povoljnih klimatskih uslova, već zbog primene mineralnih đubriva i sredstava za zaštitu bilja. Međutim, pojava jakih i ekstremnih suša na velikom prostoru je veoma učestala [16, 47, 48], tako da se mere ublažavanja moraju sprovesti razvojem navodnjavanja, uvođenjem novih hibrida i sorti tolerantnijih na sušu ili primenom drugih metodologija kojima se postiže efikasnije korišćenje vode. Češća pojava sušnih u odnosu na vlažne godine [47] utiče na smanjenje prinosa, koje su najizraženije kod šećerne repe i kukuruza (od 5 – 70 %), u ekstremnim godinama čak i do 80%. Kada se radi o suncokretu i soji, uočava se da ove kulture bolje podnose sušu. Padovi prinosa suncokreta variraju od 0 – 40 % a soje od 5 – 50% [1,12,13, 26, 39].

Istraživanja uticaja klimatskih promena na poljoprivrednu proizvodnju u Srbiji su rađena za nekoliko strateških kultura poput ozime pšenice, kukuruza, soje i šećerne repe primenom različitih modela, za klimatske scenarije SRES A1B i A2. Po istraživanjima [37] i [28] očekuje se da će klima u Srbiji biti toplija i sušnija po A1B scenariju, a još naglašenije promene se mogu očekivati po A2 scenariju. Na sreću, ovakve promene neće uticati na značajniji pad prinosa pšenice, svega -16 do 21 % po scenariju A1B za period 2001.-2030., ili -10 do 6% po scenariju A2. U periodu od 2071. - 2100. po scenariju A2 može se očekivati i porast prinosa pšenice usled povećane koncentracije CO₂. Po istim istraživanjima ni prinosi kukuruza se neće značajnije menjati u narednih petnaestak godina. Naime, predviđa se da će u nekim delovima Srbije doći do povećanja čak i do 71% dok će, u nekim delovima doći do blagog smanjenja (do 6%). Značajnije smanjenje prinosa se očekuje tek u periodu od 2071.-2100., od 52% u severnim delovima do 22% u jugoistočnim delovima Srbije. Po scenariju A1B primena navodnjavanja nije potrebna, dok bi ono značajno povećalo prinose kukuruza po scenariju A2. Slični rezultati su dobijeni i u susjednim zemljama (Hrvatska i BiH), gde se očekuje na nekim lokalitetima blagi pad prinosa, a na nekim povećanje po istim scenarijima, primenom istih (DSSAT) ili drugih (AquaCrop) modela za simulaciju prinosa kukuruza [45, 61].

Po istraživanjima [37] navodi se e da bi primena navodnjavanja povećala prinos soje od 21 – 67 % po A1B scenariju, ali znatno manje po scenariju A2, od -9 % do 43%, što znači da bi varijacije prinosa bez navodnjavanja u narednih petnaestak godina ostale na dosadašnjem nivou.

Primenom modela AquaCrop i rezultata povezanog regionalnog klimatskog modela za atmosferu i okean EBU-POM za scenarija A1B, A2 proučavan je uticaj klimatskih promena na prinose i potrebe šećerne repe za vodom [49]. Rezultati istraživanja jasno ukazuju da na područjima Vojvodine i Centralne Srbije u prvom periodu neće doći do smanjenja prinosa ni po jednom scenariju, već se mogu očekivati i povećanja po svim varijantama gajenja šećerne repe. U drugom periodu, uočavaju se padovi prinosa u scenarijima A1B i A2 na području Vojvodine, dok se u Centralnoj Srbiji može očekivati i pad prinosa u scenariju A1B kao i u scenariju A2>CO₂. Navodnjavanjem se u svim scenarijima značajno povećava prinos, s tim što je povećanje prinosa izraženije na području Centralne Srbije.

Dakle, navodnjavanje će biti značajna adaptivna mera na klimatske promene, naročito pri kraju ovog veka. Međutim, kako će se paralelno javiti i manji proticaji na rekama [46], tj. manje će biti raspoložive vode za navodnjavanje, tako da alternativne adaptivne mere na klimatske promene se moraju razvijati i proučavati u tom pravcu. Cilj ovoga rada je da se na osnovu dosadašnjih istraživanja sprovedenih u okviru projekta TR 37005 pokaže značaj i uloga adaptivnih mera na klimatske promene.

2 Adaptivne mere u poljoprivredi na klimatske promene

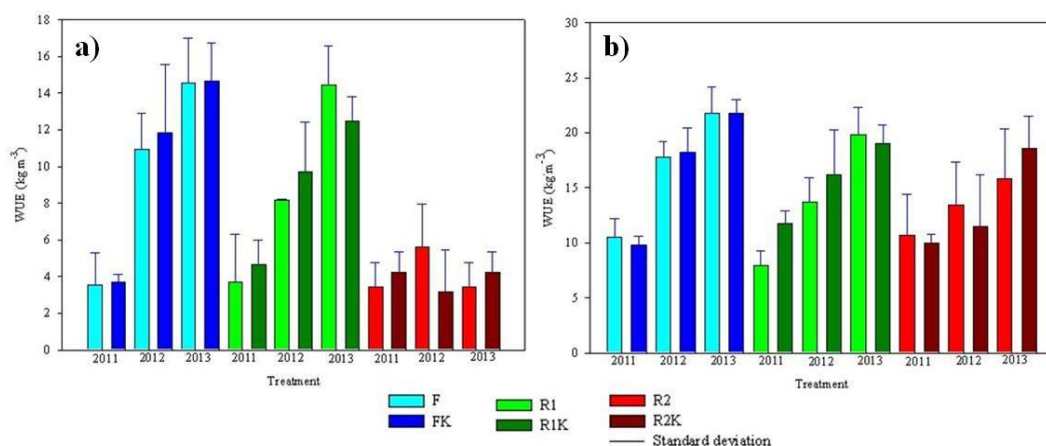
2.1 Redukovano navodnjavanje

Jedna od adaptivnih mera na klimatske promene u poljoprivredi je primena redukovano navodnjavanja, koja ima za cilj uštedu vode, povećanje efikasnosti korišćenja vode i postizanje optimalnih prinosa [53]. Primenom strategije redukovano navodnjavanja, usevi se planski izlažu određenom nivou stresa usled nedostatka vode tokom određenog perioda ili tokom cele vegetacije, što utiče na smanjenje prinosa, ali dovodi do uštede i povećanja efikasnosti korišćenja vode [40,62). Prema [50] redukcijom navodnjavanja se bolje koriste rezerve vode u zemljištu zbog boljeg ukorenjavanja biljaka.

Kakav će uticaj redukovano navodnjavanje imati na prinos i kvalitet plodova zavisi od vrste useva, evapotranspiracije kulture, tipa zemljišta, raspoložive vode u zemljištu. Pre nego što se donese odluka o primeni redukovano režima navodnjavanja, važno je proceniti njegov uticaj na različite kulture na osnovu višegodišnjih eksperimentalnih istraživanja [21]. U Srbiji, prinos nekih kultura direktno zavisi od raspoložive količine vode kao što su: lucerka, kukuruz i soja, dok se kod nekih useva takva veza ne može uočiti. Efekat navodnjavanja razlikuje se po godinama, ali ne zavisi isključivo od količine i rasporeda padavina. To ukazuje da efikasnost korišćenja vode zavisi i od drugih faktora, kao što su ekstremne temperature, mraz, grad, snabdevenost hranivima i zdravstvenog stanja biljaka [54].

Povrtarske kulture, kao što su paprika [24], plavi paradajz [25] ili krastavac [31] pri umerenim deficitima vode, povećavaju efikasnost korišćenja vode proporcionalno gubicima u prinosu i masi plodova. Međutim, u ekstremnim klimatskim uslovima u Srbiji (pojava grada i jakih pljuskova, ili ekstremnih visokih temperatura) kod paprike se ne postiže veća efikasnost korišćenja vode, zbog velike osetljivosti paprike na nedostatak vode [7].

Na slici 1 je prikazana efikasnost korišćenja vode pri proizvodnji plodova paprika a) I klase i b) I + II klase na tretmanu punog navodnjavanja (F i FK – 100 % pokrivenost potreba za vodom) i dva nivoa redukovano navodnjavanja (R1, R1K – 80% pokrivenost potreba za vodom i R2, R2K – 70 % pokrivenost) sa (K) i bez primene 5% suspenzije kaolinita tokom trogodišnjeg perioda istraživanja (2011., 2012. i 2013.). Uočava se da na efikasnost korišćenja vode (EKV) pri proizvodnji plodova paprika I klase ne utiče samo režim navodnjavanja i primena kaolina, već i vremenske prilike tokom perioda istraživanja. Niske vrednosti EKV u 2011. godini su posledica pojave grada (tri puta, jednom u junu i dva puta u julu) i pljuskova većeg inteziteta. Generalno posmatrano, se može zaključiti da primena nižeg nivoa redukovano navodnjavanja najviše utiče na efikasnost korišćenja vode [7].



Slika 1. Efikasnost korišćenja vode pri proizvodnji plodova paprike a) I klase i b) I i II klase na svim tretmanima navodnjavanja sa i bez primene kaolinita [7]

Figure 1 Water use efficiency (WUE) of yield of peppers a) I class and b) II class on all irrigation treatments with and without kaolinit [7]

Istraživači [32, 33] ističu da primena blagog deficita navodnjavanja kod paradajza podstiče bolje ukorenjavanje, koren prodire na veću dubinu zemljišta iz koje može crpeti vodu. Redukovano navodnjavanje neće dovesti ni do povećanja ni do smanjenja prinosa, a ušteda vode može iznositi i do 48%.

Efekat redukovano navodnjavanja zavisi u kom delu vegetacionog perioda je primenjeno. Istraživanja pokazuju da do najvećeg smanjenja prinosa dolazi kada se deficit vode javi u periodu cvetanja biljaka [14]. Dakle, redukovano navodnjavanje će se primeniti na onim kulturama koje najmanje gube prinos usled nedostatka vode.

2.2 Primena kaolinita

Mogućnost smanjenja negativnih uticaja suše se može postići upotrebom suspenzije kaolinita.

Kaolinit je neabrazivni, netoksičan alumosilikat ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$), mineral gline koji je formulisan (Engelhard Corporation, Iselin, NJ), kao rastvorljivi prašak za primenu sa konvencionalnom sprej opremom, komercijalizovan kao Surround® WP (BASF, Research Triangle Park, NC; previously Engelhard Corporation, Iselin, NJ). Preparat Surround® WP čini 95% mineral gline - kaolinit i 5% inertne materije [4].

Cilj upotrebe kaolinita je smanjenje temperature biljaka, (nadzemnog dela i plodova) koja se postiže zasenčenjem površine, povećanim albedom, a samim tim dolazi do smanjenja potrošnje vode i potrebe za navodnjavanjem. Navedeni efekti utiču na smanjenje prisustva ožegotina na plodovima od sunca, što obezbeđuje visok kvalitet plodova, visoku cenu na tržištu. Pored uštede vode, dokazano je da biljke tretirane kaolinitom odbijaju insekte i štetočine pa ovaj preparat nalazi primenu i u zaštiti bilja [3, 17, 18], što udvostručava značaj ove adaptivne mere na klimatske promene.

Takođe, treba istaći da je kaolinit prirodni preparat koji ima primenu u organskoj proizvodnji. U uslovima nestašice vode koja se predviđa u Mediteranskim uslovima, dolazi do povećanja saliniteta. Primenom suspenzije kaolinita obezbeđuje se dobar vodni režim biljke i ublažavanje toplotnog stresa i smanjenje ožegotina, čak i kada se paradajz navodnjava

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

zaslanjenom vodom [3]. U mnogim istraživanjima ističe se uticaj kaolinita na smanjenje ožegotina od sunca na plodovima, kao što su nar, jabuka, orah, citrusi, paradajz, tikvice itd. [4, 19, 38, 57]. Snižavanje temperature plodova primenom kaolina može uticati na povećanje prosečne mase ploda [4, 27, 44] i na poboljšanje nekih kvalitativnih osobina plodova kao što su boja ploda, sadržaj ukupnih rastvorljivih materija i koncentracije antocijana [6, 35, 51, 52, 55, 59]. Primenom kaolinita snižava se temperatura plodova citrusa u proseku od 1 do 6 °C, što pozitivno utiče na smanjenje ožegotina i kvvalitet plodva [36].

Na slici 2 prikazan je uticaj kaolinita na prisustvo ožegotina na plodovima paprike tokom ekstremno sušne 2012. godine, gajene u Staroj Pazovi, Srbija. Zapaža se da su plodovi tretirani kaolinitom bili gotovo bez prisustva ožegotina.



Slika 2. Plodovi paprike a) sa, b) bez primene 5% suspenzije kaolinita
Figure 1 Yield of peppers a) with and b) without kaolinit

Temperatura plodova paradajza tretiranih kaolinitom merena u podne najtoplijeg dana je za oko 3,5 °C niža u odnosu na temeraturu netretiranih plodova. Primena kaolinita dovodi do povećanja sadržaja likopena u plodovima paradajza prosečno za 14%, što utiče na poboljšanje kvaliteta plodova [38]. Takođe i u Srbiji primena kaolinita značajno povećava efikasnost korišćenja vode paradajza (Tab.1), bez uticaja na organoleptička svojstva plodova paradajza [29]. Primena kaolinita je veoma značajno uticala na smanjenje prisustva ožegotina na plodovima paprike gajene u Srbiji (Sl. 1) u ekstremno sušnim i toplotim uslovima [7]. Zbog svega navedeno primena kaolina u biljnoj proizvodnji se može preporučiti kao veoma korisna i zdravstveno bezbedna adaptivna mera.

Tabela 1. Efikasnost korišćenja vode (EKV) i efikasnost korišćenja vode dodate navodnjavanjem (IEKV) izračunati na osnovu stvarne evapotranspiracije useva (kg m^{-3}) [29]
Table 1. Water use efficiency and irrigation use efficiency based on actual evapotranspiration

	ETr	EKV		IEKV	
	(mm)	fresh	dry	fresh	dry
F	314	78.56	4.60	44.97	2.63
Fk	315	140.23	8.13	80.07	4.64
D	248	136.73	8.68	49.49	3.14
Dk	232	241.75	13.67	93.51	5.29

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

U tabeli 2 je prikazan uticaj primenjenog režima navodnjavanja i kaolinita na smanjenje prisustva ožegotina na plodovima paprika. Zapaža se da i primena kaolinita i režim navodnjavanja statistički veoma značajno utiču na smanjenje ožegotina na plodovima paprika. Na tretmanu punog navodnjavanja (F) se zapaža najmanji procenat ožegotina. Na svim tretmanima sa petoprocentom suspenzijom kaolinita (K) manji je procenat prisustva ožegotina u odnosu na tretmane bez kaolinita (C) [7].

Tabela 2. Uticaj kaolinita i režima navodnjavanja na smanjenje ožegotina na plodovima paprika tokom trogodišnjeg perioda istraživanja [7].

Table 2. Impact of kaolinit and irrigation treatments on sunburn reduction during three years of experiments [7]

Treatments	Sunburn (%)
Year (Y)	**
2011	19.6 a
2012	20.3 a
2013	8.8 b
Irrigation Regime (IR)	**
F	12.1 b
R1	14.7 b
R2	21.9 a
Kaolin Application (KA)	**
C	19.2 a
K	13.2 b
Interactions	
Y x IR	ns
Y x KA	ns
IR x KA	ns

LSD test ($P < 0.05$, $P < 0.01$): F-test nema značajnost (ns); značajno (*) ($P < 0.05$); veoma značajno (**) ($P < 0.01$)

LSD test ($P < 0.05$, $P < 0.01$): F-test none significant (ns); significant (*) ($P < 0.05$); very significant (**) ($P < 0.01$)

2.3 Primena protivgradnih mreža

Poslednjih par decenija usled klimatskih promena, savremena voćarska proizvodnja u kojoj se ostvaruju visoki prinosi prve klase zahteva izgradnju protivgradnih mreža i sistema za navodnjavanje. Podizanjem protivgradnih mreža utiče se na promenu mikroklimatskih uslova i smanjenje evapotranspiracije kulture ispod nje, što dovodi do značajnih ušteda vode [42]. U tabeli 3 prikazane su procenjene potrebe jabučnjaka za vodom bez zasene i stvarne potrošnje vode za tri godine istraživanja na području Čelareva+. Ustanovljeno je da se smanjenje potrošnje vode kreće od 1,9 mm u aprilu 2010. godine do 114,2 mm u septembru 2009., odnosno od 4,3 % u aprilu 2009. do čak 92,2 % u septembru 2009. godine. Prosečno umanjeње potrošnje vode ispod protivgradne mreže iznosi od 25,0 mm 2010. god. do 42,5 mm 2008., odnosno od 21,0 % 2010. do 42,9 % 2008. Dakle, uštede u potrošnji vode su veće tokom sušnijih godina, što svrstava ovu meru kao veoma važnu, kao i po sprečavanju udara grada na plodove i stvaranje ožegotina, posmatrano sa aspekta klimatskih promena.

Tabela 3. Uporedni prikaz evapotranspiracije jabuke izračunate metodama Penman-Monteith i vodnog bilansa [42]

Table 3. Comparative view of evapotranspiration calculated by Penman-Monteith and water balance method [42]

Mesec	ETc Penman-Monteith [mm·mes ⁻¹]			ETc – Metod vodnog bilansa [mm·mes ⁻¹]			Smanjenje potrošnje vode [mm·mes ⁻¹]			Smanjenje potrošnje vode (%)		
	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010	2008	2009	2010
April	37,2	49,8	36,6	26,1	47,6	34,7	11,1	2,2	1,9	29,8	4,3	5,1
Maj	91,0	95,9	75,7	51,6	68,9	70,4	39,3	27,1	5,3	43,2	28,2	7,0
Juni	116,8	106,5	118,6	81,5	91,9	92,3	35,3	14,5	26,3	30,2	13,6	22,2
Juli	124,0	144,6	148,5	65,0	99,4	88,1	59,0	45,2	60,4	47,6	31,3	40,7
Avgust	127,3	127,6	131,3	76,8	84,9	107,8	50,5	42,7	23,5	39,7	33,5	17,9
Septembar	88,8	123,8	98,6	29,2	9,6	66,3	59,6	114,2	32,3	67,1	92,2	32,8
Prosek							42,5	41,0	25,0	42,9	33,9	21,0

Israeli et al. [22] ističu da primena mreža pri proizvodnji banana u dolini Jordana na severu Izraela povećava efikasnost korišćenja vode za oko 30%. Primena mreža za senčenje utiče na smanjenje evapotranspiracije voća [41].

2.4 Primena malč folije

Tehnologija gajenja mnogih povrtarskih kultura (paprika, paradajz, lubenica, dinja...) uključuje primenu malča [5]. Osim pozitivnog efekta na prinos biomase/ prinos plodova [10] malč folija poboljšava kvalitet plodova [15] i reguliše razvoj bolesti [11]. U uslovima klimatski promena i globalnog zagrevanja, malč folija smanjuje uticaj suše [58].

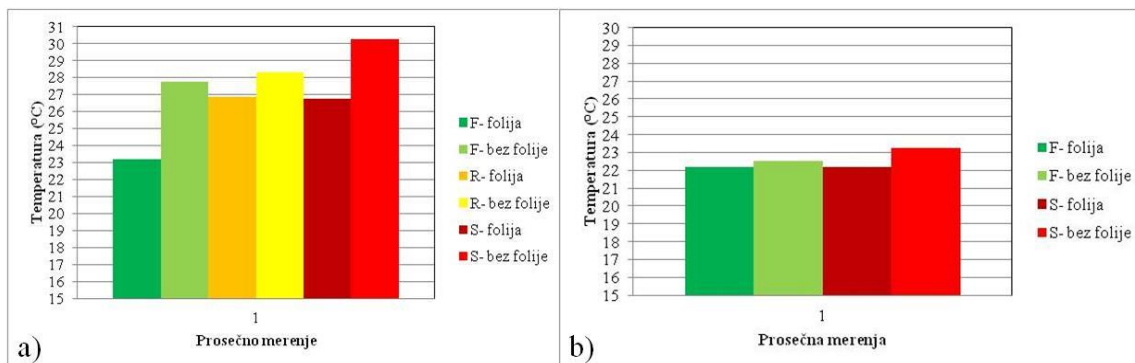
Malč folija umanjuje evaporaciju ističu [8], biljke imaju na raspolaganju više vode, intenzivnija je transpiracija, pa je zagrevanje biljke manje. Temperatura biljnog pokrivača paprike na tretmanima sa malčom je za oko 1,5°C niža nego na tretmanima bez malča. Kod paradajza su te razlike manje, jer je paradajz biljka gušćeg sklopa i proces evaporacije je već sam po sebi manje izražen (Slika 3). Primena malč folije značajno utiče na složene procese reakcije biljaka na temperaturni i vodni stres. Na primer, eliminiše se preduslov za stvaranje fiziološke truleži izazvane vodnim stresom, a samim tim se obezbeđuje bolji kvalitet plodova.

2.5 Dobro upravljanje vodama

Jedna od mogućnosti za dobro upravljanje vodama i određivanje režima navodnjavanja je primena savremenih nedestruktivnih metoda termovizije (image metoda).

Primenom nedestruktivnih metoda doprinosi se ranom detektovanju negativnih efekata, posebno suše, koji mogu da utiču na prinos i kvalitet poljoprivrednih kultura. Primenom termovizijskih kamera, multispektralnih kamera ili satelitskih snimaka velike rezolucije moguće je pratiti potrošnju vode (evapotranspiraciju), pojavu stresa usled suše, prevlaženosti ili nedostatka hraniva, na osnovu kojih se mogu donositi odluke o preciznoj vremenski i prostornoj primeni meliorativnih mera.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 3. Prosečna temperatura biljnog pokrivača a) paprike, b) paradajza na svim tretmanima zalivanja sa i bez mulč folije [8]

Figure 3. Average leaf temperature of a) peppers and b) tomato on all irrigation treatments with and without plastic mulch [8]

Termovizija omogućava vizuelizaciju razlika u površinskoj temperaturi mereći razlike u emitovanoj infracrvenoj radijaciji (dugotalasnoj infracrvenoj radijaciji od 8-14 μm). Kompiuterski program omogućava da se ove razlike u radijaciji predstave kao termalne slike, na kojima je temperaturni gradijent predstavljen kao gradijent boja. Temperatura biljnog pokrivača se smatra kao pokazatelj vodnog stresa useva, i koristi se kao pomoć u određivanju vremena navodnjavanja [43, 56].

Multispektralne kamere, prate refleksiju i emisiju radijacije različitih talasnih dužina sa površine biljnih delova, nakon čega se dobijeni rezultati analiziraju specijaliziranim softverima. Kako su metode jednostavne i nedestruktivne, sve više se praktično primenjuju u savremenoj poljoprivredi. Ove nove tehnologije se koriste od ćelijskog, nivoa celih biljaka, sve do nivoa agroekosistema. Na ćelijskom i subćelijskom nivou primena npr. konfokalne mikroskopije je dovela do revolucionarnih promena u obeležavanju ćelijskih procesa, dok su image metode na ćelijskom i nivou organa pomogle u objašnjenju procesa kao što su npr. fotosinteza, transport vode, otpornost biljaka na različite abiotičke i biotičke stresne faktore i sl. [2]. Ukoliko su biljke izložene suši, dolazi do zatvaranja stoma i opadanja transpiracije i stoga temperatura listova raste, a to se emituje u formi dugotalasne infra-crvene radijacije. Na infracrvenoj kameri to se manifestuje u formi preovlađujućih crveno/žuto obojenih površina [23, 60]. U literaturi je sve više podataka o primeni termovizijskih metoda, posebno za potrebe navodnjavanja [34]. Tako su [20] primenom ove metode utvrdili stepen stresa suše kod jabuke.

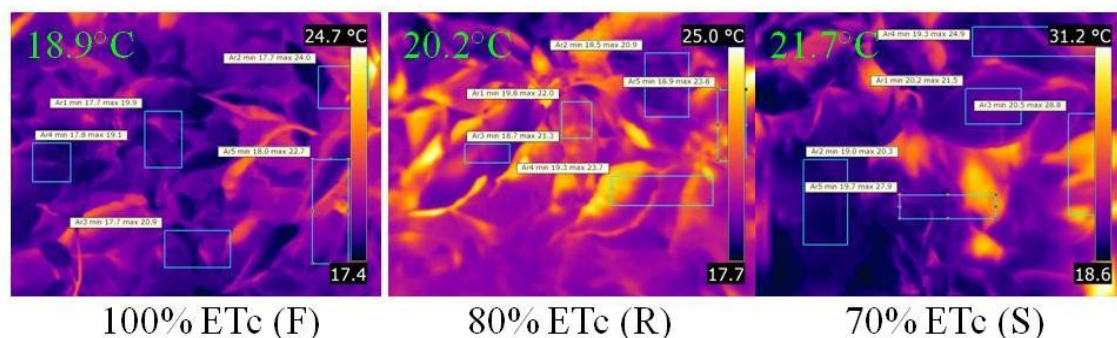
Istraživanjem u Srbiji utvrđeno je da postoji značajan uticaj režima navodnjavanja na temperaturu biljnog pokrivača paprike [9]. Podaci merenja temperatura pokazuju da su najhladnije bile biljke na tretmanu punog navodnjavanja (100% ETc) sa prosečnom temperaturom 21.29°C, zatim slede biljke na tretmanu redukovano navodnjavanja (80% ETc) sa prosečnom temperaturom 21.79°C i na kraju kao najtoplije su biljke na tretmanu redukovano navodnjavanja (70% ETc) sa prosečnom temperaturom 22.26°C (Slika 4).

Na slici 5 su prikazane temperature biljnog pokrivača maline na tretmanu sa (NA) i bez primene navodnjavanja (NN). Zapaža se da je prosečna temperatura na tretmanu navodnjavanja (26,7°C) niža od temperature biljnog pokrivača na nenavodnjavanom tretmanu (31,4°C). Uticaj navodnjavanja se ogleda i na temperaturnu razliku lista i vazduha, koja je u trenutku merenja iznosila 28,2°C. Biljke na NA tretmanu nisu bile u stresu (temperature

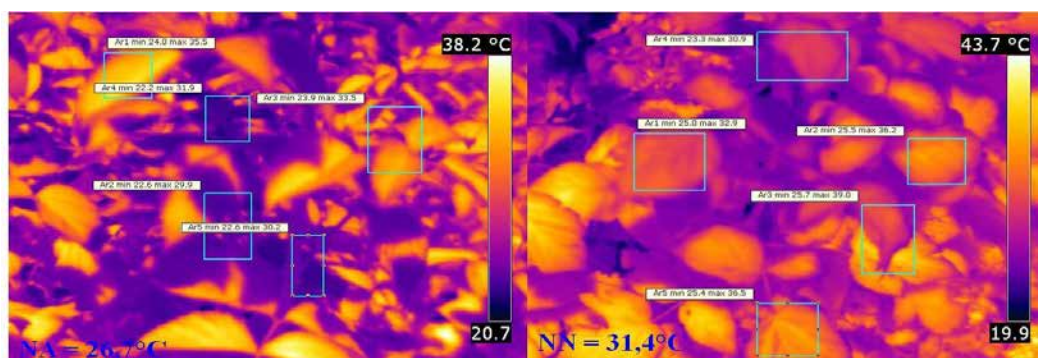
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

biljnog pokrivača niža od temperature vazduha), dok su biljke na NN tretmanu bile u stresu (temperature biljnog pokrivača je za 3,2°C) iznad temperature vazduha.

Takođe, zapaža se da postoji direktna zavisnost temperature biljnog pokrivača od vlažnosti zemljišta (Slika 6). Dakle, što je vlažnost zemljišta veća, temperatura biljnog pokrivača je niža.

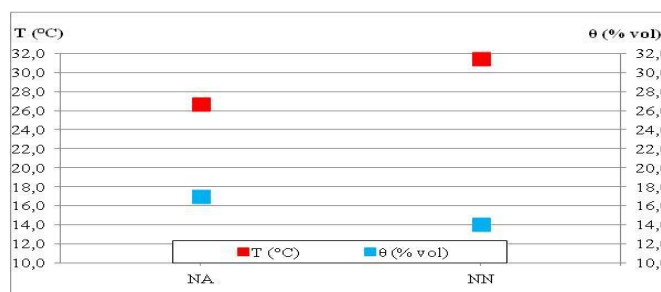


Slika 4. Temperatura biljnog pokrivača paprika merena termovizijskom kamerom na tretmanu punog navodnjavanja (F) i na tretmanima redukovano navodnjavanja (R i S)
Figure 4. Canopy temperature of peppers measured by infrared termography on full (F), and deficit irrigation treatment (R and S)



Slika 5. Temperatura biljnog pokrivača maline na navodnjavanom (NA) i nenavodnjavanom tretmanu (NN).

Figure 5. Canopy temperature of raspberry on irrigated (NA) and non irrigated treatment (NN)



Slika 6. Temperatura listova maline i vlažnost zemljišta na navodnjavanom (NA) i nenavodnjavanom tretmanu (NN) izmerene istog dana i sata.

Figure 6. Relationship between leaf temperature of raspberry and soil water content, measured at the same date and hour

3 Zaključak

Do kraja ovog veka očekuje se da će klima u Srbiji biti toplija i sušnija po A1B scenariju, a još naglašenije promene se mogu očekivati po A2 scenariju. Na sreću, ovakve promene neće uticati na značajniji pad prinosa ratarskih kultura, koje se kod nas tradicionalno obavljaju bez navodnjavanja. Varijacije prinosa se očekuju na dosadašnjem nivou. Sredinom i krajem veka, očekuju se sušniji letnji periodi, pogotovo po scenariju A2, tako da je potrebno razvijati ovu agrotehničku meru za letnje kulture. S obzirom da se predviđaju suše, što dovodi do smanjenja proticaja u rekama, biće manje raspoložive vode za navodnjavanje. Dobro upravljanje vodama primenom savremene merne tehnike i metoda, primena redukovano navodnjavanja kad god je to moguće, uz ostale mere ublažavanja suše mogu održati i unaprediti poljoprivrednu proizvodnju na području Srbije.

Literatura

1. Avakumović, D., Stričević, R., Đurović, N., i sar., 2005. Savremena analiza potrebnih količina vode za navodnjavanje. *Vodoprivreda*, 350 -0519, 37 p.11-20.
2. Barbagallo, R.P., Oxborough, K., Pallett, K.E., Baker, N.R., 2003. Rapid, noninvasive screening for perturbations of metabolism and plant growth using chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiology*, 132: 485-493.
3. Boari, F., Donadio, A., Schiattone, M. I., Cantore, V., 2015. Particle film technology: A supplemental tool to save water. *Agric. Wat. Manage.* 147, 154–162.
4. Cantore, V., Pace, B., Albrizio, R., 2009. Kaolin-based particle film technology affects tomato physiology, yield and quality. *Environ. Exper. Bot.* 66, 279–288.
5. Carranca, C., 2006. Living and cover crop mulch systems in a vegetable production, DRIS, R. (ed.) *Vegetables: Growing environment and mineral nutrition*, Helsinki: WLF Publishers, 320 p., ISBN 952-99555-1-0.
6. Chamchaiyaporn, T., Jutamanee, K., Kasemsap, P., Vaithanomsat, P., Henpitak, C., 2013. Effects of kaolin clay coating on mango leaf gas exchange, fruit yield and quality. *Kasetsart J. Nat. Sci.* 47, 479–491.
7. Ćosić, M., Djurović, N., Todorović, M., Maletić, R., Zečević, B., Stričević, R., 2015. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of sweet pepper. *Agricultural Water Management* 159, 139–147.
8. Ćosić, M., Đurović, N., Stričević, R., Mužević, V., 2013. Uticaj mulčiranja na temperaturu biljnog pokrivača paprike i paradajza u uslovima više varijanti navodnjavanja. *Orginalni naučni rad. Agroznanje*, vol 14, br.2, 213-222.
9. Ćosić, M., Stričević, R., Đurović, N., Lukic, I., Zagorac, Đ., 2012. Influence of irrigation and application of kaolin on canopy temperature of peppers measured by infrared thermography. July 16-20, Geisenheim (Germany): VII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops.
10. Diaz-Perez, J.C., Batal, K.D., 2002. Colored plastic film mulches affect tomato growth and yield via changes in root-zone temperature, *Journal of American Society of Horticultural Science* 127(1), 127-135.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

11. Diaz-Perez, J.C., Gitaitis, R., Mandal, B., 2007. Effects of plastic mulches on root zone temperature and on the manifestation of tomato spotted wilt symptoms and yield of tomato, *Scientia Horticulturae* 114(2), 90-95.
12. Dodig, D., Aleksić, V., Spasov, P., Petrović, R., Miletić, R., 2002. Climate changes in eastern Serbia and their influence on plant production and ecosystem. Proceedings of ICID International Conference on Drought Mitigation and Prevention of Land Desertification, Bled, Slovenia, CD-ROM, Ch.8.
13. Dragovic, S., Maksimovic, L., 2004. Relationship between drought intensity and crop production in Serbia and Montenegro. In Morell, MorellTodorovik, Olivija, Todorovik, Olivija, & Dimitrov, Dobri (Eds.). BALWOIS: Abstracts, (p. 438). Macedonia, The F.R. of Yugoslavia: Ministry of Environment and Physical Planning.
14. Fabeiro, C., Martín de Santa Olalla, F., De Juan, J.A., 2002. Production of muskmelon (*Cucumis melon* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. *Agric. Water Manage.* 54, 93–105.
15. Farias-Larios, J., Orozco-Santos, M., 1997. Color polyethylene mulches increase fruit quality and yield in watermelon and reduce insect pest populations in dry tropics, *Gartenbauwissenschaft* 62(6), 255-260.
16. Gocic, M., Trajkovic, S., 2014. Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. *J. of Hydrology* Vol. 510, 14 March 2014, Pages 110–123.
17. Glenn, D.M., Puterka, G.J., Van der Zwet, J.T., Byers, R.E., Feldhake, C., 1999. Hydrophobic particle films: a new paradigm for suppression of arthropod pests and plant diseases. *J. Econ. Entomol.* 92, 759–771.
18. Glenn, D.M., Drake, S., Abbott, J.A., Puterka, G.J., Gundrum, P., 2005. Season and cultivar influence the fruit quality response of apple cultivars to particle film treatments. *HortTechnology* 15, 249–253.
19. Glenn, D. M., 2012. The Mechanisms of Plant Stress Mitigation by Kaolin-based Particle Films and Applications in Horticultural and Agricultural Crops. *Hort Science*, vol. 47 no. 6 710-711.
20. Guiliani, R., Flore, J.A., 2000. Potential use of infra-red thermometry for the detection of water stress in apple trees. *Acta Horticulturae*, 537: 383-392.
21. Igbadun, H.E., Salim, B.A., Tarimo, A.K.P.R., Mahoo, H.F., 2008. Effects of deficit irrigation scheduling on yields and soil water balance of irrigated maize. *Irrig. Sci.* 27, 11–23.
22. Israeli, Y., Zohar, C., Arzi, A., Nameri, N., Shapira, O., Levi, Y., 2002. Growing banana under shade screens as a mean of saving irrigation water: preliminary results. In: Proceedings of the fifteenth ACORBAT Meeting, 27 October–2 November 2002. Cartagena, Colombia, pp. 384–389.
23. Jones, H.G., 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41: 107-163.
24. Kang, S., Zhang, L., Hu, X., Li, Z., Jerie, P., 2001. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Sci. Hortic.*, 89, 257-267.
25. Kirnak, H., Demirtas, M.N., 2006. Effects of different irrigation regimes and mulches on yield and macronutrition levels of drip-irrigated cucumber under open field conditions. *J. Plant Nutr.* 29, 1675–1690.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

26. Kresovic B., Matovic, G., Gregoric, E., Djuricin, S., Bodroza, D., 2014. Irrigation as a climate change impact mitigation measure: An agronomic and economic assessment of maize production in Serbia. *Agricultural Water Management* Vol. 139, Pages 7–16.
27. Lalancette, N., Belding, R.D., Shearer, P.V., Frecon, J.L., Tietjen, W.H., 2005. Evaluation of hydrophobic and hydrophilic kaolin particle films for peach crop, arthropod and disease management. *Pest Manage. Sci.* 61, 25–39.
28. Lalić, B., Eitzinger, J., Mihailović, D. T., Thaler, S., Jančić, M., 2013. Climate change impacts on winter wheat yield change – which climatic parameters are crucial in Pannonian lowland *J. Agric. Sci.* 151(06): 757–774.
29. Lukic, I., Stricevic, R., Durovic, N., Cosic, M., 2012. Impact of kaolin-based particle film on tomato water use efficiency. In: *Proc. Conference BALVOIS, 28 May–2 June, Ohrid (FYROM)*.
30. Maksimović, L., Dragović, S., 2002. Effect of Irrigation on sugarbeet yield increase and stabilization in the Vojvodina province, Yugoslavia. *Internat. Conf. “Drought mitigation and prevention of land desertification”*, ERVG-ICID, Bled, Slovenia.
31. Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z., Shi, J., 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. *Agr. Water Manage.* 61, 219–228.
32. Marouelli, W.A., Silva, W.L.C., Moretti, C.L., 2004. Production, quality and water use efficiency of processing tomato as affected by the final irrigation timing. *Horticultura Brasileira* 22, 225–230.
33. Marouelli, W.A., Silva, W.L.C., 2007. Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in central Brazil. *Irrigation Science* 25, 41–418.
34. Mahan, J.R., Burke, J.J., Upchurch, D.R., Wanjura, D.F., 2000. Irrigation scheduling using biologically-based optimal temperature and continuous monitoring of canopy temperature. *Acta Horticulturae*, 537: 375–381.
35. Melgarejo, P., Martinez, J.J., Hernandez, F., Martinez-Font, R., Barrowsb, P., Erez, A., 2004. Kaolin treatment to reduce pomegranate sunburn. *Sci. Hortic.* 100, 349–353.
36. Miranda, C., Arzoz, E., Santesteban, L.G., Laquidain, M.J., Gonzáles, J., Royo, J.B., 2007. Efecto de la aplicacion de caolin sobre la temperatura de las hojas en naranjo (*Citrus sinensis*) y peral (*Pyrus communis*). *Acta Hort.* 48, 434–437.
37. Mihailović, D. T., Lalić, B., Drešković, N., Mimić, G., Djurdjević V., Jančić, M., 2015. Climate change effects on crop yields in Serbia and related shifts of Köppen climate zones under the SRES-A1B and SRES-A2 *Int. J. Climatol.* 35: 3320–3334.
38. Pace, B., Boari, F., Cantore, V., Leo, L., Vanadia, S., De Palma, E., Phillips, N., 2007. Effect of particle film technology on temperature, yield and quality of processing tomato. *Acta Hortic.* 758, 287–293.
39. Pejic, B., Maheshwari, B. L., Šeremešić, S., Stričević, R., Pacureanu-Joita, M., Rajić, M., Čupina, B., 2011. Water-yield relations of maize (*Zea mays* L.) in temperate climatic conditions. *Maydica*, 56-1715, p.315-323.
40. Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage.*, 57, 175–206.
41. Pirkner, M., Tanny, J., Shapira, O., Teitel, M., Cohen, S., Shahak, Y., Israeli, Y., 2014. The effect of screen type on crop micro-climate, reference evapotranspiration and yield of a greenhouse banana plantation. *Scientia Horticulturae*, Volume 180, p. 32–39.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

42. Prokopljević, D., Stričević, R., Miletaški, B., 2012. Uticaj protivgradne mreže na evapotranspiraciju voćnjaka jabuka u Čelarevu. Savetovanje Meliroacije 12. Tematski zbornik radova. Str. 1-7.
43. Ružić, D., Stikić, R., Todić, S., Veličković, M., 2009. Primena savremenih teorijskih saznanja u oblasti fiziologije i ekologije voćaka i vinove loze. *Voćarstvo*, 43, 167-168 (2009) 65-79.
44. Saleh, M.M.S., El-Ashry, S.M., 2006. Effect of some antitranspirants on leaf mineral content, fruit set, yield and fruit quality of Washington navel and Succary orange trees. *J. Appl. Sci. Res.* 2 (8), 486–490.
45. Stojakovic, N., R. Stricevic, M. Vujadinovic-Mandic, M. Todorovic (2015). Impact of climate change on water requirements and yield of maize grown under different pedo-climatic conditions in Bosnia and Herzegovina. *Proceedings – Book of abstracts of International Conference on “Modern technologies, strategies and tools for sustainable irrigation management and governance in Mediterranean agriculture”* (Eds. F.F. Montesano, A. Parente, N. Lamaddalena, M. Todorovic, L. Trotta), 23-25 September 2015, Valenzano (Bari), Italy, ISBN 2-85352-549-X, 97-98.
46. Stojkovic, M.S., Ilic, A., Prohaska, S., Plavsic, J., 2014. Multi temporal analysis of aean annual and seasonal stream flow trends, including periodicity and multiple non-linear regression. *Water resources managemt*, Vol. 28, br. 12 str. 4319-4335.
47. Stričević, R., Djurović, N., Đurović, Ž., 2011. Drought classification in northern Serbia based on spi and statistical pattern recognition. *Meteorol. Appl.* 18: 60–69 (2011).
48. Stricevic, R., Djurovic, N., 2013. Determination of spatiotemporal distribution of Agricultural drought in Central Serbia (Šumadija). *Scientific research and Essays*, Vol. 8(11), pp. 438-446.
49. Stričević, J. R., Đurović, Lj. N., Vuković, J. A., Vujadinović, P. M., Ćosić, D. M., Pejić, S. B., 2014. Procena prinosa i potrebe šećerne repe za vodom u uslovima klimatskih promena na području Rpublike Srbije primenom AquaCrop modelom. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 59 No. 3 p.301-317.
50. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S., Jensen, C.R., 2007. Effects of partial root-zone drying (PRD) on yield, tuber size and water use efficiency in potato (*Solanum tuberosum*) under field conditions. *Fields Crops Res.* 100, 117–124.
51. Shellie, K., King, B.A., 2013a. Kaolin particle film and water deficit influence on red wine grape color under high solar radiation in an arid climate. *Am. J. Enol. Vitic.* 64, 214–222.
52. Shellie, K., King, B.A., 2013b. Kaolin-based foliar reflectant and water deficit influence on Malbec leaf and berry temperature, pigments, and photosynthesis. *Am. J. Enol. Vitic.* 64, 223–230.
53. Topcu, S., Kirda, C., Dasgan, Y., Kaman, H., Cetin, M., Yazici, A., Bacon, M.A., 2007. Yield response and N-fertiliser recovery of tomato grown under deficit irrigation. *Europ. J. of Agron.*, 26, 64–70.
54. Trifunović-Rodić, S., Stričević, R., Đurović, N., 2014. Efikasnost korišćenja vode najvažnijih useva u uslovima sa i bez navodnjavanja u Srbiji. *Agroznanje*, vol. 15, br. 3, 2014, 231-243 DOI: 10.7251/AGRSR1403231T.
55. Wand, S.J.E., Theron, K.I., Ackerman, J., Marais, S.J.S., 2006. Harvest and post harvest apple fruit quality following applications of kaolin particle film in South African orchards. *Sci. Hortic.* 107, 271–276.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

56. Wang, X., Yang, W., Wheaton, A., Cooley, N., Morana, B., 2010. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 73, 74–83.
57. Weerakkody, P., Jobling, J., Infante, M.M.V., Rogers, G., 2010. The effect of maturity, sunburn and the application of sunscreens on the internal and external qualities of pomegranate fruit grown in Australia. *Sci. Hortic.* 124, 57–61.
58. Xie, Z.K., Wang, Y.J., Li, F.M., 2005. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in region of northwest China, *Agricultural Water Management* 75(1), 71-83.
59. Yazici, K., Kaynak, L., 2009. Effects of kaolin and shading treatments on sunburn on fruit of Hicaznar cultivar of pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Hicaznar). *ActaHortic.* 818, 181–186.
60. Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., Van der Sande, C.J., Grootaers, L., Feyen, J., 2006. Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment*, 101: 299-314.
61. Vučetić, V., 2011. Modelling of maize production in Croatia: present and future climate. *The J. of Agric. Sci.* 149, pp 145-157. doi:10.1017/S0021859610000808.
62. Zegbe-Dominguez, J.A., Behboudian, M.H., Lang, A., Clothier, B.E., 2003. Deficit irrigation and partial root zone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'Petopride' processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* 98, 505–510.

Uticaj klimatskih promena na potrebe za vodom u poljoprivrednoj proizvodnji

Mile Božić¹
Goran Nikolić²
Sanja Kračunov³
Željka Rudić⁴
Jelena Božić⁵

APSTRAKT: Navodnjavanje nije samo mera za ublažavanje suše, već i za održavanje optimalne poljoprivredne proizvodnje. Razvoj navodnjavanja utiče na vodne resurse sa više aspekata, i kvantitativno i kvalitativno. Kada je reč o količini potrebne vode za navodnjavanje, korišćenje vode u ove svrhe može izazvati velike sezonske pritiske na vodne resurse. Ukoliko dođe do sve češće pojave klimatskih ekstrema, kako predviđa IPCC, potrebe za vodom za kućnu upotrebu, kao i za sve privredne grane će se značajno povećati. Cilj ovog rada je da ukaže na promene potreba za vodom biljaka u proteklih 60 godina na teritoriji Srbije (područje Beograda, Novog Sada i Niša), kao i na značaj navodnjavanja sa aspekta stabilne poljoprivredne proizvodnje, ali i uticaja na vodne resurse, s obzirom da je poljoprivreda jedan od najvećih potrošača vode. Povećavanje normi navodnjavanja, uz generalno povećanje potrošnje vode tokom sušnih perioda može da stvori značajan pritisak na vodne resurse u budućnosti.

Ključne reči: suša, evapotranspiracija, navodnjavanje, poljoprivreda

Water requirements of agricultural crops under the climate change

ABSTRACT: Irrigation is not just a measure for drought mitigation, but also to maintain optimal agricultural production. The development of irrigation affects the water resources in many aspects, both quantitatively and qualitatively. When it comes to the amount of irrigation water needs, water use for these purposes can cause large seasonal pressures on water resources. If there is a more frequent occurrence of climate extremes, as suggested by the IPCC, the need for water for domestic use, as well as for all economic sectors will increase significantly. The aim of this paper is to show the changes of crop water needs in the past 60 years on the territory of Republic of Serbia (locations: Belgrade, Novi Sad and Nis), as well as the importance of irrigation in terms of stable agricultural production, but also impacts on water resources, given that agriculture is one of the largest consumers of water. Increasing irrigation, with a general increase in the consumption of water during dry periods can create considerable pressure on water resources in the future.

Keywords: drought, evapotranspiration, irrigation, agriculture

¹ Mr Mile Božić, dipl. inž. građ. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd, mile.bozic@jcerni.co.rs

² Goran Nikolić, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd

³ Sanja Kračunov, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd

⁴ Mr Željka Rudić, dipl. inž. polj., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd

⁵ Jelena Božić, master ekol., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, Beograd

1 Uvod

Navodnjavanje nije samo mera za ublažavanje suše, već i za održavanje optimalne poljoprivredne proizvodnje. Razvoj navodnjavanja utiče na vodne resurse sa više aspekata, i kvantitativno i kvalitativno. Kada je reč o količini potrebne vode za navodnjavanje, korišćenje vode u ove svrhe može izazvati velike sezonske pritiske na vodne resurse. Ukoliko dođe do sve češće pojave klimatskih ekstrema, kako se predviđa [8], potrebe za vodom za kućnu upotrebu, kao i za sve privredne grane će se značajno povećati.

Poslednjih godina smo bili svedoci jakih suša i velikih poplava širom sveta. Procene uticaja klimatskih promena sa različitih aspekata su neophodne i ukazuju kakve buduće promene mogu da izazovu na ljudske aktivnosti i prirodu, posebno ako se u to uključe identifikacija i ocena različitih adaptacija na moguće promene. Za razliku od poplava, suše se ne mogu precizno definisati. Najčešće se fokusiramo na problem suša tek kada su osetne posledice njenog delovanja. Štete od suša mogu da prevaziđu štete nastale od drugih prirodnih nepogoda [14].

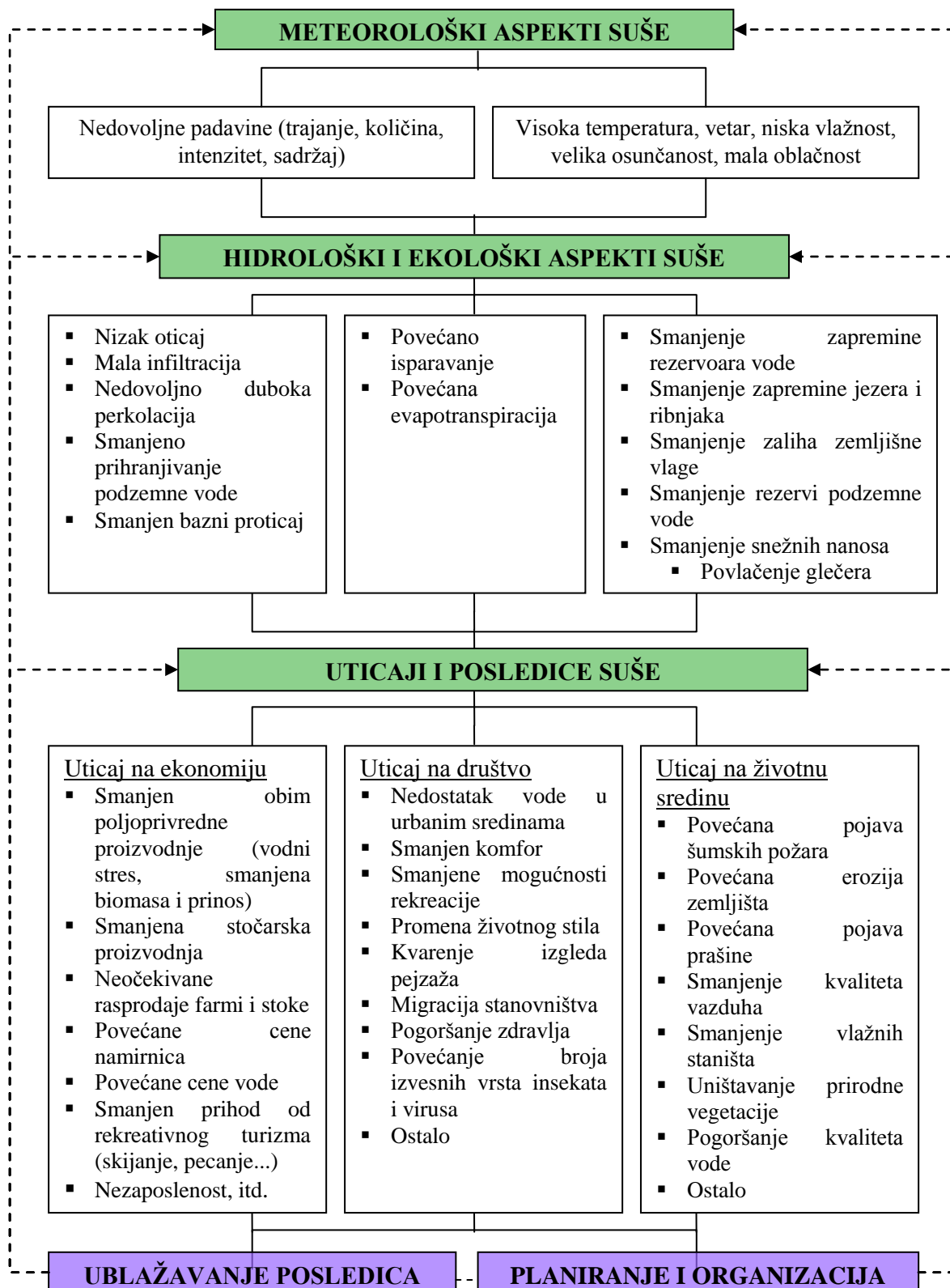
Suše mogu da prouzrokuju velike finansijske gubitke poljoprivrednim proizvođačima, a posledično i prehrambenoj industriji, a posledice su i nedovoljne količine za vodosnabdevanje naselja i druge potrebe. Osim toga posledice mogu da se manifestuju i na druge načine, kroz pojavu požara, loš kvalitet vode u vodotocima, što dalje utiče na ribarstvo, turizam i rekreaciju [17]. Slika 1 sumira različite faktore u analizi suše i problemima upravljanja sušom.

Upravljanje vodnim resursima podrazumeva „raspodelu“ vodnih resursa u vremenu i prostoru tako da potrebe svih korisnika budu zadovoljene; sledstveno, upravljanje zahteva ne samo statističku kategorizaciju sušnih događaja, već i monitoring tekućih (sušnih) uslova koji se zasniva na realnim osmatranjima i na praćenju izvedenih indeksa [7]. Za dobru adaptaciju na ekstremne klimatske događaje neophodno je proceniti koliko dobro će određena praksa ili tehnologija pomoći u izbegavanju ili ublažavanju posledica nepovoljnih klimatskih događaja, brzim i efikasnim oporavkom od negativnih efekata ili korišćenjem pozitivnih strana [19].

Poljoprivredna suša se javlja kada nema dovoljno vlage u zemljištu da odgovori na potrebe gajenih biljaka u određenom periodu. Poljoprivredna suša je evidentna posle meteorološke suše, a pre hidrološke suše [20]. Sa aspekta poljoprivrede, mnogo su značajniji efekti suše nego čist meteorološki problem koji dovodi do njih. Pojava efekata može biti trenutna ili odložena, kao što i oporavak od nedostatka vlage može biti gotovo trenutni ili odložen zavisno od osobina posmatrane oblasti ili postignutih aktivnosti. Zbog ovih ili drugih razloga, prinosi useva, stanje pašnjaka, vodostaji vodotoka i jezera i slično, ne moraju da budu mere intenziteta meteorološke suše.

Problem poljoprivredne suše, kao važnog aspekta suše, s obzirom na to da je prva ugrožena privredna grana, je izuzetno složen [11]. Proučavanje poljoprivredne suše vodi direktno u oblasti fizike zemljišta, fiziologije biljaka i agroekonomije. Može se reći da je suša najkompleksnija prirodna nepogoda ne samo zbog međusobnog uticaja različitih faktora već i zbog toga što je u direktnoj vezi sa potrebama za vodom, pa se intenzitet suše zapravo meri time koliko dobro su određene potrebe za vodom.

Prema istraživanjima za period 1971.-2000. godine [18], najznačajniji klimatološki deficit padavina (razlika padavina i evapotranspiracije) se javlja u Vojvodini, i istočnim i jugoistočnim krajevima Srbije, gde prelazi 300 mm. Deficit padavina nije jednako raspoređen na teritoriji Republike Srbije, što ukazuje na zavisnost od regionalnog karaktera, kao i nadmorske visine proučavanog područja [4,17].



Slika 1. Ilustracija faktora suše i definicije [17]
 Figure 1. Illustration of drought factors and definitions [17]

Istraživanja za period 1961.-2005. ukazuju da prosečan deficit za 26 meteoroloških stanica na teritoriji R. Srbije, iznosi 200 mm, a kada se isključe meteorološke stanice sa nadmorskim visinama preko 1000 mnm, prosečan deficit poraste za više od 20 mm [4].

Za biljku voda je osnov za sve fiziološke procese, prvenstveno fotosintezu i transpiraciju, pa time utiče na rastenje biljke, cvetanje, zametanje plodova, nalivanje zrna itd. Kada dostupna voda ne zadovolji potrebe biljke, ona ulazi u vodni stres, što dovodi do zaustavljanja rasta, smanjenja prinosa ili čak izostanka plodonošenja, kao i do oštećenja ploda [9]. „Normalni“ uslovi za biljku pod kojima će dati dobar prinos, nisu prosečni uslovi, već uslovi iznad proseka koji će obezbediti i dobar prinos [10].

Suša ne mora da utiče na poljoprivrednu proizvodnju time što nedostatak vode izaziva sušenje i venjenje biljke, već na visinu i kvalitet prinosa utiče i ako se javi u pojedinim fenofazama razvića, odnosno u takozvanim kritičnim fazama koje se razlikuju po biljnim vrstama [5]. Neke biljke su bolje adaptirane na izdržavanje uslova nedovoljne obezbeđenosti vodom, dok su druge znatno osetljivije [9].

Sa aspekta fiziologije biljaka razlikuje se zemljišna i atmosferska suša, a posmatrajući fiziologiju same biljke razlikuje se još i fiziološka suša, gde nema stvarnog nestanka vode, ali zbog mikroklimatskih uslova dolazi do sporog usvajanja, a intenzivnog odavanja vode [9]. Do pojave atmosferske suše dolazi kada je vazduh nedovoljno zasićen vodenom parom (ispod 60%), a uslovi se pogoršavaju kada su praćeni visokim temperaturama i suvim vetrom [9]. Visoka temperatura u kombinaciji sa vetrom i niskom relativnom vlažnošću vazduha, dovodi do povećanja evapotranspiracije [1]. Kada uz visoke temperature, zemljište ne raspolaže dovoljnim količinama vode, dolazi do pojave zemljišne suše.

Cilj ovog rada je da ukaže na promene potreba za vodom biljaka u proteklih 60 godina na teritoriji Srbije (područje Beograda, Novog Sada i Niša), kao i na značaj navodnjavanja sa aspekta stabilne poljoprivredne proizvodnje, ali i uticaja na vodne resurse, s obzirom da je poljoprivreda jedan od najvećih potrošača vode. Povećavanje normi navodnjavanja, uz generalno povećanje potrošnje vode tokom sušnih perioda može da stvori značajan pritisak na vodne resurse u budućnosti.

2 Materijal i metode

Neto deficit vode za biljke se određuje iz razlike potreba useva za vodom i efektivnih padavina (1). Uzimajući u obzir procentualno učešće svake kulture u plodoredu potreba useva za vodom umanjena za efektivne padavine daje neto deficit vode svake kulture. Zbir neto deficita svih kultura pomnoženih sa procentualnom zastupljenošću svake kulture u plodoredu daje ukupan neto deficit specifičnog hektara.

$$I_n = \sum_{i=1}^n [(ET_{ci} - P_e) \cdot z_{st}] \quad (1)$$

gde su: I_n – neto deficit vode, ET_c – evapotranspiracija kultura, P_e – efektivne padavine i z_{st} – zastupljenost kulture.

Evapotranspiracija useva (ET_c) predstavlja proizvod koeficijenta kulture (k_c) u kom su sadržane karakteristike useva i referentne evapotranspiracije (ET_o) koja reprezentuje klimatske uslove [2]. Evapotranspiracija useva podrazumeva da se usev gaji u standardnim

uslovima, odnosno da je adekvatne gustine, dobro obezbeđen vodom i hranivima, da nije pod stresom usled saliniteta, bez prisustva bolesti, štetočina i korova.

$$ET_c = ET_o \cdot k_c \quad (2)$$

Koeficijenti kulture za određene periode su određeni na osnovu ukupnog perioda vegetacije i trajanja pojedinih fenofaza razvića kultura zastupljenih na području. Da bi jedan sistem za navodnjavanje mogao da zadovolji potrebe kultura za vodom u vršnom periodu potrošnje, neophodno je uzeti u obzir jedan specifičan hektar, koji je zasnovan na postojećem ili planiranom plodoredu. Ovde je razmatran plodored koji obuhvata kulture i njihovu procentualnu zastupljenost koje su obuhvaćene popisom poljoprivrede iz 2012. g., za svaku izabranu lokaciju [16].

Referentna evapotranspiracija je izračunata na osnovu FAO Penman – Monteith metode [2]. Referentna evapotranspiracija izražava atmosfersku moć za isparavanjem sa referentne površine. Dobijena je na osnovu meteoroloških podataka MS Beograd, MS Niš i MS Novi Sad – Rimski Šančevi, za period 1949.-2014. Klimatski parametri, potrebni za proračune (minimalna i maksimalna temperatura vazduha (°C), relativna vlažnost vazduha (%), brzina vetra (m/s), padavine (mm) i trajanje sunčevog sjaja (h)) su preuzeti iz meteoroloških godišnjaka Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije [15].

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (3)$$

gde je: ET_o – referentna evapotranspiracija (mm/dan), R_n – neto radijacija sa površine useva (MJ/m²·dan), G – energija utrošena na zagrevanje zemljišta (MJ/m²·dan), T – temperatura vazduha (°C), u_2 – brzina vetra merena na 2 m visine (m/s), $e_s - e_a$ je deficit napona vodene pare (kPa), Δ – nagib krive napona vodene pare (kPa/°C), γ – psihrometerska konstanta (kPa/°C).

Efektivne padavine, potrebne za izračunavanje neto deficita vode, su dobijene na osnovu USDA metode [21]. Od ukupnih padavina zapravo se iskoristi samo jedan njihov deo, efektivne padavine, koje dođu u aktivni sloj zemljišta.

$$P_e = 1,2525 \cdot (P^{0,82416} - 2,3435) \cdot e^{0,0022ET} \delta(D_n) \quad (4)$$

gde je: P_e – efektivne padavine za razmatrani period (mm), P – stvarne padavine (mm), e – osnova prirodnog logaritma, ET – evapotranspiracija za razmatranu kulturu (mm), δ – korekcionni koeficijent koji zavisi od norme zalivanja.

3 Rezultati i diskusija

Proučavani period obuhvata nekoliko sušnih godina, i to 3 istaknute u poslednjih 15 godina 2000., 2003., 2012. godinu. Dobijene vrednosti za referentnu evapotranspiraciju, za period 1949.-2014. godine, ukazuju da za područje Novog Sada i Beograda postoji blagi rastući

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

trend, dok je za Niš trend blago opadajući (Slika 2). Prosečne vrednosti referentne evapotranspiracije za proučavani period se kreću od 824 mm za Niš, 836 mm Novi Sad, do 879 mm Beograd. Vrednosti referentne evapotranspiracije se kreću u značajnom rasponu za sve tri lokacije/meteorološke stanice, i to za Novi Sad 730-1010 mm, Beograd 763-1124 mm i Niš 709-954 mm. Razlika između minimalnih i maksimalnih izračunatih vrednosti se kreće od 245 do 361 mm, što se izjednačava sa vrednostima sume šestomesečnih padavina.

Računske vrednosti evapotranspiracije kultura su znatno niže, na šta utiče plodored, odnosno izbor gajenih kultura. Prosečna evapotranspiracija iznosi za Novi Sad 460 mm, Beograd 532 mm, i Niš 453 mm. Izbor gajenih kultura utiče i na potrebe za vodom, čije vrednosti značajnije variraju tokom proučavanog perioda (Slika 3).

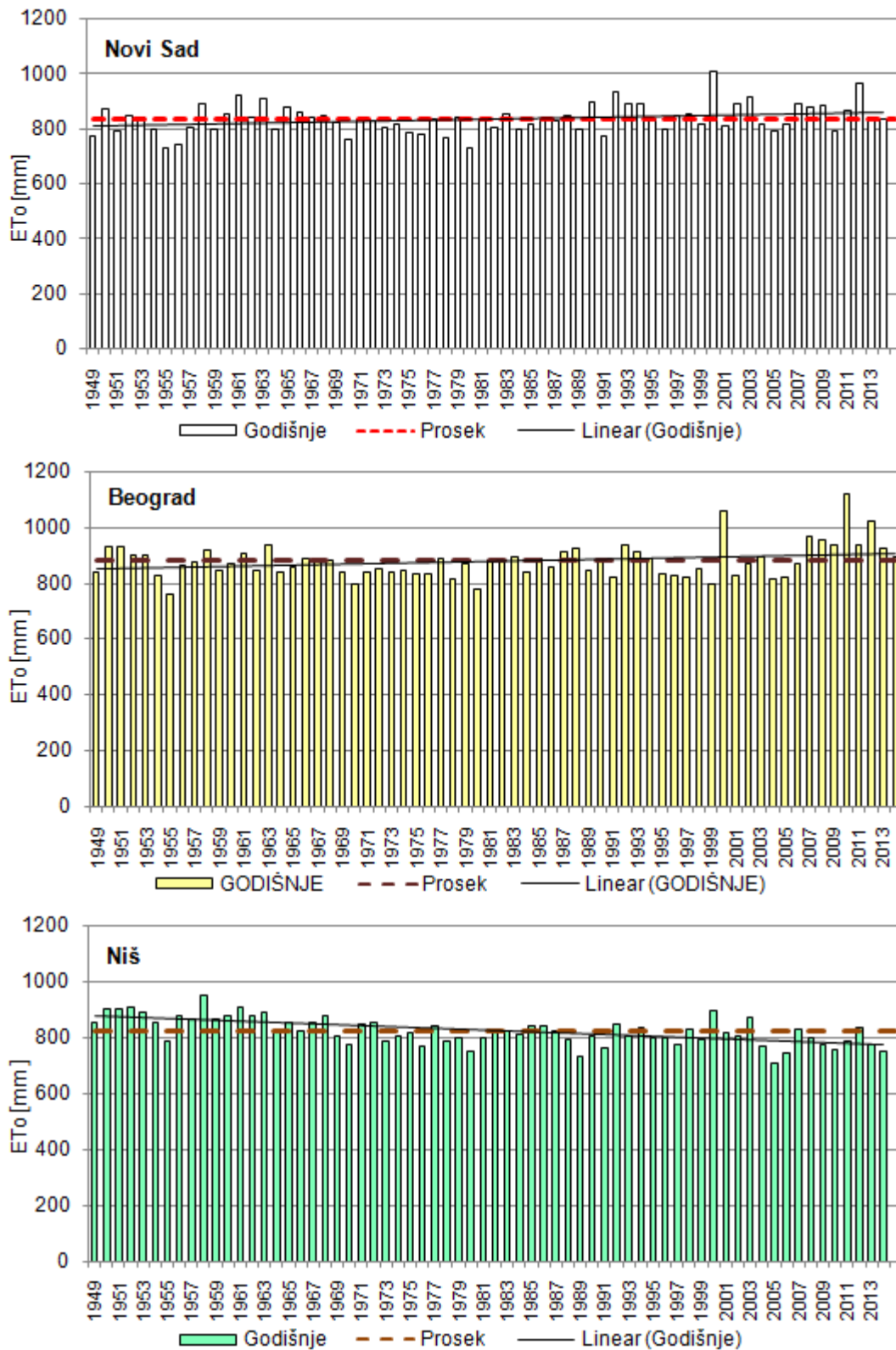
Potrebe za vodom u proučavanom 66-godišnjem periodu su 18 puta prevazišle 300 mm na lokaciji Beograd, što obuhvata skoro trećinu slučajeva. Na lokaciji Novi Sad ovako visoke potrebe za vodom su registrovane 14 puta, odnosno približno u petini slučajeva, a na lokaciji Niš 6 puta. Od navedenih 18 puta kada su na lokaciji Beograd potrebe za vodom prešle 300 mm, 9 puta se dogodilo u poslednjih 15 godina, što je naznaka da ekstremni događaji postaju učestaliji u ovom području. Na lokalitetu Niš, u poslednjih 15 godina potrebe za vodom su bile više od navedene vrednosti samo jednom, a na lokalitetu Novi Sad 4 puta.

Generalni trend kada su u pitanju potrebe za vodom je rastući za Beograd, opadajući za Niš, dok je za lokalitet Novi Sad neutralan (Slika 3). Minimalne potrebe za vodom za Beograd su iznosile 107 mm (2014.g.), dok su maksimalne iznosile 473 mm (2000.g.); u Novom Sadu su dobijene minimalne 46 mm (2010.g.), maksimalne 419 mm (2000.g.), dok su u Nišu minimalne iznosile 50 mm (2014.g.), a maksimalne 371 mm (1958.g.). Svi ekstremi su registrovani u periodu posle 2000. god., osim maksimalnih potreba za lokalitet Niš. Razlike u godinama kada je došlo do pojave ekstrema ukazuju na uticaj lokalnog karaktera klime na potrebe za vodom.

Sa aspekta biljne proizvodnje nije ključan nedostatak padavina sam po sebi već i drugi klimatološki uslovi, poput visoke temperature, vetra i vlažnosti vazduha. Kada se analiziraju uslovi za nastanak poljoprivredne suše, potrebno je sveobuhvatno razmatrati klimatske uslove, ali i osobine zemljišta i gajene kulture. Visoke temperature i neodgovarajuća raspodela padavina generalno dovode do povećanih potreba za vodom za navodnjavanje, čak iako suma padavina vegetacionog perioda ostaje ista [3]. Na teritoriji Egipta se prognozira povećanje temperature koje će usloviti povećanje evapotranspiracije pšenice za 10%, i kukuruza za 8%, pa se efekat klimatskih promena generalno ogleda u povećanju evapotranspiracije kultura i smanjenju prinosa [6].

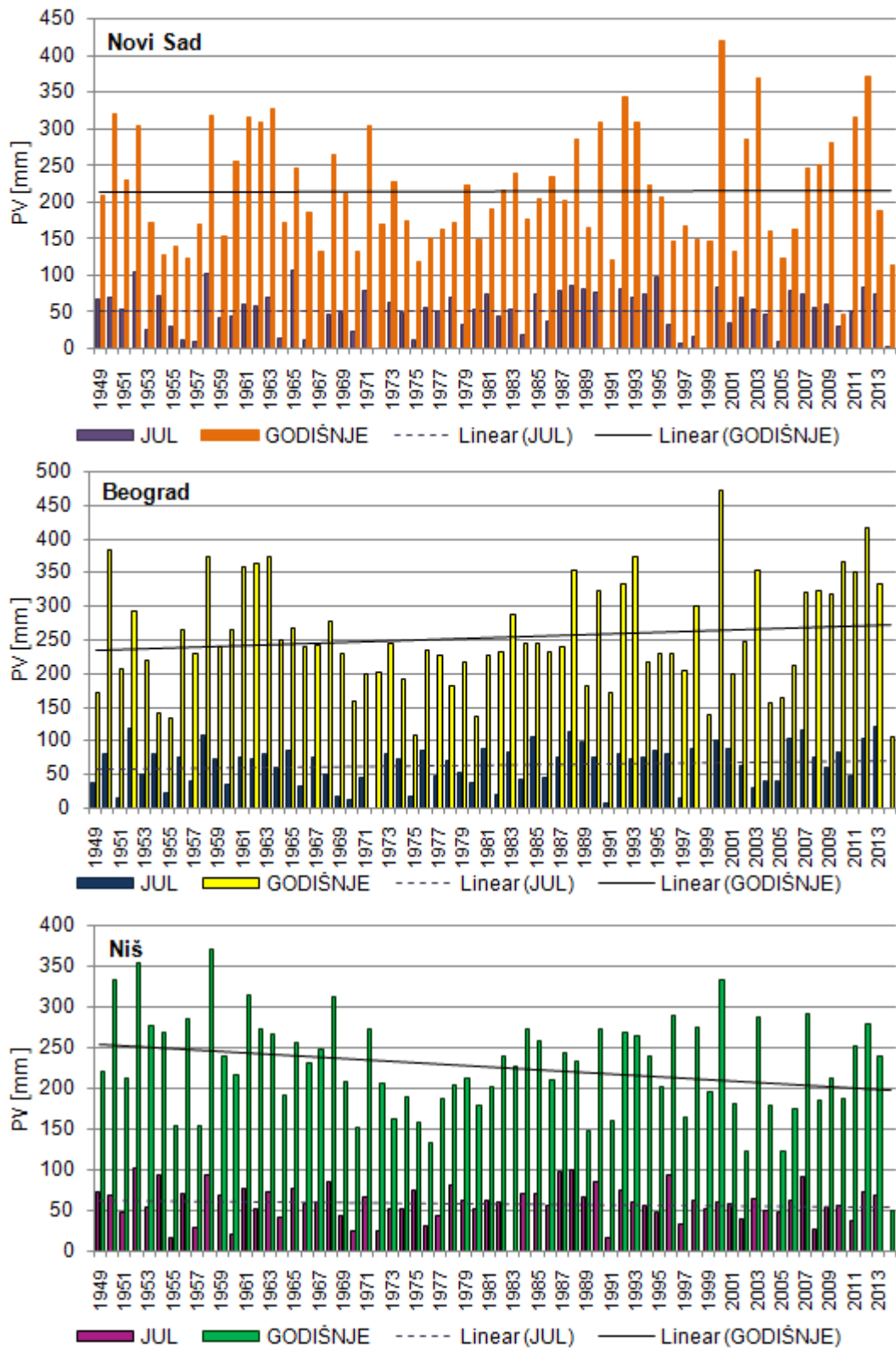
Navodnjavanje kao agrotehnička mera treba da obezbedi i reguliše neophodan vodni režim poljoprivrednog zemljišta i da pravilno utiče na stvaranje i održavanje toplotnog režima zemljišta i režima ishrane biljke. Navodnjavanjem se u regionima periodičnih suša, u koje spada i Srbija, ostvaruju visoki i stabilni prinosi. Da bi se zadovoljile potrebe gajenih kultura za vodom u potpunosti, potrebne su izuzetno velike količine vode, što može da stvori veliki pritisak na izvore vode u kritičnim mesecima. Na teritoriji Beograda bi u izuzetnom slučaju bilo potrebno skoro 0,5 miliona m³ za zalivanje 100 ha u sušnoj godini.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2. Refrentna evapotranspiracija (godišnje sume) za Novi Sad, Beograd i Niš
Figure 2. Reference evapotranspiration (annual sum) for Novi Sad, Belgrade and Niš

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 3. Potrebe za vodom za Novi Sad, Beograd i Niš
Figure 3. Crop water requirements for Novi Sad, Belgrade and Niš

4 Zaključak

Za poljoprivredni sektor, samo za navodnjavanje je potrebno u proseku 215 mm, 254 mm, 226 mm, odnosno u ekstremnim godinama 419 mm, 473 mm, 371 mm, za Novi Sad, Beograd i Niš, respektivno. Tokom vegetacione sezone, za 1 ha je potrebno u proseku 2.150 m³, 2.540 m³, 2.260 m³ vode za zalivanje na teritoriji Novog Sada, Beograda i Niša, respektivno. Ova količina vode sa povećanjem navodnjavane površine može da predstavlja značajan pritisak na vodna tela, što dalje može da uslovi pojavu hidrološke suše kao tipičnu posledicu antropogenog uticaja na izvore vode. Ukoliko se planira širenje navodnjavanih površina treba razmišljati i u pravcu primene novih tehnika zalivanja, takozvanog deficitarnog navodnjavanja, koje imaju za cilj da se uz znatno manji utrošak vode (do 50%), dobiju optimalni prinosi [12].

Rizik nedostatka vode za navodnjavanje za buduće potrebe za vodom zahteva posebnu analizu. Adaptacije na predstojeće promene su primenljive i na strani obezbeđenja vode za navodnjavanje, ali i na strani prilagođavanja potreba samih biljaka [13]. Uticaj klimatskih promena na potrebe za vodom za navodnjavanje, ipak nije lako proceniti samo pomoću procenjenih potreba biljaka za vodom i izlučenih padavina, iako ove veličine imaju važnu ulogu.

Pristupi uštedi vode u navodnjavanju se mogu klasifikovati kao inženjerski, agronomski, upravljački ili institucionalni [12], pa mere obuhvataju rekonstrukciju i modernizaciju sistema, primenu modernih tehnika navodnjavanja, planiranje zalivanja, upotrebu prečišćene otpadne vode, primenu deficitarnog navodnjavanja. Primena inovativnih tehnologija i upravljačkih pristupa u donošenju odluka i dugoročno kreiranje vodoprivredne politike predstavljaju pravi izazov.

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekta tehnološkog razvoja TR 37005 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

1. Abtew, W., Mellese, A., (2013), *Evaporation and Evapotranspiration, Measurements and Estimations*, Springer Netherlands.
2. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (1998.), *Crop Evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements*, Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
3. Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., (Eds.), (2008), *Climate Change and Water, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC Secretariat, Geneva, pp 210.
4. Božić, M., Nikolić, G, Rudić, Ž., (2010), *Drought and Irrigation Strategy*, In: Proceedings of Regional IWAYWP Conference, Balkans Regional Young Water Professionals Conference, 29-30 April 2010, Belgrade, Serbia, p. 54-59.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

5. Doorenbos, J., Kassam, A.H., (1979), *Yield response to water*, Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome.
6. Eid, H.M., El Marsafawy, S.M., Ouda, S.A, (2006), *Assessing the impact of climate on crop water needs in Egypt, the CROPWAT analysis of three districts in Egypt*, CEEPA Discussion Paper No. 29, CEEPA, University of Pretoria.
7. Gonzalez, J., Valdes, J.B., (2004), *The mean frequency of recurrence of in-time-multidimensional events for drought analyses*, Natural Hazards and Earth System Sciences 4, 17–28.
8. IPCC, (2007), *Summary for Policymakers*, In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
9. Kastori, R., (1995), *Fiziologija biljaka*, Nauka, Beograd.
10. Kelly, B.W., Kirkbride, J.W., (1964), *Forecasting crop yields*, Seminar on Weather and Our Food Supply, Center for Agricultural and Economic Development, Iowa State University, Ames, Iowa, 4-6 May, 1964.
11. Knutson, C., Hayes, M., Phillips, T., (1998), *How to reduce drought risk*, Preparedness and Mitigation Working Group of the Western Drought Coordination Council, Lincoln, Nebraska.
12. Kulkarni, S., (2011), *Innovative technologies for water saving in irrigated agriculture*, International Journal of Water Resources and Arid Environments 1, 226-231.
13. Lee, J.L., Huang, W.C., (2014), *Impact of climate change on the irrigation water requirement in Northern Taiwan*, Water 6, 3339-3361.
14. Loucks, D.P., van Beek, E., (2005), *Water Resources Systems Planning and Management*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization and WL | Delft Hydraulics, The Netherlands, p. 680.
15. Republički hidrometeorološki zavod, (1949., 1950., ... 2014.), *Meteorološki godišnjak*.
16. Republički zavod za statistiku, (2013), *Popis poljoprivrede 2012, Poljoprivreda u Republici Srbiji*, Republički zavod za statistiku Srbije, Beograd.
17. Salas, J.D., (1983), *CE 624 Class Notes, Control of Floods and Droughts*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
18. Spasov P., (2003), *Pojava suše u Srbiji, njeno praćenje i mogućnosti prognoze*, Vodoprivreda 0350-0519, 35 (2003) 201-202, p. 30-36.
19. UNEP/IVM, (1998), *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, (Eds. Feenstra, J.F., Burton, I., Smith, J.B., Tol, R.S.J.), UNEP/Vrije Universiteit, Amsterdam.
20. US Geological Survey (USGS), <http://md.water.usgs.gov/drought/define.html>
21. USDA SCS, (1970), *Irrigation water requirements*, Tech. Rel. No. 21. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service.

Pitanje pouzdanosti u projekcijama uticaja klimatskih i drugih promena na vodne resurse

Dejan Dimkić¹

APSTRAKT: U okviru Nacionalnog naučnog projekta TR37005, kao i drugim Nacionalnim i Međunarodnim projektima i studijama, velika pažnja se posvećuje klimatskim promenama i njihovom uticaju na vodne resurse. Neke od analiza razmatraju samo uticaj klimatskih promena, dok neke razmatraju i uticaj promene u korišćenju zemljišta i/ili promene u čovekovom korišćenju voda. Iako se generalno može oceniti da većina predviđanja govori u prilog smanjenju raspoloživosti vodnih resursa u Srbiji, u zavisnosti od analiziranog sliva rezultati se dosta razlikuju. Čak i u okviru istog sliva, u zavisnosti od usvojenih klimatskih i hidroloških modela, razmatranih uticaja, početnih i drugih pretpostavki, rezultati se nekad malo, ali često i puno razlikuju. Pitanje pouzdanosti prognoza se malo ili nimalo ne razmatra. Ovaj rad diskutuje na tu temu i pokušava da da određene smernice.

Ključne reči: Pouzdanost, raspoloživost vodnih resursa, klimatske promene, hidrološke promene, promene u korišćenju zemljišta, potrebe za vodom.

The reliability in projections of climate and other changes impact on water resources

ABSTRACT: Within the National scientific project TR37005, as well in other National and International projects and studies, great attention is related to climate change and his impact on water resources. Some of them analyze just impact of climate change, while some others analyze as well impact from land use changes and/or changes in human use of water. Generally, the majority results of these projects and studies tell us that water resource availability will decrease in Serbia, but the differences between catchements could be significant. Even in one catchement, depending on climatic and hydrological models, analyzed impacts and accepted prepositions, the differences between results could be small, but often significant, too. The reliability of projection is not consider or is consider low. This paper discuss on this subject and try to give some guidlines.

Keywords: Reliability, availability of water resources, climate change, hydrological changes, land use changes, water demand.

¹ Dejan Dimkić, dipl.ing, Šef odseka za vodno planiranje i klimatske promene, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ulica Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava – Beograd; dejan.dimkic@jcerni.co.rs

1 Uvod

Pod pojmom vodnog resursa podrazumeva se svaka celina podzemnih i površinskih voda, a u ovom radu se pod tim pojmom, ako se ne naglasi posebno, razmatraju površinski vodotoci – reke. Kada se govori o vodama u rekama, podrazumevaće se prvenstveno srednjegodišnje vode. U 20-om veku, posebno od 1950-1960, reke u Srbiji generalno beleže negativan trend. To je i razlog pojave u zadnjih 10-ak godina većeg broja projekata, studija i radova koji razmatraju ovaj problem i, sa određenim početnim pretpostavkama, daju očekivanja za budućnost. Izabranim projektima, čiji se rezultati prikazuju, ne želi se ni uvećati ni umanjiti značaj, već su projekti koji su bili dostupni autoru rada.

2 Šta utiče na promenu vodnog resursa i prikaz rezultata iz nekih projekata

Pored klimatskih promena (CC), na hidrološki režim jednog vodotoka utiču i promene u korišćenju zemljišta (LU) u slivu i promene u čovekovom obimu i načinu korišćenja (HU) voda [4, 8, 11]. Iz tih razloga imamo pojavu da neke reke u Srbiji beleže značajno opadanje svojih voda, dok manji broj njih beleži i porast (uglavnom reke koje su počele da dobijaju vodu sa drugog sliva 70'-80' ih godina XX veka).

Većina projekata iz bliskog prethodnog perioda je bazirana na različitim regionalnim klimatskim modelima sa različitim scenarijima, koji daju osnovne ulazne podatke za dalje hidrološke modele. Neki rezultati (na godišnjem nivou) iz ovih projekata su skraćeno prikazani u tabeli 1. Veliki broj studija baziranih na regionalnom klimatsko-hidrološkom modelu razmatra samo prve promene (CC).

Ovde nećemo prikazivati i razmatrati rezultate iz ovih projekata dobijene za pojedine periode (godišnja doba) u toku godine, kao ni rezultate za ekstremne pojave malih i velikih voda.

Tabela 1. Rezultati promena u vodnim resursima iz izabranih projekata za različita test područja
 Table 1. Selected projects results of changes in water resources for different test areas

	Akronim Projekta	Test područje	Prime-njeni Scenario	Period		Analizirane promene			Rezultati (% promene)	Napomene
				Bazni	Projektov.	CC	LU	HU		
1a	CCWaterS	Aluvijalno izvoriste "Jelak"- V. Gradište (reka Pek)	A1B	1961-1990	2021-2050 & 2071-2100	Da	Da/ ne	Da	-13% & -30%	Srednja opcija
1b	CCWaterS	Aluvijalno izvoriste "Mlaka" - Kučevo (reka Pek)	A1B	1961-1990	2021-2050 & 2071-2100	Da	Da/ ne	Da	-13% & -45%	Srednja opcija
1c	CCWaterS	Karstna izvorista "Beljanica"	A1B	1961-1990	2021-2050 & 2071-2100	Da	Da/ ne	Ne	-13% & -32%	VNC model
1d	CCWaterS	Karstna izvorista "Stara Planina"	A1B	1961-1990	2021-2050 & 2071-2100	Da	Da/ ne	Ne	-6% & -20%	VNC model

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

	Akronim Projekta	Test područje	Prime-njeni Scenario	Period		Analiziran e promene			Rezultati (% promene)	Napomene
				Bazni	Projektov.	CC	LU	HU		
2a ₁	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	1.8 & -26	Model ech-hirham
2a ₂	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-9.2 & -34	Model had-clm
2a ₃	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-0.6 & -32	Model ech-regcm
2a ₄	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-14 & -43	Model had-hadrm
2a ₅	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-6.9 & -36	Model ech-ebupom
2a ₆	NVE/RHMZ	Kolubara river, HS Slovac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-4.2 & -33	Model stx-ebupom
2b ₁	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	+21 & -8.2	Model ech-hirham
2b ₂	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-9.1 & -40	Model had-clm
2b ₃	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	+8.7 & -3.6	Model ech-regcm
2b ₄	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	-5.3 & -37	Model had-hadrm
2b ₅	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	+2.1 & -39	Model ech-ebupom
2b ₆	NVE/RHMZ	Toplica river, HS Doljevac	A1B	1962-1990	2002-2030 & 2072-2100	Da	Ne	Ne	+4.1 & -33	Model stx-ebupom
3a ₁	TR37005	Nišava river, HS Niš	A1B	1961-1990	2001-2030 & 2071-2100	Da	Ne	Ne	-0.86 & -1.51	
3a ₂	TR37005	Nišava river, HS Niš	A2	1961-1990	2071-2100	Da	Ne	Ne	-6.22	
3b ₁	TR37005	Kolubara river, HS Draževac	A1B	1961-1990	2001-2030 & 2071-2100	Da	Ne	Ne	-10.45 & -4.62	
3b ₂	TR37005	Kolubara river, HS Draževac	A2	1961-1990	2071-2100	Da	Ne	Ne	-2.47	
3c ₁	TR37005	Raška river, HS Raška	A1B	1961-1990	2001-2030 & 2071-2100	Da	Ne	Ne	-9.34 & -8.33	

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

	Akronim Projekta	Test područje	Prime-njeni Scenario	Period		Analiziran e promene			Rezultati (% promene)	Napomene
				Bazni	Projektov.	CC	LU	HU		
3c ₂	TR37005	Raška river, HS Raška	A2	1961-1990	2071-2100	Da	Ne	Ne	-10.34	
3d ₁	TR37005	Mlava river, HS Veliko Selo	A1B	1961-1990	2001-2030 & 2071-2100	Da	Ne	Ne	-2.67 & -4.32	
3d ₂	TR37005	Mlava river, HS Veliko Selo	A2	1961-1990	2071-2100	Da	Ne	Ne	-1.44	
4a ₁	WATCAP	Drina river–HS Foča	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+6.4% & +2.9%	ECHAM5r3 RACMO
4a ₂	WATCAP	Drina river–HS Foča	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+1.2% & +0.6%	ECHAM5r3 REMO
4a ₃	WATCAP	Drina river–HS Foča	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+0.3% & +9.3%	HadCM3Q0 CLM
4a ₄	WATCAP	Drina river–HS Foča	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-0.1% & -5.5%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4a ₅	WATCAP	Drina river–HS Foča	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+1.7% & -3.4%	ECHAM5r3 RegCM3
4b ₁	WATCAP	Drina river–HS B.Bašta	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+3.8% & +1.5%	ECHAM5r3 RACMO
4b ₂	WATCAP	Drina river–HS B.Bašta	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+0.5% & -1.6%	ECHAM5r3 REMO
4b ₃	WATCAP	Drina river–HS B.Bašta	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+0.2% & +5.2%	HadCM3Q0 CLM
4b ₄	WATCAP	Drina river–HS B.Bašta	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+0.2% & -1.4%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4b ₅	WATCAP	Drina river–HS B.Bašta	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+2.7% & -3.3%	ECHAM5r3 RegCM3
4c ₁	WATCAP	Drina river – mouth	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+4.0% & +2.3%	ECHAM5r3 RACMO
4c ₂	WATCAP	Drina river – mouth	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+1.2% & -2.4%	ECHAM5r3 REMO
4c ₃	WATCAP	Drina river – mouth	A1B	1961-1990	2011-2040 &	Da	Da/ ne?	Ne	+1.0% &	HadCM3Q0 CLM

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

	Akronim Projekta	Test područje	Prime-njeni Scenario	Period		Analiziran e promene			Rezultati (% promene)	Napomene
				Bazni	Projektov.	CC	LU	HU		
					2041-2070				+3.5%	
4c ₄	WATCAP	Drina river – mouth	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+1.9% & -0.4%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4c ₅	WATCAP	Drina river – mouth	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+4.4% & -1.9%	ECHAM5r3 RegCM3
4d ₁	WATCAP	Lim river – HS Priboj	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+1.1% & +0.2%	ECHAM5r3 RACMO
4d ₂	WATCAP	Lim river – HS Priboj	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-0.3% & -1.8%	ECHAM5r3 REMO
4d ₃	WATCAP	Lim river – HS Priboj	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-0.4% & +2.4%	HadCM3Q0 CLM
4d ₄	WATCAP	Lim river – HS Priboj	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+2.0% & +0.4%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4d ₅	WATCAP	Lim river – HS Priboj	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+3.3% & -3.1%	ECHAM5r3 RegCM3
4e ₁	WATCAP	Kolubara river – HS Beli Brod	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-14.2% & -5.6%	ECHAM5r3 RACMO
4e ₂	WATCAP	Kolubara river – HS Beli Brod	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+3.1% & -21.3%	ECHAM5r3 REMO
4e ₃	WATCAP	Kolubara river – HS Beli Brod	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-13.3% & -24.0%	HadCM3Q0 CLM
4e ₄	WATCAP	Kolubara river – HS Beli Brod	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-7.0% & -10.7%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4e ₅	WATCAP	Kolubara river – HS Beli Brod	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	+20.3% & -2.6%	ECHAM5r3 RegCM3
4f ₁	WATCAP	Sava river – HS S.Mitrovica	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-3.5% & +1.7%	ECHAM5r3 RACMO
4f ₂	WATCAP	Sava river – HS S.Mitrovica	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ ne?	Ne	-1.1% & -7.9%	ECHAM5r3 REMO
4f ₃	WATCAP	Sava river – HS S.Mitrovica	A1B	1961-1990	2011-2040 &	Da	Da/ ne?	Ne	-4.2% &	HadCM3Q0 CLM

	Akronim Projekta	Test područje	Prime-njeni Scenario	Period		Analizirane promene			Rezultati (% promene)	Napomene
				Bazni	Projektov.	CC	LU	HU		
					2041-2070				-7.6%	
4f ₄	WATCAP	Sava river – HS S.Mitrovica	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ne?	Ne	-1.2% & -9.5%	HadCM3Q0 HadRM3Q0
4f ₅	WATCAP	Sava river – HS S.Mitrovica	A1B	1961-1990	2011-2040 & 2041-2070	Da	Da/ne?	Ne	+5.5% & +0.1%	ECHAM5r3 RegCM3

3 Koje sve neizvesnosti postoje i šta se može očekivati za Srbiju

Brojne su neizvesnosti koje prate projekcije budućih hidroloških prilika [6, 9, 10]. Kod regionalnih klimatsko-hidroloških režima, neizvesnosti u rezultatima analiza uticaja klimatskih promena na hidrološke režime možemo, uslovno, podeliti na neizvesnosti u predviđanju same klime (uključujući i klimatske promene) i neizvesnosti u predviđanju hidroloških režima na osnovu pretpostavljene buduće klime.

Uzroke nepouzdanog predviđanja klimatskih promena (klime) treba pre svega potražiti u:

- prirodnoj složenosti i promenljivosti same klime,
- nedovoljnog poznavanja mehanizma reakcije klimatskog sistema na klimatske promene.

Ove 2 neizvesnosti su, po mišljenju Autora (posebno druga), verovatno i najznačajnije od svih koje se javljaju kod procene uticaja klimatskih promena na hidrološke režime, bez obzira na primenjeni postupak.

Uzrok nepouzdanog predviđanja hidroloških režima na osnovu pretpostavljene klime:

- nemogućnosti potpune izučenosti korelacije između klime i hidrološkog režima datog sliva (regiona),
- neistovetnosti tih veza pri današnjim i pri uslovima značajnih klimatskih promena,
- demografske i druge promene na izučavanom području.

Mimo prethodno iskazanih neizvesnosti, ne računajući neizvesnosti usled tačnosti izmerenih ulaznih veličina, kod Regionalnih klimatsko-hidroloških modela se još mogu javiti sledeće neizvesnosti:

- realnosti izabranog klimatskog scenarija (pretpostavke o načinu povećanja GHG, pretpostavke o načinu razvoja svetske privrede i društva uopšte, i sl.),
- realnosti izabranog hidrološkog modela,
- nereprezentativnosti usvojenih ulaznih veličina za dati region (na pr.: ako se uzme kao osnovni niz, niz podataka iz 30-godišnjeg perioda, često se gube značajni ekstremi - primer suša u Engleskoj [3] iz 1928 i 95-96, a niz obuhvata 1961-90)

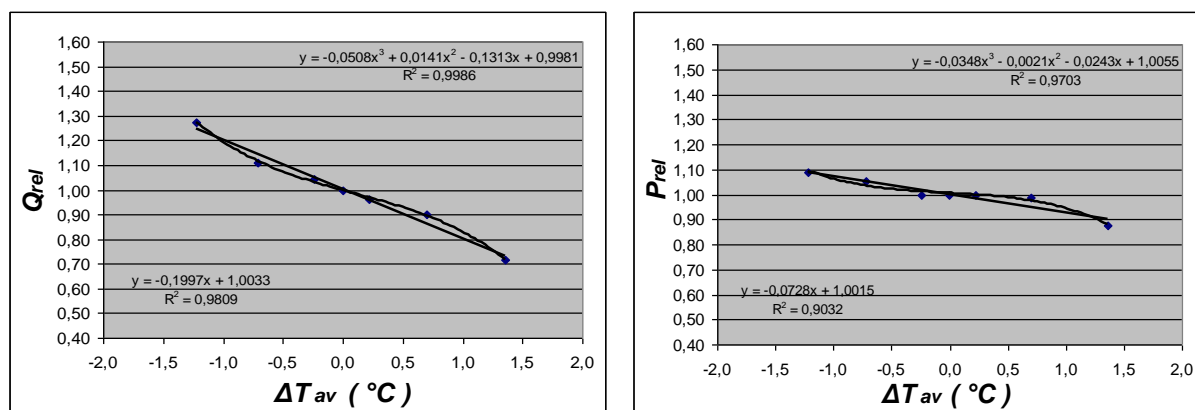
Respektujući sve navedene projekte, analizom rezultata dolazimo do dva zaključka:

1. U svim projektima i skoro za sve slučajeve, manje promene se očekuju za blisku budućnost u odnosu na dalju, što se čini logičnim.
2. Rezultati dosta variraju, čak i za iste reke, pogotovu za dalju budućnost.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Na drugoj konstataciji bi se zadržali. Ako se za hidrološku prognozu neke reke dobija široki raspon mogućih proticaja (ekstremno od +20% do -40%), to znači da je potrebno dati osvrt koliko se data prognoza smatra pouzdanom (verovatnom). To iziskuje ili da se odrede neki kriterijumi po kojima bi se računala verovatnoća date prognoze, što se čini teoretski mogućim (na pr. verovatnoća usvojene klimatske projekcije pomnožena verovatnoćom korektnosti odabranog hidrološkog modela), ali dosta zametnim i krajnje diskutabilnim, ili da obrađivač date studije (projekta) da svoju ekspertsku ocenu, što je opet svakako diskutabilno.

Umesto toga, pogledajmo šta se kao prosek može očekivati za domicilne reke u Srbiji u bliskoj budućnosti sa velikom pouzdanošću. U istraživanjima baziranim na osmotrenim podacima [1, 2], rezultati direktne korelacije između prosečne godišnje temperature naspram padavina i rečnog protoka za 18 analiziranih slivova su pokazani u relativnim vrednostima na slici 1. Značaj ovog pristupa je što uzima u obzir sva tri aspekta promena: CC, LU i HU.



Slika 1 Relativni srednjegodišnji protok i padavine u funkciji devijacije prosečne godišnje temperature

Figure 1 Relative values of average annual discharge and precipitation in function of average annual temperature deviation

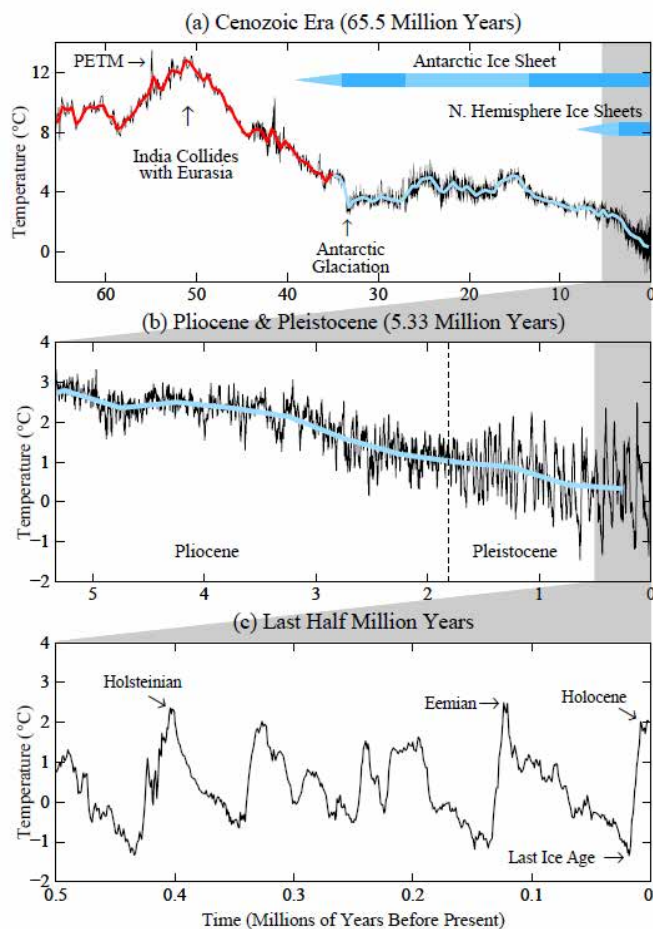
Vidi se da je koeficijent determinacije vrlo visok na oba grafika, što ukazuje na visoku pouzdanost. To znači da, u proseku, promena srednjegodišnje temperature od $\pm 1^{\circ}C$ ima obrnuto proporcionalni efekat na godišnje padavine od oko 7%, a na srednjegodišnje protoke od oko 20%. To implicira da se u bližoj budućnosti, ako se jave godine sa prosečnom godišnjom temperaturom za $2^{\circ}C$ višom od proseka u poslednjih 60 godina, možemo očekivati, kao najverovatniju vrednost, oko 50% manje vode u rekama u Srbiji. Kao što je napomenuto, ove korelacije su proseci na godišnjem nivou, a raspodela srednjegodišnjih protoka u funkciji srednjegodišnje temperature je slična sa Gauss raspodelom, što daje dodatnu potvrdu ovim korelacijama. Ako bi se u budućnosti značajno više vode uzimalo za navodnjavanje, ili ako se sprovedu adekvatne mere adaptacije, gornja korelacija se može promeniti (ali ne previše u bliskoj budućnosti).

Naravno, rezultati variraju od sliva do sliva, oštija je za istočni deo zemlje u odnosu na zapadni, i ova prosečna zavisnost može biti samo orijentir. Da bi se ona iskoristila za pojedinačne slivove, možda bi bilo uputno raditi iste modele za veći broj slivova i težiti ka tome da njihov prosek za centralnu Srbiju bude oko vrednosti gornjih korelacija.

4 Zašto povećanje temperature izdvajamo kao najveću nepouzdanost

Prosečno povećanje temperature u Srbiji u poslednjih 100 godina iznosi oko 0.6°C [1]. S toga se rezultati klimatskih modela [6, 10], da će se temperatura do kraja XXI veka povećati za $3-4^{\circ}\text{C}$ (kao najverovatniji interval), uz sav respekt za korektnost postupka proračuna, čine vrlo diskutabilnim. Dosta je izvesno da bi se sa eventualnim ovakvim povećanjem temperature javili procesi u društvu koje je nemoguće predvideti (pre svega društveni događaji kao posledica reakcije ljudi), pa onda dolaze u pitanje i usvojene početne pretpostavke oko društvenih promena i količine GHG emisija. To je prvi razlog zašto se izdvaja povećanje temperature kao najveća neizvesnost.

Druga je po pitanju dostizanja temperaturnih pikova na planeti u prošlosti. Slika 2 prikazuje prosečnu temperaturu na planeti unazad 500.000 godina [5, 7] i vidi se da je sadašnja prosečna temperatura na planeti (holocen) za manje od 1°C niža od maksimalnih pikova, zabeleženih u Holsteinianu i Emianu. To ukazuje da planeta možda ima zaštitne mehanizme protiv preteranog povišenja temperatura, na primer, relativno naglo usporavanje termohalinske cirkulacije (opstrujavanje velikih masa vode u okeanima), što bi moglo da izazove oštrije zime, posebno na severnoj polulopti.



Slika 2 Promene temperature u prošlosti

Figure 2 Past temperature changes

Takođe se ne čini nemogućom i solucija da države u svetu naprave sporazume oko smanjenja GHG emisija i druge, kojih bi se u značajnoj meri držali.

5 Zaključna razmatranja

Klimatske promene su samo jedan od faktora koji utiču na vodne resurse, prisutan je na svim profilima, ali sa različitim značajem. U istočnom delu zemlje je uglavnom dominantan, ali drugde često i nije najveći, ponegde je i minoran, obzirom na veličinu drugih uticaja [1, 8].

Iako je neizvesnost, time i nepouzdanost sastavni deo svake projekcije, sigurno je da ona raste sa dužinom perioda za koji se daju projekcije. Iz svega iznetog smatram da sve projekcije za dalju budućnost (reda 50 i više godina) treba shvatati krajnje „akademski“, dok pažnju stručne javnosti i društva treba zadržati na bližu budućnost (do reda narednih 30 godina), za koju je izvesnost prosečnog smanjenja vodnih resursa ne samo vrlo verovatna, nego i dosta merljiva.

To znači da treba sprovesti, u meri u kojoj ekonomija zemlje to dopušta, potrebne mere adaptacije na sve grane vodoprivrede. Pritom se mora voditi računa o prioritetima, kao i činjenici da je velika verovatnoća da se može očekivati nezanemarivo prosečno smanjenje vodnih resursa u Srbiji, barem u bližoj budućnosti.

Predlaže se da se u nekom od budućih projekata analize uticaja klimatskih promena na vodne resurse za bližu budućnost (max. povećanje srednjegodišnje temperature 1 do 2°C) obuhvati veći broj domicilnih slivova i da se traže klimatska scenarija i hidrološki modeli koji daju prosečnu međuzavisnost protoka i temperature na srednjegodišnjem nivou u skladu sa korelacijom na slici 1.

Zahvalnica

Predstavljeno istraživanje je sprovedeno za potrebe naučnog projekta TR37005 „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u periodu 2011-2015.

Literatura

1. Climate change impacts on the river hydrology in Serbia – National Study, Institute for the development of water resources “Jaroslav Černi”, 2010-2012.
2. D.Dimkić et al., Climatic and Hydrological Changes and Importance of Observed Data; International Conference 17-18 October 2013: Climate Change Impacts on Water Resources; ISBN 978-86-82565-41-3, pages 195-202
3. H.J.Fowler, C.G.Kilsby and J.Stunell, Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England, Hydrol. Earth Syst. Sci, 11(3), 1115-1126, 2007
4. Z.Gavrilović et al., The effects of Forest on Runoff Regimes in Serbia; International Conference 17-18 October 2013: Climate Change Impacts on Water Resources; ISBN 978-86-82565-41-3, pages 203-210

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

5. J.E.Hansen and M.Sato, 2012, Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change; Springer 2012 Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects, ISBN 978-3-7091-0973-1, pages 21-47
6. IPCC Spatial Report on Emissions Scenarios (SRES, 2000). www.ipcc.ch
7. F.Messinger, Why is the Current Global Warming Taking Place, and How Can We foresee what might be expected ? ; International Conference 17-18 October 2013: Climate Change Impacts on Water Resources; ISBN 978-86-82565-41-3, pages 6-13
8. H.P.Nachtnebel, Water Resources Under Pressure: Direct Human Interventions and Climate Change; International Conference 17-18 October 2013: Climate Change Impacts on Water Resources; ISBN 978-86-82565-41-3, page 31
9. Nacionalna komunikacija 2, 2014, Agencija za životnu sredinu, Uticaj klimatskih promena na vodne resurse
10. Synthesis Report of the IPCC (Nov. 2007.) www.ipcc.ch
11. B.Vasiljević et al., Historical Overview and Different Methodologies Applied in Climate Change Studies; International Conference 17-18 October 2013: Climate Change Impacts on Water Resources; ISBN 978-86-82565-41-3, pages 183-194

Preliminarna projekcija stanja vodnih resursa u Srbiji u uslovima promenjene klime

Stevan Prohaska¹
Aleksandra Ilić²
Vesna Tripković³
Vladimir Đurđević⁴

APSTRAKT: Za projektovanje klimatskih uslova u budućnosti u Srbiji korišćen je Regionalni klimatski model EBU-POM. Metodom dinamičkog skaliranja (downscaling), određeni su klimatski parametri za lokacije meteoroloških stanica u cilju definisanja vodnog režima na slivovima hidroloških stanica. Integracijom je pokriven period od 1961. do 2100. godine, podrazumevajući konstantnu koncentraciju gasova staklene bašte od 1961.-2012. godine jednaku osmotrenim vrednostima, dok u periodu od 2013. – 2100. koncentracije variraju u skladu sa scenarijima Međunarodnog panela za klimatske promene (IPCC). Izabran je A1B scenario kao prosečni i A2 kao ekstremni. Za izabrane periode u skladu sa scenarijima formirane su mesečne serije padavina, temperature vazduha, evapotranspiracije, vlaznosti vazduha. Srednjemesečni protoci u rekama u Srbiji procenjeni su pomoću modifikovanog VNC modela U radu su prezentovani rezultati za sliv reke Nišave.

Ključne reči: klimatsko modeliranje, klimatski scenariji, standardna nelinearna korelacija, vodni resursi

Preliminary assesment of climate change impact on the water resources in Serbia

ABSTRACT: In order to design future climatic conditions in Serbia, a regional climate model EBU-POM was used. Method of dynamical scaling (downscaling) was applied for climatic parameters estimation at meteorological stations in order to define the water regime in the basins of hydrological stations. Integration covers the period 1961 – 2100. assuming a constant concentration of greenhouse gases from 1961st to 2012th, the same as observed, while in the period 2013 - 2100. concentrations vary according to the scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Scenario A1B was selected as average and A2 as extreme. For selected periods in accordance with the scenarios monthly series were created like: precipitation, air temperature, evapotranspiration, humidity. Mean monthly flows in rivers in Serbia are estimated using a modified VNC model. The paper presents the results for the Nišava river basin.

Key words: climatic modelling, climate scenarios, standard nonlinear correlation, water resources

¹ Prof. dr Stevan Prohaska, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

² Ass. Aleksandra Ilić, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

³ Dr Vesna Tripković, dipl. inž. geol., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, vesna.tripkovic@jcerni.co.rs

⁴ Doc. dr Vladimir Đurđević, dipl. meteo., Institut za meteorologiju, Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu, Dobračina 16, vdj@ff.bg.ac.rs

1 Uvod

U cilju formiranja budućih projekcija klime razvijen je veliki broj modela za klimatsko modeliranje. Postoji nekoliko globalnih modela (atmospheric-ocean general circulation models) koji se koriste za sagledavanje osnovnih elemenata hidrološkog ciklusa u uslovima promenjene temperature, padavina, evapotranspiracije.

Za projektovanje klimatskih uslova u budućnosti u Srbiji za potrebe naučnih projekata Ministarstva nauke, prosvete i tehnološkog razvoja korišćen je Regionalni klimatski model EBU-POM. Metodom dinamičkog skaliranja (downscaling), određeni su klimatski parametri za lokacije meteoroloških stanica u cilju definisanja vodnog režima na slivovima hidroloških stanica koji su izabrani za ovaj rad [1], [2].

Integracijom je pokriven period od 1961. do 2100. godine, podrazumevajući konstantnu koncentraciju gasova staklene bašte od 1961.-2012. godine jednaku osmotrenim vrednostima, dok u periodu od 2013. – 2100. koncentracije variraju u skladu sa scenarijima Međunarodnog panela za klimatske promene (IPCC). Na osnovu integracije izabrano je tri perioda za koje su prikazani rezultati klimatskog modeliranja: kontrolni period 1961.-2012., bliska budućnost 2013.-2050. i daleka budućnost 2051.-2100. Izabrano je dva IPCC scenarija, A1B kao prosečni i A2 kao ekstremni. Za izabrane periode u skladu sa scenarijima formirane su mesečne serije padavina, temperature vazduha, evapotranspiracije, vlažnosti vazduha [6].

Efekti klimatskih promena na vodne resurse određeni su na osnovu projekcija promena meteoroloških varijabli.

Srednjemesečni protoci u rekama u Srbiji procenjeni su pomoću modifikovanog VNC modela koji je razvijen u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi” za procenu oticaja na osnovu poznatih meteoroloških podataka. Model omogućava formiranje linearnih kros-regresionih zavisnosti standardizovanih promenljivih, različite kombinacije uzročno-posledičnih veza hidroloških i meteoroloških vremenskih serija. Teorijsku osnovu čini standardna nelinearna korelacija. Parametri modela su kalibrisani na bazi zvaničnih podataka RHMZ-a za period 1961.-2012.

2 Teorijska osnova VNC modela

Sušina modela VNC je u uspostavljanju linearnih korelacionih zavisnosti između standardizovanih promenljivih hidroloških i meteoroloških vremenskih serija koje su u uzročno-posledičnim vezama.

Model se zasniva na teoriji nelinearne standardizovane korelacije i prostorne korelacione analize. Prva je ideja bila napraviti alat pomoću kog će biti moguća postorna interpolacija podataka na mestima gde ne postoje merenja, ali je, kasnije, prilagođen za potrebe popunjavanja prekida i produžavanja serija hidroloških i meteoroloških podataka na mernim stanicama [4].

Kao zavisno promenljiva, obično se uzima protok na hidrološki neizučenom profilu (prostorna interpolacija) ili na profilu mernog mesta gde postoje prekidi u merenjima. Kao nezavisno promenljive veličine uzimaju se poznate vrednosti vremenskih serija: protoka na hidrološkim stanicama u širem regionu i/ili različite klimatske veličine, kao što su, padavine, srednje temperature vazduha, vlažnost vazduha, napon vodene pare i dr.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Posmatra se $L+1$ mernih stanica, pri čemu su za njih L ($i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, L$) poznate merne vrednosti razmatrane hidrološke i/ili meteorološke veličine u N istih vremenskih trenutaka ($j = 1, 2, 3, \dots, M, M+1, \dots, N$). Treba istaći da se ne radi o hronološki uređenoj seriji već N predstavlja broj simultanih merenja, dok su za jednu stanicu poznate vrednosti istovremenih merenja meteorološke veličine samo za M trenutaka. Cilj je izvršiti popunjavanje nedostajućih $N-M$ podataka za vremenske trenutke kada ih na stanici $i = 0$ nema.

Poznate veličine su:

- za stanicu $i = 0$, M osmotrenih vrednosti veličine u j -tom vremenskom trenutku: X_{j0} ($j = 1, 2, 3, \dots, M$);
- nizovi izmerenih vrednosti veličine na i -toj stanici ($i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, L$) u j -tom vremenskom trenutku: X_{j0} ($j = 1, 2, 3, \dots, M, M+1, \dots, N$).

Nepoznate veličine su vrednosti razmatrane (hidrološke) veličine na stanici $i = 0$ u j -tom vremenskom trenutku: X_{j0} ($j = M+1, M+2, \dots, N$).

Polazna pretpostavka je da postoji monotona krivolinijska regresija između osmotrenih veličina na različitim stanicama u istom vremenskom trenutku. U tom slučaju je veza između njihovih standardizovanih promenljivih linearna. Veza između standardizovanih promenljivih uspostavlja se na osnovu podataka za sinhroni period osmatranja za sve stanice, dužine M . Prvi korak pri određivanju standardizovane promenljive je da za svaku seriju i treba odrediti empirijske verovatnoće p_{ji} promenljivih X_{ji} po jednačini (1):

$$p_{ji} = \frac{m_{ji} - 0.25}{M + 0.5} \quad (1)$$

pri čemu je m_{ji} mesto promenljive u opadajućem nizu.

Drugi korak se odnosi na zamenu empirijskih verovatnoća p_{ji} njihovom standardizovanom promenljivom U_{ji} koja se dobija preko inverzne funkcije za normalni zakon raspodele po jednačini (2):

$$p_{ji} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{U_{ji}} e^{-\frac{U^2}{2}} \cdot dU \quad (2)$$

Šematski su opisani koraci prikazani na slici 1.

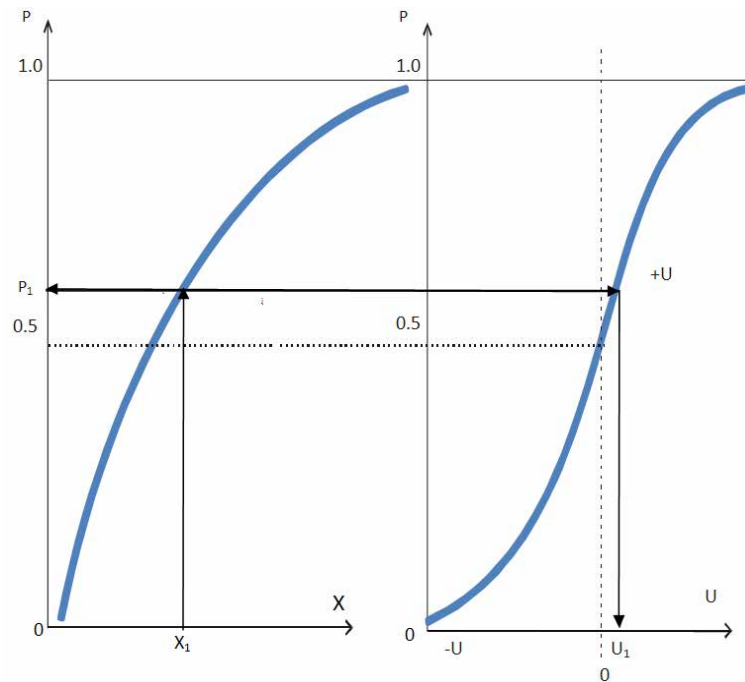
Saglasno polaznoj postavci uspostavlja se linearna zavisnost između standardizovanih, zavisno promenljive i nezavisno promenljivih (3):

$$U_{j0} = \alpha_{01} \cdot U_{j1} + \alpha_{02} \cdot U_{j2} + \dots + \alpha_{0i} \cdot U_{ji} + \dots + \alpha_{0L} \cdot U_{jL} \quad (3)$$

Koeficijenti α_{0i} se određuju prema jednačini (4):

$$\alpha_{0i} = \frac{D_{0i}}{D_{00}} \quad (4)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Standardizacija promenljivih

gde je D_{00} determinanta standardizovanih koeficijenata korelacije r_{ji} (5), dok je D_{0j} minor koji se dobija zamenom j -te kolone koeficijentima r_{0i} .

$$D_{00} = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1L} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2L} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ r_{L1} & r_{L2} & r_{L3} & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Koeficijenti korelacije r_{0i} (6) između podataka za stanicu $i = 0$ i ostalih stanica $i = 1, 2, 3, \dots, L$ se određuju na osnovu nizova podataka za sinhroni period merenja dužine M .

$$r_{0i} = \frac{1}{M-1} \cdot \frac{\sum_{j=1}^M U_{j0} \cdot U_{ji}}{\sigma^2(M)} \quad (6)$$

gde je:

$$\sigma^2(M) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{j=1}^M U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (7)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Međusobni koeficijenti korelacije između i-te i k-te stanice za koje postoji niz sinhronih merenja dužine N , određuju se prema jednačini (8):

$$r_{ik} = \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji} \cdot U_{jk}}{\sigma^2(N)} \quad (8)$$

gde je:

$$\sigma^2(N) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (9)$$

Da bi se odredio konačan broj članova jednačine linearne regresije neophodno je odrediti težinske koeficijente δ_{oi} (10) svih stanica i uporediti ih za zadatim kriterijumom.

$$\delta_{oi} = \frac{|r_{oi} \cdot \alpha_{oi}|}{R_o^2} \quad (10)$$

gde je R_o empirijski koeficijent višestruke korelacije (11):

$$R_o^2 = \sum_{i=1}^L |r_{oi} \cdot \alpha_{oi}| \quad (11)$$

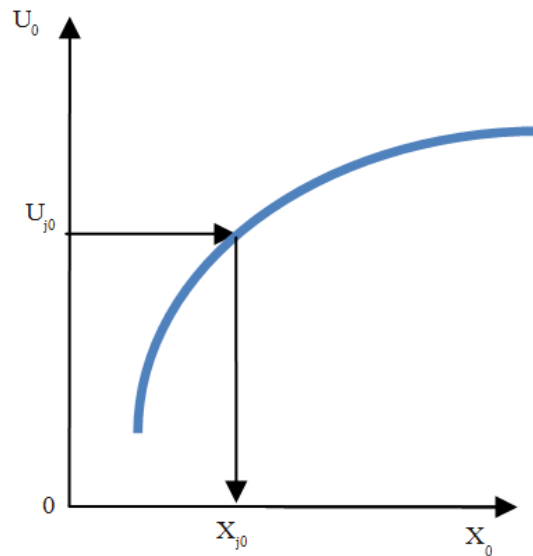
Prvi kriterijum koji mora biti ispunjen je (12):

$$\sum_{i=1}^L \delta_{oi} = 1 \quad (12)$$

Drugi kriterijum je (13) kojim se određuje da li iz jednačine nelinearne regresije između standardizovanih promenljivih treba eliminisati ili zadržati član:

$$\delta_{oi} \begin{cases} > 2 \cdot \frac{\sigma_{R0}^2}{R_o^2}, & \sigma_{R0}^2 = \frac{1 - R_o^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{zadržati} \\ < 2 \cdot \frac{\sigma_{R0}^2}{R_o^2}, & \sigma_{R0}^2 = \frac{1 - R_o^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{eliminirati} \end{cases} \quad (13)$$

Uspostavlja se analitička zavisnost između merenih vrednosti osnovne veličine i njenih standardizovanih promenljivih, X_{j0} i U_{j0} na osnovu podataka za period dužine M (slika 2).



Slika 2. Veza između vrednosti osnovne i standardizovane veličine

Uspostavljena analitička zavisnost se primenjuje za određivanje nedostajućih (projektovanih) vrednosti X_{ji} ($j = M+1, M+2, \dots, N$) na osnovu poznatih vrednosti standardizovanih promenljivih U_{j0} dobijenih iz linearne veze.

2 Modifikacija osnovnog modela za ocenu uticaja klimatskih promena

Da bi se odredili projektovani protoci u uslovima promenjene klime prvo je potrebno, koristeći jednačinu (3) formirati zavisnost (14) [5]:

$$U(Q_0) = \alpha_{o1} \cdot U_1(P) + \alpha_{o2} \cdot U_2(T) + \alpha_{o3} \cdot U_3(E) \quad (14)$$

gde je:

Q_0 - srednjemesečni protok na hidrološkoj stanici čije se slivno područje razmatra;

P - srednjemesečna suma padavina na slivu;

T - srednjemesečne temperature vazduha na slivu;

E - srednjemesečna potencijalna evapotranspiracija na slivu.

Zatim je potrebno uključiti uticaj unutargodišnje raspodele svih veličina kao što je prikazano u jednačinama (15) – (18):

$$q_{ik} = \frac{Q_{ik} - \bar{Q}_k}{\sigma_k^Q} \quad (15)$$

$$p_{ik} = \frac{P_{ik} - \bar{P}_k}{\sigma_k^P} \quad (16)$$

$$t_{ik} = \frac{T_{ik} - \bar{T}_k}{\sigma_k^T} \quad (17)$$

$$e_{ik} = \frac{E_{ik} - \bar{E}_k}{\sigma_k^E} \quad (18)$$

gde je:

Q_{ik} - srednjemesečni protok u i-toj godini, k-tom mesecu;

P_{ik} - srednjemesečna suma padavina u i-toj godini, k-tom mesecu;

T_{ik} - srednjemesečna temperatura u i-toj godini, k-tom mesecu;

E_{ik} - srednjemesečna evapotranspiracija u i-toj godini, k-tom mesecu;

σ_k^Q - srednje kvadratno odstupanje serije srednjemesečnih protoka u k-tom mesecu;

σ_k^P - srednje kvadratno odstupanje serije srednjemesečnih suma padavina u k-tom mesecu;

σ_k^T - srednje kvadratno odstupanje serije srednjemesečnih temperatura u k-tom mesecu;

σ_k^E - srednje kvadratno odstupanje serije srednjemesečnih evapotranspiracije u k-tom mesecu.

Na ovaj način se vrši transformacija jednačine (14) u jednačinu (19):

$$U(q_{ik}^0) = \alpha_{o1} \cdot U_1(p_{ik}) + \alpha_{o2} \cdot U_2(t_{ik}) + \alpha_{o3} \cdot U_3(e_{ik}) \quad (19)$$

Jednačina (19) je osnovna jednačina koja je korišćena za simulaciju srednjemesečnih protoka za identifikacioni period i buduće projekcije kada se oni određuju na osnovu projekcija klimatskih parametara u zavisnosti od izabranog scenarija.

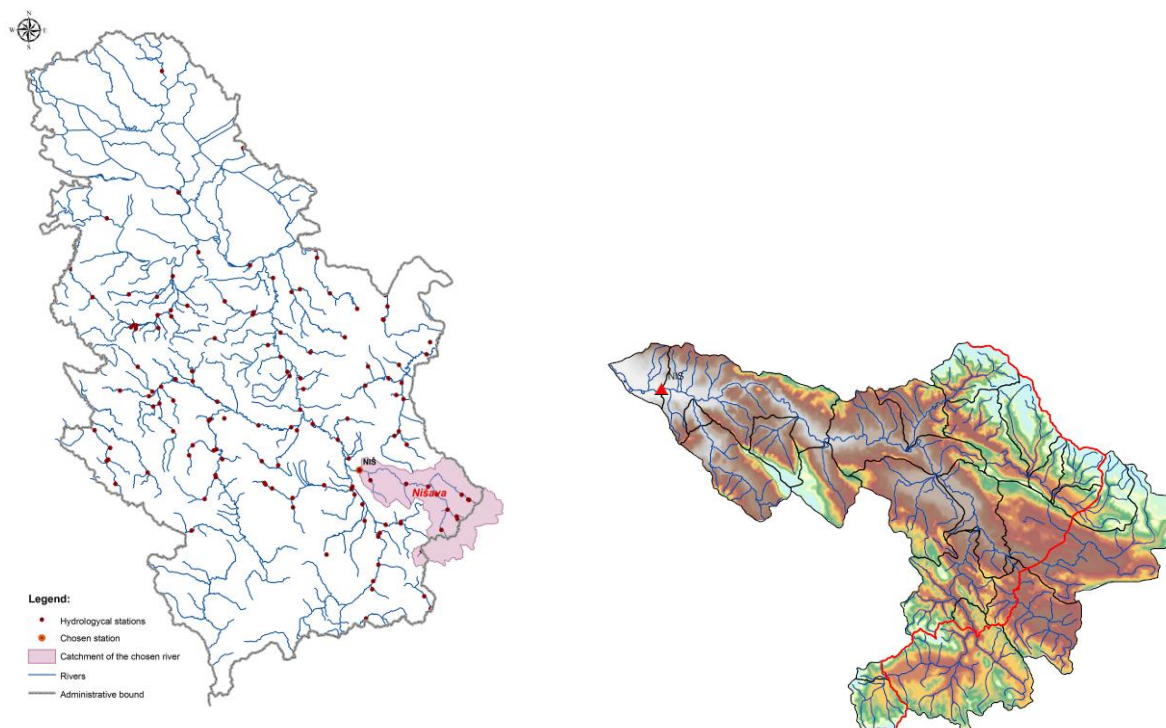
Kalibracija parametara modela kao i funkcionalne zavisnosti standardizovanih i mernih vrednosti ($U(Q_0)$, $U_1(P)$, $U_2(T)$, $U_3(E)$) se određuje za period u kome postoje merenja.

3 Ulazni podaci

Analiza uticaja klimatskih promena na režim srednjemesečnih protoka pomoću modela VNC u ovom radu je ilustrovana na primeru sliva reke Nišave, površine 3870 km² (slika 1).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Slivno područje reke Nišave

Ulazne serije padavina, temperatura i protoka za kalibraciju modela za identifikacioni period preuzete su od Republičkog hidrometeorološkog zavoda za meteorološku stanicu Niš i hidrološku stanicu Niš, respektivno. Na osnovu klimatoloških varijabli sračunata je potencijalna evapotranspiracija metodom Penman-Monteith [3]. Statistički parametri mesečnih serija padavina, temperature, evapotranspiracije i protoka za identifikacioni period 1961.-2012. godine prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Statistički parametri ulaznih vremenskih serija za identifikacioni period 1961-2012.

	1961 – 2012.			
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)
SRE	613.32	377.37	10.56	28.06
σ	103.225	42.018	0.642	9.182
Cv	0.168	0.111	0.061	0.327
Cs	-0.771	-0.431	0.583	0.361
MIN	306.495	256.002	9.366	11.818
MAX	839.59	467.32	12.02	48.01

Projektovane serije klimatoloških varijabli formirane su klimatološkim modeliranjem metodom dinamičkog skaliranja opisanoj u literaturi [1], [2].

4 Rezultati

Rezultati projektovanih vrednosti klimatoloških varijabli i hidrološke varijable primenom jednačine (19) za scenarije A1B i A2 i dva perioda: 2013.-2050. i 2051.-2100. Prikazani su u tabelama 2 i 3. Parametar Θ predstavlja odnos projektovane vrednosti i merene vrednosti varijabli iz table 1.

Tabela 2. Statistički parametri projektovanih serija za A1B i A2 scenarija, period 2013.-2050.

	2013 – 2050. A1B				2013 – 2050. A2			
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)
SRE	537.33	357.89	9.49	25.19	580.53	368.12	9.22	24.12
Θ	0.88	0.95	0.90	0.90	0.95	0.98	0.87	0.86
σ	98.744	38.146	0.693	4.906	112.644	37.542	0.691	4.933
Cv	0.184	0.107	0.073	0.195	0.194	0.102	0.075	0.205
Cs	-0.144	-0.562	0.023	0.089	0.435	0.037	0.066	0.234
MIN	341.930	246.484	8.216	16.013	372.870	284.024	7.874	14.601
MAX	762.17	426.54	10.84	36.03	844.03	454.11	10.96	34.93

Tabela 3. Statistički parametri projektovanih serija za A1B i A2 scenarija, period 2051.-2100.

	2051. – 2100. A1B				2051. – 2100. A2			
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)
SRE	449.28	328.18	11.47	21.43	484.71	328.01	11.65	19.73
Θ	0.73	0.87	1.09	0.76	0.79	0.87	1.10	0.70
σ	87.925	37.200	0.877	1.836	122.277	43.980	1.119	2.428
Cv	0.196	0.113	0.077	0.086	0.252	0.134	0.096	0.123
Cs	0.109	-0.437	-0.089	-0.094	0.471	-0.087	-0.014	0.350
MIN	274.200	247.197	9.601	17.146	274.200	236.312	9.444	15.364
MAX	636.58	399.49	13.18	25.20	806.64	429.27	13.84	25.47

5 Zaključak

Generalno se može reći da će u razmatranim narednim prognoznim periodima, kod svih parametara vodnog bilansa reke Nišave (padavina, evapotranspiracije i oticaja), po oba scenarija promene klime, doći do smanjenja vrednosti. Nešto izraženija smanjenja se očekuju u periodu 2051.-2100. u odnosu na period 2013.-2050. Temperature vazduha će se, takođe, smanjiti u periodu 2013.-2050., po oba scenarija. Za period 2051.-2100. temperatura vazduha će porasti za red veličine 1.0%, odnosno za 10C, po oba scenarija.

Red veličine očekivanog smanjenja rečnog oticaja reke Nišave, po scenariju A1B je oko 10%, za period 2013.-2050., a 24% za period 2051.-2100. Po scenariju A2 očekuje se

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

smanjenje rečnog oticaja u iznosu od oko 14% u periodu 2013.-2050. i oko 30% za dugoročni period 2015.-2100.

Zahvalnica

Predstavljeno istraživanje je sprovedeno za potrebe naučnih projekata TR37005: „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ i III43007: „Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu: Praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u periodu 2011.-2015.

Literatura

1. Djurdjevic, V., Rajkovic, B. (2008a): *Verification of a coupled atmosphere-ocean model using satellite observations over the Adriatic Sea*, Ann. Geophys., 26, 1935-1954
2. Djurdjevic, V., Rajkovic, B. (2008b) *Air-sea interaction, Fluid mechanics of environmental interfaces*, Editors: Gualtieri C. and Mihajlovic T. D., Taylor and Francis
3. Prohaska S. (2003) *Hidrologija I*, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd
4. Prohaska S. (2006) *Hidrologija II*, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd
5. Prohaska, S., Đurđević, V., Ilić A., Vukelić, V., Koprivica, A. (2013) *Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in Serbia*, 6th International Conference on Water Resources and Environment Research ICWRER 2013, 3-7 June, Koblenz, Germany, Conference Proceedings, pp. 502-514
6. Wilby, R., L., et al. (2004), *Guidelines for Use of Climate Change Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*, IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA). http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown_Guide.pdf

Comparison of Semi vs. Fully Distributed Urban Storm Runoff Models

Rui Pina^{1,2*}
Susana Ochoa¹
Maria Aivazoglou¹
Nuno Simões²
Ana Mijic¹
Alfeu Sá Marques²
Čedo Maksimović¹

ABSTRACT: Urban pluvial flooding can be defined as an event that occurs when one or both (overland and sub-surface) components of urban drainage system's capacity is over exceeded as a consequence of heavy local storm. In these cases water remains on the surface (both ponding and flowing) creating huge risk for economy, environment and human health. This is called pluvial flooding but other names such as surface, flash etc. flooding are in use. Urban drainage models are able to analyse such events. Such models comprise of four main components (modules): (i) rainfall as an input, (ii) rainfall-runoff i.e. rainfall abstraction (infiltration, evapotranspiration, storage, surface depression etc.) i.e. conversion of total rainfall into runoff, (iii) overland flow (including flow over roofs, pervious and impervious areas, along the street gutters and through the inlets to sewers and (iv) sewer flow modules. In the case of pluvial flooding, two flow systems: one on the surface and the other in sewer pipes interact with each other through the inlets (gullies and manholes) both in time and space and this poses challenge to the modellers. The rainfall-runoff module can be either semi-distributed (i.e. based upon sub-catchments units through which rainfall is applied to the model and at which runoff hydrographs (thus volumes) are estimated), or fully distributed (with rainfall inputs applied directly on each of the 2D surface model elements, runoff flow calculated and routed to the next downstream one). This paper presents the results a comparison of semi-distributed and fully distributed rainfall-runoff modules coupled with 1D2D urban drainage model (one-dimensional sewer flow and two dimensional overland flow modules). A real case study is analysed and modelling results are compared against water depth records in sewers and photographic records of surface flooding from a monitored flood event. The differences between the models are outlined and the results are discussed. In general, since fully distributed models require more detailed data than is normally available the advantages and disadvantages of each of the modelling approach are discussed. The work presented includes parts of the research carried out within the EU projects RainGain, Blue Green Dream and FLIRE.

Keywords: urban pluvial flooding, flood modelling, semi-distributed, fully distributed

¹ Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, United Kingdom

² IMAR-CMA, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, 3030-790 Coimbra, Portugal

* Corresponding author's e-mail: r.pina13@imperial.ac.uk

1 Introduction

Urban pluvial flooding can be defined as an event that occurs when the drainage system capacity is exceeded and/or water remains on the surface, posing risks for the economy, environment and human health. Exceedance of the drainage capacity can happen on the surface (before water reached underground sewers), in the sewer system (surcharging when water flow out of the sewers back on the surface) or as a combination of these two cases. The physical processes involved in this type of flooding can be divided into four main components: rainfall, rainfall-runoff, overland flow and sewer flow. Overland and sewer flow simulation modules have been greatly improved in recent years (Djordjević et al., 2005; Hunter, et al., 2008; Maksimović et al. (2009), Giangola-Murzin et al., 2012); however, with the advances in technology (e.g. remote sensing, digital map, weather radar data, computing techniques (Cea, et al., 2010)) and the development of urban drainage methodologies such as Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), Water Sensitive urban design (WSUD) and Blue Green Dream (BGD) project solutions further research is needed to study rainfall-runoff transformation and its link with other processes.

Two main types of rainfall-runoff models are semi-distributed (SD) and fully distributed (FD) models. SD models are based on defining sub-catchments units (by delineation using some simple or more sophisticated method), each of which has uniform characteristics and a unique discharge point that can be either a node or another sub-catchment. Each sub-catchment can have its own physical and hydrologic characterisation, such as area, slope, impervious area, soil characteristics of pervious area, etc., and generates runoff from a spatially uniform rainfall input. FD are physically based models defined by a more detailed discretisation of a grid or a mesh of regular or irregular elements. In FD models the rainfall is directly applied to each grid element, generating grid-point runoff. The movement of surface runoff is then simulated by the overland flow module, thus this type of model should be applied for two-dimensional (2D) modelling of overland flow (Beven 2012).

This paper discusses the differences between SD and FD rainfall-runoff models applied to 1D2D urban drainage models (one-dimensional (1D) sewer flow model and two-dimensional (2D) surface overland flow model). SD and FD models were coupled with a 1D2D model of a real case study at Coimbra, Portugal. The input dataset is presented and the particularities of these models are shown. Results are compared against registered data and the differences observed between the SD and FD models are outlined in a discussion for further developments.

2 Case study

The case study used in this paper is the “Zona Central” catchment, located in the downtown area of Coimbra, Portugal (Figure 1). It has a total area of approximately 1.5 km² and an average slope of 0.24 m/m. The sewer system is nearly 35 km long, most of which is combined.

The steep topography of the catchment plays a major role in exacerbating urban pluvial flood hazard. Surface runoff cannot enter the minor sewer system due to the steep slopes during intense rainfall events. Therefore, it stays on the surface and flows through preferential pathways (e.g. roads) or accumulates in natural and man-made ponds, such as the 8

MaySquare, where important services and historical buildings are located (e.g. City Council, Monastery of Santa Cruz).

2.1 Dataset

The SD and FD models of the “Zona Central” catchment were built with the same input data in order to make them comparable.

The network data was provided by the water utility company AC, Águas de Coimbra, EM and digital terrain model (DTM) data was defined by a LIDAR model with 1 m regular cell resolution (Figure 1.a).

Open Street Maps (OSM) data and buildings polygons were used to obtain the land use information required for the hydrological characterisation of both rainfall-runoff models and for the overland flow model characterisation (Figure 1.b).

A monitoring campaign was carried out during the period between 2010-2012 by Simões (2012) to estimate rainfall in the catchment and measure water depth in main points of the sewer network (Figure 1.a). This data was used to adjust both models and to compare their results. In addition, recorded rainfall and photographs of one flood event (9 June 2006) were used to compare flood results of both models.

The system is combined and the waste water inflows and their pattern were defined based upon water demands data from 2012 for each geolocated client.

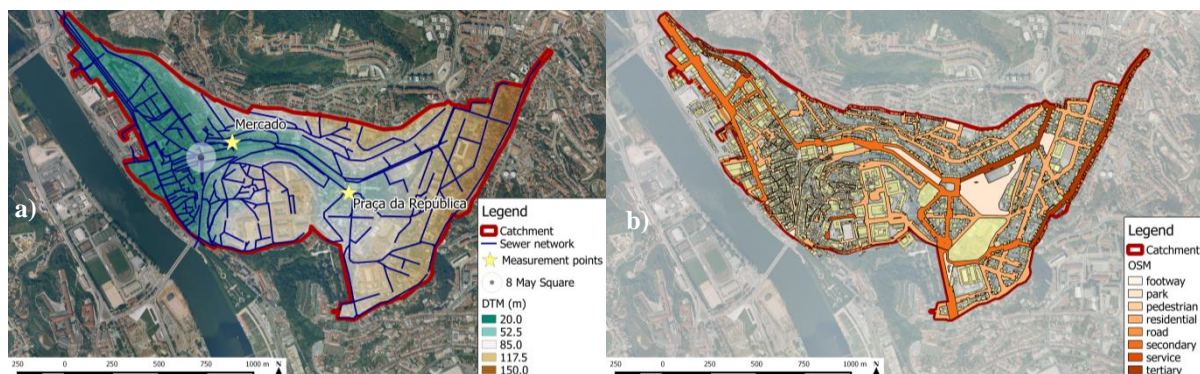


Figure 1. a) Sewer network, DTM and monitoring point locations; b) Land use data in the “Zona Central” catchment in Coimbra

3 Semi and fully distributed models building

The 1D2D dual drainage models with rainfall inputs applied respectively through sub-catchments (i.e. semi-distributed model, SD) and directly on the 2D surface model (i.e. fully-distributed model, FD) were implemented using the dataset described above. The two models share the same 1D sewer model and 2D surface model; the only differences are:

- the way in which rainfall is input (through sub-catchments vs. directly on 2D surface model),
- the way in which runoff volume is estimated (at sub-catchment scale vs. at grid or mesh element of the 2D surface model)

- the way in which runoff volumes are inputted to the model (in SD models the estimated runoff at each sub-catchment is directly inputted into the nodes of the 1D sewer model, whereas in the FD model the runoff generated at each grid/mesh element is routed through the 2D surface and, depending on topography and on the location of sewer gullies, it may or may not enter the sewer system)

In what follows the way in which each component of the 1D, 2D, SD and FD models was setup is described.

3.1 Sewer and overland flow models

The 1D sewer flow model was built using the topology and geometry network data provided by the water utility company. The 2D overland flow model was created based upon the DTM, the buildings polygons and the land use characteristics. The resolution of the overland mesh is 50 - 300 m² in the overall area and 150-900 m² in green areas, such as parks. In both models flows are routed by solving the full shallow water equations, respectively in 1D (i.e. de Saint-Venant equation) and 2D.

3.2 Rainfall-runoff models

The rainfall-runoff model was based on sub-catchments units for the SD model and on the surface overland mesh and building polygons for the FD model. The Horton method was chosen to model the infiltration of pervious areas, with parameters based on Butler and Davies (2011), and fixed runoff coefficients were adopted for impervious surfaces. A calibration procedure was applied to adjust these infiltration parameters in both models.

The SD model is split into sub-catchments covering the entire catchment area, with sub-catchment areas ranging from 50.0 m² to 4.8 ha with an average of 0.17 ha and standard deviation of 0.28 ha. Each sub-catchment has its own uniform hydrological characterisation, namely initial losses, impervious area, width, surface roughness and infiltration parameters. Width was defined by sub-catchments geometry and the other parameters were based on covered land use zones percentages for each sub-catchment. The SWMM hydrological model was applied for the surface runoff routing (single non-linear reservoir with routing dependent on surface roughness, surface area, ground slope and catchment width (Rossman, 2010)).

In contrast, the FD model uses sub-catchment units only to estimate runoff from the buildings' roofs; the runoff estimated at each building sub-catchment is then connected directly to the sewer system. The remaining areas (i.e. non buildings) are divided into overland mesh elements, each of which is assigned infiltration parameters based upon the land use data above. In these areas surface runoff is calculated at each mesh element and it is then routed using the shallow water equations, as described in the previous section. Surface runoff will only enter the sewer system once it reaches a sewer network node.

3.3 Connections with the sewer network

The amount of water entering the sewer system is, in reality, limited by the capacity of the inlet structures; nonetheless, this fact is not always considered in urban drainage models. Given the flooding mechanisms in the study area, accounting for such limitation is essential. Therefore, a concept based on virtual nodes (hypothetical connections) was adopted as

represented in Figure 2. These virtual nodes have an infinitesimal volume (in opposite to usual manholes, defined by chamber area and level) and are directly connected with the overland surface and with the sub-catchments. They are also connected with the sewer network manholes through orifices with the limited capacity of inlet structures. Therefore, the inlet flow to the sewer system from the sub-catchments discharges and from the runoff on the surface overland is limited to the inlet capacity of gullies (defined by the orifices). Since these orifices only allow flow in one direction, flap valves were adopted in the opposite direction to enable stormwater from the surcharged sewer network to run to the surface. The definition of the inlet structures capacity was based on experiences presented by Pina (2010).

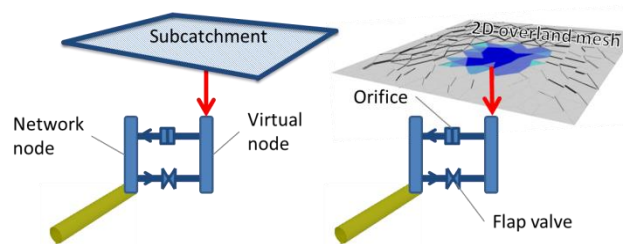


Figure 2. Hypothetical connections of sub-catchments (left) and surface overland (right) with the sewer network used in the model to better model flooding mechanism

4 Results

The SD and FD models were tested using several storm events for which water depths records in sewers were available. In this section, three storm events are presented and the recorded water depths at two main points (Figure 1.a) are compared against model results. In addition, photographs of a flood event at the 8 May Square are compared with the floodplains produced by the models.

4.1 Analysis of events with measured water depths

The water balances shown in Table 1 reveal that SD and FD models are producing the same overall runoff volumes, but the maximum water volume on the 2D surface is higher in the FD model. In addition, the water depths in the sewer system (Figures 3-5) are lower in the FD model. This can be explained by the connections of the overland network to the sewer system. In the SD model runoff is directly applied to the nodes of the sewer network and it only reaches the surface in case of sewer surcharge or if the capacity of the inlet structures is exceeded. In contrast, in the FD model runoff remains on the surface until it reaches a manhole (and it can also come back to the surface once if sewers surcharge). Because of this, higher water volumes are generally retained on the surface of the FD model, due to overland singularities which would normally be drained by private network sewers. The sewer flow model used in this study only includes the public sewer network and not considers any private network connections. The absence of such connections in the sewer flow model is not critical in SD models, where all the water in a given sub-catchment is assumed to go straight to an

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

associated node. But it is a problem in FD models, where water simply remains on the surface as it cannot be drained.

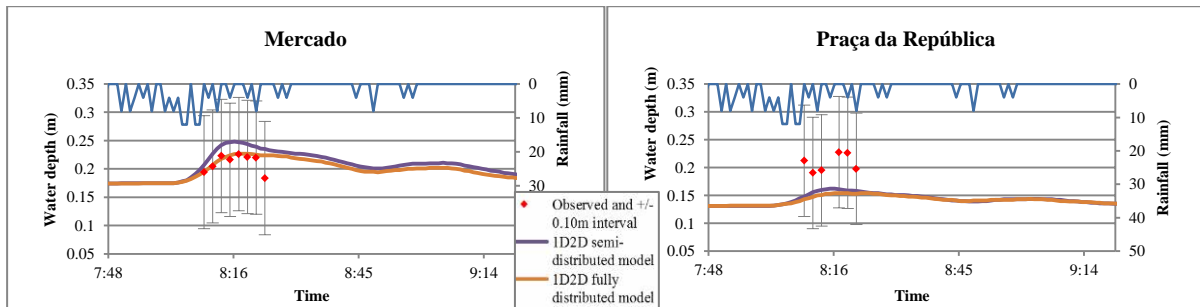


Figure 3. Observed data and model results – 2011/01/29

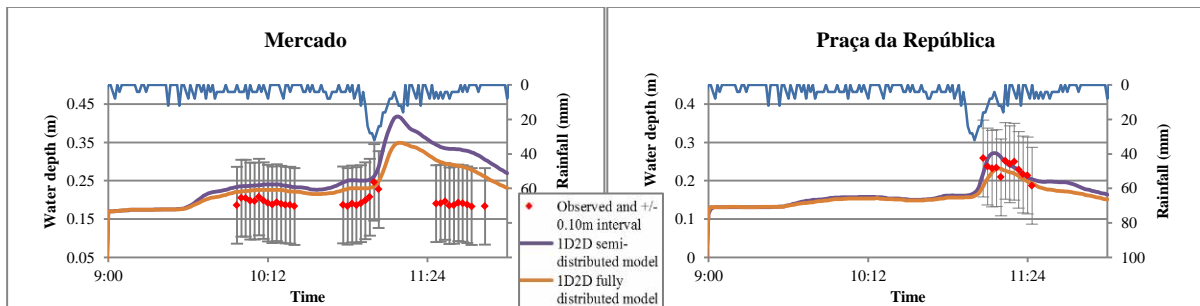


Figure 4. Observed data and model results – 2011/02/13

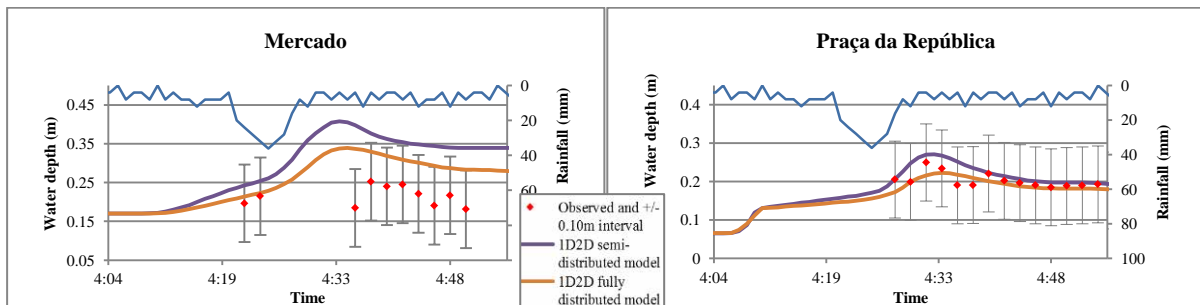


Figure 5. Observed data and model results – 2011/02/16.

Table 1. Water balance for each simulation.

Simulation	Model	Duration	Total rainfall	Total runoff	Max volume on the
2011-01-29	SD	120	4289.8	2289.7	1773.0
	FD	120	4471.8	2483.0	2156.8
2011-02-13	SD	180	19251.8	12843.0	8333.0
	FD	180	20068.6	12170.4	9934.9
2011-02-16	SD	60	13183.3	8879.3	6692.8
	FD	60	13742.7	8093.8	7269.5

4.2 Analysis of flood event with photographic evidence

The flood recorded on 9th June 2006 was caused by a rainfall with 50 years return period. Figure 6 presents photographs taken at 8 May Square during this flood event, as well the floodplains generated by the models with the registered rainfall. In this particular case, the floodplain produced at 8 May Square by the SD model covers a larger area and has higher water depths as compared to the FD results. This seems opposite to the conclusion in the previous section, but is justified because this is just a specific area. The overall results are in accordance to the previous conclusions, since the maximum volume on the 2D surface is higher in the FD than in the SD model (29808.1 m³ and 26933.5 m³, respectively). The observed results at 8 May Square can be explained by the fact that this area has the lowest elevation in the catchment and accumulates surface runoff that cannot enter the sewer system due to the limited capacity of inlet structures. Therefore, the runoff that is retained on the surface in the FD model due to overland singularities cannot reach this flooded area, resulting in a lower flooded area and flood depth comparing with the SD.

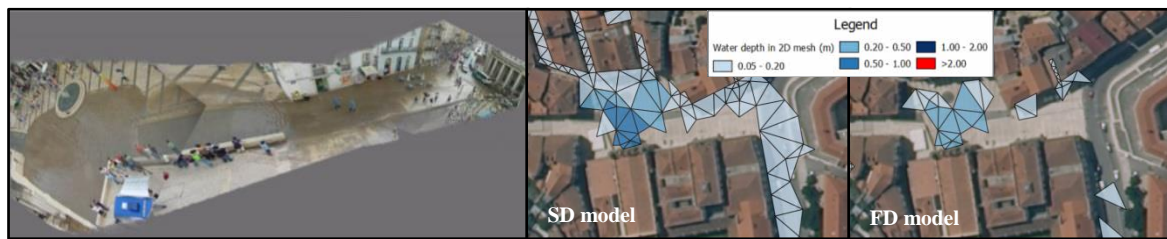


Figure 6. Flood recorded on 9 June 2006 in “Zona Central” catchment, Coimbra, Portugal; flood levels obtained with the SD and FD models

Initial work on analysis of potential of flood prediction and linking it with forest fire prediction carried out within the project FLIRE (http://www.flire.eu/en/project_en/) has implemented a simplified version of SD model in the pilot project Rafina in Greece. Initial results of the testing of SD model in the Rafina catchment for urban coincidental flooding (fluvial and pluvial, customised for the linkage to forest fire prediction) indicate that its version based on predefined scenarios is a very promising tool for this purpose.

5 Conclusions

This paper presented a comparison between two types of 1D2D dual drainage models: SD and FD. Model building concepts are presented for these two models and results of a case study are presented.

The most evident difference between SD and FD models is the definition of the rainfall-runoff models and its connection with the overland and sewer flow modules. SD models are based on delineated sub-catchments that discharge directly to the sewer network. In FD models the runoff is routed on the overland surface and discharged to the sewer system through inlet nodes. In the present case study, surface overland singularities generally retained water volumes in the FD, where private sewer connections should drain these areas. This is

not a problem in the SD model, since the water is directly assigned to a sewer node. This suggests that FD models require higher detail in the sewer network data to include also private networks. However, as this option can make the sewer flow module very complex, other possibility can be to define the FD model only on open areas (without buildings - e.g. roads, green areas) combined with sub-catchments on the other areas covered by the catchment. Initial results of the testing of SD model in the Rafina catchment indicate that its version based on predefined scenarios is a very promising tool for this purpose.

Acknowledgements

Rui Pina acknowledges the financial support from the Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério para a Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, Portugal [SFRH/BD/88532/2012]. Support of EU through the programs Interreg (RainGain project), Climate_KIC (Blue Green Dream project) is acknowledged and appreciated.

Part of the research presented in this paper has been undertaken during the framework of implementation of the FLIRE Project (LIFE11/ENV/GR/975-FLIRE). The project is co-financed by European Commission General Directorate for the Environment, LIFE financial instrument with 50%.

References

1. Beven, Keith J. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons, West Sussex.
2. Butler D. and Davies J.W. (2011). *Urban drainage*. CRC Press, London.
3. Cea, L., Garrido, M., Puertas, J. (2010). Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas. *J. of Hydrology*, 283, 88-102.
4. Djordjević, S., Prodanović, D., Maksimović, Č., Ivetić, M., & Savić, D. A. (2005). SIPSON - Simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks. *Wat. Sci. and Tech.*, 52 (5), 275-283.
5. Giangola-Murzin, A., Gires, A., Hoang, C. T., Tchiguirinskaia, I., & Schertzer, D. (2012). Multi-Hydro modelling to assess flood resilience across scales, case study in the Paris region. *Proc. 9th ICUD*, Belgrade, Serbia.
6. Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., Liang, D., Falconer, R. A., Lin, B., Waller, S., Crossley, A. J., & Mason, D. C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of Institution of Civil Engineers. Water management*, 161 (1), 13-30.
7. Maksimović, Č., Prodanović, D., Boonya-aroonnet, S., Leitão, J. P., Djordjević, S., and Allitt, R. (2009). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *Journal of Hydraulic Research*, 47(4):512-523
8. Pina, R. D., Oliveira Sousa, J., Santos Temido, J., Sa Marques, A. (2010). O novo paradigma de gestão dos sistemas de drenagem da cidade de coimbra – Causas das inundações na Praça 8 de Maio, em Coimbra, e propostas de intervenção. *Proc. 10th Congresso da Água*, Alvor, Portugal.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

9. Rossman, L.A. (2010). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
10. Simoes, N. E. (2012) Urban Pluvial Flood Forecasting. Ph.D. thesis, Imperial College London.

Калибрација дистрибуираних хидролошких модела

Андријана Тодоровић¹

Јасна Плавшић²

Милош Станић³

Жељко Василић⁴

АПСТРАКТ: Код просторно дистрибуираних хидролошких модела различите ћелије рачунске мреже имају спровене вредности параметара модела. Као такви, дистрибуирани хидролошки модели омогућавају да хетерогене особине карактеристика слива буду боље представљене у моделу, што ове моделе чини реалистичнијим у односу на моделе са хомогеним параметрима. Међутим, постоје два проблема у примени дистрибуираних модела. Прво, примена дистрибуираних модела је веома захтевна са становишта рачунарских ресурса. Друго, број параметара које је потребно оптимизовати се вишеструко увећава, што чини калибрацију ових модела веома комплексном. Један од начина да се смањи број параметара је примена неке од метода регуларизације. Ове методе подразумевају посредну оптимизацију целог просторног поља параметра преко тзв. супер-параметара. У овом раду приказана је калибрација дистрибуираног хидролошког модела помоћу савремене методе регуларизације која се базира на једном супер-параметру за свако параметарско поље и не захтева увођење додатних ограничења за параметере. Модел је калибрисан за слив реке Колубаре.

Кључне речи: просторно дистрибуирани хидролошки модели, калибрација, методе регуларизације

Calibration of distributed hydrologic models

ABSTRACT: Spatially distributed models imply that different parameter sets are appointed to different computational grid cells. As such, the distributed models can accommodate natural spatial heterogeneity of catchments to certain extent, and they are assumed to be more realistic than the lumped models. However, there are two issues when it comes to the application of the distributed models. Firstly, hydrologic simulations with these models are computationally expensive. Secondly, the number of free parameters increases manifold making the calibration of these models rather challenging. The number of free model parameters can be reduced by applying some of the regularisation methods. These methods imply indirect optimisation of the parameter field via so-called "super-parameters". In this paper a contemporary regularisation method is applied for calibration of the distributed hydrologic model. This method relies on a single super-parameter per parameter field and does not require any additional limitations to be imposed on the parameters. The model is calibrated to simulate runoff in the Kolubara River Catchment.

Keywords: spatially distributed hydrologic models, calibration, regularisation methods

¹ Андријана Тодоровић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, andrijana@hikom.grf.bg.ac.rs

² В. проф. др Јасна Плавшић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, jplavsic@grf.bg.ac.rs

³ В. проф. др Милош Станић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, mstanic@grf.bg.ac.rs

⁴ Жељко Василић, дипл.инж.грађ., Грађевински факултет у Београду, zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Увод

Модел падавине-отицај (детерминистички или параметарски модели) се користе за симулацију хидролошких величина на разматраном сливном подручју (нпр. влажност земљишта), односно хидролошком профилу (проток). За израду хидролошких симулација неопходни су метеоролошки подаци – падавине, температуре, потенцијална евапотранспирација (*ПЕТ*), и подаци о сливу као што су површина слива, нагиби, намена земљишта, типови тла и вегетације. Постоји много детерминистичких хидролошких модела различитог степена комплексности, као и начина на који се они класификују. Једна од подела је према просторној расподељености (дистрибуираности), односно према томе како је просторна хетерогеност карактеристика слива и/или метеоролошких података укључена у хидролошки модел. Ова класификација је приказана у Табели 1 (према Ajami et al., 2004).

Табела 1. Класификација хидролошких модела према просторној дистрибуираности параметара модела и метеоролошких података.

Table 1. Classification of hydrologic models according to the spatial distribution of model parameters and the input data.

ТИП МОДЕЛА	ПАРАМЕТРИ	МЕТЕОРОЛОШКИ ПОДАЦИ
Хомогени (енгл. <i>lumped</i>)	Исти скуп параметара за цео слив	Осредњени подаци за цео слив
Семи-хомогени (енгл. <i>semi-lumped</i>)	Исти скуп параметара за цео слив	Различити подаци за сваки подслив
Семи-дистрибуирани (енгл. <i>semi-distributed</i>)	Различити скупови параметара за сваки подслив	Различити подаци за сваки подслив
Дистрибуирани (енгл. <i>distributed</i>)	Различити скупови параметара за сваку ћелију рачунске мреже	Различити подаци за сваку ћелију рачунске мреже

У једначинама детерминистичких хидролошких модела које описују процесе формирања отицаја фигуришу и параметри, који омогућавају да се структура модела прилагоди условима формирања отицаја на конкретном сливу. Вредности параметара се најчешће не могу одредити *a priori* на основу карактеристика слива, већ се параметри оптимизују како би се добило што боље слагање између симулираних и осмотраних величина. Овај поступак одређивања вредности параметара модела назива се калибрација модела. Један од проблема у калибрацији модела је димензионалност оптимизационог проблема (енгл. *model overparameterisation, ill-posedness of the optimisation problem*), односно велики број слободних параметара модела (које је потребно оптимизовати) спрема најчешће само једне осмотрене величине (проток).

Просторна хетерогеност карактеристика слива или метеоролошких величина (пре свега падавина) значајно утиче на формирање отицаја (нпр. Beven, 2002; Loukas et al. 2002; Tromp-Van Meerveld & McDonnell, 2006; Vivoni et al. 2007). Самим тим, очекује се да укључивање просторне расподељености у хидролошке моделе доприноси квалитету модела, што досадашња истраживања потврђују (нпр. Bardossy & Das, 2008; Vaze et al., 2011; Khakbaz et al. 2012). Упркос томе, дистрибуирани хидролошки модели још увек нису често коришћени у пракси. Наиме, постоје два велика проблема у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

њиховој примени: (1) симулације са дистрибуираним моделима су веома захтевне са становишта рачунарских ресурса, и (2) број слободних параметара модела се вишеструко увећава, као и димензионалност оптимизационог проблема, што калибрацију ових модела чини изузетно комплексном.

Како би се смањила разлика између броја слободних параметара и осматраних величина, у процес калибрације дистрибуираних модела могу се укључити додатне информације. С обзиром да дистрибуирани модели резултују вредностима симулираних хидролошких величина и унутар слива, за калибрацију се могу користити и осматрања са узводних хидролошких станица или осматрања дугих хидролошких величина (нпр. нивои подземних вода, Seibert, 2000).

Такође, постоји неколико приступа који се примењују у циљу редуковања броја слободних параметара, односно смањује неодређености оптимизационог проблема (Blasone et al., 2007; Blasone, 2007):

– Фиксирање вредности неутицајних (неосетљивих) параметара модела. Искључивање параметара из калибрације мора бити оправдано резултатима анализе осетљивости.

– Додељивање истог скупа параметара рачунским ћелијама које имају иста својства (нпр. намену и тип земљишта, нагиб, и сл.) и за које се претпоставља да се понашају на сличан начин у смислу формирања отицаја (Beven, 2001). Овакве рачунске ћелије се називају хидролошким јединицама (енгл. *Hydrologic Response Units* – HRU). За одређивање хидролошких јединица могу се користити ГИС алати.

– Примена неке од метода регуларизације (Yilmaz et al., 2010; Pokhrel & Gupta, 2010; Pokhrel et al., 2012).

Метод регуларизације имају за циљ смањење димензионалности, односно броја слободних параметара, што се постиже тако што се уместо параметра за сваку рачунску ћелију оптимизују тзв. супер-параметри који представљају читаво просторно поље једног параметра модела (Pokhrel et al., 2012). Сами параметри модела у рачунским ћелијама се не оптимизују, већ рачунају на основу супер-параметара (који се оптимизују у поступку калибрације) и њихове почетне, претпостављене вредности параметра у датој рачунској ћелији. Сваки просторно расподељени параметар модела представљен је најмање једним супер-параметром. На пример, вредност i -тог параметра модела $\hat{\theta}_i$ у j -тој ћелији рачунске мреже се одређује на основу његове почетне вредности за ту ћелију $\theta_{\text{PRIOR } i, j}$ и адитивног супер-параметра a_i :

$$\hat{\theta}_{i, j} = a_i + \theta_{\text{PRIOR } i, j} \quad (1)$$

Уколико се усвоји само адитивни супер-параметар (као у једначини 1), број супер-параметара је једнак броју параметара модела N_p , односно, уместо оптимизације $N_p \cdot N_g$, где N_g означава број ћелија рачунске мреже, оптимизује се само N_p параметара, што је еквивалентно калибрацији модела са хомогеним параметрима. Аналогно се могу применити и мултипликативни (једначина 2) или експоненцијални супер-параметри, као и комбинације више супер-параметара (адитивни, мултипликативни и експоненцијални супер-параметри у једначини 3):

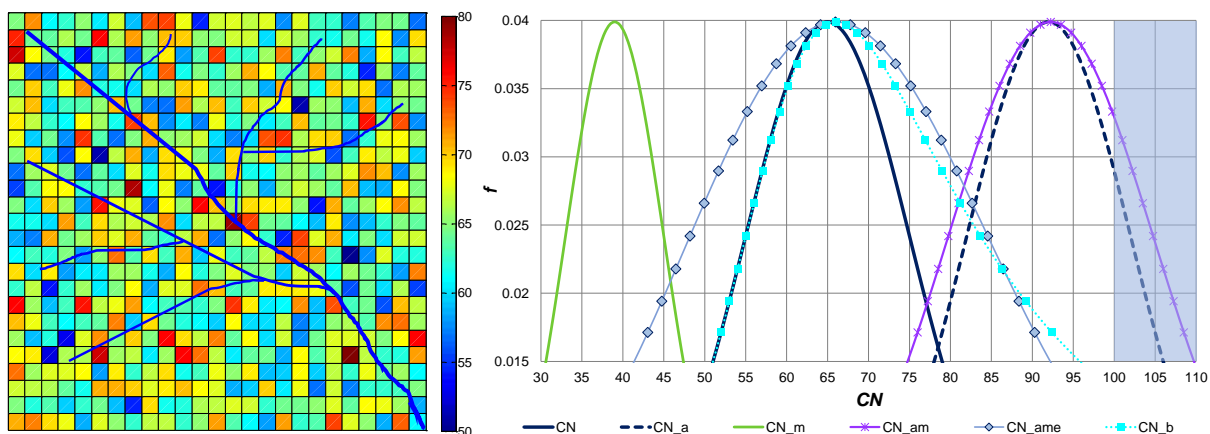
$$\hat{\theta}_{i, j} = m_i \cdot \theta_{\text{PRIOR } i, j} \quad (2)$$

$$\hat{\theta}_{i,j} = m_i \cdot (\theta_{\text{PRIOR } i,j})^{e_i} + a_i \quad (3)$$

Као што је приказано на Слици 1, уколико се уведе само адитивни супер-параметар, облик просторне расподеле вредности датог параметра (варијанса, асиметрија) се не мења, док увођење додатних супер-параметара резултује већом флексибилношћу просторне расподеле. Флексибилност расподеле је веома битна зато што омогућава боље прилагођавање модела осмотреним подацима и води већој ефикасности модела, и зато што омогућава већу корекцију почетно претпостављене просторне расподеле. Међутим, увођење додатних супер-параметара подразумева и увећање димензионалности оптимизационог проблема. На пример, уколико се модел калибрише са адитивним, мултипликативним и експоненцијалним супер-параметрима (као у једначини 3), потребно је оптимизовати $3 \cdot N_p$ параметара. Поред повећања димензионалности оптимизационог проблема, постоји више супер-параметара за које је потребно дефинисати почетне опсеге.

Методe регуларизације често подразумевају и увођење ограничења за оптимизоване параметре. На слици 1 десно су приказане просторне расподеле хидролошког броја CN за хипотетички слив и расподеле добијене применом различитих метода регуларизације. Осенчени део на слици 1 десно показује да се применом метода регуларизације могу добити физички нереалне вредности параметара ($CN > 100$), које у општем случају могу да резултују негативним стањима резервоара, бесконачним или комплексним вредностима симулираних вредности.

Додатни проблем у примени метода регуларизације представља дефинисање почетне просторне расподеле параметара. Овај поступак до неке мере олакшава примена ГИС алата, међутим физичке карактеристике рачунске ћелије (нпр. намена земљишта, тип тла или вегетације) нису једнозначно повезане са вредностима параметара, па овај поступак захтева умешност хидролога који ради калибрацију.



Слика 1. Хипотетички слив и просторна расподела хидролошког броја (CN) добијена различитим методама регуларизације.

Figure 1. Hypothetical catchment (left) and spatial distribution of the curve number (CN) with different regularisation methods.

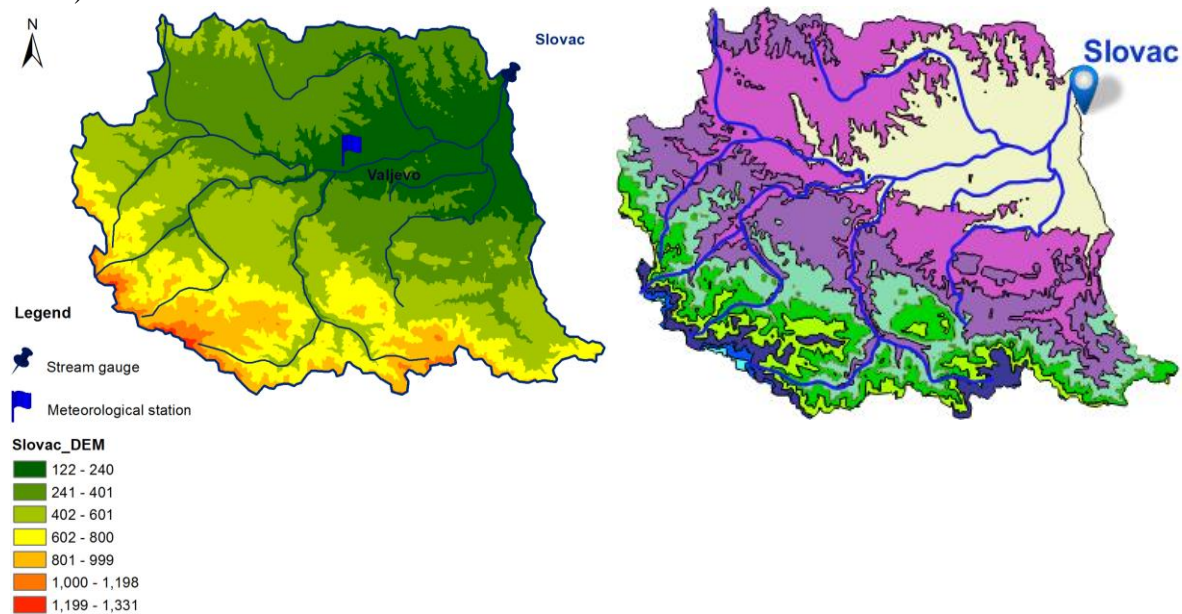
У методе регуларизације се убрајају и *SVD* (енгл. *Singular Value Decomposition*), која се базира на одређивању линеарне комбинације вектора који највише утичу на симулиране величине (енгл. *Principal Component Analysis*), и метода Тиконова, која у критеријумску функцију укључује пенал због одступања од претпостављене почетне просторне расподеле параметара (Yilmaz et al., 2010).

2 Методологија

У овом раду је приказана калибрација дистрибуираног хидролошког модела *Catch* применом савремене методе регуларизације. Модел је калибрисан према протоцима осматрени на водомерној станици Словац на реци Колубари.

2.1 Слив и подаци

Слив реке Колубаре налази се у западној Србији и захвата површину од преко 3600 km². У овом раду симулиран је отицај са слива узводно од водомерне станице (в.с.) Словац (Слика 2), који захвата површину од 995 km². Овај део слива се простире између 122 m n.m. и 1331 m n.m. На сливу доминира пољопривредно земљиште и листопадне шуме (посебно на већим надморским висинама), док је мање од 1.5% површине слива урбанизовано (Langsholt et al., 2013; Todorovic & Plavsic, 2015; Todorović, 2015). На сливу су највише заступљени параподзоли (хидролошка група тла С), док су смоница, подзоли и кисела браон земљишта затупњена у далеко мањој мери (Djordković, 1984). На најузводнијим деловима слива постоји карст (Dimitrijević et al., 1975).



Слика 2. Слив реке Колубаре до в.с. Словац (лево) и висинске зоне (десно).
Figure 2. The Kolubara River catchment upstream of the Slovac stream gauge (left) and the elevation zones (right).

За симулацију отицаја на в.с. Словац коришћена су осматрања дневних падавина и средњих дневних температура са метеоролошке станице Ваљево, док је хидролошки модел калибрисан према средњим дневним протоцима осмотреним на в.с. Словац. Подаци о овим станицама, просеци осмотрених величина у периоду 1954-2013, као и резултати теста значајности нагиба линеарне регресије за годишње вредности дати су у Табели 2. Резултати показују да постоји статистички значајан позитиван тренд у средњим годишњим температурама, док у низовима средњих годишњих протока и укупних годишњих падавина није детектован статистички значајан тренд (Todorovic & Plavsic, 2015; Todorović, 2015).

Табела 2. Доступни подаци за симулацију отицаја са слива реке Колубаре.
Table 2. Data available for runoff simulation at the Kolubara River catchment.

Станица	Величина	Надморска висина [m. n.m]	Подаци од године	Просек у периоду (1954-2013)	Статистички значајан тренд
Словац	Проток	121.59	1954	9.8 m ³ /s	нема
Ваљево	Падавине Температуре	176	1951	790 mm 11.3 °C	нема позитиван

2.2 Хидролошки модел

За симулацију отицаја коришћен је хидролошки модел *Catch* (Vasilić et al., 2012). Овај модел садржи модуле за симулацију задржавања падавина на вегетацији, снежног покривача и влаге у земљишту (вертикални водни биланс), као и модуле за трансформацију отицаја и пропацију хидрограма у водотоцима (хоризонтални водни биланс). Ови модули су укратко описани у овом раду, док су једначине модела дате у Vasilić et al. (2012).

Модул за симулацију задржавања падавина на вегетацији (интерцепција). Вегетација је представљена једним резервоаром (слика 3), чији максимални капацитет варира током вегетационог периода. Максимални капацитет резервоара вегетације је слободни параметар модела, док је његова вредност у датом рачунском кораку сразмерна вредности *LAI* (енгл. *Leaf Area Index*) у том кораку. У овом раду *LAI* прати синусоидну функцију током вегетационог периода (од 1.4. до 1.11.), док су вредности овог индекса ван вегетационог периода једнаке нули. Улаз у резервоар вегетације су падавине при температурама изнад граничне (T_{S-R}), док су излази евапорација и падавине које доспевају до тла (енгл. *throughfall*).

Модул за симулацију снега. Све падавине при температурама испод граничне T_{S-R} се сматрају снегом (слика 3). Симулација топљења снега заснива се на методи степен-дан (Beven, 2001; Hock, 2003; Anderson, 2006; He et al. 2014), односно топљење снега је пропорционално разлици између температуре ваздуха и снежног покривача, и температуре топљења снега. У овом раду је претпостављено да је температура топљења снега једнака граничној T_{S-R} . Фактор топљења снега (енгл. *meltrate factor*), који је „кофицијент пропорционалности“ у једначини за симулацију топљења снега, варира током зимске сезоне према синусној функцији која има најмању вредност 21. децембра, а највећу 21. јуна. Топљење снега такође зависи и од простроне покривености снежним покривачем, која се процењује на основу дебљине снежног покривача. Биланс

резервоара снега, поред падавина и топљења снега, чини и сублимација. Сви елементи биланса резервоара снега представљени су у милиметрима воденог талога.

Модул за симулацију влаге у земљишту. У моделу *Catch* земљиште је представљено резервоаром површинског и потповршинског слоја (слика 3). У овом раду усвојен је један потповршински слој земљишта, с тим да број ових слојева може бити предмет калибрације модела.

У површинском слоју земљишта, који има дебљину до 10 cm, формира се површински (Хортонов) отицај који се симулира применом SCS методе. Поред падавина које доспевају до тла и / или отопљеног снега, и површинског отицаја, биланс овог резервоара састоји се и из евапорације и перколације (процуривања) у потповршински слој земљишта. Перколација зависи од стања резервоара површинског слоја земљишта. Уколико је овај слој засићен, перколација се симулира применом Дарсијевог закона, док се перколација из незасићеног слоја симулира применом интегралног облика Ричардсове једначине у вертикалном правцу, где се коефицијент филтрације одређује на основу ван Генухтенове једначине (Vasilić et al., 2012). Континуално симулирање влаге у земљишту омогућено је кориговањем вредности хидролошког броја према претходном стању резервоара. За потребе хидролошких симулација потребно је дефинисати хидролошки број и иницијалну апстракцију, дебљину и ефективну порозност, као и коефицијент филтрације при засићењу земљишта, влажности трајног увенућа и пољског капацитета и индекса расподеле величине пора (енгл. *pore size distribution index*).

Биланс потповршинског слоја земљишта састоји се из перколације из површинског слоја, транспирације и перколације у резервоар подземних вода. Потповршински слој земљишта је дебљи у односу на површински, и има мањи коефицијент филтрације, док су остали параметри исти за оба слоја земљишта.

Трансформација отицаја. Површински отицај се трансформише у директни преко линеарног резервоара, чини је коефицијент једнак очекиваном времену концентрације. Перколација из потповршинског слоја представља улаз у нелинеарни резервоар подземних вода са преливом: базни отицај се добија трансформацијом кроз нелинеарни резервоар, док се количина воде изнад прага овог резервоара промтно прелива у линеарни резервоар, чинећи брзи потповршински отицај (слика 3).

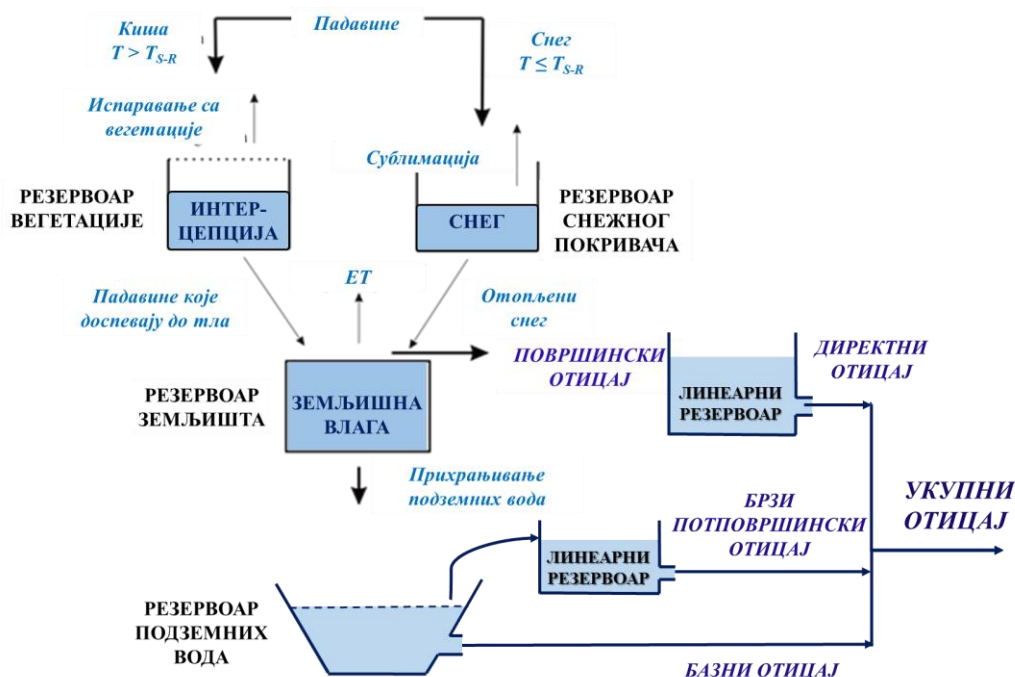
Улазни подаци. За симулацију отицаја са дневним рачунским кораком потребне су дневне падавине, просечне дневне температуре и вредности потенцијалне евапотранспирације (*ПЕТ*), док су за калибрацију модела потребни просечни дневни протоци. Вредности *ПЕТ* су рачунате методом Намон-а (Намон, 1961).

Дистрибуирани модел. Ова верзија модела има 24 параметра, с тим да је свега 6 параметара модела просторно расподељено:

- (1) Максимални капацитет резервоара вегетације (CAN_{max}) – зависи од типа вегетације;
- (2) Максимална вредност *LAI* (LAI_{max}) – зависи од типа вегетације;
- (3) Коефицијент (λ) – је обрнуто сразмеран дебљини снежног покривача, па су мање вредности овог коефицијента су додељене вишим зонама;
- (4) Хидролошки број (*CN*) – зависи од доминантне намене земљишта и типа тла;

- (5) Дебљина потповршинског слоја земљишта ($D_{\text{subsurface}}$) – нека истраживања су показала да је највећа дебљина земљишта у нижим деловима слива, док се према вододелници дебљина земљишта смањује (Han & Liu, 2015);
- (6) Градијент висине падавина са надморком висином (α) – количина падавина се нелинеарно расте са надморском висином, односно вредности овог градијента опадају са надморком висином (Bardossy & Das, 2008).

Слив је подељен на девет висинских зона приближно истих распона (Слика 2 десно), при чему је свакој висинској зони додељен сопствени скуп параметара. Улазне метеоролошке су такође кориговане за сваку висинску зону према разлици између метеоролошке станице Ваљево и просечне надморске висине зоне.



Слика 3. Схематски приказ структуре модела *Catch*.
 Figure 3. Structure of the *Catch* model.

2.3 Калибрација модела

За аутоматску калибрацију хидролошког модела коришћен је савремени оптимизациони алгоритам AMALGAM (Vrugt & Robinson, 2007; Vrugt et al., 2009), који у себи садржи четири глобална оптимизациона алгоритма (NSGA II, DE, PSO, AMS). Оптимизација параметара почиње случајним одабиром скупова параметара применом LH методе (енгл. *Latin Hypercube Sampling*). Почетно одабрани скупови се „додељују“ појединим оптимизационим алгоритмима, при чему се број скупова који се додељује неком алгоритму динамички мења током оптимизације, у зависности од успеха тог алгоритма у претходној итерацији. У овом раду је одабрано 100 почетних скупова параметара, а критеријум конвергенције је 20.000 итерација. Резултати прелиминарних симулација су показали да даље повећавање броја итерација не доводи до побољшања критеријумских функција.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Модел је калибрисан према Kling-Gupta критеријумској функцији KGE , која се у поступку калибрације максимизује (Gupta et al., 2009):

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\hat{S}_{Q_{sim}}}{\hat{S}_{Q_{obs}}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}} \quad (7)$$

KGE квантификује ефикасност модела у репродуковању динамике формирања отицаја (кофицијент корелације) и запремине отицаја (однос просечних протока), као и однос стандардних девијација у серијама осмотрених и симулираних протока (Gupta et al., 2009). Ова критеријумска функција је настала побољшањем стандардно примењиваног Неш-Сатклифовог коефицијента ефикасности (NSE), за који је показано да води потцењивању односа варијанси осмотрених и симулираних протока (Gupta et al., 2009). Као и у случају NSE , циљна вредност KGE је 1.

2.4 Метода регуларизације

Метода регуларизације која је примењена у овом раду представљена је у Yilmaz et al. (2008). Иако ова метода подразумева само један супер-параметар β за сваки простороно расподељени параметар, она резултује великом флексибилношћу просторне расподеле, укључујући не само први и други моменат расподеле, већ и њену асиметрију (Слика 4).

Вредност i -тог параметра модела $\hat{\theta}_i$ у j -тој ћелији рачунске мреже се одређује на основу његове почетне вредности за ту ћелију $\theta_{PRIOR\ i,j}$, најмање ($\theta_{i,MIN}$) и највеће вредности ($\theta_{i,MAX}$) i -тог параметра и супер-параметра β_i који се оптимизује:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,min} + (\theta_{i,max} - \theta_{i,min}) \left(\frac{\theta_{PRIOR\ i,j} - \theta_{i,min}}{\theta_{i,max} - \theta_{i,min}} \right)^{\alpha_i} \quad (8)$$

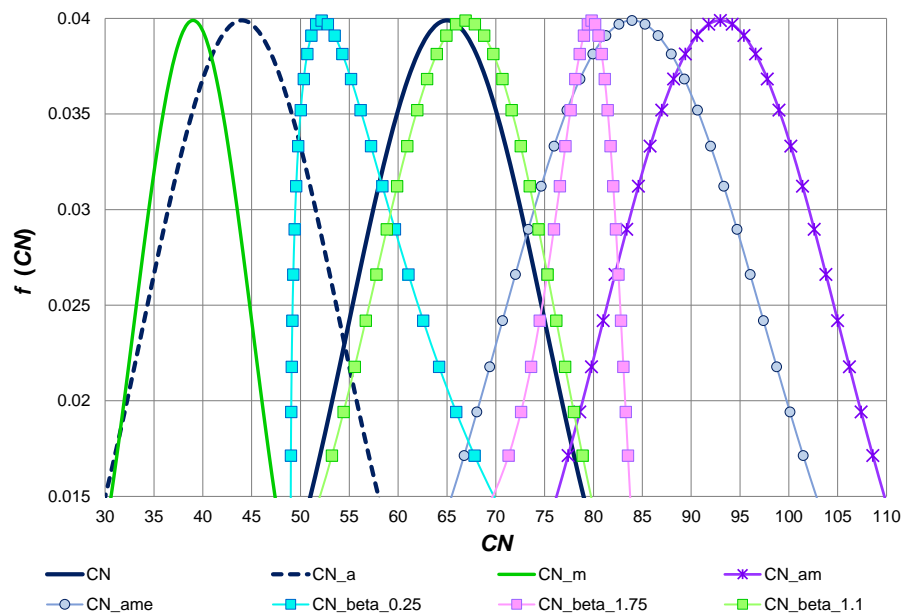
$$\alpha_i = \log_{10} \left(1 - \frac{2 - \beta_i}{2} \right) / \log_{10} 0.5 \quad (9)$$

Супер-параметар β_i узима вредности из скупа (0, 2], при чему се вредности супер-параметра блиске нули параметар $\hat{\theta}_i$ своди на минималну, а за $\beta = 2$ максималну вредност из почетног опсега (Todorović, 2015):

$$\begin{aligned}
 \beta \rightarrow 0 &\Rightarrow \alpha \rightarrow -\infty \Rightarrow \theta_{i,j} \rightarrow \theta_{\min} \\
 \beta = 1 &\Rightarrow \alpha = 1 \Rightarrow \theta_{i,j} = \theta_{\text{PRIOR } i,j} \\
 \beta = 2 &\Rightarrow \alpha = 0 \Rightarrow \theta_{i,j} = \theta_{\max}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Примена ове методе регуларизације има две велике предности у односу на стандардне методе које су приказане у уводном поглављу, које знатно олакшавају калибрацију дистрибуираних модела:

- (1) Није потребно дефинисати опсег за супер-параметре β_i – супер-параметри увек узимају вредности из скупа $(0, 2]$, без обзира на токо који параметра представљају;
- (2) Оваква трансформација онемогућава да вредности параметара изађу ван унапред дефинисаног опсега $[\theta_{i, \text{MIN}}, \theta_{i, \text{MAX}}]$, па није потребно уводити никаква ограничења за параметре како не би уземли (физички) нереалне вредности.



Слика 4. Просторне расподеле хидролошког броја (CN) за различите вредности супер-параметра β (хипотетички слив приказан на слици 1).

Figure 4. Spatial distributions of the curve number (CN) with different values of super-parameter β (hypothetical catchment presented in Figure 1).

2.5 Примена дистрибуираног модела

Калибрисани дистрибуирани хидролошки модел је тестиран применом *SST* (енгл. *Split Sample Test*) и *DSST* (енгл. *Differential Split Sample Test*). Први тест подразумева калибрацију и евалуацију модела током периода са сличним метеоролошким карактеристикама, док други тест подразумева евалуацију модела током периода који се битно разликује од периода калибрације модела (Klemeš, 1986). *DSS* тест се релативно ретко примењује у пракси, с обзиром да се јавља велики пад у ефикасности модела током периода евалуације (Seibert, 2003).

У овом раду периоди калибрације и евалуације су одабрани према висини годишњих падавина, с тим да је у *DSST* модел калибрисан током пет најкишнијих и тестиран на пет најсушнијих хидролошких година, што представља најзахтевнији тест за хидролошке моделе (Li et al. 2012; Vaze et al. 2010; Brigode et al. 2013; Todorovic & Plavsic, 2015). Периоди калибрације и евалуације за оба теста су приказан у табели 3.

Табела 3. Периоди калибрације и евалуације за *SST* и *DSST* и годишње падавине за сваки период.

Table 3. Calibration and evaluation periods for *SST* and *DSST*, along with mean annual precipitation depths over each period.

SST		DSST	
Калибрација	Евалуација	Калибрација	Евалуација
1980 – 1985 (790 mm)	2001-2006 (790 mm)	1974 – 1979 (886.4 mm)	1989 – 1994 (647.5 mm)

У циљу приказа квалитета дистрибуираног модела, резултати тестова су поређени са резултатима модела са хомогеним параметрима. И у моделу са хомогеним параметрима је вертикални водни биланс рачунат независно за сваку висинску зону: улазни подаци (падавине, температуре, *PIET*) су кориговани, док су параметри исти за све зоне. Опсежи параметара су исти у обе верзије модела. Ефикасност модела је квантификована вредностима *KGE* и релативне пристрасности.

3 Резултати

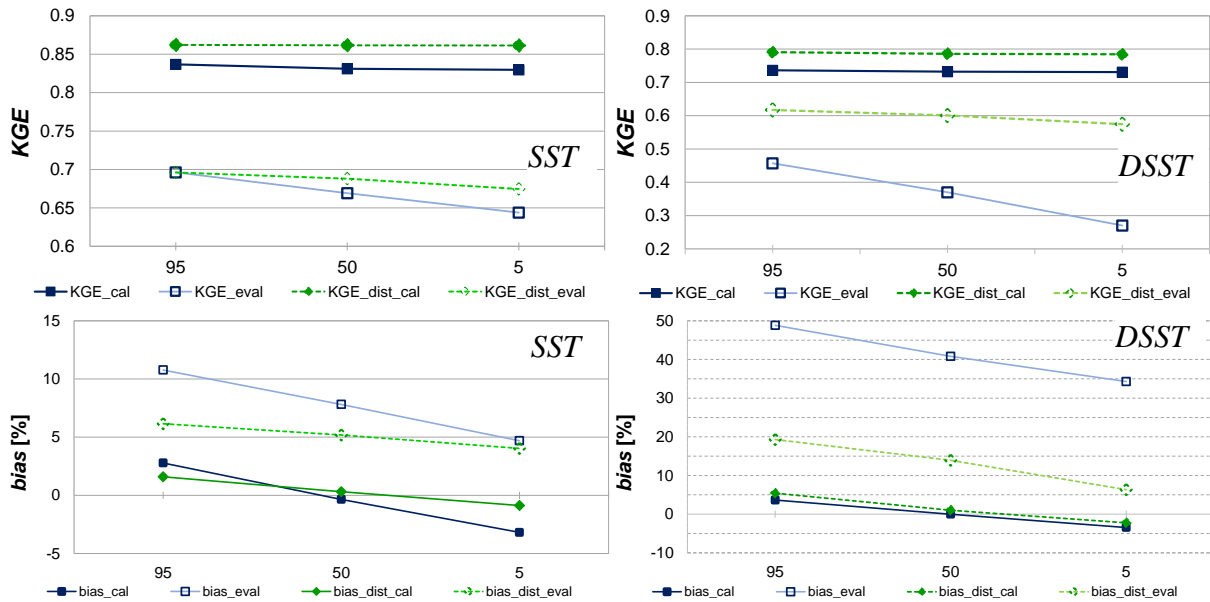
Резултати тестова *SST* и *DSST* за обе верзије модела приказани су на Слици 5. Симулације су вршене са 100 оптимизованих скупова параметара, па су на слици приказане само вредности 95-тог, 50-тог (медијана) и 5-тог перцентила ансамбла.

Вредности *KGE* су релативно високе у калибрационим периодима, с обзиром на то да су коришћени дневни подаци (Langsholt et al., 2013; Todorović & Plavšić, 2014; Todorovic & Plavsic, 2015). Дистрибуирана верзија модела резултује нешто већим вредностима *KGE* у периодаима калибрације, као и у евалуационим периодима. Разлика између дистрибуираног и модела са хомогеним параметрима је посебно изражена у периоду евалуације *DSS* теста, где је ефикасност модела са хомогеним параметрима драстично опала, а ефикасност дистрибуираног модела задовољавајућа.

Релативна пристрасност у калибрационим периодима веома мало одступа од нуле, што показује способност модела да репродукује водни биланс. Међутим, у периодима евалуације постоји нешто већа пристрасност, која је посебно изражена у *DSS* тесту. Овакви резултати су у складу са претходним истраживањима (нпр. Seibert, 2003; Vaze et al., 2010; Li et al., 2012; Brigode et al. 2013). Међутим, у оба теста пристрасност дистрибуираног модела током евалуационих периода је знатно мања у односу на модел са хомогеним параметрима, и може се сматрати прихватљивом (Moriasi et al., 2007).

На слици 6 су приказане простроне расподеле оптимизованих вредности дебљине потповршинског слоја земљишта и максималне вредности *LAI* (LAI_{max}), као и расподеле

почетно задатог поља ових параметара. Расподеле оптимизованих параметара могу знатно да одступају од почетних расподела, као и да се међусобно разликују.



Слика 5. Резултати *SST* (лево) и *DSST* (десно): вредности критеријумске функције *KGE* (горе) и релативне пристрасности изражене у процентима (доле).

Figure 5. The results of the *SST* (left panels) and *DSST* (right panels): *KGE* efficiency (top panels) and relative bias in per-cent (bottom panels).

4 Закључна разматрања

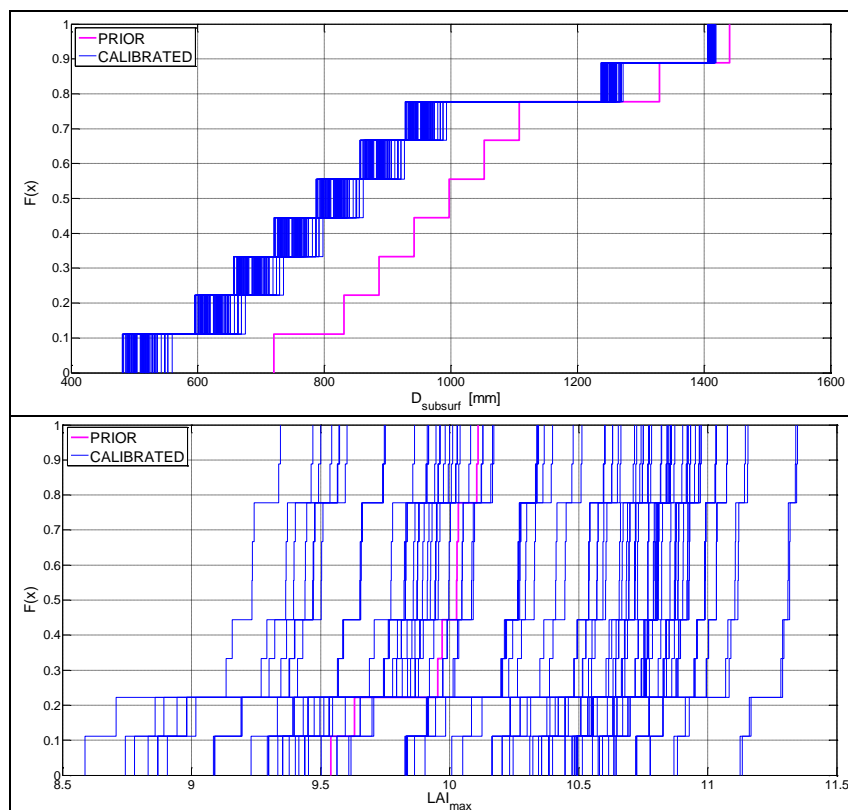
Иако дистрибуирани хидролошки модели препознају хетерогеност карактеристика слива и метеоролошких величина, нису нашли ширу примену у хидролошкој пракси због захтеваних рачунарских ресурса и комплексности њихове калибрације услед великог броја параметара које је потребно оптимизовати. Како би се број слободних параметара модела смањило, примењују се методе регуларизације. У овом раду је приказана савремена метода регуларизације која се базира на само једном супер-параметру за сваки прострно расподељени параметар, и која не захтева увођење додатних ограничења за параметре. На овај начин, димензионалност оптимизационог проблема дистрибуираних и модела са хомогеним параметрима је иста. Иако веома једноставна, приказана метода регуларизације резултује великом флексибилношћу просторних расподела параметара.

Приказана метода регуларизације је примењена за калибрацију дистрибуиране верзије хидролошког модела *Catch*. Модел је примењен за симулацију отицаја са слива реке Колубаре узводно од водомерне станице Словац. Слив је подељен на висинске зоне приближно истик распона, при чему свака зона има сопствени скуп параметара и улазне податке. Модел има 24 параметра, међутим само параметри који су везани за тип вегетације, намену земљишта или карактеристике за које је показано да се мењају

са надморском висином су просторно расподељени. Модел је калибрисан применом оптимизационог алгоритма AMALGAM, према критеријумској функцији *KGE*. Просторне расподеле оптимизованих параметара потврђују флексибилност коју омогућава приказана метода регуларизације.

Калибрисан дистрибуирани модел је тестиран (*SS* и *DSS* тестови) и упоређен са моделом са хомогеним параметрима. Резултати тестова указују на предности примене дистрибуираног модела, која се пре свега огледа у малој пристрасности чак и током евалуационог периода *DSS* теста.

Иако ова метода регуларизације и резултати тестова иду у прилог примени дистрибуираних модела, њихова примена остаје ограничена расположивим подацима, с обзиром да финија просторна резолуција хидролошких јединица треба да буде пропраћена финијом временском резолуцијом улазних података.



Слика 6. Просторна расподела дебљине потповршинског слоја земљишта (горе) и максималне вредности *LAI* (доле).

Figure 6. Spatial distribution of thickness of the subsurface soil layer (top panel) and maximum *LAI* value (bottom panel).

Захвалница

Истраживање приказано у овом раду подржано је од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја (пројекти TP37010 и TP37005). Коришћени подаци добијени су од Републичког хидрометеоролошког завода Србије.

Литература

1. Ajami, N. K., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 112–135.
2. Anderson, E. (2006). Snow Accumulation and Ablation Model – SNOW-17. Retrieved from http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/22snow17.pdf
3. Bardossy, A., & Das, T. (2008). Influence of rainfall observation network on model calibration and application. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 77–89.
4. Beven, K. (2001). *Rainfall-Runoff Modelling - The Primer*. West Sussex: John Wiley & Sons.
5. Beven, K. (2002). Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes*, 16(2), 189–206.
6. Blasone, R.-S. (2007). *Parameter Estimation and Uncertainty Assessment in Hydrological Modelling*. Technical University of Denmark.
7. Blasone, R.-S., Madsen, H., & Rosbjerg, D. (2007). Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques. *Nordic Hydrology*, 38(4-5), 451.
8. Brigode, P., Oudin, L., & Perrin, C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *Journal of Hydrology*, 476, 410–425.
9. Dimitrijević, M., Karamata, S., Sikošek, B., & Veselinović, D. (1975). *Osnovna Geološka karta 1:100000*. Beograd.
10. Djorković, M. (1984). Određivanje hidrološke grupe zemljišta pri definisanju oticanja u metodi SCS. *Vodoprivreda*, 87(1), 57–60.
11. Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80–91.
12. Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evaporation. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Division, J.o.H.* (pp. 107–120).
13. Han, X., & Liu, J. (2015). Investigating thickness and physical properties of forest soil along headwater hillslopes by hole drilling method. In *Geophysical Research Abstracts* (pp. Vol. 17, EGU2015–4350). Vienna: EGU. Retrieved from <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-4350.pdf>
14. He, Z. H., Parajka, J., Tian, F. Q., & Blöschl, G. (2014). Estimating degree-day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4773–4789.
15. Hock, R. (2003). Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282(1-4), 104–115.
16. Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2012). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 418-419, 61–77.
17. Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences*, 31(1), 13–24.
18. Langsholt, E., Lawrence, D., Wong, W. K., Andjelic, M., Ivkovic, M., & Vujadinovic, M. (2013). Effects of climate change in the Kolubara and Toplica catchments, Serbia. Oslo, Norway.
19. Li, C. Z., Zhang, L., Wang, H., Zhang, Y. Q., Yu, F. L., & Yan, D. H. (2012). The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1239–1254.
20. Loukas, A., Vasiliades, L., & Dalezios, N. R. (2002). Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(2), 211–228. doi:10.5194/hess-6-211-2002

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

21. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
22. Pokhrel, P., & Gupta, H. V. (2010). On the use of spatial regularization strategies to improve calibration of distributed watershed models. *Water Resources Research*, 46(1), 1–17.
23. Pokhrel, P., Yilmaz, K. K., & Gupta, H. V. (2012). Multiple-criteria calibration of a distributed watershed model using spatial regularization and response signatures. *Journal of Hydrology*, 418–419, 49–60.
24. Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Science*, 4(2), 215–224.
25. Seibert, J. (2003). Reliability of Model Predictions Outside Calibration Conditions. *Nordic Hydrology*, 34(5), 477–492.
26. Todorovic, A., & Plavšić, J. (2015). The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *Journal of Water and Climate Change*. doi:10.2166/wcc.2015.086
27. Todorović, A., & Plavšić, J. (2014). Mogućnost primene modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije. *Vodoprivreda*, 46(1-6), 117–128.
28. Tromp-Van Meerveld, H. J., & McDonnell, J. J. (2006). Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research*, 42(2), 1–11.
29. Vasilić, Ž., Stanić, M., & Plavšić, J. (2012). Razvoj distribuiranog hidrološkog modela 3Dnet-Catch. In *Zbornik radova sa 16. naučnog savetovanja SDHI i SDH* (pp. 1–11). Građevinski fakultet u Beogradu.
30. Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J.-M., Teng, J., & Viney, N. R. (2011). Conceptual Rainfall–Runoff Model Performance with Different Spatial Rainfall Inputs. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 1100–1112.
31. Vaze, J., Post, D. a., Chiew, F. H. S., Perraud, J.-M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 447–457.
32. Vivoni, E. R., Entekhabi, D., Bras, R. L., & Ivanov, V. Y. (2007). Controls on runoff generation and scale-dependence in a distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1683–1701.
33. Vrugt, J. A., & Robinson, B. A. (2007). Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 104, pp. 708–11).
34. Vrugt, J. A., Robinson, B. A., & Hyman, J. M. (2009). Self-Adaptive Multimethod Search for Global Optimization in Real-Parameter Spaces. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 243–259.
35. Yilmaz, K. K., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44(9), W09417, 1–18.
36. Yilmaz, K. K., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2010). Model Calibration in Watershed Hydrology. In B. Sivakumar & R. Berndtsson (Eds.), *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting* (pp. 53–105). Singapore: World Scientific Publishing.

Metod distribuiranih brzina za određivanje vremena kašnjenja sintetičkog jediničnog hidrograma

Nikola Zlatanović¹

APSTRAKT: Pri proračunu hidrograma velikih voda na neizučeni slivovima, jedna od najčešćih metoda za određivanje transformacije efektivnih padavina u izlazni hidrogram je primena sintetičkog jediničnog hidrograma. Vreme kašnjenja predstavlja jedan od ključnih parametara pri definisanju sintetičkog jediničnog hidrograma, i najčešće se procenjuje primenom empirijskih formula koje uzimaju u obzir fizičke karakteristike najdužeg toka u slivu (npr. dužina, pad, itd). U ovom radu, primenjen je pristup korišćenja osnovnih hidrauličkih pretpostavki za procenu srednjih brzina toka širom slivnog područja na osnovu kojih se računa vreme putovanja do izlaznog profila. Tečenje u svakoj diskretizovanoj jedinici je klasifikovano u jedno od tri vrste tečenja: ravansko tečenje, plitko koncentrovano tečenje i tečenje u otvorenim tokovima. Za svaku od navedenih vrsta tečenja su primenjene odgovarajuće pretpostavke i proračuni za dobijanje srednje brzine tečenja, kao i vremena putovanja. Na ovaj način sračunata vremena kašnjenja korišćena su za proračun maksimalnih proticaja na 20 slivova u Srbiji. Ovi rezultati upoređeni su sa rezultatima istog proračuna korišćenjem opšteprihvaćenih empirijskih zavisnosti, kao i sa rezultatima dobijenim na osnovu statističke obrade maksimalnih godišnjih proticaja na datim slivovima. Rezultati pokazuju značajno smanjenje pokazatelja odstupanja RMSE (koren srednje kvadratne greške) primenom predložene metodologije, od skoro tri puta za povratni period od 20 godina do skoro dva puta za povratni period od 100 godina.

Ključne reči: jedinični hidrogram, vreme kašnjenja, neizučeni slivovi

Distributed velocity method for estimating synthetic unit hydrograph lag time

ABSTRACT: The synthetic unit hydrograph method is one of the most popular methods for transforming effective rainfall into runoff in ungauged catchments. Hydrograph lag time is one of the key parameters in the unit hydrograph method, and is most often estimated using empirical formulas that take into account physical characteristics of the longest flow path (e.g. length, slope, etc.). The approach taken in this paper is to estimate the average velocities throughout the catchment using basic hydraulic assumptions, and then calculate the time to outlet. Flow is classified into three categories: sheet flow, shallow concentrated flow and flow in open channels, each with its characteristic assumptions and parameters. This method was used to calculate peak runoff in 20 catchments throughout Serbia, and the results were then compared to more traditional methods for lag time estimation, as well as peak runoff obtained via statistical analysis. The results show a significant reduction of the RMSE when using the proposed methodology, from almost 3 times for the 20-year return period, to almost 2 times for the 100-year return period.

Key words: unit hydrograph, lag time, ungauged catchments

¹ Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Zavod za zaštitu od bujica i erozije, Beograd, Srbija

1 Uvod

Pri proračunu hidrograma velikih voda na neizučnim slivovima, jedna od najčešćih metoda za određivanje transformacije efektivnih padavina u izlazni hidrogram je primena sintetičkog jediničnog hidrograma. Vreme kašnjenja predstavlja jedan od ključnih parametara pri definisanju sintetičkog jediničnog hidrograma, i najčešće se procenjuje primenom empirijskih formula koje uzimaju u obzir fizičke karakteristike najdužeg toka u slivu (npr. dužina, pad, itd).

U ovom radu, primenjen je pristup korišćenja osnovnih hidrauličkih pretpostavki za procenu srednjih brzina toka širom slivnog područja na osnovu kojih se računa vreme putovanja do izlaznog profila. Tečenje u svakoj diskretizovanoj jedinici je klasifikovano u jedno od tri vrste tečenja: ravansko tečenje, plitko koncentrovano tečenje i tečenje u otvorenim tokovima. Za svaku od navedenih vrsta tečenja su primenjene odgovarajuće pretpostavke i proračuni za dobijanje srednje brzine tečenja, kao i vremena putovanja. Na ovaj način sračunata vremena kašnjenja korišćena su za proračun maksimalnih proticaja na 20 slivova u Srbiji.

2 Proračun vršne ordinate hidrograma velikih voda

Proračun gubitaka, odnosno efektivnih padavina, vršen je SCS metodom. Ovu metodu je razvio SCS (Soil Conservation Service, danas NRCS - National Resources Conservation Service) kao proceduru za računanje oticaja u malim neizučnim poljoprivrednim slivovima [7] ali je od tada postala jedna od najpopularnijih metoda za proračun površinskog oticaja za male i srednje slivove.

Broj krive oticaja CN (sastavni deo SCS metode za određivanje efektivnih padavina) određivan je na osnovu hidrološke grupe zemljišta, zemljišnog pokrivača, načina obrade zemljišta i hidroloških uslova u slivu. Hidrološke grupe zemljišta određene su na osnovu Pedološke karte Republike Srbije razmere 1:50.000 (Institut za proučavanje zemljišta Topčider - Beograd), odnosno Pedološke karte Federativne Narodne Republike Jugoslavije razmere 1:1.000.000 (Jugoslovensko društvo za proučavanje zemljišta, 1959), dok je za određivanje zemljišnog pokrivača korišćen CORINE Land Cover 2006 [13].

Transformacija efektivnih padavina u hidrogram direktnog oticaja je simuliran primenom modifikovanog SCS jediničnog hidrograma koju su predložili Brajković i Jovanović [1] na osnovu velikog broja osmotrenih slivova u Jugoslaviji. Vreme kašnjenja jediničnog hidrograma je definisano sledećim izrazima:

$$t_{lag} = a\Delta t + t_0 \quad (1)$$

$$t_0 = 1.06 \left(\frac{L}{I_{ur}} \right)^{0.47} \quad (2)$$

gde su: Δt - vreme trajanja kišne epizode, a - parametar koji zavisi od površine sliva, t_0 - parametar koji zavisi od fizičkih karakteristika sliva, L - najveća dužina toka (u km), I_{ur} - uravnati pad toka (u procentima).

Maksimalna ordinata hidrograma (izražena u m³/s) se računa kao:

$$Q_{\max} = \frac{2 \cdot A \cdot P_e}{T_b \cdot 60} \cdot 1000 \quad (3)$$

gde su: A - površina sliva (u km²), P_e - efektivne padavine (u mm) i T_b - baza hidrograma tj. vreme od početka do kraja hidrograma direktnog oticaja (u min). Baza hidrograma je suma vremena podizanja hidrograma T_p i vremena opadanja hidrograma T_r , čiji se odnos, $K=T_r/T_p$, smatra funkcijom od ukupne površine sliva A [3].

3 Raspoloživi podaci

Od ukupnih 28 hidroloških stanica Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije koje imaju slivnu površinu manju od 500 km², ukupno 20 stanica je odabrano koje zadovoljavaju sledeće kriterijume: 1) da ne postoje veće akumulacije u slivu, ili duže deonice nasipa koje "odsecaju" veće slivne površine, 2) da topografska vododelnica odgovara stvarnoj vododelnici (naročito u karstnim predelima), 3) da postoji dovoljno dugačak niz podataka maksimalnih godišnjih proticaja (minimalno 30 godina) i 4) da u slivu ne postoje znatne urbane površine koje su mogle značajno uticati na promenu oticaja tokom perioda osmatranja. Primeri stanica koje nisu razmatrane uključuju stanicu Svođe na reci Vlasini i Stapani na reci Đetinji koje se nalaze nizvodno od akumulacija.

Slivovi na kojima su vršene analize u ovom radu su: Jasenica (hs Donja Šatornja), Crnajka (hs Crnajka), Kozarska (hs Tupalovce), Lukovska (hs Merčez), Lopatnica (hs Bogutovac), Jablanica (hs Sedlari), Gradac (hs Degurić), Toplica (hs Magovo), Obnica (hs Belo Polje), Kutinska (hs Radikina Bara), Tamnava (hs Koceljeva), Dičina (hs Brđani), Rasina (hs Brus), Visočica (hs Bračevci), Bjelica (hs Guča), Lužnica (hs Svođe), Kolubara (hs Valjevo), Kosanica (hs Visoka), Resava (hs Manastir Manasija), Visočica (hs Visočka Ržana) i Moravica (hs Ivanjica).

4 Statistička obrada velikih voda

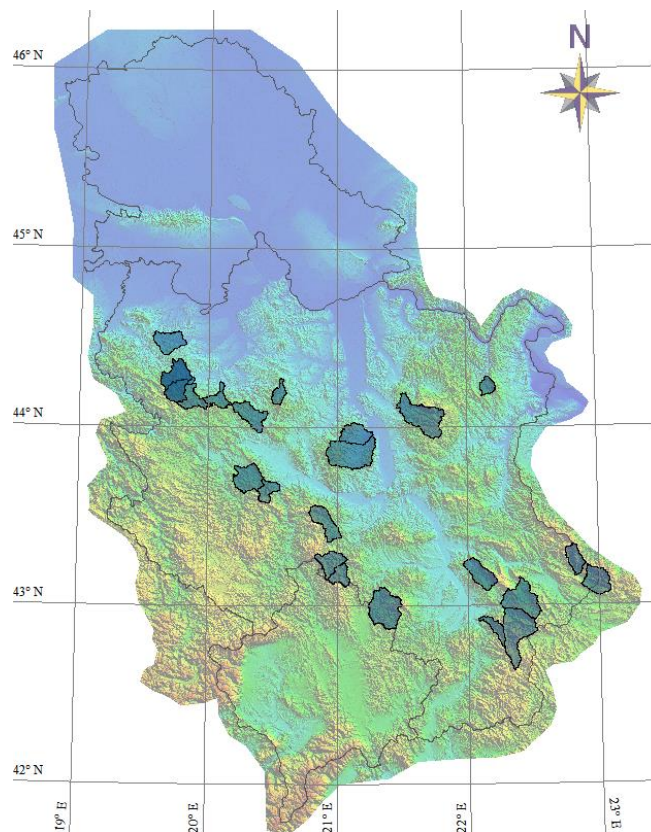
Maksimalni proticaji dobijeni su na osnovu statističke obrade merenih maksimalnih godišnjih proticaja na hidrološkim stanicama kojima upravlja Republički hidrometeorološki zavod Srbije, za ukupan period rada stanica zaključno sa 2011. godinom. Primenjena je opšta raspodela ekstremnih vrednosti (GEV). čija je kumulativna raspodela verovatnoće (funkcija raspodele) data kao:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (\text{za } \kappa \neq 0) \quad (4)$$

gde su: κ - parametar oblika, α - parametar razmere i ξ - parametar lokacije. Parametri raspodele određivani su primenom metode L-momenata [10].

5 Digitalni model terena

Korišćen je SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) digitalni model terena (DEM) [9] kao podloga za dalje analize. Rezolucija digitalnog modela terena je 3 lučne sekunde u geografskoj projekciji (WGS84 datum), što iznosi okvirno 90x60 m kada se reprojektuje u Gauss Krigerovu pravougaonu Merkatorovu projekciju koja se koristi u Srbiji. Ovakav raster je dalje interpolacionim metodama doveden do rezolucije od 70x70 m da bi se obezbedio kvadratni oblik ćelija sa minimalnim gubitkom nivoa detaljnosti. Kako je izvorni SRTM DEM (bez dodatnih korekcija) veoma ograničen za korišćenje u hidrološkim analizama, niz koraka za predprocesiranje terena je primenjen [12] da bi se obezbedio "hidrološki korektan" model terena. Nakon tretiranja depresija i ravnih površina, sračunati su rasteri pravaca tečenja (flow directions) i površina sliva (flow accumulations) primenom metode "Deterministic 8" [8].



Slika 1. Obradeni SRTM DEM za teritoriju Srbije sa prikazom razmatranih slivova
Figure 1. Pre-processed SRTM DEM for Serbia with outlined study basins

6 Metod distribuiranih brzina

Osnovna zamisao metoda distribuiranih brzina za određivanje vremena kašnjenja sintetičkog jediničnog hidrograma je da se procene srednje brzine tečenja duž svih tokova u slivu, odnosno u svakoj ćeliji rastera digitalnog modela terena, a da se potom saberu vremena putovanja duž hidraulički najdužeg toka. Deonice tokova su podeljene u tri tipa: ravansko tečenje, plitko koncentrovano tečenje i tečenje u otvorenim tokovima.

6.1 Ravansko tečenje

Ravansko tečenje, ili površinsko tečenje, je definisano kao tečenje preko površi. Najčešće se ostvaruje na najuzvodnijim delovima sliva, pri vododelnici. Kako primenjena rezolucija digitalnog modela terena iznosi 70 m, ravansko tečenje je razmatrano samo u najuzvodnijim ćelijama u slivu.

Pojednostavljen oblik Maningove jednačine je korišćen za proračun vremena putovanja ravanskog tečenja. Ovaj pojednostavljen oblik razvili su Welle i Woodward [11] nakon izučavanja uticaja različitih parametara na rezultate proračuna:

$$v_1 = 0.0233 \frac{(P_2)^{0.5} I^{0.4}}{n^{0.8}} \quad (5)$$

gde su: v_1 - srednja brzina ravanskog tečenja (u m/s), n - Maningov koeficijent za ravansko tečenje, P_2 - 24-časovne padavine povratnog perioda od dve godine (u mm), procenjen okvirno 30 mm za teritoriju Srbije, I - podužni pad površine (u m/m).

6.2 Plitko koncentrovano tečenje

Ravansko tečenje postepeno prelazi u plitko koncentrovano tečenje, sabirajući se u potočićima, brazdama i jarugama, najčešće nakon manje od 50 m [5] [6]. Smatra se da se plitko koncentrovano tečenje ne odvija u jasno definisanom koritu. Smatra se da srednja brzina zavisi od podužnog pada toka i vrste podloge [4]. Korišćena je sledeća zavisnost:

$$v_2 = K \cdot I^{0.5} \quad (6)$$

gde je: v_2 - srednja brzina plitko koncentrovanog toka (u m/s), K - koeficijent koji zavisi od podloge (zemljišnog pokrivača), koji varira od 0,9 za guste šume do 6 za urbana područja, I - podužni pad (u m/m).

6.3 Tečenje u otvorenim tokovima

Nakon plitkog koncentrovanog tečenja, obrazuje se tečenje u otvorenim tokovima. Smatra se da tečenje u otvorenim tokovima nastaje kada uzvodna slivna površina dostigne 0,1 km² (odnosno 20 uzvodnih ćelija u ovom slučaju), što se grubo poklapa sa početkom ucrtanih tokova na topografskim kartama razmere 1:25.000.

Maningova jednačina za računanje srednje brzine tečenja je:

$$v_3 = \frac{1}{n} R^{(2/3)} \sqrt{I} \quad (7)$$

gde su: v_3 - brzina tečenja u otvorenom toku (u m/s), n - Maningov koeficijent (u m^{-1/3}s), R - hidraulički radijus (u metrima), I - podužni pad toka (u m/m).

Vrednost Maningovog koeficijenta n je procenjena primenom Jarrett-ove formule [2]:

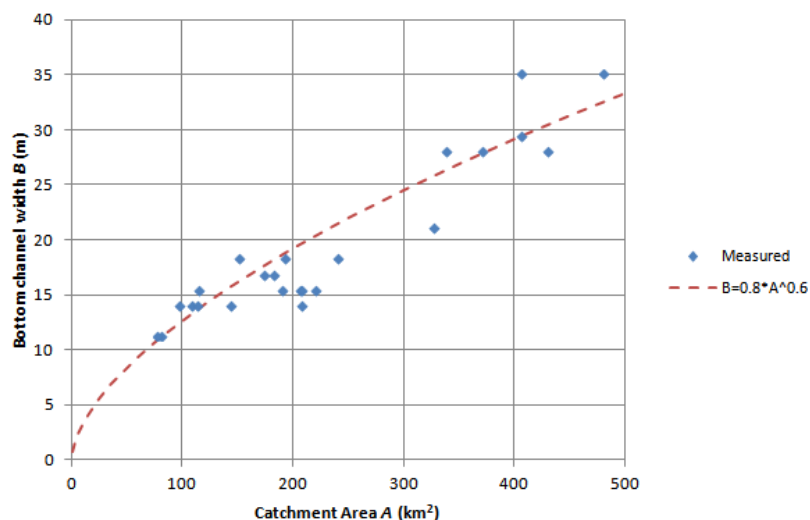
$$n = 0.39 I^{0.38} R^{-0.16} \quad (8)$$

gde je I podužni pad linije energije (aproksimiran podužnim padom korita) a R je hidraulički radijus (u metrima). Hidraulički radijus R je računat pod pretpostavkom trapeznog poprečnog profila.

Širina dna trapeznog korita usvojena je uvođenjem zavisnosti širine dna od pripadajuće uzvodne slivne površine. Za ukupno 21 sliv je na izlaznim profilima (profili hidroloških stanica), izmerena širina korita korišćenjem satelitskih i ortofoto snimaka. Za potrebe procene, usvojeno je da je širina dna jednaka širini korita na ortofoto snimcima. Dobijena zavisnost glasi:

$$B = 0.8A^{0.6} \quad (9)$$

gde je B širina dna korita (u metrima) a A je ukupna uzvodna površina sliva (u km^2). Na slici 2 je prikazan odnos izmerenih širina korita i uzvodnih površina sliva, kao i kriva usvojene zavisnosti.



Slika 2. Zavisnost između širine dna korita B i uzvodne površine sliva A
 Figure 2. Relationship between channel bottom width B and catchment area A

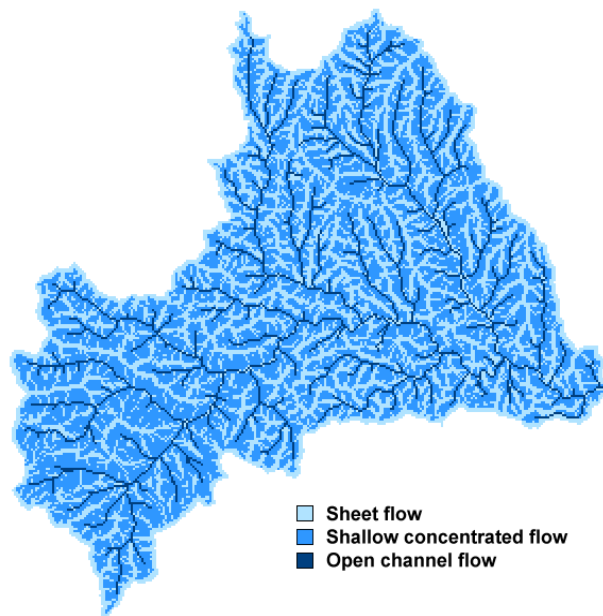
7 Rezultati

Detaljni rezultati primenjene metodologije prvo su prikazani na primeru sliva reke Obnice do hidrološke stanice Belo Polje, a potom sumarno na uporednoj analizi rezultata proračuna velikih voda na ukupno 20 slivova primenom metode distribuiranih brzina i primenom prethodnih empirijskih zavisnosti za proračun vremena podizanja hidrograma.

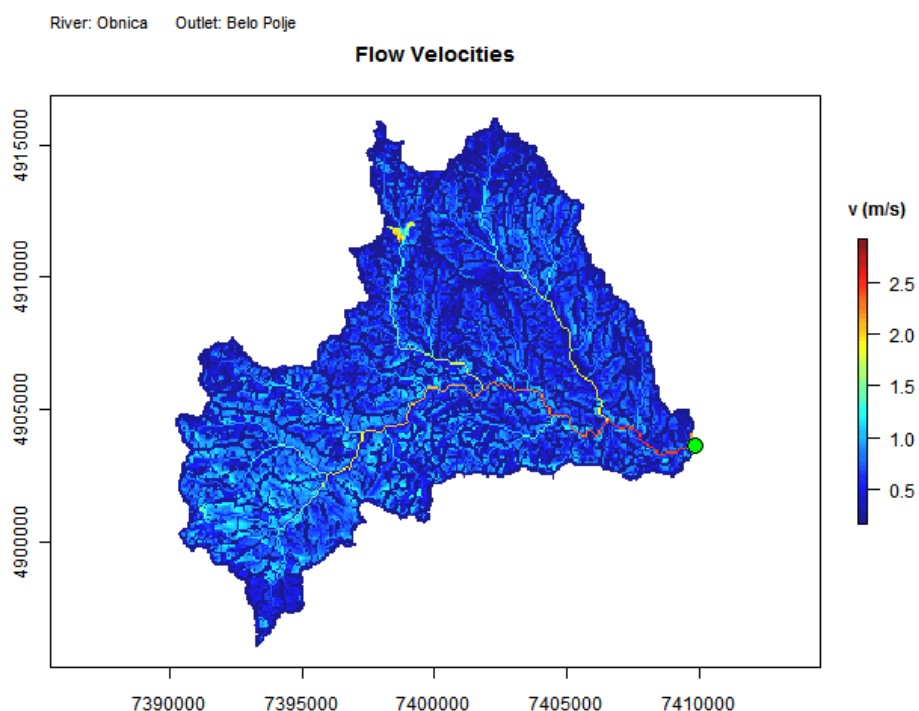
Rezultat klasifikacije tokova prema vrsti tečenja je raster čija svaka ćelija uzima vrednost jedne od tri vrste tečenja: ravansko tečenje, plitko koncentrovano tečenje ili tečenje u otvorenim tokovima. Na slici 3 prikazan je rezultujući raster za sliv reke Obnice. U najuzvodnijim ćelijama u slivu, neposredno uz vododelnice podslivova, dominira ravansko tečenje i označene su svetlo plavom bojom. Čelije gde se smatra da je dominantno tečenje

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

plitko koncentrovano je označeno plavom bojom, dok su ćelije za koje se smatra da označavaju već formirane potoke i reke označene tamno plavom bojom.



Slika 3. Podela vrste tečenja u slivu reke Obnice
Figure 3. Flow types within the Obnica River catchment

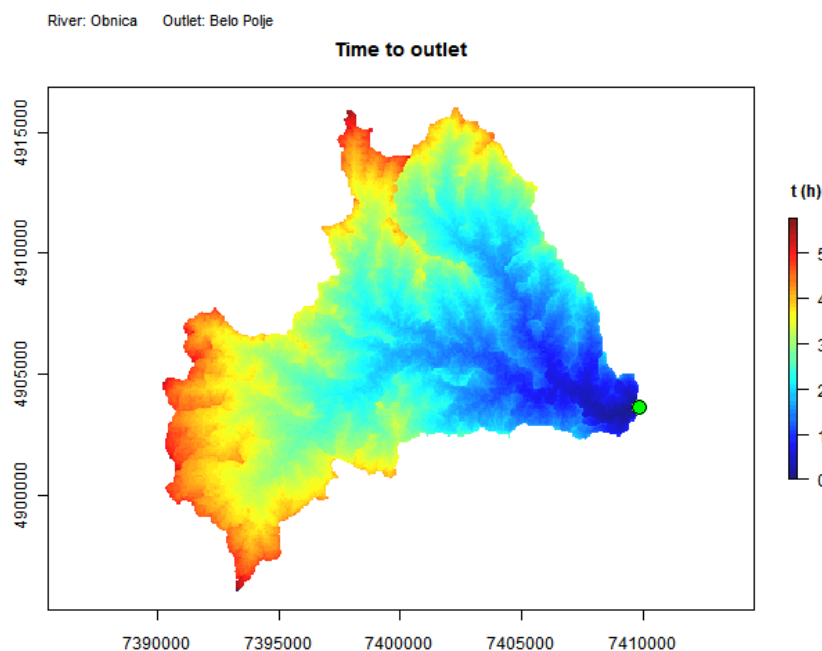


Slika 4. Sračunati raster srednje brzine toka za reku Obnicu
Figure 4. Example of computed flow velocities for Obnica River catchment

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Raster srednje brzine toka se računa u svakoj ćeliji slivne površine na osnovu usvojene vrste tečenja, podužnog pada i usvojene hrapavosti (izraženu preko Manningovog koeficijenta n). Dat je primer za reku Obnicu na slici 4. Na karti se može videti da se srednje brzine toka povećavaju sa porastom pripadajuće uzvodne površine sliva. Takođe se može videti uticaj zemljišnog pokrivača na srednje brzine; zapadni deo sliva koji je pretežno pokriven povljoprivrednim površinama daje veće brzine od gusto pošumljenih predela. U urbanim sredinama, kao npr. Kamenici u severnom delu sliva, dobijaju se znatno veće brzine toka.

Vremena putovanja se takođe računaju za svaku ćeliju rastera, što kao rezultat daje raster izohrona, koji predstavlja prosečno vreme za koje je potrebno da iz svake ćelije tok stigne do izlaznog profila (slika 5). Na karti se jasno vidi da će tokovi u dvema glavnim dolinama doprineti oticaju u toku prva dva sata (tamno plava boja), dok će daljim delovima sliva na istoku i severu biti potrebno bar 4 sata (označeno narandžastom i crvenom bojom).

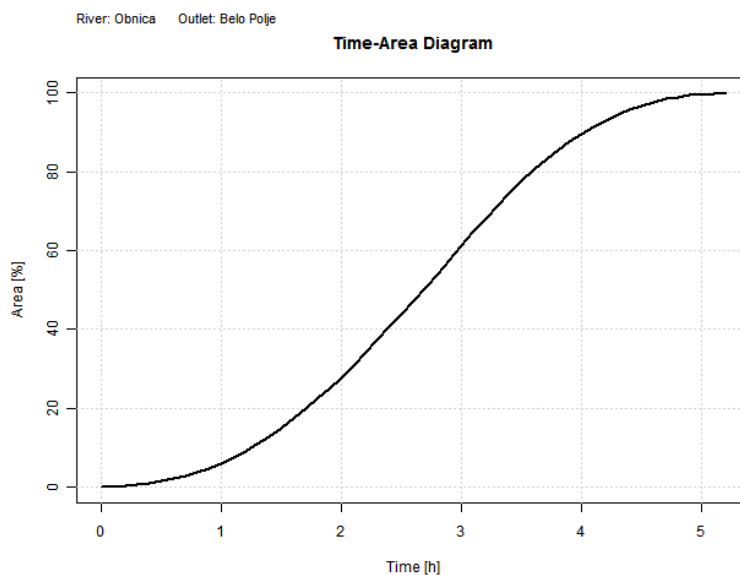


Slika 5. Raster izohrona za sliv reke Obnice

Figure 5. Example of calculated flow time to outlet for Obnica River catchment

Sumarna linija ukupnog oticaja, odnosno dijagram "površina-vreme putovanja", se formira sabiranjem histograma vremena putovanja. Takav dijagram prikazan je za reku Obnicu na slici 6, gde se može videti da 60% sliva učestvuje u ukupnom oticaju za nešto manje od 3 časa.

Rezultati dobijeni statističkom analizom su upoređivani sa rezultatima dobijenim modeliranjem padavina i oticaja, kako korišćenjem tradicionalne metode proračuna vremena kašnjenja tako i primenom metoda distribuiranih brzina. Relativni reziduali RR te dve metode, u poređenju sa maksimalnim proticajima dobijenim statističkom analizom, sračunati su za svaki od razmatranih slivova i povratni period, kao pokazatelj relativnog odstupanja rezultata, na sledeći način:



Slika 6. Dijagram sumarne linije oticaja za reku Obnicu
 Figure 6. Example of time-area diagram for Obnica River catchment

$$RR(i, T) = \frac{Q_{RR}(i, T) - Q_{FA}(i, T)}{Q_{FA}(i, T)} \quad (10)$$

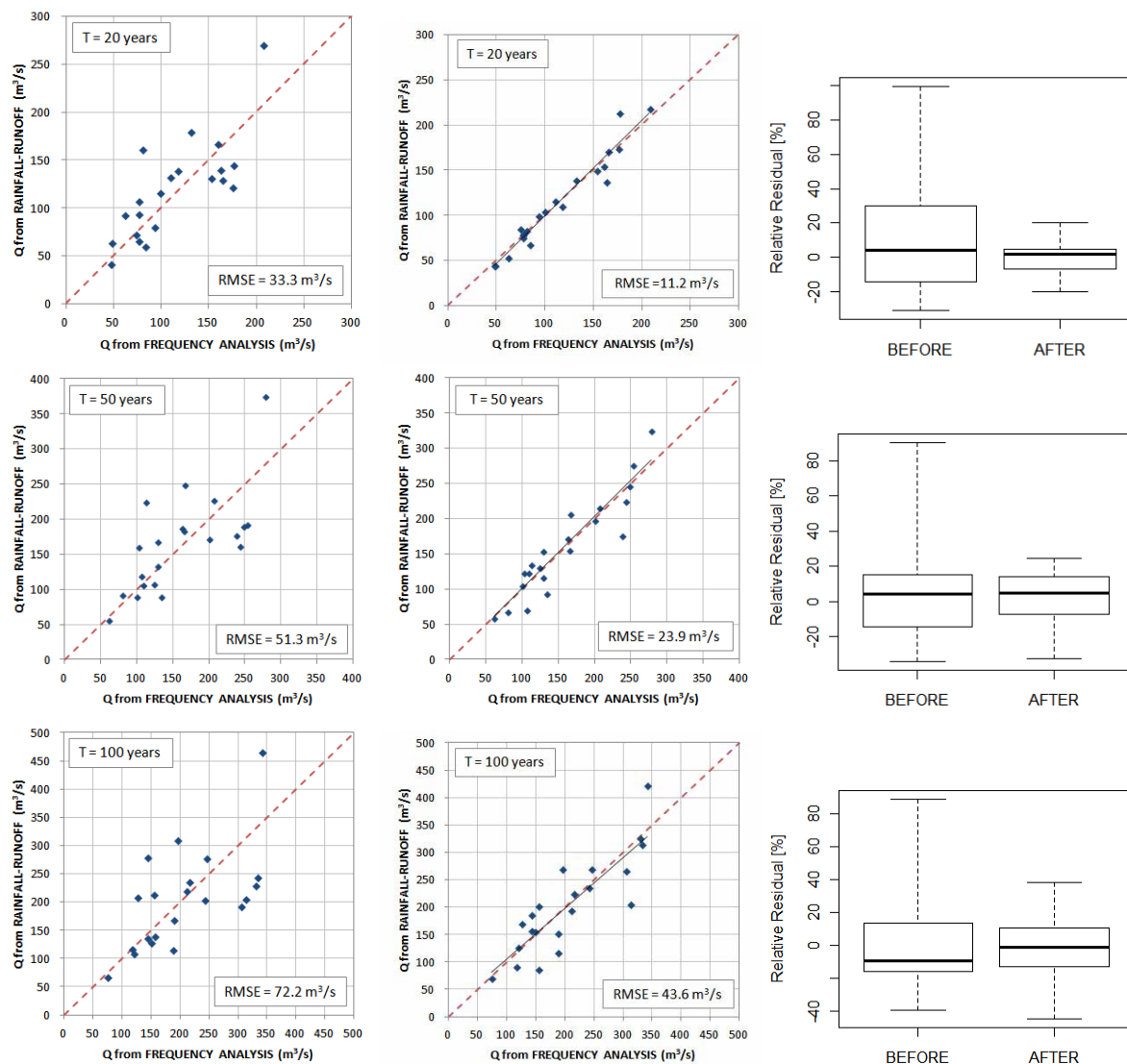
gde su: $Q_{RR}(i, T)$ - proticaj sračunat analizom padavina i oticaja, za sliv i i povratni period T ,
 $Q_{FA}(i, T)$ - proticaj sračunat statističkom analizom, za sliv i i povratni period T

Na slici 7 su prikazani uporedni grafici ovih metoda, za povratne periode od 20,50 i 100 godina. U levoj koloni je dat uporedni prikaz sračunatih vršnih proticaja metodom padavine-oticaaj, koristeći tradicionalne metode proračuna vremena kašnjenja, i maksimalnih godišnjih proticaja koji su rezultat statističke analize. U srednjoj koloni su takođe upoređeni rezultati metode padavine-oticaaj, ali koristeći metod distribuiranih brzina. Idealno poklapanje "1-1" sa statističkim vrednostima označeno je crvenom linijom. U desnoj koloni je prikazan box-plot rezultata pre i nakon primene metoda distribuiranih brzina.

8 Zaključak

Razvojem i primenom metoda distribuiranih brzina, izvršen je pokušaj poboljšanja postojeće metodologije za proračun vremena podizanja hidrograma koja se najčešće koristi u praksi. Rezultati pokazuju da je u tome postignut značajan uspeh, u vidu poboljšanja slaganja sračunatih vršnih ordinata hidrograma velikih voda sa vrednostima maksimalnih godišnjih proticaja dobijenim statističkom analizom.

Najznačajniji uspeh postignut je pri proračunu velikih voda povratnog perioda od 20 godina, gde je primenom prikazane metodologija smanjen pokazatelj odstupanja RMSE (koren srednje kvadratne greške) sa 33,3 m³/s na 11,2 m³/s, odnosno skoro tri puta (66%). Slični rezultati dobijeni su i za povratni period od 50 godina, sa smanjenjem RMSE od dva puta (53%), dok je za povratni period od 100 godina smanjenje nešto manje i iznosi 40%.



Slika 7. Uporedni prikaz rezultata sračunatih vršnih proticaja povratnih perioda od 20, 50 i 100 godina i proticaja dobijenih statističkom analizom, korišćenjem tradicionalnog načina određivanja vremena podizanja hidrograma (pre / leva kolona) i primenom metoda distribuiranih brzina (posle / srednja kolona)

Figure 7. Comparison of calculated peak discharges and statistical design discharges, using traditional lag time estimation (before) and using distributed velocity method (after), for 20, 50 and 100-year return periods

Metod opisan u ovom radu nastoji da nađe primenu u preciznijem određivanju režima velikih voda na neizučnim slivovima, na taj način što uzima u obzir raspored brzina tečenja u vodotocima širom slivne površi, za razliku od metoda koje se najčešće koriste u praksi i zasnivaju se na analizi samo najdužeg toka u slivu. Pored određivanja vremena kašnjenja jediničnog hidrograma, metod se može koristiti i za određivanje nepravilnosti oblika hidrograma koje nastaju usled različitog prostornog rasporeda rečne mreže, kao i hidrauličkih uslova koji vladaju.

Predlog za dalji rad na metodu distribuiranih brzina se zasniva na daljem poređenju sa osmotrenim podacima i ostvarenim vrednostima vremena podizanja hidrograma kao i brzina doticaja u slivu. U ovom radu su rezultati proračuna upoređivani sa rezultatima statističke analize osmotrenih maksimalnih godišnjih proticaja, a sledeći korak bi mogao da uključi korišćenje metoda pri modeliranju oticaja na osnovu padavina i poređenju sa osmotrenim hidrogramima na vodomernim stanicama.

9 Literatura

1. Brajković, M., and Jovanović, S., (1979), *Analysis of watershed parameters applied to computations of maximum discharge using the method of synthetic unit hydrograph*, Proceedings of the International Symposium on specific aspects of hydrological computations for water projects, Gidrometeoizdat, Leningrad.
2. Jarrett, R.D., (1984), *Hydraulics of high-gradient streams*, Journal of Hydraulic Engineering 110 (11), pp. 1519–1539.
3. Jovanović, S., (1989), *Hidrologija*, Građevinski priručnik - tehničar 6, 11–181, IRO Građevinska knjiga, Beograd.
4. Kent, K.M., (1964), *Chapter 15 documentation*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.
5. Kibler, D.F., and Aron, G., (1982), *Estimating basin lag and $T(c)$ in small urban watersheds*, EOS, Transactions, American Geophysical Union, vol. 63, no. 18, abstract #H12-8.
6. McCuen, R.H., and Spiess, J.M., (1995), *Assessment of kinematic wave time of concentration*, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering.
7. National Resources Conservation Service (NRCS), (2002), *National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology*, USDA, Washington, D.C.
8. O'Callaghan, J.F., and Mark, D.M., (1984), *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28, 3, p323-344.
9. Rodriguez E. et al, (2005), *An assessment of the SRTM topographic products (Technical Report JPL D-31639)*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
10. Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula-Georgiou E., (1993), *Frequency Analysis of Extreme Events*, in: *Handbook of Hydrology*, Editor: Maidment David R., McGraw-Hill.
11. Welle, P.J., and D.E. Woodward, (1986), *Time of concentration*, Hydrology, Technical Note No. N4. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, NENTC, Chester, PA.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

12. Zlatanović N., Gavrić S. (2013). *Comparison of an automated and manual method for calculating storm runoff response in ungauged catchments in Serbia*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 61 (3). pp. 195-201. ISSN 0042-790X
13. Zlatanović N., Milovanović I., Čotrić J., (2012), *Application of CORINE Land Cover Dataset for Estimating Runoff from Ungauged Catchments*, 5th Conference on Water, Climate and Environment - BALWOIS 2012

Kalibracija i verifikacija modela oticaja sa urbanih slivova

Borislav Mašić¹
Miloš Stanić²
Jasna Plavšić³

APSTRAKT: Osnovni zadatak rada je utvrđivanje mogućnosti praktične primene softverskog paketa SWMM na modelu kanalizacionog sistema za deo urbanog sliva koji se nalazi na području East Yorcka-Kanada. Na osnovu merenja padavina i oticaja na razmatranom slivu, izvršena je kalibracija modela, optimizacijom određenog broja parametara modela. Za verifikaciju modela su usvojeni parametri koji daju najbolje rezultate simulacije procesa oticaja na predmetnom slivu u toku kalibracije. Ispitano je i nekoliko najčešćih kriterijuma kvaliteta rezultata-srednja (algebarska) greška, koren srednje vrednosti kvadratne greške, koeficijent korelacije i relativna greška maksimalnog protoka i zapremine otekle vode. Ulazni podaci za formiranje modela i rezultati merenja padavina i oticaja za predmetni sliv preuzeti su iz UDM baze podataka.

Ključne reči: EPA SWWM, kalibracija modela, verifikacija modela, urbani sliv

Calibration and verification of stormwater runoff model from urban areas

ABSTRACT: The primary aim of this paper is to validate usage of the software package EPA SWMM by testing it on the existing sewer network model situated in the urban area of East York-Canada. The calibration of the model is conducted based on measurements of rainfall intensity and runoff from the study area. Most sensitive model parameters were optimized and parameter values, which provide the most reliable results of the model runoff process simulation throughout the calibration, are used for verification. Furthermore, the widespread calibration criteria are examined: mean (algebraic) error, root mean square error, correlation coefficient and relative error of maximum flow rate and runoff volume. Input data for establishing the model and results of measurements of rainfall intensity and runoff from the study area, are taken from UDM database.

Keywords: EPA SWWM, model calibration, model verification, urban area

¹Mast. Borislav Mašić, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, boramasic@gmail.com

² Prof.dr Miloš Stanić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Beograd, mstanic@grf.bg.ac.rs

³ Prof.dr Jasna Plavšić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Beograd, jplavsic@grf.bg.ac.rs

1 Uvod

U urbanim područjima, globalna urbanizacija i rast broja stanovnika uzrokovali su promene hidrološkog ciklusa i povećanje procenta nepropusnih površina (parkinzi, kolovozi, krovovi, itd.) pod betonom i asfaltom, čime se oticaj od slične kiše nakon urbanizacije znatno povećao u odnosu na oticaj pre urbanizacije [7]. Kod urbanizovanih slivova, hidrološki i geomorfološki uslovi se menjaju, a režimi tečenja postaju drugačiji, što rezultuje smanjenje retenzionog kapaciteta i količine površinskog oticaja vode u odnosu na prirodne slivne površine. Najčešći efekti urbanizacije sliva na kišni oticaj ogledaju se u sledećem [3]:

- smanjenoj ukupnoj infiltraciji, kao i u smanjenom baznom oticaju;
- smanjenoj transpiraciji (usled smanjenog procenta zelenih površina);
- kraćem zadržavanju manjih količina vode u depresijama terena i barama;
- "oceđivanje" sliva traje kraće nego na prirodnom slivu;
- ranijoj pojavi maksimalnog proticaja na izlivu;
- smanjenom vremenu koncentracije sliva zbog izgradnje kišnih kolektora i regulisanja prirodnih tokova u odnosu na period pre urbanizacije prirodnih slivnih područja.

Generalno, porast zapremine otekle vode sa urbanih slivova veći je u odnosu na prirodne 1.5–2 puta, a vršni proticaj 2-5 puta [2,3]. Na urbanim slivovima intenzitet kiše ima ključni uticaj na vrednost maksimalnog protoka na izlivu, za razliku od prirodnih slivova, gde je ovaj uticaj manje izražen, a kiše koje dovode do značajnog oticaja imaju duže trajanje.

Pored velikog broja modela koji stoje na raspolaganju za simulaciju količine kišnog oticaja na urbanom slivu (HSPF, STORM, HEC-5Q i drugi), svojim kvalitetom, a posebno dostupnošću širokom krugu korisnika ističe se model EPA SWMM, verzija 5.1. Jednostavno grafičko okruženje i mogućnost izbora različitih metoda proračuna za sve faze procesa omogućavaju da se ovaj program može primeniti na urbani sliv bilo koje konfiguracije.

U radu je analizirana mogućnost praktične primene softverskog paketa SWMM na konkretnom primeru modeliranja kanalizacionog sistema za deo urbanog slivakoji se nalazi na području East Yorka-Kanada. Osnovni zadatak rada je podrazumevao kalibraciju modela formiranog u SWMM-u, optimizacijom određenog broja parametara i utvrđivanje osetljivosti kreiranog modela na promenu određenih parametara sistema. Nakon kalibracije modela ciklusa oticaja sa dela sliva East York, izvršena je verifikacija dobijenih parametara modela, a kvalitet rezultata je prikazan u vidu nekoliko kriterijuma za ocenu kvaliteta modela. Na predmetnom slivu postoje mereni podaci (intenzitet kiše i hidrogrami oticaja) za šest kišnih epizoda, od kojih će se tri usvojiti za kalibraciju, a tri za verifikaciju modela. Osnovni cilj rada je ocena uticaja fizičkih parametara modela i različitih metoda proračuna na odgovor sliva.

2 Metodologija

2.1 Opis predmetnog slivnog područja

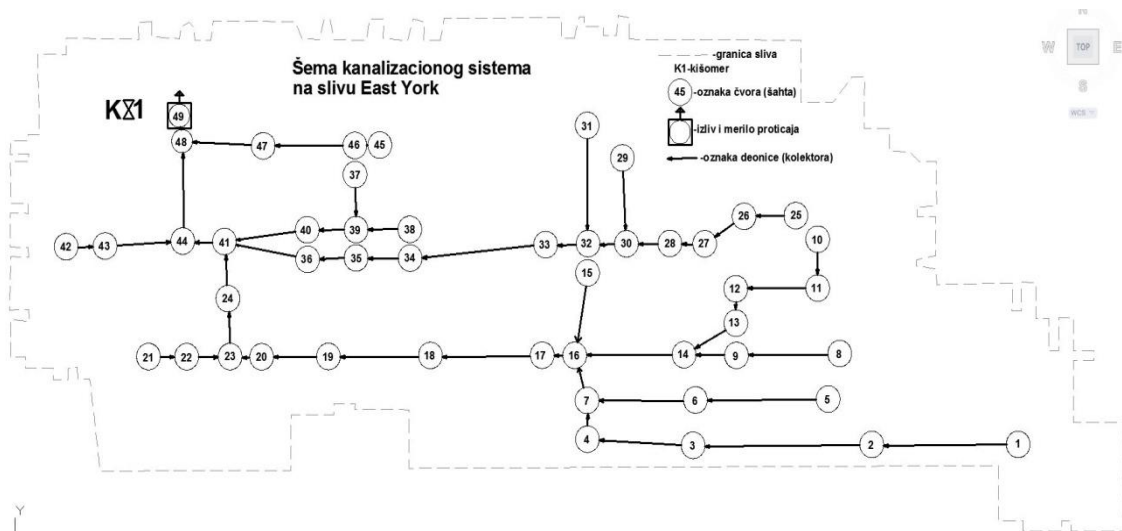
Početkom osamdesetih godina prošlog veka, Institut za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu pristupio je formiranju UDM međunarodne baze podataka o padavinama i oticaju sa urbanih površina iz raznih delova sveta. Iz ove baze podataka, za prikaz modeliranja kišnog

oticaja upotrebom programa SWMM, kao i procesa kalibracije i verifikacije izabran je deo sliva East York, Toronto, Kanada [5].

Urbano slivno područje East York predstavlja gradski sliv lociran približno na 4.4 km severoistočno od centra Toronta. Razmatrano slivno područje u okviru East Yorka je približno pravougaonog oblika, sa padom terena usmereno od najviše kote 133.10 m u severoistočnom delu slivnog područja ka najnižoj koti 118.50 m. Površina slivnog područja iznosi 155 ha i pretežno je stambeno područje (89.1 % stambenih objekata), naseljeno uglavnom kućama. Preostali deo predmetnog sliva čine parkovi i igrališta. Od ukupnih površine predmetnog sliva, 75.7 ha čine nepropusne površine, što odgovara 49 % od ukupne površine sliva.

2.2 Model kanalizacionog sistema na delu sliva East York

Sve atmosferske i sanitarne upotrebljene vode unutar predmetnog slivnog područja odvođe se opštim (zajedničkim) kanalizacionim sistemom do izlivnog šahta (čvor br.49-slika 1). Prema dostupnim podacima, u ovom radu pretpostaviće se da su krovovi svih kuća na predmetnom slivnom području povezani direktno na kanalizacioni sistem [5]. Zbog toga, krovovi su modelirani kao nepropusne površine na slivnom području, iz kojih se kišnica direktno uliva u kolektore. Na slici 1, šematski je prikazan postojeći kanalizacioni sistem na delu sliva East York, sa mestom izliva i meračem protoka. Za prikazanu kanalizacionu mrežu u UDM bazi dati su podaci o dužinama kolektora, uzvodnom i nizvodnom čvoru (šahtu) svakog kolektora, prečniku i podužnom nagibu kolektora. Na predmetnom slivnom području, materijali od kojih su izgrađeni kolektori postojeće kanalizacione mreže su [5]: glazirana keramika (za kolektore prečnika do 600 mm); beton (za preostale prečnike kolektora) i opeka (za dva karakteristična prečnika 1524 mm i 1676 mm). Ukupna dužina kanalizacione mreže iznosi 6,82 km.



Slika 1. Postojeća kanalizaciona mreža na predmetnom slivu
Figure 1. The existing sewer network model in the study area

U UDM bazi ne postoje podaci o kotama dna šahtova, pa je u radu pretpostavljeno da je kota dna izliva na 0 m (kao referentni nivo), da bi se na osnovu podataka o padovima i dužini

pojedinih deonica, došlo do vrednosti kota dna ostalih čvorova mreže. Ovo za posledicu ima nemogućnost obuhvatanja kaskadnih uliva pojedinih deonica u šahtove. Početna dubina vode u čvorovima mreže na početku simulacije usvojena je na 0.0 m. U modelu kanalizacione mreže predmetnog sliva, za tip graničnog uslova na izlivu izabrana je opcija slobodan izliv.

Kako je kanalizacioni sistem opšteg tipa, pored atmosferskih voda, postoji i doticaj sanitarne - upotrebljene vode, pa je u model bilo potrebno uneti i doticaje u beskišnim periodima. Protok u sistemu pri suvom vremenu određen je na osnovu prosečnog dotoka otpadnih voda za predmetno slivno područje:

$$Q_{pros.} = q_{sp.} \cdot F_{sliva} \cdot n = 343 \frac{L}{st.dan} \cdot 1.55 km^2 \cdot 5400 \frac{stan.}{km^2} = 33.3 \frac{L}{s} \quad (1)$$

,gde je: $Q_{pros.}$ -srednja dnevna produkcija otpadnih voda domaćinstava; $q_{sp.}$ -specifična produkcija otpadnih voda (po stanovniku i danu), određena na osnovu podataka o specifičnoj potrošnji vode na teritoriji Kanade za 1999.-tu godinu; F_{sliva} -površina predmetnog slivnog područja; n -gustina naseljenosti gustine naseljenosti na teritoriji East Yorka prema popisu 1999.-te godine.

Prosečna vrednost dotoka pri suvom vremenu za svaki čvor (*Average value*) dobija se tako što se prosečna vrednost za ceo sistem podeli sa brojem čvorova sistema:

$$Avg. Value = \frac{Q_{pros.}}{N} = \frac{33.3 L/s}{49} = 0.68 \frac{L}{s} \sim 1 \frac{L}{s} \quad (2)$$

Zbog nepoznate promene dotoka sanitarnih upotrebljenih voda tokom vremena na posmatranom slivu, za koji se kreira model oticaja, u radu nije uzeta u obzir dnevna neravnomernost upotrebljenih voda.

Za svaki od podslivova na predmetnom slivu, u UDM bazi podataka date su sledeće karakteristike: površina; procenat nepropusnih i propusnih površina; prosečan nagib; pripadajući čvor deonice u koji se izliva površinski oticaj sa svakog od podslivova. Na razmatranom slivnom području usvojeno je da 50 % nepropusnih površina nema depresija i da oticaj i sa propusnih i sa nepropusnih površina svakog podsliva direktno otiče u odgovarajući izliv.

Prilikom kreiranja modela u okviru SWMM, za svaku kišu usvajan je vremenski korak od 1 minuta, iz razloga relativno kratkog trajanja svake od razmatranih kišnih epizoda (najduže trajanje iznosi 202 minuta).

2.3 Podaci o merenim vrednostima padavina i oticaja nadelu sliva East York

Na delu urbanog sliva East York, za koji se kreirao model oticaja, postoji jedan kišomer, sa koga su očitani podaci o visini padavina u pojedinim vremenskim intervalima za 6 kišnih epizoda. Podaci o padavinama za predmetni unosili su se u model kao kumulativna visina kiše (sumarna linija kiše), mereno od početnog trenutka. Sumiranje je vršeno i po vremenu merenom od početka kiše i po visini pale kiše.

Na predmetnom slivu vršeno je i merenje proticaja na izlaznom čvoru mreže (čvor 49-slika 1) za svaku od 6 kišnih epizoda. Za kalibraciju modela su izabrane tri kišne epizode, dok su za verifikaciju modela izabrane preostale tri kišne epizode. U tabeli 1 prikazani su rezultati

merjenja proticaja od kiša na izlaznom profilu razmatranog sliva, kao i podaci o intenzitetu padavina preuzeti iz UDM baze podataka.

Tabela 1. Mereni podaci padavina i oticaja napredmetnom slivu
Table 1. Measurements of rainfall intensity and runoff from the study area

<i>Oznaka kiše</i>	<i>Namena</i>	<i>Max.proticaj (L/s)</i>	<i>Zapremina otekle vode (m³)</i>	<i>Max. intenzitet kiše (mm/min)</i>
CA0208	verifikacija	1110	5 142.00	0,51
CA0209	kalibracija	3335	3 353.40	2,03
CA0210	verifikacija	1781	2 726.55	0,51
CA0211	kalibracija	6236	12 827.25	1,78
CA0212	verifikacija	6809	18 066.30	1,78
CA0213	kalibracija	5982	7 935.60	1,52

2.4 Opis procesa kalibracija i verifikacije modela oticaja na predmetnom slivu

Procesom kalibracije će se obuhvatiti nepoznati ulazni parametri podslivova i to: Manningov koeficijent hrapavosti za propusne i nepropusne površine; karakteristična širina površinskog tečenja i dubina površinskih depresija na propusnim i nepropusnim površinama. Za kolektore, kalibrisaće se samo vrednost Manningovog koeficijenta hrapavosti za cevi od betona, opeke i glazirane keramike, u domenu vrednosti preporučenih u literature [8]. Parametri infiltracije, koji se ogledaju kao fizičke osobine zemljišta datog sliva su nepoznati kao ulazni parametri, pa će se njihova vrednost kalibrisati, u zavisnosti od odabrane metode za proračun infiltracije i u granicama vrednosti datih u literaturi. U okviru kalibracije, za tečenje u mreži kolektora, ispitaće se rezultati dobijeni metodom kinematskog talasa i metodom dinamičkog talasa za obračun protoka. Za početne vrednosti parametara u toku kalibracije, usvojeno je da je dubina površinskih depresija na propusnim i nepropusnim površinama nula. Za Manningove koeficijente hrapavosti u cevima i napovršini podslivova, kao početne vrednosti za kalibraciju usvojene su minimalne vrednosti, date preporukama u literaturi [2].

Za kalibraciju su se odabrale kišne epizode sa oznakama CA0209; CA0211 i CA0213 (tabela 1), dok su preostale epizode odabrane za verifikaciju rezultata modela. Prilikom odabira kišnih epizoda za kalibraciju i verifikaciju modela vodilo se računa o zapremini otekle vode koju uzrokuju.

Kalibracija modela je vršena iterativno, tako što su se parametri modela "ručno" korigovali sa svakom iteracijom. Kalibracija se vršila variranjem svakog parametra pojedinačno za sve tri kišne epizode i to sledećom metodologijom: usvojile su se početne vrednosti nepoznatih parametara modela, i to minimalne vrednosti date u literaturi. U svakoj iteraciji, korigovao se jedan parametar, a ostali nisu menjani, sve dok rezultati modela ne bi bili zadovoljavajući sa aspekta tog parametra, za sve tri epizode. On bi se usvajao i u narednim iteracijama isti postupak se primenjuje za preostale parametre pojedinačno. Karakteristična širina površinskog tečenja, kao najosetljiviji parametar modela se kalibrisao kada su usvojeni preostali fizički parametri kolektora i podslivova (tabela 2).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Vrednosti karakteristične širine toka po iteracijama
Table 2. Values of characteristic width per iterations

Pripadajući čvor podsliva- izliv	I iteracija (m)	II iteracija (m)	III iteracija- usvojena (m)	IV iteracija (m)
1	192	201	211.2	221
2	80	84	88	92
4	124	130	136.4	143
5	82	86	90.2	94
7	108	113	118.8	124
8	166	173	182.6	191
9	119	124	130.9	137
10	293	306	322.3	337
14	206	215	226.6	237
16	240	251	264	276
17	110	115	121	127
18	400	418	440	460
19	383	400	421.3	440
20	198	207	217.8	228
21	241	252	265.1	277
25	196	205	215.6	225
29	242	253	266.2	278
30	350	366	385	403
31	140	146	154	161
33	237	248	260.7	273
38	200	209	220	230
40	198	207	217.8	228
41	400	418	440	460
42	260	272	286	299
44	147	154	161.7	169
45	335	350	368.5	385
47	174	182	191.4	200
48	350	366	385	403

Na prethodno opisan način za sve tri kišne epizode je dobijena jedna grupa parametara modela, koja daje zadovoljavajuće vrednosti kriterijuma kvaliteta modela.

Kao ocena uspešnosti kalibracije modela, u radu se analizirala veličina relativne greške zapremine otekle vode na izlivu i ordinate maksimalnog proticaja, u odnosu na izmerene vrednosti. Osim relativne greške, za numeričku ocenu kvaliteta rezultata modela u toku kalibracije i verifikacije, u radu su se odredile vrednosti nekoliko kriterijuma kvaliteta

modela, baziranih na odstupanjima simuliranih vrednosti proticaja od osmotrenih- srednja (algebarska) greška-BIAS, koren srednje vrednosti kvadratne greške-RMSE i koeficijent korelacije-R.

Generalno je prihvaćeno da kalibraciji hidroloških modela treba prići kao višekriterijumskom problemu [4]. Uprkos činjenici da "ručna" metoda kalibracije hidrološkog modela oduzima više vremena, od većeg je značaja za hidrologe jer omogućava postizanje veće osetljivosti modela na promenu pojedinih parametara [1].

Ako je osnovni cilj hidrološkog modela reprodukcija ponašanja postojećeg sistema (sliva), tada verifikacija rezultata simulacije sistema u modelu predstavlja proces određivanja kvaliteta samog simulacionog modela. Nakon kalibracije parametara modela, za svaku kišnu epizodu, dobijene parametre je potrebno verifikovati i izraziti odstupanje simuliranih vrednosti oticaja od izmerenih u vidu analiziranih numeričkih kriterijuma za ocenu kvaliteta modela. Niti jedan kriterijum kvaliteta simulacije, gledan zasebno, ne daje potpunu informaciju o kvalitetu određenog modela. Svaki daje informaciju o jednom ili više aspekata kvaliteta (često nazivanih atributima) produkata simulacije u modelu [6].

3 Rezultati i diskusija

3.1 Rezultati procesa kalibracije

Kalibrisanjem događaja, za tri odabrane kiše, u okviru modela oticaja sa dela sliva East York, set parametara za koje se dobija najbolje preklapanje osmotrenih i simuliranih rezultata u pogledu greške i izgleda hidrograma je dat u tabeli 3. Dobijene vrednosti parametara modela će se upotrebiti u verifikaciji. Broj parametara koji se kalibrisao u okviru predmetnog modela je 11.

Infiltraciona metoda, koja daje najbolje rezultate u poređenju sa preostalim metodama za iste usvojene ostale parametre podslivova i kolektora je metoda Green-Ampt-a. Karakteristike zemljišta, kao fizički parametri koji figurišu u okviru ove metode, su dobijeni procesom kalibracije. Za model proračuna tečenja u cevima usvojen je model kinematskog talasa.

Tabela 3. Usvojeni parametri SWMM modela dobijeni kalibracijom
Table 3. Adopted SWMM's model parameters obtained by calibration

$N_{imp.}$	$N_{perv.}$	$D_{imp.}$ (cm)	$D_{perv.}$ (cm)	n_{con} ($m^{-1/3}s$)	n_{clay} ($m^{-1/3}s$)	n_{brick} ($m^{-1/3}s$)	Ψ (mm)	K (mm/h)	Δw (%)
0.01	0.15	0.05	0.05	0.012	0.012	0.015	180	1.016	15.4

* $n_{imp.}$ -Manningov koeficijent hrapavosti za nepropusne površine; $n_{perv.}$ -Manningov koeficijent hrapavosti za propusne površine; $D_{imp.}$ i $D_{perv.}$ - dubina površinskih depresija na nepropusnim i propusnim površinama; $n_{con.}$, n_{clay} i n_{brick} -Manningov koeficijent hrapavosti za kolektore od betona, glazirane keramike i opeke, respektivno; K -koeficijent filtracije zasićenog zemljišta; Ψ - visina kapilarnog penjanja; Δw -početni deficit vlage u zemljištu

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

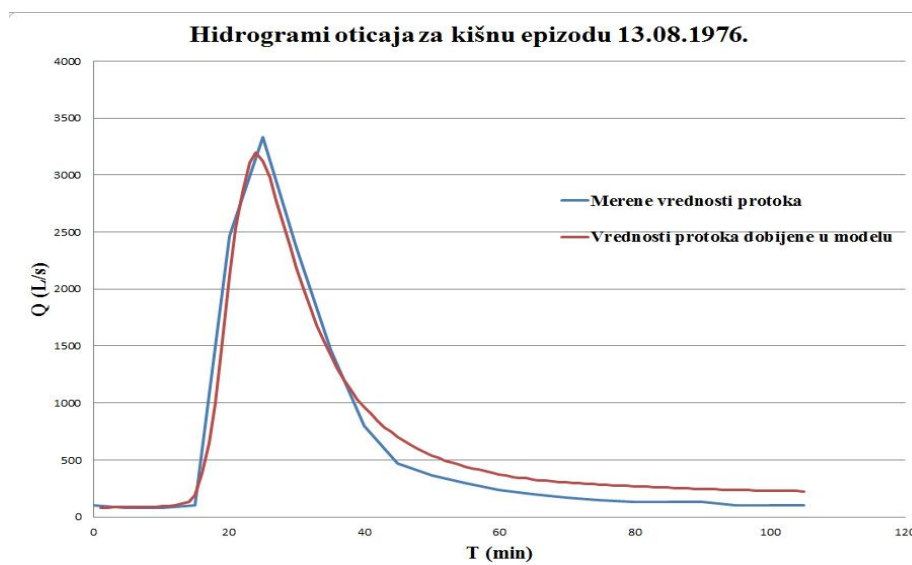
U tabeli 4 date su vrednosti kriterijuma kvaliteta rezultata modela dobijeni kalibracijom, upotrebljenih u ovom radu, dobijeni za tri kišne epizode i one parametre koji daju "najbolje kalibrisane događaje".

Tabela 4. Kriterijumi kvaliteta modela oticaja dobijeni kalibracijom
Table 4. Runoff model quality criteria obtained by calibration

Oznaka	Kišna epizoda	$\delta_{Q_{max}}$ (%)	$\delta_{V_{oteklo}}$ (%)	BIAS (L/s)	RMSE (L/S)	R	N
CA0209	13.08.1976.	4.0	0.20	60.4	167.7	0.99	22
CA0213	10.08.1977.	4.1	0.97	93.9	1256.8	0.74	19
CA0211	25.06.1977.	2.7	0.48	56.9	338.7	0.98	32

* $\delta_{Q_{max}}$ -relativna greška maksimalnog proticaja u sistemu; $\delta_{V_{oteklo}}$ -relativna greška zapremine otekle vode; BIAS-srednja greška; RMSE-koren srednje kvadratne greške; R-koeficijent korelacije; N-broj osmotrenih vrednosti protoka

Na slici 2, prikazan je hidrogram oticaja za jednu kišnu epizodu (CA0209), u kalibraciji, za usvojene vrednosti fizičkih parametara modela iz tabele 3, karakterističnu širinu usvojenu shodno tabeli 2, Green-Ampt-ovu metodu infiltracije i model kinematskog talasa. Za sve tri kišne epizode u kalibraciji modela, vreme razlike pojave vršnog proticaja na hidrogramu iznosi do 2 minuta.



Slika 2. Hidrogram oticaja za usvojene parametre modela dobijene kalibracijom
Figure 2. Runoff hydrograph for adopted model parameters obtained by calibration

Osnovni kriterijum za izbor kišnih epizode za kalibraciju modela je što pravilniji oblik hidrograma oticaja (trougaooni oblik) koji uzrokuju, kao što se uočava na slici 2.

3.2 Rezultati procesa verifikacije

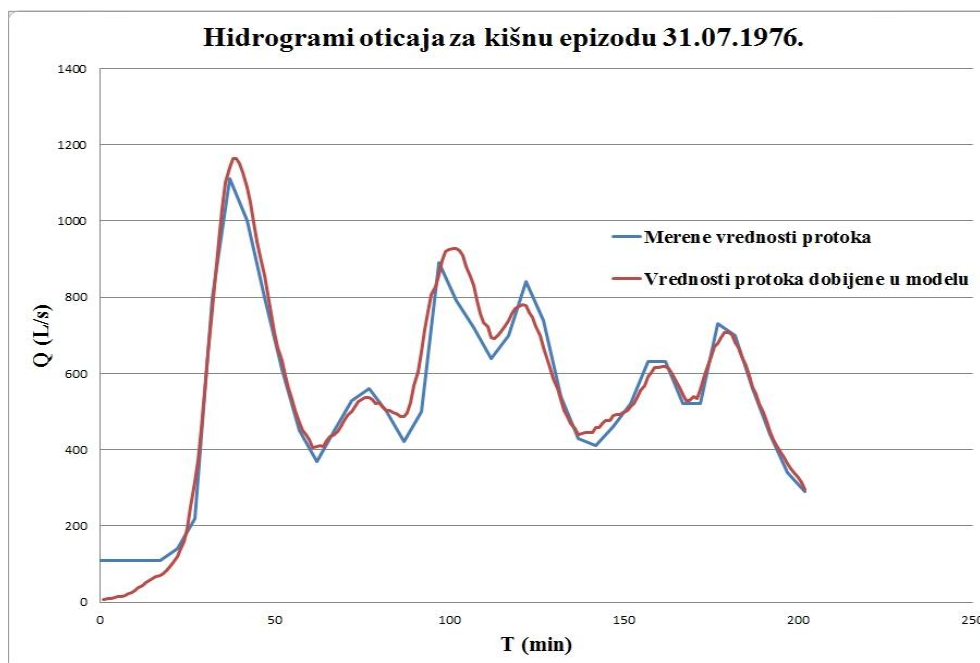
U tabeli 5 date su vrednosti analiziranih kriterijuma kvaliteta modela oticaja na delu sliva East York, dobijene za tri kišne epizode u procesu verifikacije i usvojene parametre modela iz tabele 3. Kao numerički pokazatelji validnosti dobijenih rezultata verifikacije, primenili su se isti kriterijumi kvaliteta modela koji su se upotreбили u kalibraciji modela.

Tabela 5. Kriterijumi kvaliteta modela oticaja dobijeni verifikacijom
 Table 5. Runoff model quality criteria obtained by verification

Oznaka	Kišna epizoda	$\delta_{Q_{max}}$ (%)	$\delta_{V_{oteklo}}$ (%)	BIAS (L/s)	RMSE (L/S)	R	N
CA0210	01.09.1976.	5.2	14.5	131.6	396.6	0.73	23
CA0208	31.07.1976.	4.8	10	14.1	56.4	0.97	39
CA0212	29.06.1977.	6.5	0.4	48.6	729.1	0.91	41

* $\delta_{Q_{max}}$ -relativna greška maksimalnog proticaja u sistemu; $\delta_{V_{oteklo}}$ -relativna greška zapremine otekle vode; BIAS-srednja greška; RMSE-koren srednje kvadratne greške; R-koeficijent korelacije; N-broj osmotrenih vrednosti protoka

Na slici 3 prikazan je hidrogram oticaja za jednu kišnu epizodu (CA0208), koje su se koristile za verifikaciju modela oticaja, za usvojene vrednosti fizičkih parametara modela iz tabele 3, karakterističnu širinu usvojenu shodno tabeli 2, Green-Ampt-ovu metodu infiltracije i model kinematskog talasa.



Slika 3. Hidrogram oticaja za kišnu epizodu u procesu verifikacije modela
 Figure 3. Runoff hydrograph for rainfall episode obtained by model verification

Kao i u procesu kalibracije, tokom verifikacije modela, vreme razlike pojave vršnog proticajana hidrogramu iznosi do 2 minuta. Ako se uporede hidrogami sa slike 2 i slike 3, uočava se da kišna epizoda, upotrebljena za proces verifikacije daje izrazito nepravilan oblik hidrograma oticaja, što je bio i osnovni kriterijum odabira kišnih epizoda za proces verifikacije.

3.3 Komentar dobijenih rezultata

U tabeli 6, prikazani su analizirani kriterijumi kvaliteta rezultata modela oticaja za šest kišnih epizoda na delu sliva East York. Ukupno se ispitalo i ocenjivalo pet kriterijuma kvaliteta modela. Kišne epizode su poređane od najboljih do najlošijih ocena kvaliteta modela. U prvoj grupi nalaze se događaji koji uzrokuju najboljim ocene kvaliteta rezultata, a u šestoj događaji koji uzrokuju najlošije ocene kvaliteta rezultata modela.

Tabela 6. Ocene kvaliteta simuliranih rezultata oticaja za sve kišne epizode
Table 6. Assessment of runoff model quality criteria for all rainfall episodes

Oznaka kišne epizode	Ispitivani kriterijumi kvaliteta modela				
	δQ_{max} (%)	δV_{oteklo} (%)	BIAS (L/s)	RMSE (L/S)	R
CA0208	IV	V	I	I	III
CA0209	II	I	IV	II	I
CA0210	V	VI	VI	IV	VI
CA0211	I	III	III	III	II
CA0212	VI	II	II	V	IV
CA0213	III	IV	V	VI	V

Komentar dobijenih rezultata modela oticaja sa dela sliva East York:

1. Sa aspekta BIAS, kao mere pouzdanosti modela, rezultati dobijeni modeliranjem svih šest kišnih epizoda pokazuju istu tendenciju. Pozitivne vrednosti srednje greške (BIAS) ukazuju na to da vrednosti proticajaja dobijenih simulacijom u modelu, za sve razmatrane događaje, prevazilaze osmotrene vrednosti proticajaja na izlaznom profilu. Sam po sebi ovaj kriterijum kvaliteta ne govori o ukupnoj tačnosti rezultata modela, ali se iz njega sagledava smer odstupanja modeliranih vrednosti.

2. RMSE daje prosečnu veličinu greške, srazmerno kvadratima pojedinih grešaka odstupanja osmotrenih i simuliranih vrednosti. Ovaj kriterijum, kao mera ukupne tačnosti rezultata modela, ukazuje na relativno veliku netačnost modeliranih rezultata proticajaja, osim u slučaju kiše CA0208, koja daje i najmanju vrednost srednje greške. To je kiša najslabijeg intenziteta, koja daje relativno malu zapreminu otekle vode, pa je to jedan od razloga za ovakav rezultat u pogledu RMSE. Osnovna mana RMSE je njegova osetljivost na velike greške, što znači da ne mora davati stabilnu procenu greške, ako se koristi na malim uzorcima.

3. Koeficijent korelacije predstavlja meru linearne povezanosti simuliranih i izmerenih vrednosti u vremenskoj seriji podataka. Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije rezultata modela za sve događaje ukazuju na pozitivnu korelaciju simuliranih i osmotrenih vrednosti. U

zavisnosti od veličine koeficijenta korelacije, rezultati modela za sve događaje ukazuju na jaku korelaciju između simuliranih i izmerenih vrednosti protoka na izlivu. Koeficijent korelacije je osetljiv za kišne epizode kod kojih postoji manji brojem osmotrenih vrednosti protoka na izlivu (CA0213 i CA 0210).

4. Uticaj intenziteta kiše na kvalitet rezultata modela se ogleda u sledećem: rezultati modela za kišnu epizodu najmanjeg intenziteta (CA0208) daju dobru ocenu korelacije srednje kvadratne greške i srednje (algebarske) greške, dok rezultati modela za kišnu epizodu maksimalnog intenziteta (CA0209) daju dobru ocenu koeficijenta korelacije i relativne greške zapremine otekle vode. Kišna epizoda, koja uzrokuje najmanju zapreminu otekle vode sa sliva daje najlošije ocene u pogledu BIAS, R i relativne greške zapremine otekle vode.

3.4 Osetljivost modela na promenu pojedinih parametara i metoda proračuna

Deo sliva East York, kao urbano slivno područje, velikim delom je prekriven propusnim površinama (travnjaci, parkovi, itd.) i to u iznosu od 51 % ukupne površine sliva. Takva konfiguracija predmetnog sliva povećava broj osetljivih parametara čije se vrednosti mogu menjati u cilju kalibracije modela.

Uprkos činjenici da veličina karakteristične širine površinskog tečenja za svaki podsliv ne varira u okviru jednog sliva [8], senzitivnost modela na promenu ovog parametra je analizirana (tabela 2) da bi se procenile moguće greške u pretpostavci ovog parametra, odnosno dužini toka površinske vode za svaki podsliv, do mesta izliva. Izmeni vrednosti ovog parametra se pristupilo veoma pažljivo, da se ne bi izgubio njegov fizički smisao.

Na predmetnom slivu, u pogledu maksimalnog oticaja sa sliva i oblika hidrograma, senzitivnost modela je najveća na promenu karakteristične širine površinskog tečenja, dubine površinskih depresija i Manningovog koeficijenta hrapavosti za nepropusne površine, kao fizičkih parametara modela. Vrednosti Manningovog koeficijenta za propusne površine i za cevovode ne utiču u toj meri na senzitivnost modela oticaja sa dela sliva East York.

Zbog velikih nagiba kolektora na predmetnom slivu, usled kojih je uspor i kaskadni uticaj uliva zanemarljiv, odabrana je metoda kinematskog talasa za proračun tečenja u cevima. Ona daje bolje rezultate simulacije u poređenju sa metodom dinamičkog talasa, naročito na opadajućoj grani hidrograma oticaja, s tim da je opcija plavljenja šahtova sistema i naknadno vraćanje te količine vode u sistem onemogućena. Ako se ta opcija omogući, rezultati simulacije u modelu za obe metode proračuna tečenja u cevima su približno slični.

U modelu proračuna oticaja sa dela sliva East York, metoda Green-Ampt-a se pokazala kao infiltraciona metoda koja daje najbolje rezultate u poređenju sa SCS metodom, Hortonovom i modifikovanom Hortonovom metodom, za iste usvojene fizičke parametre modela i metodu proračuna tečenja u cevima.

4 Zaključak

Pomoću simulacionih modela padavine–oticaaj moguće je uspostaviti kontinualnu matematičku vezu između komponenti ciklusa oticaja sa urbanih površina. Pri upotrebi softverskih paketa za simulaciju ciklusa oticaja sa urbanih slivova, moguće je dobiti tačnije izlazne podatke i koristiti detaljnije modele sa više parametara.

U radu je opisana i prikazana primena programskog paketa SWMM na konkretnom primeru dela urbanog sliva East York, koji je karakterističan po većem procentu propusnih površina nego što je generalno slučaj sa urbanim slivovima. Izradi kvalitetnog modela doprineli su dostupni podaci preuzeti iz UDM baze podataka, koji su u velikoj meri smanjili neizvestnost vrednosti ulaznih parametara. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je model veoma dobro predstavio realna dešavanja na slivu tokom padavina različitog intenziteta i trajanja, koje uzrokuje različite vrednosti zapremine otekle vode. Oblici hidrograma oticaja dobijeni simulacijom pomoću modela SWMM se skoro u potpunosti poklapaju sa oblicima izmerenih hidrograma.

Zahvalnost

Rad je proistekao iz naučno-istraživačkog projekta Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije TR37018, pod nazivom: "Razvoj sistema podrške odlučivanja za potrebe integralnog upravljanja vodnim resursima na slivu".

Literatura

1. Beling F., Garcia J., Paiva E., Bastos G., Paiva J. (11-16 september 2011), *Analysis of the SWMM model parameters for runoff evaluation in periurban basins from southern Brazil*, 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
2. Cambez M., Pinho J., David L. (2008), *Using SWMM 5 in the continuous modelling of stormwater hydraulics and quality*, 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
3. Despotović J. (2009), *Kanalisanje kišnih voda*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
4. Gupta H., Sosooshian S., Yapo P. (1998), *Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information*, Water Resources Reseach 34 (4).
5. Maksimović Č., Radojković M. (1986), *Urban Drainage Catchments-selected worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments*, Pergamon Press, Oxford, Great Britain.
6. Murphy A. (1998), *Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient*, Monthly Weather Review 116.
7. Petrović J. (2001), *Uvod u hidrologiju*, Građevinski fakultet u Beogradu-odsek za planiranje i građenje naselja.
8. Yen C.B. (1986), *Rainfall-runoff Process on Urban Catchments and Its Modeling*, Urban Drainage Modeling: Proceedings of the International Symposium on Comparasion of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, UDM '86, Dubrovnik, Yugoslavia.

Modeliranje urbanih slivova na osnovu javno dostupnih podataka

Andrija Nedeljković¹
Aleksandar Sekulić²
Nemanja Branislavljević³

APSTRAKT: Za potrebe hidrološkog modeliranja urbanih slivova neophodno je obezbediti veliku količinu, različitih tipova podataka koji uključuju i podatke o karakteristikama modeliranog sliva. Poslednjih godina došlo je do ekspanzije ponude javno dostupnih podataka na internetu i nesumnjivo je da se mnogi od njih mogu iskoristiti za potrebe hidrološkog modeliranja. Podaci su uglavnom dostupni preko servisa velikih IT kompanija kao što su Google, Microsoft, Amazon, Apple, itd. U ovom radu je analizirana moguća upotreba javno dostupnih podataka o karakteristikama razmatranog sliva za potrebe modeliranja pomoću popularnog softverskog paketa EPA SWMM. Testirana je upotreba podataka koje su učinile dostupnim kompanije Google i Microsoft u obliku online satelitskih snimaka, na primeru područja eksperimentalnog sliva u švedskom gradu Lulea. Zaključeno je da se sa javno dostupnih servisa mogu dobiti brojne informacije koje su tradicionalno prikupljane na terenu. Ipak, za potrebe hidrološkog modeliranja, postoji potreba i za podacima koji još uvek nisu javno dostupni, tako da je izlazak na teren i prikupljanje podataka na tradicionalan način često i dalje neophodno.

Ključne reči: EPA SWMM, urbani slivovi, javno dostupni podaci

Urban catchments modelling using public data

ABSTRAKT: For the purposes of hydrological modeling of urban catchments it is necessary to provide a large amount of various types of data including information on the characteristics of the modeled basin. In recent years there has been an expansion of offer of publicly available information on the internet and there is no doubt that many of them can be used for the hydrological modeling. The data are generally available through the services of large IT companies such as Google, Microsoft, Amazon, Apple, etc. In this paper we analyze the possible use of publicly available data on the characteristics of the modeled basin for the purposes of modeling using popular software package EPA SWMM. We tested the use of the information made available by Google and Microsoft in the form of online satellite imagery on the example of experimental catchment area in the Swedish city of Lulea. It was concluded that the publicly available services can get a lot of information that are traditionally collected in the field. However, for purposes of hydrological modeling, there is also need for data that are not yet publicly available, so that the fieldwork and data collection in the traditional way are often still necessary.

Keywords: EPA SWMM, urban catchments, public data

¹ Andrija Nedeljković, mast.inž.građ., student doktorskih studija, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, andrija.s.nedeljkovic@gmail.com

² Aleksandar Sekulić, mast.inž.geod., asistent-student doktorskih studija, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd aleksandarsale.sekulic@gmail.com

³ Dr Nemanja Branislavljević, docent, Građevinski fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd nemanja@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Velike informatičke kompanije, poput Google-a, Apple-a, Amazona i ostalih u svojoj ponudi imaju veliku količinu javno dostupnih (često besplatnih) podataka. Ti podaci su organizovani na različite načine i uglavnom se njima pristupa pomoću specijalno dizajniranih API-ja (API – application interface), čime se omogućava da se podaci ili iskopiraju u lokalnu memoriju ili da se koriste u različitim aplikacijama.

Iako su javno dostupni, podaci često nisu u obliku da se mogu odmah upotrebiti, već je iz njih neophodno izvući informacije od interesa. Stoga, velike kompanije poput Google-a, Apple-a ili Microsoft-a imaju sopstvene web servere za transfer podataka korisnicima, kako u sirovom obliku, tako i u grafičkom obliku posredstvom određenih sistema za vizuelizaciju. To je slučaj i sa satelitskim snimcima i mapama. Podaci u obliku satelitskih snimaka i mapa se nalaze na serverima tih kompanija, dok se sami podaci (satelitski snimci i mape) prikazuju korisnicima kroz za to dizajnirane aplikacije. Javno dostupni satelitski snimci i mape sadrže u sebi informacije koje mogu poslužiti za formiranje ulaznih podataka neophodnih za hidrološko modeliranje.

Jedan od izuzetno popularnih softverskih paketa za modeliranje oticaja na urbanim slivovima je softverski paket EPA SWMM [7]. Jedan od ključnih ulaznih podataka, podataka sa relativno najvećom osetljivošću, za koncept EPA SWMM modela urbanog oticaja je raspored i veličina propusnih i nepropusnih površina na razmatranom slivu [2].

Cilj ovog rada je da se ispita mogućnost upotrebe podataka o modeliranom slivu koji su dostupni u obliku satelitskih snimaka preko servera dve velike IT kompanije: Google i Microsoft. Upotreba podataka je testirana na modelu eksperimentalnog sliva u gradu Lulea u Švedskoj [6], a rezultati su upoređeni sa rezultatima simulacije dobijenih na osnovu podataka prikupljenih tradicionalnim putem – izlaskom na teren. Rezultati su upoređeni kako u pogledu vrednosti hidrograma za dve razmatrane kiše, tako i u pogledu neizvesnosti koja se javlja usled neodređenosti podataka koji se mogu dobiti sa satelitskih snimaka.

Nakon sprovedene analize, zaključeno je da se sa javno dostupnih servisa mogu dobiti brojne informacije koje su tradicionalno prikupljane na terenu. Ipak, za potrebe hidrološkog modeliranja, postoji potreba i za podacima koji još uvek nisu javno dostupni, tako da je izlazak na teren i prikupljanje podataka na tradicionalan način često i dalje neophodno.

2 Metodologija

Metodologija istraživanja prikazanog u ovom radu podrazumeva nekoliko koraka (slika 1):

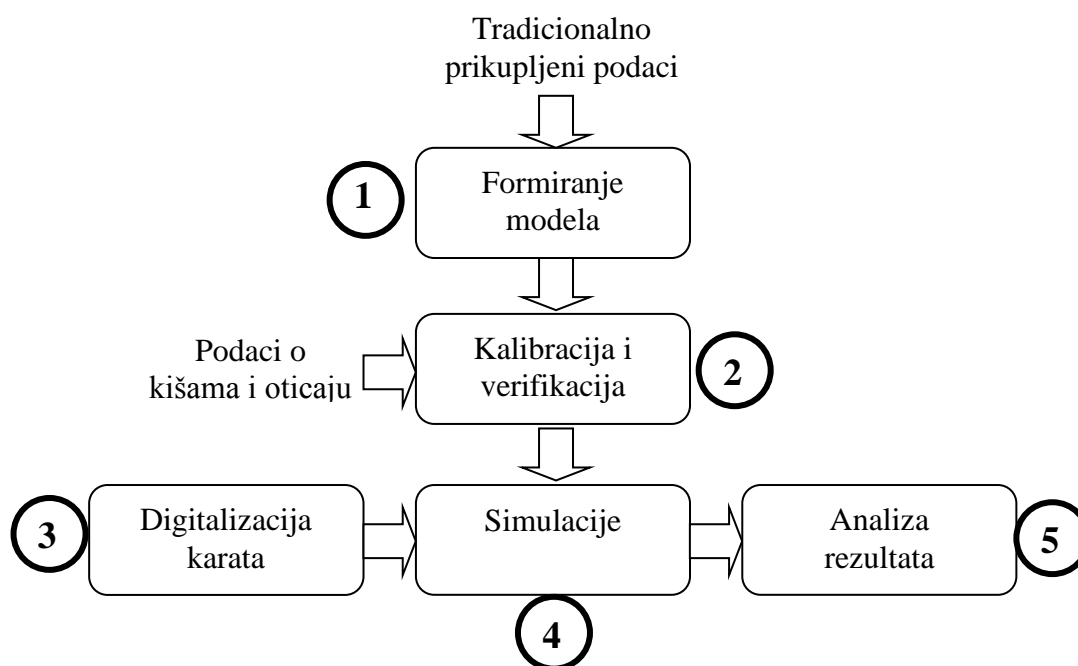
1. formiranje modela oticaja u programskom paketu EPA SWMM,
2. kalibracija modela na osnovu izmerenih kišnih epizoda i oticaja sa sliva,
3. digitalizacija satelitskih snimaka razmatranog eksperimentalnog sliva,
4. izračunavanje ulaznih podataka za EPA SWMM iz digitalizovanih snimaka,
5. analiza rezultata oticaja u pogledu vrednosti hidrograma i u pogledu neizvesnosti rezultata simulacije.

Nakon formiranja modela na osnovu podataka prikupljenih tradicionalnim putem, izlaskom na teren, model je neophodno kalibrisati na osnovu prikupljenih podataka o kišama i oticaju nakon tih kišnih epizoda. Nakon kalibracije neophodno je sprovesti i verifikaciju

modela, upoređivanjem rezultata simulacije sa izmerenim oticajem za kišnu/kišne epizode nezavisne od onih korišćenih za kalibraciju.

Razmatrani ulazni podatak u ovom raadu je raspored i odnos nepropusnih i propusnih površina, i ti podaci se u EPA SWMM model se upisuju kao procenti nepropusnih površina sa depresijama i nepropusnih površinama bez depresija.

Da bi dobili procenite nepropusnih i propusnih površina neophodno je digitalizovati satelitske snimke dostupne na internetu. Digitalizacija je dovoljno sprovedi tako da se izdvoje samo nepropusne površine (saobraćajnice, krovovi kuća, itd.). Digitalizovana su dva tipa objekta – kuće i saobraćajnice. Za svaki digitalizovani objekat potrebno je odrediti tri veličine: najverovatnija procena površine, gornja granica površine i donja granica površine.



Slika 1. Metodologija analize upotrebe javnih satelitskih snimaka za potrebe modeliranja
Figure 1. Using public data for hydrologic modeling analysis methodology

Nakon određivanja intervala površina i najverovatnijih vrednosti i njihovog prevođenja u oblik adekvatan za EPA SWMM model, neophodno je sprovedi simulaciju sa najverovatnijom procenom, kao i simulaciju propagacije neodređenosti, pri čemu su veličine procenata nepropusnih površina predstavljene u obliku intervala.

Simulaciju propagacije neodređenosti nije sprovedena za podatke koji su prikupljeni na tradicionalan način, mada se to može obaviti usvajanjem okvirne neodređenosti mernog instrumenta koji bi se u tu svrhu koristio.

3 Primer

Urbani sliv Porsoberg se nalazi u predgrađu grada Lulea, kraj Balitičkog mora, na severu Švedske. Na Slici 2. dat je prikaz sliva, preuzet iz [6].

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Moderno stambeno naselje se sastoji od porodičnih kuća. Sve ulice i trotoari su asfaltirani i odvojeni od kuća zelenim pojasom. Oluci su povezani sa kišnom kanalizacijom i može se smatrati da 22% oticaja sa krovova dospeva direktno u kišnu kanalizaciju. Ukupna površina sliva iznosi 13.01 ha. Podaci o nepropusnim površinama, predstavljeni u [6] su prikupljeni sa karata i na terenu. Nema podataka da su rađena detaljna geodetska snimanja terena za potrebe studije.

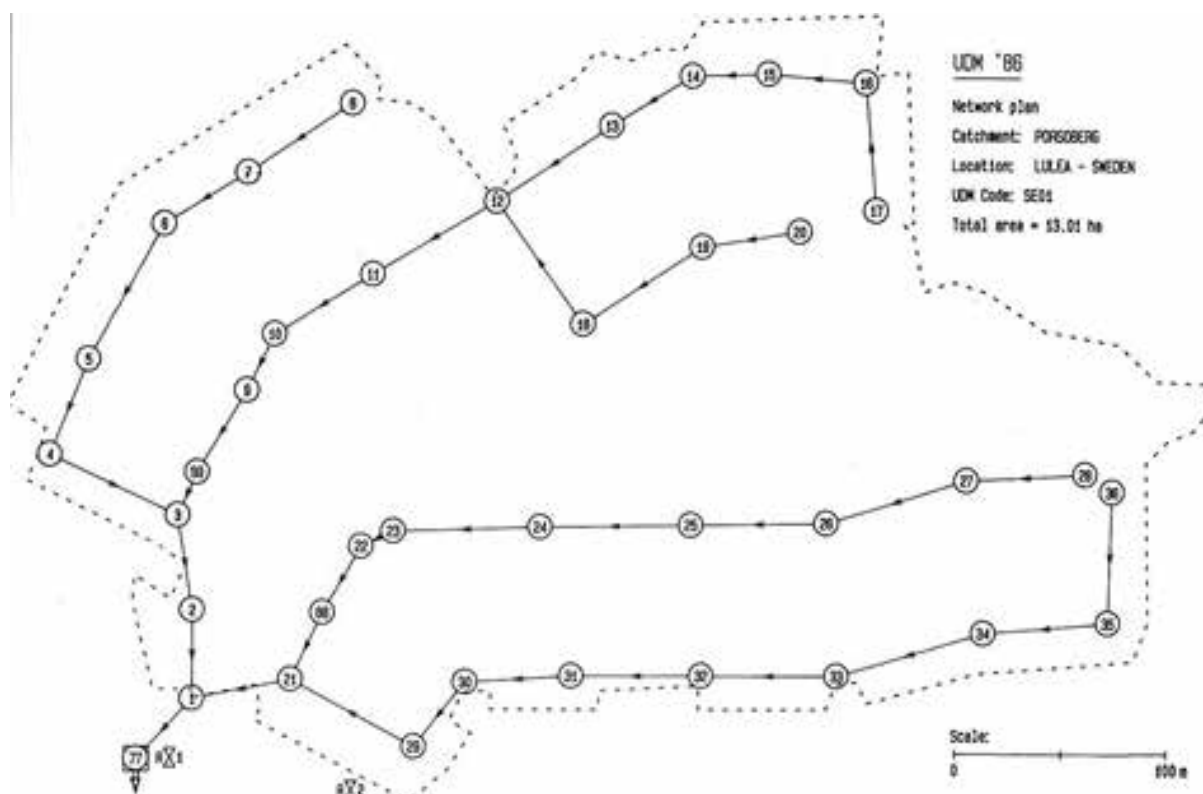
Porsoberg ima separacioni kanalizacioni sistem. Kišna kanalizacija se sastoji od betonskih cevi precnika od DN225 do DN500. Sliv ima jedan ispust kišne kanalizacije, koji je naznačen na Slici 2.

Na slivu postoje dva kišomera postavljena u neposrednoj blizini merača protoka. Za potrebe izrade ovog rada korišćeni su podaci sa kišomera br. 1, postavljenog kod samog merača protoka. Protok je meren pomoću trouganog preliva. Nivo vode na prelivu je meren ultrazvučnim meračem.

Na Slici br. 3 šematski je predstavljen sistem kišne kanalicaije na slivu Porsoberg i naznačene su lokacije kišomera i merača protoka [6].



Slika 2. Razmatrani eksperimentalni sliv u blizini švedskog grada Lulea, naselje Porsoberg [6]
Figure 2. Experimental catchment near Swedish town Lulea, Porsoberg [6]



Slika 3. Šematski prikaz kanalizacionog sistema Porsoberga [6]
 Figure 3. Sketch of drainage Porsoberga drainage system [6]

4 Rezultati i diskusija

Model sliva u blizini švedskog grada Lulea je razvijen u softverskom paketu EPA SWMM. Za model infiltracije usvojena je SCS metoda. Nakon formiranja modela sprovedena je manuelna kalibracija modela podešavanjem parametara:

- veličine depresija na nepropusnim površinama, h_d ,
- Maningovog koeficijenta n za nepropusne površine,
- Maningovog koeficijenta n za kolektore,
- procenta oticaja sa nepropusnih površina koji prelazi na propusne (eng. Sub-Catchemnt routing),
- CN broja.

Nakon kalibracije, sprovedena je verifikacija modela na nezavisnoj kišnoj epizodi. Kalibracija i verifikacija su sprovedene minimiziranjem dve kriterijumske funkcije prikazane u tabeli 1 i ocenom Nash-Sutcliffe parametra.

Razlika u maksimalnoj ordinati hidrograma predstavljena je pomoću kriterijumske funkcije Q_{max} [4]:

$$Q_{max} = \frac{|Q_{max}^O - Q_{max}^M|}{Q_{max}^O} \cdot 100$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Razlika u zapremini vode koja je otekla sa sliva predstavljena je pomoću kriterijumske funkcije V [4]:

$$V = \frac{|V^O - V^M|}{V^O} \cdot 100$$

Parametar efikasnosti modela E koji su predložili su Nash i Sutcliffe definiše se na sledeći način:

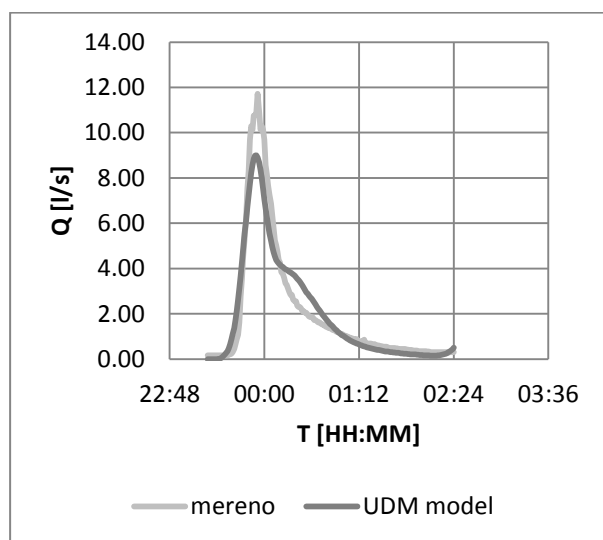
$$E = 1 - \frac{\sum_1^n [(Q_i^O - Q_i^M)^2]}{\sum_1^n [(Q_i^O - \bar{Q}^O)^2]}$$

Parametar E može imati vrednosti od 1 do $-\infty$. Vrednost 1 odgovara savršenom poklapanju modela sa opažanom serijom, dok negativne vrednosti parametra E ukazuju na to da je i srednja vrednost opažane serije bolji pokazatelj od modela [5].

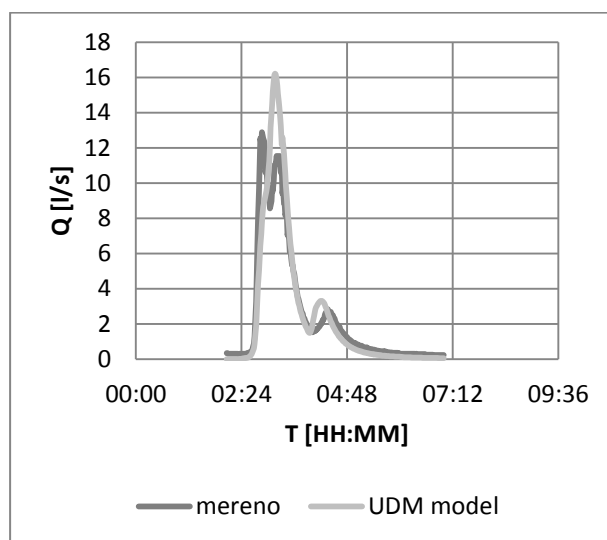
Rezultujući hidrogrami nakon kalibracije i verifikacije su prikazani na slici 4. Može se primetiti dobro slaganje dinamike hidrograma, ali se generalno primećuje da se javlja nešto veći oticaj sa sliva, do čak 28% za kišnu epizodu br. 5.

Tabela 1. Vrednosti kriterijumskih funkcija nakon kalibracije i verifikacije modela
Table 1. Objective functions after model calibration and verification

	Kalibracija			Verifikacija		
	Epizoda 4	Epizoda 5	Epizoda 6	Epizoda 1	Epizoda 2	Epizoda 3
E	0.924	0.867	0.958	0.922	0.820	0.931
Q_{max} [%]	8.28	8.76	5.02	23.14	25.76	12.87
V [%]	9.65	28.14	16.51	4.09	0.15	4.75

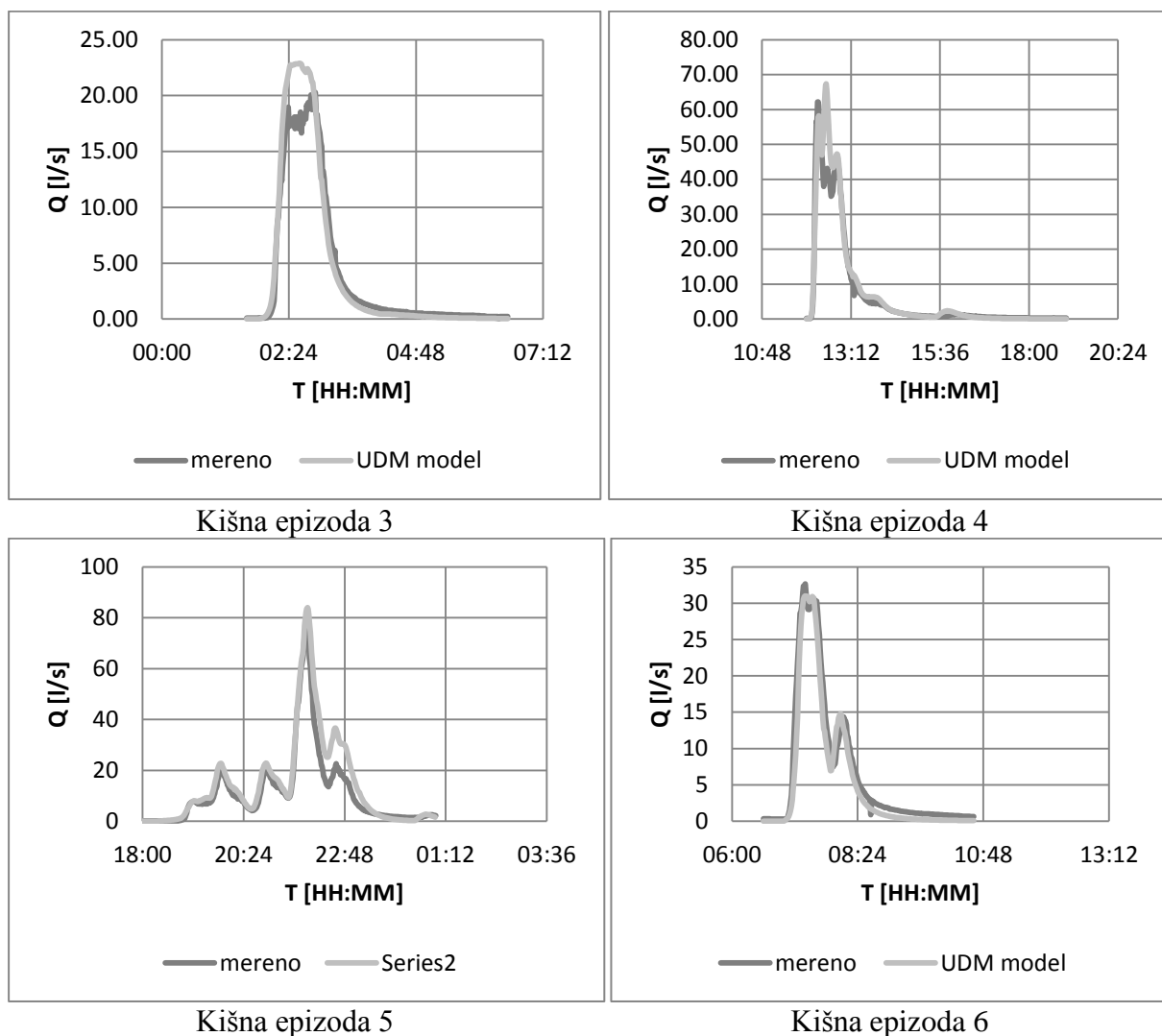


Kišna epizoda 1



Kišna epizoda 2

Slika 4. Hidrogrami oticaja nakon kalibracije i verifikacije
Figure 4. Model calibration and verification runoffs



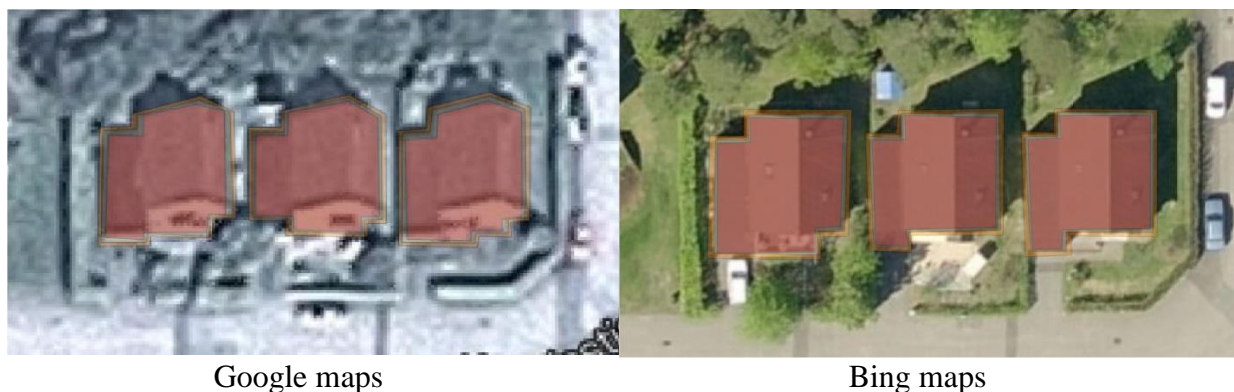
Slika 4. Hidrogrami oticaja nakon kalibracije i verifikacije - nastavak
 Figure 4. Model calibration and verification runoffs - continued

Povećan oticaj sa sliva upućuje na moguće neslaganje ulaznih podataka o odnosu propusnih i nepropusnih površina sa stanjem na terenu. Da bi se proverio odnos propusnih i nepropusnih površina na terenu, digitalizovani su satelitski snimci iz dva izvora (slika 5):

- Google maps – kompanije Google [3] i
- Bing maps – kompanije Microsoft [1]

Na slici 5 se može uočiti da kvalitet satelitskih snimaka nije ujednačen po lokacijama, a postoji i značajno odstupanje u rezoluciji snimaka što se može videti na slici 5.

Snimci su digitalizovani tako da se za nepropusne površine odredi najverovatnija procena i granice neizvesnosti. Na slici 6 je prikazan primer digitalizacije dva objekta.

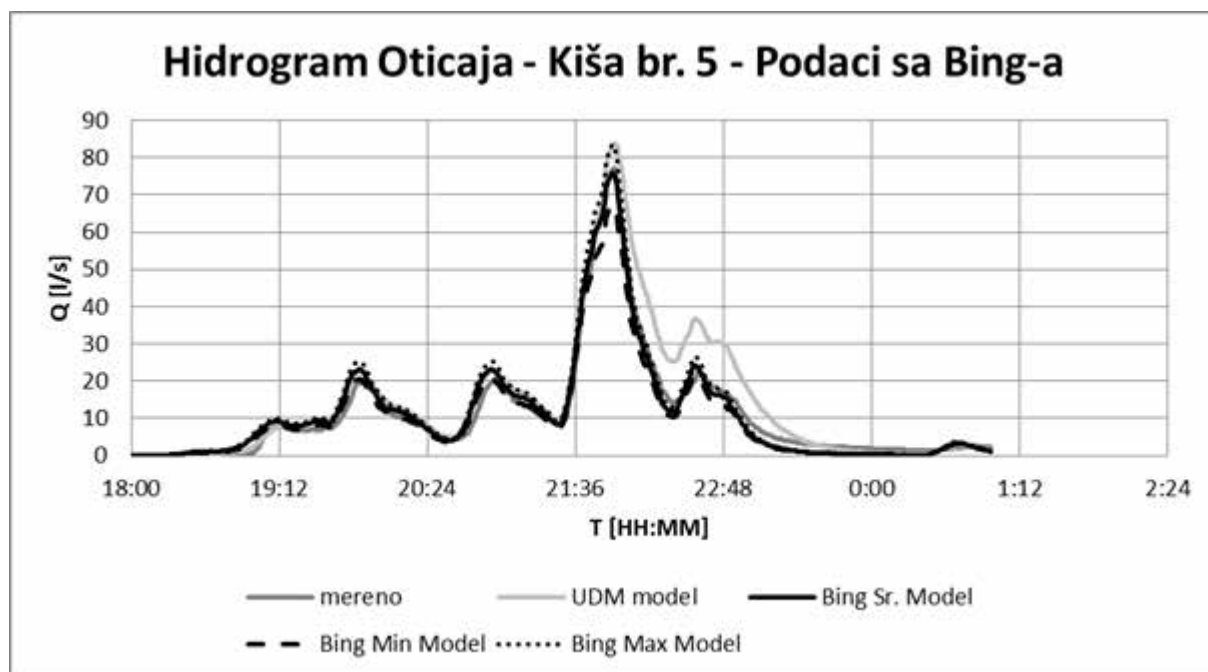


Slika 5. Razlike u kvalitetu mapa različitih servisa
Figure 5. Differences in the image quality of two satellite imagery providers



Slika 6. Digitalizacija objekata sa podacima dobijenim iz satelitskih snimaka
Figure 6. Satellite images digitizing example

Hidrogrami oticaja bolje su se slagali sa osmotrenim vrednostima oticaja za svaku kišnu epizodu kod snimaka koje isporučila kompanija Microsoft dok je kod snimaka kompanije Google bilo promenljivih rezultata. Kao primer, detaljno je analizirana jedna kišna epizoda (kišna epizoda 5), za koju su formirani hidrogrami za najverovatniju procenu, donju granicu intervala i gornju granicu intervala nepropusnih površina. Formirani hidrogrami su prikazani na slici 7, a rezultati analize u tabeli 2.



Slika 7. Hidrogrami za kišnu epizodu 5
 Figure 7. Runoff for the rain No. 5

Tabela 2. Vrednosti kriterijumskih funkcija nakon upotrebe javno dostupnih podataka
 Table 2. Objective functions after using public data as model inputs

	UDM Model	Bing Min	Bing μ	Bing Max	GM Min	GM μ	GM Max
E	0.867	0.964	0.979	0.959	0.863	0.937	0.974
Q_{max} [%]	8.76	12.79	1.57	8.04	29.93	19.17	8.22
V [%]	26.39	10.50	1.24	11.46	27.63	16.70	5.40

Na slici 7 se može videti da je sa podacima sa javno dostupnih servisa dobijeno dobro slaganje sa merenim oticajima, čak bolje nego u slučaju modela sa tradicionalno izmerenim ulaznim podacima. U tabeli 2. su prikazani rezultati modela urađenih prema podacima iz [6] i modela dopunjenih podacima dobijenim digitalizacijom javno dostupnih snimaka. Vidi se da u slučaju satelitskih snimaka koje je isporučio Microsoft (Bing maps), postoji bolje slaganje i u slučaju greške koja se može napraviti pri procesu digitalizacije, dok se kod snimaka koje je isporučila kompanija Google (Google maps), za slučaj kada se koristi minimalna procena kontura objekata javljaju lošiji rezultati, čemu je uzrok upravo loš kvalitet snimaka.

Neizvesnost oticaja, je očekivano, veća u slučaju podataka dobijenih sa satelitskih snimaka iz kompanije Google, pri čemu je glavni uzrok tome, problematičan kvalitet snimaka i ugao snimanja (slika 5).

Na neizvesnost digitalizacije nepropusnih površi može uticati dosta faktora. Najbitniji od svih je rezolucija snimaka koja za Google-ove i Bing-ove mape varira od 0,5m i naviše. Treba napomenuti da su za testirano područje Bing snimci veće rezolucije i imaju manje zakošenje nego Google-ovi što se vidi na slikama. Bliže su analizirana dva tipa objekata:

- **Kuće:** Kod digitalizacije kuća i krovova kada su snimci iskošeni nije moguće videti sve krajeve jedne kuće i digitalizovana površina se deformiše. Senke kuća i drveća takođe skrivaju neke delove kuća i krovova i nije ih moguće tačno digitalizovati. Ukoliko se kuće nalaze vrlo blizu jedna drugoj, zbog već navedenih faktora nije ih moguće razdvojiti tako da su digitalizovane kao jedan objekat. Zbog lošije rezolucije negde nije moguće prepoznati da li je nešto objekat, parking ili nešto treće.
- **Putevi:** Kod digitalizacije puteva senke kuća i drveća na isti način utiču na neizvesnost kao i kod kuća. Na nekim mestima su putevi totalno prekriveni drvećem. Ukoliko su put i zemljani deo oko puta na snimku slične boje, teško se određuje granica između njih. Subjektivni utisak operatera takođe ima veliki uticaj na neizvesnost kod digitalizacije. Operater odlučuje da li je neka pojava na snimku put ili kuća i određuje njihove granice.

Zbog svih navedenih razloga tri puta je izvršena digitalizacija testiranog područja, i za Google i Bing snimke. Prvo je izvršena digitalizacija na uobičajen način, potom je izvršena digitalizacija tako da se objekat svakako nalazi u digitalizovanoj površini i na kraju tako da digitalizovana površina sigurno sadrži objekat. Ovime su dobijene i maksimalne i minimalne površi čime je određena neizvesnost digitalizacije.

5 Zaključak

U ovom radu je analizirana upotrebljivost javno dostupnih podataka za potrebe modeliranja oticaja sa urbanih slivova EPA SWMM programskim paketom. Razmatran je odnos propusnih i nepropusnih površina, što predstavlja jedan od ključnih podataka za razmatrani softverski paket. Raspored propusnih i nepropusnih površina je procenjen digitalizacijom mapa do kojih je moguće doći putem online servisa. Analiza je sprovedena na modelu eksperimentalnog sliva naselja Porsoberg švedskog grada Lulea. Analizirani su rezultati digitalizacije satelitskih snimaka iz dva izvora: Google maps, kompanije Google i Bing maps, kompanije Microsoft. Pored vrednosti odnosa propusnih i nepropusnih površina, analizirana je i neizvesnost hidrograma oticaja usled neizvesnosti digitalnih satelitskih snimaka.

Osnovna prednost javno dostupnih podataka je njihova cena, tj. činjenica da su satelitski snimci, koji se mogu upotrebiti u procesu modeliranja besplatni. Vizuelnom inspekcijom snimaka, uviđa se da je kvalitet snimaka značajno lošiji od orto-foto snimaka koji se mogu naći u komercijalnoj ponudi. Takođe, uočena je velika razlika i u kvalitetu podataka dostupnih preko različitih servisa. Kao rezultat ovog rada, utvrđeno je da su satelitski snimci koje isporučuje kompanija Microsoft kvalitetniji od onih koje isporučuje kompanija Google.

Sa druge strane, nisu svi podaci neophodni za modeliranje dostupni kao javni pa je za mnoge ipak neophodan izlazak na teren. Isto tako, neizvesnost podataka sa online mapa je veća od neizvesnosti podatka merenih na terenu geodetskim instrumentima. Ipak, ukoliko se ispostavi da je tačnost online mapa nije adekvatna za modeliranje, javno dostupni podaci se mogu koristiti za kontrolu kvaliteta podatka sa terena.

Literatura

1. Bing maps - <https://www.bing.com/maps>
2. Chen, M., Shyamprasad, S., Heineman M. and Carter C. (2008), *Representation of Non-Directly Connected Impervious Area in SWMM Runoff Modeling*, Journal of water management modeling
3. Google maps - <https://www.google.rs/maps>.
4. Jovanović, S., Radić, Z. (1990), *Parametarska Hidrologija*, Beograd
5. Krause, P., Boyle, D.P, and Bäse F. (2005), *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*, Advances in Geosciences, 5, 89–97
6. Maksimovic, C., Radojkovic, M. (1986), *Urban Drainage Catchments*, Pergamon press, ISBN 0080340865
7. Rossman, L. A. (2007), *Storm Water Management Model User's Manual*, EPA/600/R-05/040, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH

Performance of (Blue) Green Roof Systems: Full-Scale Experiments Based Modelling

Xi Liu¹
Ana Mijić¹
Han Jung Kuo²
Čedo Maksimović¹

ABSTRACT: Green roofs are a classic example of a multifunctional Blue Green Solution, which can mitigate the adverse effects of both climate change and the increase in impervious surfaces associated with extensive urbanisation. By converting unused building roofs and facades into multifunctional green spaces, green infrastructure can provide a wide range of benefits, including stormwater (pluvial) flood attenuation, thermal insulation of buildings, additional space for outdoor activities, food production, enhancement of biodiversity, and other urban ecosystem service. Many studies have quantified the stormwater benefits of green roofs, either through experiments or by developing conceptual and/or physically based models. However, most of the studies carried out were not sufficient for developing advance reliable models of quantifiable uncertainty, because they were based on data collected from simple lab experiments, green roof systems with a simple drainage layer or small-scale rigs with vertical flow only. The resulting “models” (mainly “curve fitting”, regression equations) often did not allow for extrapolation to the conditions different than the experimental ones. Full-scale experiments quantifying the hydrologic performance of modular green roof systems have been limited, especially in the UK. In this study carried out within the Blue Green Dream (BGD) project (www.bgd.org.uk), three full-scale, open air, modular and fully instrumented green roof systems were constructed on the roof of the Eastside hall of residence in the campus of Imperial College London, UK. Multi-sensor system generated data are recorded at appropriate frequency, and used in the green roof model development and testing. The application of range of models was tested, including both simpler conceptual and more sophisticated physically based ones representing relevant physical processes. A simple linear reservoir (SLR) conceptual model is presented in this paper. It is used to predict the dynamic response of extensive multi-layered green roof systems to pluvial inputs for event-based simulations. By comparing with experimental data collected, the simulation results confirm the SLR model is able to reproduce a good match of the measured runoff for extensive green roofs. The main results enable quantification of impacts of green roofs on reduction of the volume of rainwater run-off, attenuate the flow and delay the peak time. Additional functions such as green roof module for Building Information Management (BIM) module are under development. Furthermore use of harvested and stored overflows from the green roof system for (i) improvement of energy efficiency of buildings (ii) real time (dynamic) surface flood attenuation are planned to be implemented and analysed in the nearby future.

Key words: Modular green roof systems, multifaceted monitoring, simple linear reservoir (SLR) model, dynamic performance

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

² Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei

1 Introduction

Increased frequency of heat waves and intense rainfall events is accentuating the Urban Heat Island effect and putting cities at increased risk of flooding. In most developed cities, roofs may account for more than 40% of the impermeable urban surface area [1]. Stormwater runoff from urban conventional roofs makes a significant contribution to sewerage-derived flooding and urban water quality problems. Green roofs (also known as vegetated roofs) take advantage of the usually forgotten and unused exterior surface of buildings to deliver green space. Green roofs can provide a wide range of benefits in the urban environment including retaining 50% to 80% of the precipitation [2, 3], providing a cooling and insulation effect of the building [4], increasing the roof lifespan, counteracting increased temperature rise [5] in the cities and improving biodiversity. Many European countries and the United States have started providing incentive programs such as exemptions from storm water management taxes to encourage building owners to install green roofs [6]. Thus, it is important to treat the water and energy performance of green roofs as interconnected topics in building and urban design [7]. However, due to a variety of green roof system designs and climate conditions, it is difficult to generalize the relationship between the water and thermal performance of green roofs and the site's condition. To ensure that optimum green roof systems are designed and constructed, there is a growing need for comprehensive models that can be used by developers and architects to assess and ultimately, maximise, the potential benefits of green roofs.

This study combines experimental studies and numerical simulations of the water and energy performance of three green roof systems installed on a student residence building in London. The study has been carried out in two phases. During the first phase, a full-scale green roof experimental site was designed and constructed.

2 Full-scale Green Roof Experimental Site

In April 2014, two extensive and one intensive green roof systems ($3m \times 4m$ for each, $36m^2$ in total) were installed on the rooftop at Eastside Halls of Residents, Imperial College London. Figure 1 is the cross section of green roof systems installed and the schematic representation of the sensors location.

From the top to the bottom, both extensive green roof systems (Plot A and Plot B) consist of pre-cultivated sedum plants growing on 70 mm depth substrate, a filter layer, an 'egg box' shape drainage layer, a protection mat layer, a root-resistant waterproofing layer and finally a protection layer. Plot B has a deeper drainage layer in combination with wicking mat layer and be able to store 7.5 L/m^2 water during the rainfall event. Wicking mat is developed especially for use in combination with the water distribution, storage and drainage element for capillary irrigation of green roofs. Plot C use a standard intensive green roof system. The vegetation layer is pre-cultivated wildflower and grass growing on the 150 mm depth substrate. The drainage element made of deep-drawn plastic with large water storage cells. After a rainfall event, up to 17 L/m^2 water will be distributed and stored in the cup-like drainage cells. To further lower the maintenance need of the intensive green roof system, drip lines are clipped into the drainage elements to provide water directly in the root area. Three full-scale experimental green roofs are the most commonly utilised in the market and differ in the type of the drainage layer and in the usage of the wicking mat.

Eastside is equipped with an automatic weather station (recording data on rainfall, air temperature, solar radiation, wind velocity and direction and relative humidity) and separate set of sensors for unsaturated soil moisture and temperature, as well as runoff from individual plots. Each green roof plot is hydraulically isolated and covers 12 m², making the total monitoring area 36 m². Additionally, ad-hoc measurements are performed with mobile equipment for example spatial distribution of surface temperature by infrared camera. The data collected from the Eastside green roofs enables the performance analysis of the three green roof systems (both intensive and extensive) and validation of both existing and proposed simulation methods.

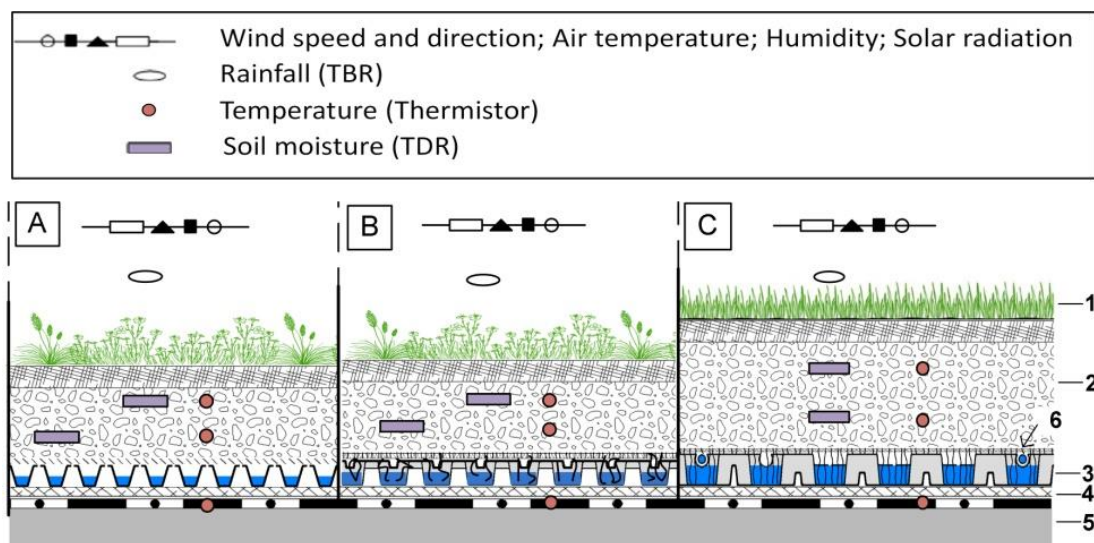


Fig. 1 Cross section of green roof systems and the schematic representation of the sensors location: 1. Vegetation; 2. Substrate; 3. Drainage layer (with filter sheet on top); 4. Protection layers (consists of root-resistant and waterproofing layers); 5. Roof insulation foam; 6. Wicking mat.

3 Analyses and Modelling of Green Roof Runoff Response

In the second phase, prior to the new model development, data collected from Eastside were analysed to gain initial insights into the performance of experimental green roof plots. Five rainfall events recorded in August 2014 were analysed for this study and the hydrologic characteristics of the rainfall events are listed in the Table 1. The percentage of retained volume and peak flow reduction and the delay of the hydrograph centroid with respect to the hyetograph centroid were also analysed for each rainfall event. During the record time, there is no runoff from Plot C (intensive system) achieving 100% runoff reduction for all events. The results show that both extensive and intensive green roofs can significantly reduce the volume of rainwater run-off, attenuate the flow and delay the peak time, especially for small events.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Table 1: Events observed at the Eastside green roof between 1st August 2014 and 31st August 2014 with the percentage of retained volume and peak flow reduction and the delay of the hydrograph centroid with respect to the hyetograph centroid.

Event Start Time	Rain Duration	Rainfall Depth	Mean Intensity	Peak 5-min Intensity	Return Period	Runoff Reduction (%)		Peak Runoff Reduction (%)		Peak Time Delay (hour)	
	[min]					[mm]	[mm/h]	[mm/h]	Plot A	Plot B	Plot A
06/08/14 01:25	405	10.0	1.5	7.2	<1 month	100	100	100	100	-	-
08/08/14 20:25	365	12.2	2.0	9.6	<1 month	100	100	100	100	-	-
10/8/14 01:50	795	29.6	2.2	40.8	1.54 years	40.3	52.7	48.3	67.6	0.2	0.2
25/8/14 07:00	870	38.4	2.65	7.2	2.90 years	37.0	49.1	13.5	32.7	5.0	5.0
26/8/14 09:15	555	4.2	0.45	2.4	<1 month						

By conducting comparisons using Eastside data, the applicability of current hydrologic green roof models, a simple linear reservoir (SLR) conceptual model and a physically-based model (Hydrus-1D), were investigated. The SLR model considers the green roof systems as divided into three layers, each one corresponding to a storage or reservoir, as shown in Figure 2.

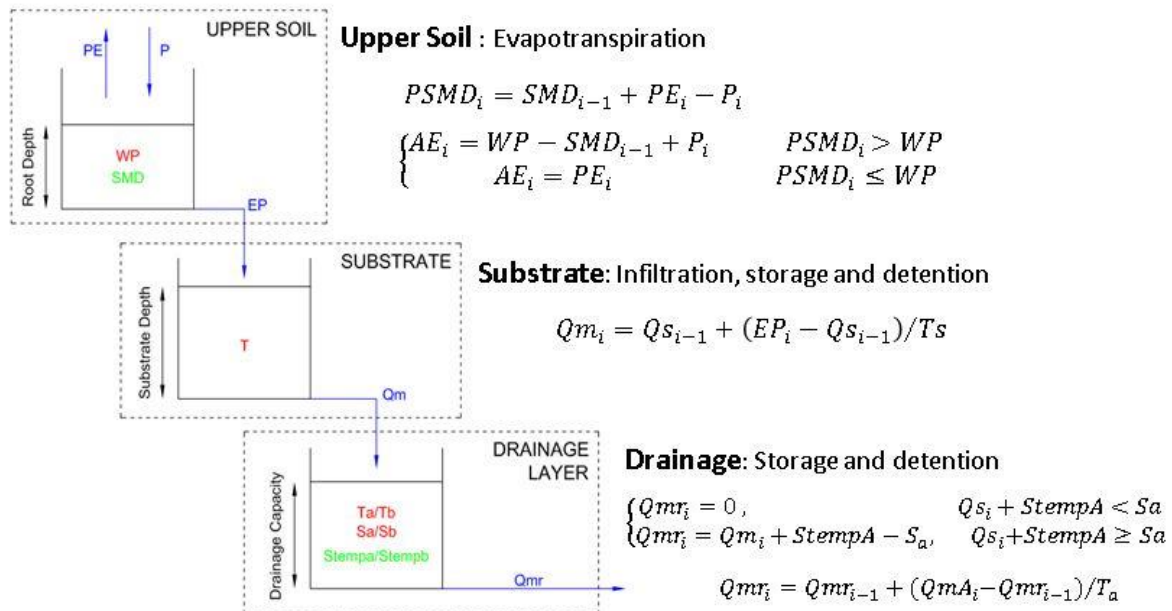


Fig. 2: A simple linear reservoir conceptual rainfall-runoff model (SLR Model) [8]

The physically-based model is a one-dimensional finite element model for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media [9]. The physically-based model calculates the potential evapotranspiration with the Penman-Monteith. A large number of highly dynamic physical variables, including: net radiation, air temperature, air relative humidity and the resistances will be needed as inputs for the model. The governing flow equation of the infiltration process is the one-dimensional form of the Richards' equation. The hyetographs, the corresponding measured hydrographs (indicated as blue line) and the hydrographs simulated with the SLR (indicated as red line) and the physically-based model (indicated as green line) for plots A for a validation event from 10/08/2014 is illustrated in Figure 3.

Both models appear to roughly follow in time the profile of the observed runoff, but clearly underestimate of around 40% the peak of discharge. The runoff peak of the SLR model is also delayed by one hour, making its appearance on the on the descending side of the measured one. Although both models underestimate the peak of discharge, the cumulative volume of stormwater runoff proceeding from the green roof is overestimated. The validation results for other events also confirm that the applicability of both models generally decreases with higher rainfall intensity and larger drainage storage capacity. Also, the physically based model shows greater potential for an accurate estimation of the runoff hydrograph from green roof systems.

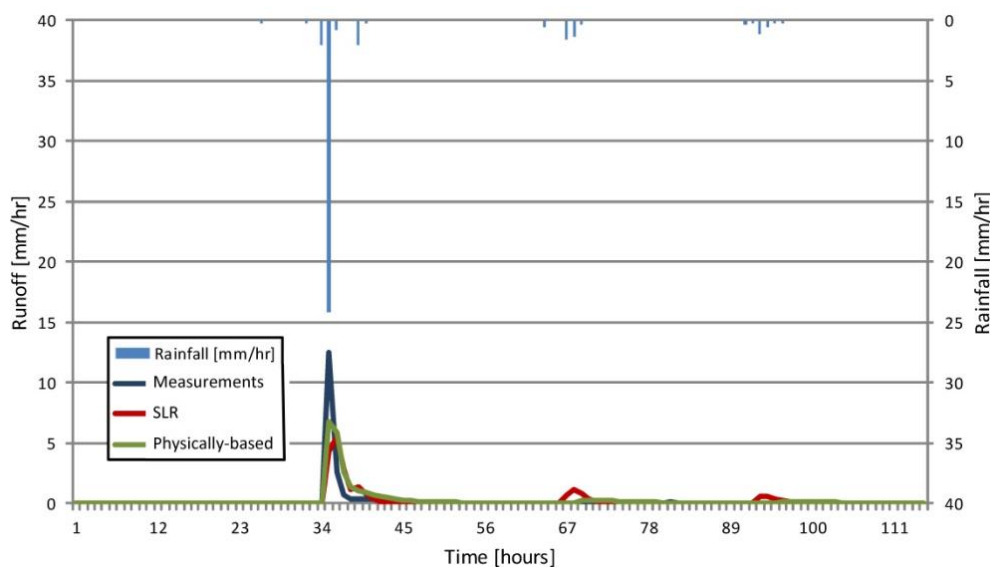


Fig. 3: The hyetographs, the corresponding measured hydrographs and the comparison of the simulated hydrographs with the SLR and the physically-based models results for Plot A used for validation for event from 10/08/2014

4 Other Potential Applications of the Experimental rig

4.1 Real Time (dynamic) Surface Flood Attenuation

Storm water that is harvested from the roof, after part of it is “absorbed” by the green roof and evaporated can be stored and reused for various purposes. An apparent use is irrigation of the

roof when needed in the dry periods. The other possible use of the storage space is for surface flood attenuation, irrigation of other green spaces and ground water recharge. There is a “conflict of interest” between irrigation which would preferably have the storage as full as possible and flood attenuation which would be at its maximum if the storage were empty at the time of the start of heavy storm which could cause flooding. This conflict can be reduced if the storage is kept as full as possible for irrigation purpose and emptied before heavy storm providing that the system is linked to an early warning or pluvial flood prediction such as presented in [11]. In that case the storage can be emptied into storm sewers, on green spaces or recharged into ground water aquifer and reused as presented in 4.2.

4.2 Use of the RWH (Roof Water Harvested) Overflow for Ground Water Recharge for Energy Generation

In order to avoid overloading of storm drainage system the case of Imperial College campus it is planned to transfer the overflow from the storage into the local ground water aquifer. Water from this aquifer would then be used for heating and cooling of buildings in the campus. Details of this plan will be presented elsewhere.

4.3 Development of the BG (Blue Green) Model for BIM (Building Information Management)

BIM technology can be used to design and integrate water (Blue) system and vegetated (Green) system in building site area (See Figure 4). With integrated BIM model, it can be used to analyse heat transfer, water usage, energy consumption and CO₂ reduction (See Figure 5).

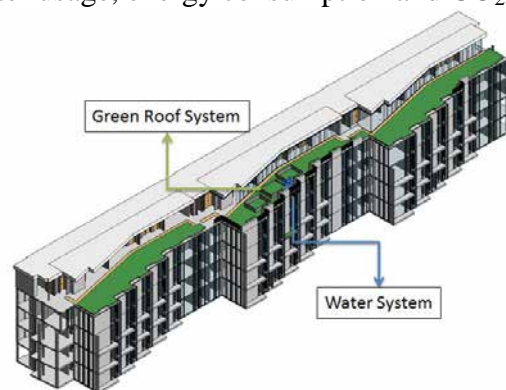


Figure 4: BIM Model and Blue Green System

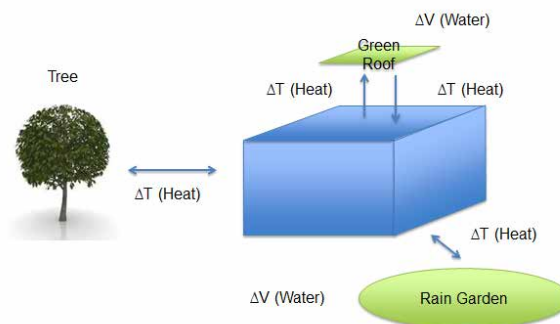


Figure 5: Evaluate Building Performance

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the financial support of the European Institute of Technology, Climate KIC funded project: Blue Green Dream - <http://bgd.org.uk/> (Grant No. APIN0022).

References

- [1] V. Stovin, G. Vesuviano, and H. Kasmin, "The hydrological performance of a green roof test bed under uk climatic conditions," *Journal of Hydrology*, vol. 414, pp. 148–161, 2012.
- [2] D. J. Bliss, R. D. Neufeld, and R. J. Ries, "Storm water runoff mitigation using a green roof," *Environmental Engineering Science*, vol. 26, no. 2, pp. 407–418, 2009.
- [3] V. Stovin, "The potential of green roofs to manage urban stormwater," *Water and Environment Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 192–199, 2010.
- [4] S. Alcazar and B. Bass, "Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in madrid," *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, DC, 2005.
- [5] S. Onmura, M. Matsumoto, and S. Hokoi, "Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens," *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 7, pp. 653–666, 2001.
- [6] N. She and J. Pang, "Physically based green roof model," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, no. 6, pp. 458–464, 2009.
- [7] Tabares-Velasco, Paulo César. Predictive heat and mass transfer model of plant-based roofing materials for assessment of energy savings. Diss. Architectural Engineering, 2009.
- [8] Liu, X., Mijic, A. and Maksimovic, C. (2015). Conceptual Model for Simulating the Hydrologic Performance of Extensive Green Roof Systems. In: The 7th International Conference of SuDBE2015. Reading.
- [9] R. N. Hilten, T. M. Lawrence, and E. W. Tollner, "Modeling stormwater runoff from green roofs with hydrus-1d," *Journal of Hydrology*, vol. 358, no. 3, pp. 288–293, 2008
- [10] Kuo, H. J., and S. H. Hsieh (2015). "BIM Design Framework for City's Blue-Green Dream", Proceedings of the 11th China Urban Housing Conference, July 24-25, 2015, Qingdao, China (in Chinese).
- [11] Ochoa Rodriguez, L. Thraves a. Johnston, S., Surface Water Floof Warning in England; Overview, Assessment and Recommendations, Int. Conf. on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe 5-7 September 2013, Exeter, United Kingdom

Integralno upravljanje i korišćenje oticaja kišnih voda sa Ostružničkog mosta

Jovan Despotović¹, Nenad Jaćimović², Jasna Plavšić³, Miloš Stanić⁴,
Aleksandar Đukić⁵, Dragutin Pavlović⁶, Andrijana Todorović⁷,
Vanja Živanović⁸, Sanja Milić⁹

APSTRAKT: Rad prikazuje sistem za kanalisanje i prečišćavanje kišnih voda sa kolovoza Ostružničkog mosta preko Save i dela obilaznog autoputa kod Beograda, i njeno upuštanje u podzemlje. Tretirani oticaj se upušta u irigacioni kanal ili u reku Savu u zaleđu bunara izvorišta Beogradskog vodovoda i kanalizacije (BVK). Tokom prethodnih gotovo 20 godina oticaj sa starog mosta je kroz otvore na konstrukciji slobodno padao na Savu i priobalje reke. U sklopu rekonstrukcije postojećeg i izgradnje novog mosta zbog novih propisa u oblasti voda, projektovan je integralni sistem za upravljanje oticajem sa mosta i njegovim kvalitetom. Koncept je da se u filterskom postrojenju tretira prva trećina zapremine kišnog oticaja. Prikazano rešenje predstavlja savremenu meru za poboljšanje komponenti bilansa voda (zapremine i kvalitet). Potencijal oticaja za prihranjivanje izdani BVK ocenjen je modeliranjem na osnovu prethodnih istraživanja karakteristika akvifera i može biti računat kao zahvatanje kišnog oticaja u specifičnim uslovima. Rešenje sadrži i praćenje – monitoring efekata predviđenog rešenja kao obavezno radi ocene uticaja projektovanih i izvedenih objekata i mera.

Ključne reči: reka Sava, most Ostruznica, kišni oticaj, kanalisanje, prečišćavanje, nalivanje kišnih voda.

Integral solution for the Ostružnica bridge runoff management and harvesting

ABSTRACT: The paper presents the rainfall runoff drainage and treatment system at the bridge Ostruznica deck. Treated water is used for recharge of groundwater aquifer of the Belgrade Water Supply System wells. For almost 20 years old bridge deck was drained through simple holes at the river Sava and its banks. The constraints and conditions for runoff discharge become stringent with time. From 2011 to 2014 the design project for reconstruction works was performed and the drainage system is to be completed on the existing and the new bridge adjacent to the first one. The integral solution comprises the drainage and irrigation and/or discharge water into the Sava River of pre-treated runoff from the portion of the highway Dobanovci – Bubanj Potok and the bridge. The first third of the runoff volume has to be taken for a pre-treatment. Solution should be considered as a measure of water cycle improvements. The recharge capacity potential is modelled based on data from previous analyses of the Sava aquifer characteristics and considered as rainfall harvesting in such conditions. Monitoring is planned as an obligatory tool for assessment of recharge and water quality impacts.

Keywords: river Sava, bridge Ostruznica, rainfall runoff, drainage, treatment, irrigation - aquifer recharge

¹ Dr Jovan Despotović, v.prof., Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, edespoto@hikom.grf.bg.ac.rs

² Dr Nenad Jaćimović, docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, njacimovic@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Dr Jasna Plavšić, v.prof, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, jplavsic@grf.bg.ac.rs

⁴ Dr Miloš Stanić, v.prof, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, mstanic@grf.bg.ac.rs

⁵ Mr Aleksandar Đukić, Institut „Jaroslav Černi”, Beograd

⁶ Dr Dragutin Pavlović, docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, epavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs

⁷ Andrijana Todorović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, andrijana@hikom.grf.bg.ac.rs

⁸ Vanja Živanović, dipl.grad.inž., Cekibeo d.o.o.

⁹ Sanja Milić, dipl.grad.inž., Cekibeo d.o.o.

1 Uvod

Glavni projekat mosta preko reke Save na autoputu E70/E75 (deonica Dobanovci-Bubanj Potok) u blizini Beograda uključuje i kompleksno rešenje sistema za kanalisanje kišnih voda sa dela autoputa od km 574+050 do km 578+150, tj. sistem obuhvata odvodnjavanje dva mosta - starog i novoprojektovanog.

Rešenje je projektovano u skladu sa važećim nacionalnim zakonodavstvom i ograničenjima i preporukama koje se tiču zaštite čovekove okoline odnosno kriterijuma za odvođenje kišnih voda sa saobraćajnica i njihovo ispuštanje u vodotokove/podzemlje.

Konstrukcija mosta ukupne dužine 1966 m i širine 14.3 m je mešovita – delom je u pitanju armirano-betonska konstrukcija (dva dela ukupne dužine 1388 m) sa čeličnim centralnim delom nad rekom u dužini 588 metara, videti sliku 1.

2 Koncept odvodnjavanja mosta/saobraćajnice

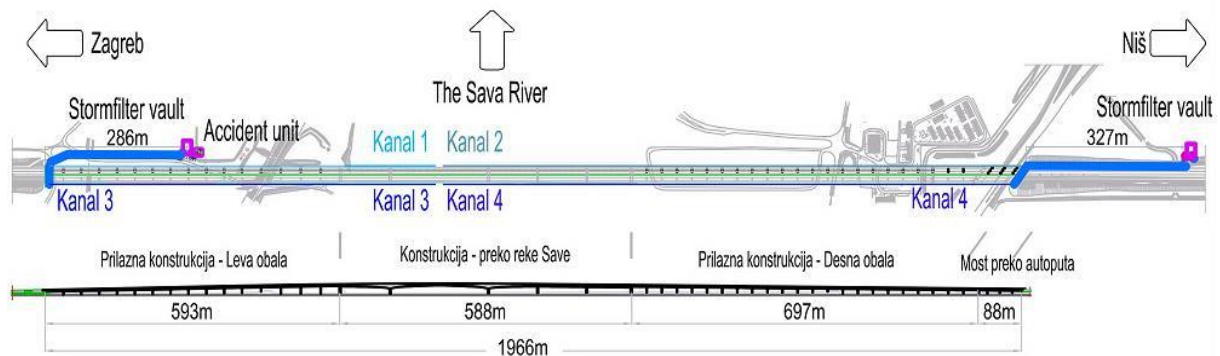
2.1 Uvod

Na najvišem nivou kompletne konstrukcije sistem za odvodnjavanje mostova i priradajućih deonica auto puta, ima sledeće elemente:

- Sa najviše tačke kolovoza na mostu polaze 4 odvodne cevi (cevi 1, 2, 3, 4) – sa svake kolovozne trake po jedna i ka rečnim obalama; važi za oba mosta – vidi sliku 1.
- „Cev 1” (leva saobraćajna traka – leva obala) i „Cev 3” (desna saobraćajna traka – leva obala) spojene su u revizionom oknu R3-47, odakle zajedno sa vodom sa deonica 1 i 2 pripadajućih delova autoputa teku na instalacije za tretman, a zatim se tretirana voda ispušta u retenzioni bazen odakle se pumpa (crpna stanica na obali Save) potiskuje u reku Savu ili se odvodi u irigacioni kanal u zaleđu bunara. U neposrednoj blizini retenzije nalazi se početak drenažnog kanala koji treba da ubacuje vodu iza niza reni bunara sistema za vodosnabdevanje „Beogradskog vodovoda i kanalizacije” koji se nalazi na levoj obali reke Save (bunari W43 – W50, slika 2).
- Cev duž stuba M5 spaja „Cev 2” (leva saobraćajna traka – desna obala Save) i „Cev 4” (desna saobraćajna traka – desna obala Save) na deonici od ~340 m i sprovodi vodu do objekta za tretman i kasnije upuštanje tretiranih voda u obližnji kanal.
- Imajući u vidu da se voda posle tretmana upušta u kanale za navodnjavanje/odvodnjavanje, voda se mora prečistiti kroz postupke taloženja i odvajanja drugih zagadivača. Ovo je vrlo važno jer se mostovi na Savi nalaze u užoj zoni zaštite izvorišta za sistem snabdevanja Beograda pijaćom vodom.
- Na mestu ispuštanja tretiranih voda u irigacionu kanalsku mrežu treba izgraditi ispusnu građevinu kako bi se osigurala stabilnost i trajnost ove lokacije.

Na slici 1 je prikazan most preko Save u Ostružnici u situaciji i u podužnom preseku, sa osnovnim elementima i delovima sistema za kanalisanje i prečišćavanje kišnih voda sa mosta i sa dela obilaznice - autoputa Dobanovci – Bubanj Potok. Takođe se mogu videti i dva objekta za pretretiranje kišnog oticaja, na obe obale reke Save; više reči o tome kasnije.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Osnova, presek mosta, elementi i objekti kanaliziranja na mostu Ostružnica preko Save

2.2 Principi odvođenja kišnih voda

Koncept sistema odvodnjavanja kišnih voda podrazumeva sprovođenje različitih faza i instalaciju odgovarajuće opreme i izgradnju potrebnih objekata:

- zahvatanje i sprovođenje kišnih voda rigolama i slivnicima (slivničkim rešetkama) sa gornje površine mosta – kolovoz i pešačka traka,
- „prikupljanje” – sprovođenje vode sa više slivnika-rigola sistemom cevi koje su okačene na mostovsku konstrukciju ili prolaze kroz nju,
- ispuštanje tako prikupljenih voda na određenim – definisanim mestima-pozicijama,
- primarni tretman kišnih voda na sabirnim lokacijama u objektima gde se pored taloženja i odmašćivanja kišni oticaj i filtrira, pre nego što se ispusti u retenzije u obalnoj zoni na obe strane vodotoka oko mostova.

Osnovni princip pri analizi i dimenzionisanju elemenata i kanalizacionog sistema je ujednačena sigurnost odvijanja saobraćaja na ukupnom potezu – deonici autoputa oko Beograda, prema standardima SRPS-EN-754 je definisano povratnim periodom 10 godina.

2.3 Hidrološki podaci

Za potrebe projektovanja obezbeđene su ITP krive za jake kiše kratkog trajanja za kišomernu stanicu Vračar-Beograd (dato u tabeli 1), od 5 minuta do 60 minuta trajanja i povratnog perioda 10 godina (SRPS-EN-754). Izbor merodavnih intenziteta ili visine padavina je veoma delikatan - osetljiv deo kompletne analize oticaja i dimenzionisanja elemenata i sistema za kanaliziranje i prečišćavanje jer se neadekvatnim izborom merodavnih padavina mogu lako zaključiti pogrešni sudovi i ocene merodavnih proticaja kao i zapremina oticaja, što sdalje prouzvodi nesolidne sisteme i neadekvatnu zaštitu, takođe neujednačenu u pojedinim delovima sistema, odnosno infrastrukture koju treba zaštititi od kišnih voda i poplava, kao i zagađenja koje kišne vode donose (Plavšić, Despotović, 2005; Despotović, 2009).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 1: Kišomerna stanica Vračar-Beograd: ITP vrednosti za računke kiše verovatnoća pojave 1%, 10% i 50% (povratni periodi redom 100, 10 i 2 godine), trajanja do 60 minuta
Table 1: IDF curves of probability of occurrence 1%, 10% and 50%, i.e. for return periods of the 100 years, 10 years and 2 years, up to 60 minute duration

T [min]	I _k (T,1%) [L/s/ha]	I _k (T,10%) [L/s/ha]	I _k (T,50%) [L/s/ha]
5	633.68	448.93	319.99
10	431.02	305.35	217.65
15	331.96	235.17	167.63
20	272.40	192.98	137.55
25	232.31	164.57	117.31
30	203.32	144.04	102.67
35	181.31	128.44	91.55
40	163.96	116.16	82.80
45	149.92	106.21	75.70
50	138.29	97.97	69.83
55	128.50	91.03	64.89
60	120.12	85.10	60.65

Podsećanja radi, za analize i proračune kanalizacionih sistema se koriste merodavne padavine-kiše odgovarajućeg intenziteta, upravo prema brzini tečenja u cevi-kanalu od 5 minuta do potrebnih trajanja za pojedine objekte i deonice cevi-kanala. Za slivnike su korišćene 5-o minutne kiše, za dimenzionisanje cevi i kanala kiše dužih trajanja do 60 minutnog intenziteta i zapremine za retenziju (Despotović, 2009; Despotović, sa sar., 2014) .

2.4. Izbor slivnika

Izbor slivnika zavisi od tipa konstrukcije na/u koju treba da se postave – beton ili čelik kao i od obaveznih parametara i uslova, od kojih je najvažniji rastojanje slivnika (Despotovic, et al., 2007; Despotović, 2009). Duž betonskog dela konstrukcije postavljeni su slivnici sledećih karakteristika: klasa C250KN, okvir 850 mm, otvori 600 mm, zahtevana visina okvira sa postavljenom rešetkom je 75 mm, a težina 75 kg. Odvodna čelična cev Ø150 mm se priključuje na slivnik, a vododrživost spoja se ostvaruje epoksidnim premazom.

Određena odstupanja od načina postavljanja slivnika javljaju se na ukrštanju (odnosno nadvoznoj konstrukciji) gde je osa slivnika pomerena za ~5 cm kako bi se izvršilo mimoilaženje sa stubovima konstrukcije.

2.5. Zagađenje u prvoj zapremini - količini oticaja

Uporedo sa povećanjem proticaja nakon početka kiše, raste i zagađenost oticaja za mosta do određenog momenta, a zatim opada do trenutka kada se može smatrati da su padavine sprale

gotovo svo zaostalo zagađenje deponovano iz sušnog perioda. Vremenski period od pojave prvog oticaja na izlaznom profilu sistema do trenutka kada je koncentracija zagađenja na dozvoljenom nivou za ispuštanje u vodoprijemnike bez prečišćavanja (postignut zahtevani stepen razblaženja zagađenja) naziva se u hidrotehničkom žargonu „prvi oticaj” (od engleskog „the first flush”). Postoje različite pristupi koji opisuju ovaj fenomen (Despotovic, 2009). Za različite zagađujuće materije vreme „prvog oticaja“ (tj. dozvoljenog nivoa koncentracije u vodi) je različito.

Takođe, vreme trajanja prvog oticaja zavisi od dužine putanje vode do objekta za tretman i intenziteta računске kiše. Na mostu na Savi ovo vreme je kratko i iznosi par minuta, zbog kratkih putanja tečenja kao i kiša kratkih trajanja (5 minuta) i jakih intenziteta. Za kompletan sistem za odvodnjavanje mosta i saobraćajnice računska kiša je trajanja 60 minuta.

3.5. Dilatazione spojnice i temperaturni kompenzatori

Temperaturne deformacije mostovske konstrukcije računate su za temperaturni opseg od 36°C. Predviđena je ugradnja dilatacionih spojnica, posebno projektovanih i proizvedenih. Pored kompenzacije temperaturnih deformacija i drugih usled sleganja i dinamičkog opterećenja, usvojene spojnice smanjuju i uticaj vibracija koje mogu dovesti do zamora cevnog materijala sistema za odvodnjavanje mosta. Predviđeni su i elementi koji treba da reaguju na sprečavanje preteranih deformacija cevovoda u vertikalnom pravcu usled deformacija pešačkih staza ispod kojih su cevovodi okačeni. Vertikalni kompenzatori (za deformacije do ~15 mm) nalaze se ispod svakog slivnika kao i na vertikalnim trasama cevovoda u postavljenim uz stubove mosta. Na delovima cevovoda koji se prostiru pod malim nagibom (gotovo horizontalno) fleksibilnim elementima omogućene su dilatacije različitih veličina (± 25 mm, ± 50 mm, ± 100 mm ± 120 mm, ± 130 mm) bez stvaranja deformacionih opterećenja. Dilatazione spojnice su projektovane i ugrađene na svim krajevima glavnog čeličnog raspona mosta (pokrivaju podužne deformacije do ~230 mm).

Ovaj deo proračuna i dimenzionisanja takođe obuhvata efekte promena nagiba cevi, kao i promene nagiba oticajnih površina mosta – kolovoza i staza, što podrazumeva proveru minimalnih i maksimalnih brzina (Despotović sa sar, 2014).

3.6. Tehnologija tretmana oticaja sa mosta/saobraćajnice

Pre upuštanja prikupljenih kišnih voda sa oba mosta (starog i novog) u odvodne kanale ili samu reku Savu, predviđeno je da budu tretirane do izvesne mere kako bi se uklonile taložljive materije, ulja i masti kao i deo ostali zahađenja. U objektima za tretman predviđena je ugradnja komercijalnih modula Stormfilter® (STORMFILTERITALIA), koji su testirani na mnogim saobraćajnicama širom Italije, a u Srbiji na mostu Gazela (preko reke Save, na autoputu E75 kroz Beograd). Oni su se pokazali sasvim zadovoljavajućim za uklanjanja teških metala koji se nalaze u oticaju sa saobraćajnica. Ovi filteri se ugrađuju u podzemne komore/rezervoare sa prethodnom taložnikom. Filteri su cilindričnog oblika – postavljaju se u baterijama, a svaki filter je kapaciteta oko 2 L/s vode koja se filtrira.

4 Tehnička rešenja

U tabeli 2 prikazani su rezultati proračuna kišnog oticaja sa površina između dva slivnika (prema Racionalnoj metodi), po formuli $Q [L/s] = Bm L i K_o$; gde je $L [m]$ rastojanje između slivnika, i intenzitet merodavne 5-minutne kiše od 449 L/s/ha, K_o koeficijent oticaja (usvojen avrednost 1), i Bm širina mosta od ukupno 14.3 m. Rastojanja između slivnika su različita – od 8.5 m, 10 m, 12 m, 16.5 m i 22 m, u zavisnosti od podužnog i poprečnog nagiba kolovoza i drugih parametara vezanih za tečenje (Despotovic et al, 2005; Despotović, 2009; Despotović sa sar, 2014).

Tabela 2. Rastojanje između slivnika $L [m]$ u funkciji dotoka do njih $Q [L/s]$.
 Table 2. Distance between inlets $L [m]$ and approach flow rate $Q [L/s]$.

L [m]	8.5	10	12	16.6	22
Q [L/s]	5.46	6.42	7.70	10.66	14.13

Pošto je most projektovan bez zaustavne trake, tehničko rešenje odvodnjavanja je izvedeno pod pretpostavkom da se kišna voda za merodavnu kišu raspoređuje neposredno nizvodno od slivnika samo širinom servisne trake (što je prostor od ograde mosta do ivice njoj najbliže saobraćajne trake).

Dodatni problem koji se tiče postavljanja slivnika na neekvidistantnom rastojanju, pored promenljivog podužnog i poprečnog pada, predstavlja i preklapanje pozicije slivnika sa elementima konstrukcije mosta koje nije moguće/dozvoljeno probijati/bušiti itd. Zbog toga rastojanja između slivnika variraju od 8.5 m do 22 m, a njihov inicijalni položaj (dobijen hidrološko-hidrauličkom računicom) korigovan je u saradnji sa projektantima konstrukcije.

5 Preveniranje zagađenja obala i izvorišta vodosnabdevanja

Ostružnički most je u užoj zoni sanitarne zaštite izvorišta Beogradskog vodovoda, tačnije u zoni zaštite sistema bunara. Zbog toga je potrebno kod odvodnjavanja kišnih voda sa mosta zagađenih usled saobraćajnih sredstava kontrolisati kvalitet kanalisanih voda i prečišćavati je. U slučaju ostružničkog mosta je predviđeno rešenje kontrolisanog odvodnjavanja kišnih voda kako još nije primenjeno u Republici Srbiji, zbog strogih uslova zaštite čovekove okoline ali i izvorišta vodosnabdevanja. Ovim se ide u susret uslovima koje postavlja Evropska direktiva o vodama, ali i želja da se ispune kriterijumi oštriji od zakonskih u cilju održivosti rešenja.

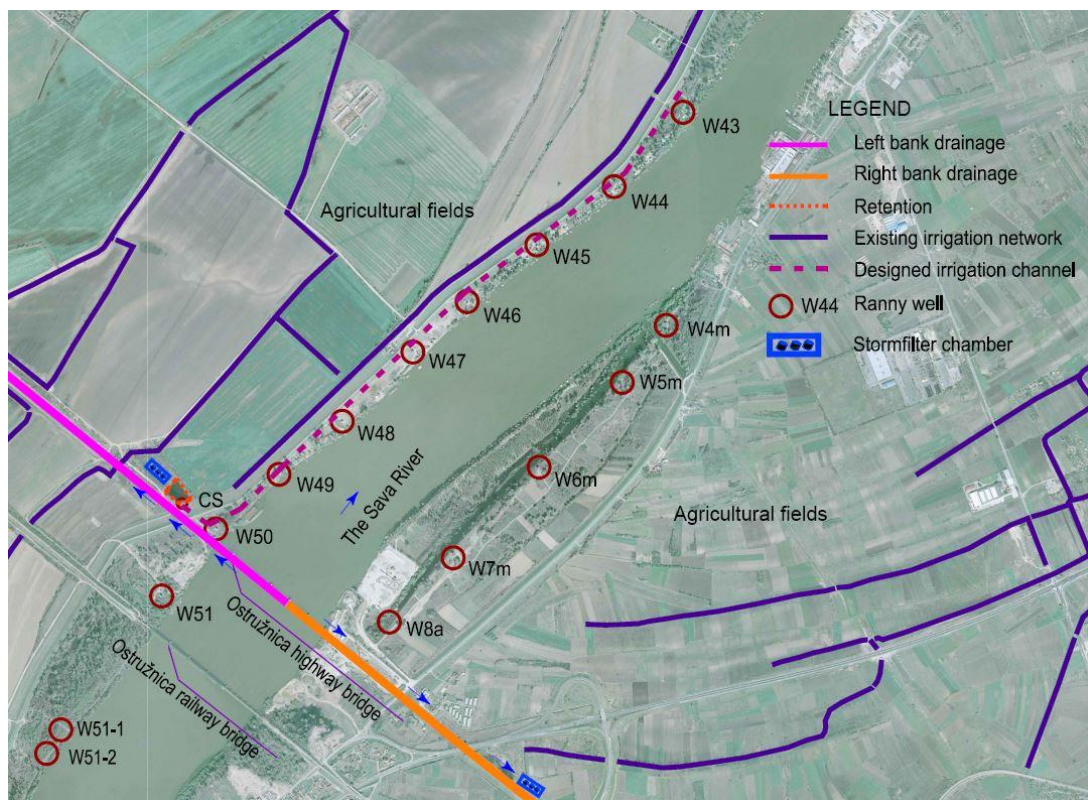
Jedna od realnih mogućnosti je primena opreme i infrastrukture za sakupljanje prosutih tečnosti i materijala u slučajevima incidenata na saobraćajnicama (sudari, prevrtanja, transportnih vozila sa opasnim i zagađujućim materijama, itd). Međutim, pošto je to postfestum reakcija, sa nedefinisano dugom vremenskom distancom, odluka je bila da se instalira sistem koji će raditi samostalnije, tj. sa značajnom manjom zavisnošću od ljudskog prisustva.

Od većeg broja razmatranih sistema prihvaćen je sistem pod imenom SW-ERM 03®, tj. SW Environmental Risk Management 03®rItalia (www.stormwateritalia.com) koji se dodaje objektu sa filetrikom (Stomrfilter unit). Rešenje se sastoji od objekta koji se postavlja na pome-nutu lokaciju i koji sadrži betonski rezervoar, opremu, senzore a računarski je pod nadzorom

odgovarajućim softverom. Ovaj sistem se može integrisati u informacionu mrežu upravljača putnim pravcem ili putnim objektom. Time se omogućava da incidentne situacije iz oblasti zagađenja voda mogu biti obznanjene i drugim učesnicima u saobraćaju ukoliko će to izazvati privremeno zatvaranje saobraćajnice ili njenog dela. Sa hidrotehničko-zaštitnog stanovišta ovakav sistem aktivnim kontrolama na sistemu (ventili, ustave, elementi tretmana, itd.) može da spreči propagaciju zagađenja nizvodno u sistem i ka recipijentima u okruženju; videti sliku 2.

6 Monitoring izvedenog sistema odvodnjavanja

Obnova zaliha podzemne vode (*groundwater recharge*) prikupljanjem, tretmanom i upuštanjem u podzemlje površinskog oticaja sa mostova i okolnih pripadajućih delova saobraćajnica kod Ostružnice, na prelasku preko Reke Save na putu E75 kod Beograda, biće neprekidno osmatrana korišćenjem postojeće i dodatne mreže pijezometara. Ova mreža pijezometara obuhvata zonu oko retenzije, meliracionih kanala, mreže Reni bunara i oblasti u zaleđini sistema. Predviđeno je kontinualno osmatranje nivoa podzemnih voda, sa zahvatanjem uzoraka na dve nedelje radi utvrđivanja parametara kvaliteta vode. Proširena lista parametara kvaliteta ustanovljena je prema srpskom zakonodavstvu u oblasti vode za piće.



Slika 2. Situacija – mostovi, saobraćajnice i neposredno nizvodni potez reke Save sa serijom bunara izvorišta BVK na obe obale reke Save (crveni krugovi) i irigacioni kanal
 Figure 2. Plan view – bridges, roads, the river Sava stretch downstream bridge Ostružnica and the Belgrade Water and Sewerage Company water wells (red circles) and irrigation channel

Osim na mostu Gazela koji se nalazi u centralnoj zoni grada Beograda, na svim ostalim mostovima koji su u oblasti koja predstavlja izvorište vodosnabdevanja grada odvedena kišna voda direktno ispušta u reku Savu ili u podzemlje bez ikakvog prečišćavanja (videti sliku 2).

Monitoring nivoa i kvaliteta vode će se koristiti za ocenu vrednosti računskih parametara korišćenih u modeliranju podzemne sredine u fazi projektovanja – očekivano rekalkibrisanje modela trebalo bi da da pouzdanije pokazatelje efektivnosti predviđenih mera a samim tim i mogućnost da se uvedu korekcije u izvedeni sistem i poveća njegova efektivnost u smislu režima podzemnih voda i održavanja njihovog kvaliteta. Konkretna uloga numeričkog modela tečenja vode u podzemlju je kontrola režima podzemnih voda u zoni bunara od W43 do W50 na desnoj obali reke Save (Slika 1). Ovo bi trebalo da stvori osnovu za kvaliteteno projektovanje sličnih drenažnih sistema na postojećim i budućim mostovima preko reke Save.

7 Zaključci

Odvodnjavanje kišnih voda sa Ostružničkog mosta preko reke Save izvedeno je na netradicionalan način – projektovan je kompleksan sistem prikupljanja i tretmana voda. Složeni sistem je osmišljen imajući u vidu potrebu za povećanjem bezbednosti saobraćaja i pouzdanosti transporta, ali i zahteve za zaštitu vodnih resursa kao dela čovekove okoline. Tretirane vode se privremeno zadržavaju u retenziji a zatim se njihov deo upušta u rečni podzemni akvifer na levoj rečnoj obali koji je ujedno i deo izvorišta pitke vode grada Beograda kojim gazduje javno preduzeće Beogradski vodovod i kanalizacija. Radi izbegavanja mogućeg negativnog uticaja na kvalitet vode u akviferu usopstavljen je sveobuhvatni sistem monitoringa.

Izvođenjem projekta ostvaren je značajan boljitak u procesu odvođenja kišnih voda – stari sistem se sastojao samo od otvora koji su vodili od porvšine mosta kroz konstrukciju i koji su se slobodno drenirali. Na starom mostu ovo stanje je trajalo punih 40 godina, što znači da je zagađenje od saobraćaja ali i od degradirane konstrukcije bez ikakvih smetnji dospevalo na tlo, u podzemlje i direktno u vodotok. Savremeni drenažni sistem takođe štiti od oštećenja i kvarova i mnogobrojne infrastrukturne instalacije koje koriste mostovsku konstrukciju da pređu vodotok (vodovod, električna energija, telekomunikacije, itd). Predviđeni monitoring akvifera treba da omogući kvalitetnije numeričko modeliranje podzemne sredine u odnosu na ono sa početka projekta. Time će se omogućiti da se na novim projektima premošćavanja vodotokova u zoni Beograda na reci Savi omogući obnova zaliha vode u akviferima kišnom vodom sa saobraćajnicama i nepropusnih površina čiji je kvalitet kontrolisan..

Projekat je primer saradnje šireg tima – istraživača, projektanata, investitora i lokalnih vlasti, koji imaju viziju i žele da u zajedničkom poduhvatu ostvare moderno, pouzdano, efikasno i održivo rešenje uklapanja građevinskih poduhvata u čovekovo okruženje u urbanim uslovima. Na ovaj način se može postići delimično smanjenje negativnog uticaja klimatskih promena koje se ogleda u smanjenju nivoa podzemnih voda i kapaciteta akvifera, sa jedne strane, i smanjenja čestine padavina uz ekstremizaciju njihovih količina i intenziteta.

Takođe je primenjen i sistem za pravovremnu sanaciju incidentnih situacija u oblastima koje su od najvećeg značaja za očuvanje vodnih resursa i izvorišta vode za piće.

Stoga, ovaj projekat je primer kako se problematična situacija do izvesne mere može pretvoriti u dobit za hidrološki ciklus, količine i kvalitet vodnih resursa i korisnike voda.

Zahvalnost

Autori su zahvalni na podršci i pomoći JP „Putevi Srbije” i JP „Beogradski vodovod i kanalizacija”, preduzećima „Strabag” AG, „Mostogradnja”, „Mostprojekt”, „Cekibeo” i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije (projekat TR37010).

Literatura

1. J. Petrović, J. Despotović: Historical rainfall for urban storm drainage design, *Water Science and Technology*, Vol. 37, No. 11, pp. 105-111, 1998.
2. J. Despotović, J. Petrović, N. Jaćimović: Measurements, calibration of rainfall-runoff models and assessment of the return period of flooding events at urban catchment Kumodraž in Belgrade, *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 127- 133, 2002.
3. J. Despotović, N. Stefanović, D. Pavlović, J. Plavšić: Inefficiency of urban storm inlets as a source of urban floods, *Water Science and Technology*, Vol. 51, No. 2, pp. 139 - 145, 2005.
4. J. Despotović, *Kanalisanje kišnih voda*, Građevinski fakultet, Beograd, ISBN 978-86-7518-075-3, 420 strana, 2009.
5. J. Despotović, J. Plavšić J., N. Jaćimović, Lj. Janković: Odvođenje kišnog oticaja u gradovima i sigurnost saobraćaja, *Voda i sanitarna tehnika*, 40(1), str. 29-34, 2010.
6. J. Despotović, S. Nikoletić, V. Živanović, P. Dulić, Idejni i glavni projekta odvodnjavanja kišnih voda sa mosta Ostružnica, za Mostprojekt, 2015.

Primena distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju oticaja u uslovima karsta

Nenad Jaćimović¹
Miloš Stanić²
Tina Dašić³
Duško Vujović⁴

APSTRAKT: U radu je prikazana primena fizički zasnovanog, distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju oticaja na karstnim slivovima. Model 3Dnet-HET je razvijen za simulaciju oticaja na slivu reke Trebišnjice, a u okviru ovog rada će se prikazati rezultati simulacija na slivu Dabarskog polja i izvorišne zone reke Bregave. Razvijeni model je u potpunosti zasnovan na fizičkim zakonitostima kojima se opisuje transformacija padavina u površinski i podzemni oticaj. Proračun transformacije padavina u oticaj je funkcionalno podeljen na dva osnovna dela, gde izlaz iz prvog dela predstavlja ulaz u drugi. U prvom delu simulira se vertikalno kretanje vode i formiranje podzemnog i površinskog oticaja, na osnovu padavina i meteoroloških uslova kao ulaznih parametara. Drugi deo razvijenog hidrološkog modela predstavlja (uslovno) horizontalno kretanje vode u karstnoj sredini.

Ključne reči: karst, hidrološki model

Application of distributed hydrologic model for runoff simulation in karst terrains

ABSTRACT: The paper presents application of physically based, distributed hydrologic model for simulation of runoff at karst terrains. The 3Dnet-HET model is developed for simulation of river Trebisnjica catchment, however, in this study it is applied for simulation of time series at the Dabarsko polje catchment, as well as river Bregava catchment. Developed model is completely based on physical relations, which describe transformation of rainfall into surface and groundwater runoff. Functionally, it is divided into two modules. The first one computes the vertical water balance with precipitation and meteorological parameters as the model input, while the second part simulates the "horizontal" water balance as the water circulation through the karst environment.

Keywords: karst terrain, hydrological modeling

¹ Dr Nenad Jaćimović, Docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, njacimovic@hikom.grf.bg.ac.rs

² Dr Miloš Stanić, V. Profesor, firma, adresa, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

³ Dr Tina Dašić, V. Profesor, firma, adresa, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

⁴ Duško Vujović, ZP „Hidroelektrane na Trebišnjici“ a.d., Trebinje, Rep. Srpska

1 Uvod

Usled izuzetne složenosti i neodređenosti podzemnih tokova u karstnim uslovima, modeliranje oticaja na karstnim slivovima predstavlja poseban izazov [1,2]. U tom smislu, generalno su moguća dva pristupa za matematičko modeliranje transformacije padavine u oticaj na slivu. U prvom slučaju radi se o modelu tipa 'crne kutije', gde se na osnovu osmotrenih vremenskih serija uspostavljaju statističke relacije između pojedinih procesa vodnog bilansa. Primenom ovakvog pristupa, uz primenu modernih tehnika kalibracije parametara, pokazalo se da se veoma dobro mogu simulirati osmotrene hidrauličke veličine u složenim karstnim sistemima, kao što je to slučaj sliva reke Trebišnjice .

Drugi pristup predstavlja korišćenje fizički zasnovanih relacija za opisivanje pojedinih komponenti formiranja površinskog ili podzemnog oticaja. Ovakav pristup, jasno, zahteva znatno detaljnije poznavanje uslova na slivu i podrazumeva značajan broj parametara modela koji su predmet kalibracije. Međutim, primena ovakvih modela, sa prihvatljivim nivoom složenosti i uz kvalitetno sprovedenu kalibraciju i verifikaciju modela, može da pruži pouzdan model koji se može koristiti u predikcione svrhe, kada se očekuju promene na slivu, kao što je to u slučaju izgradnje objekata kojima se menja bilans voda na pojedinim delovima sliva (akumulacije, hidrotehnički tuneli, itd.).

U ovom radu je predstavljen distribuirani, fizički zasnovan model 3DNet-HET, (Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu) koji je primenjen za simulaciju oticaja na slivovima reke Trebišnjice i reke Bregave u istočnoj Hercegovini.

2 Opis modela

Prema prostornoj diskretizaciji, hidrološki modeli mogu da budu:

- prostorno homogeni modeli,
- prostorno raspoređeni modeli (distribuirani modeli), i
- prelazni, prostorno djelimično raspoređeni modeli (semi-distribuirani modeli).

U slučaju prostorno homogenih modela, sliv se tretira kao homogena celina sa parametrima koji predstavljaju efektivne vrednosti. U slučaju prostorno raspoređenog modela, sliv se deli na veliki broj podslivova sa različitim karakteristikama, a jednačine modela se rešavaju za svaki poligon zasebno. Od broja i veličine poligona zavisi i koliko će model biti prostorno raspoređen i koliko u obzir uzima prostornu varijaciju parametara.

Hidrološki model 3Dnet-HET pripada grupi fizički zasnovanih distribuiranih modela. Pod pojmom „distribuirani“, podrazumevaju se hidrološki modeli koji su prostorno dekomponovani na manje podslivove. Oticaj sa ovih podslivova završava u kontrolnim profilima hidrografske mreže – hidroprofili (HP) ili karstnim izdanima (KI).

Usvojeni hidrološki model je u potpunosti zasnovan na fizičkim zakonitostima kojima se opisuje transformacija padavina u površinski i podzemni oticaj. Prostorna dekompozicija modela podrazumeva podelu slivnog područja na elemente proizvoljnog oblika, pri čemu se svaki element opisuje određenim brojem karakterističnih veličina (koeficijent vertikalne filtracije, poroznost, karakteristične vlažnosti, itd.). Nad ovim elementima se najpre vrši proračun vertikalnog vodnog bilansa. U okviru prostorne diskretizacije, korišćeni su još elementi koji predstavljaju karstne izdani, karstna polja, veštačke akumulacije i hidrauličke veze koje u hidrauličkom smislu povezuju prethodno navedene elemente.

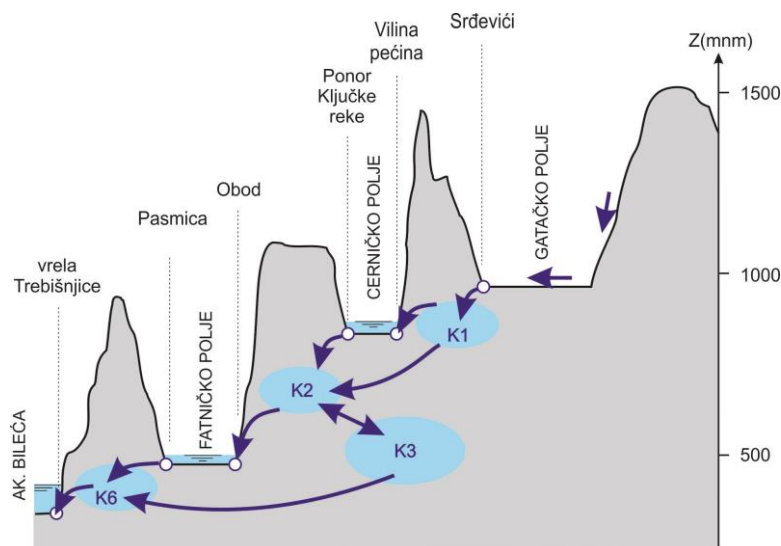
Navedeni elementi se generalno mogu podeliti na čvorove sistema, kao što su karstna polja, podzemne karstne izdani, veštačke akumulacije, i skup hidrauličkih veza koje reprezentuju površinske i podzemne tokove kojima su povezani navedeni čvorovi i koje predstavljaju linijske elemente sistema. Pomoću linijskih elemenata sistema (hidrauličkih veza) se vrši proračun (uslovno rečeno) horizontalnog vodnog bilansa.

Proračun transformacije padavina u oticaj je funkcionalno podeljen na dva osnovna dela, gde izlaz iz prvog predstavlja ulaz u drugi. U prvom delu se simulira vertikalno kretanje vode i formiranje podzemnog i površinskog oticaja. Ulaz u ovaj deo su padavine i meteorološki parametri, dok izlaz predstavlja veličina infiltracije ka karstnim izdanima i površinski oticaj na karakterističnim hidroprofilima, kao što su karstna polja. Vertikalni vodni bilans se distribuirano računa na čitavoj površini sliva, pri čemu će detaljniji matematički opis ovog procesa biti prikazan u nastavku.

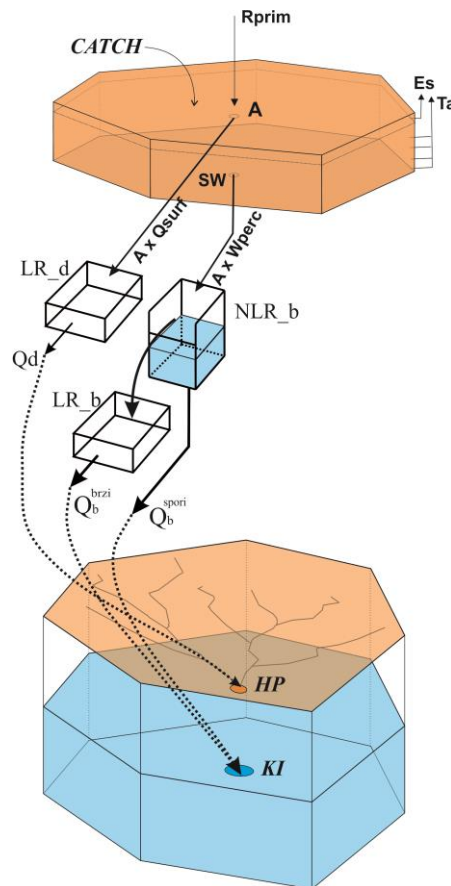
2.1 Proračun vertikalnog vodnog bilansa

Na nivou svakog podsliva se računa vertikalni bilans i određuju komponente površinskog (označenog sa Q_{surf}) i dubinskog oticaja (označenog sa W_{perc}). Svaka komponenta oticaja se izliva u poseban linearni rezervoar (LR_d i LR_b) i transformiše se u oticaj na odgovarajućem pripadajućem hidroprofilu. Ova transformacija kroz linearne rezervoare se obavlja nezavisno za obe komponente tako da je moguće imati različite čvorove (HP ili K) u kojima završava površinski i/ili dubinski oticaj. Na slici 2 je shematski prikazan jedan podsliv sa osnovnim komponentama vertikalnog vodnog bilansa na podslivu.

Ulazni podaci za proračun vertikalnog bilansa su padavine i potencijalna evapotranspiracija, zadati u formi fluksa na površini terena kao i temperatura vazduha (T_{max} , T_{min} i T_{sr}). Ukoliko su u model uneti podaci sa više meteoroloških stanica, primenjuje se prostorna interpolacija kao i visinska korekcija padavina i temperature tako da svaki podsliv ima jedinstvene ulazne meteorološke podatke.



Slika 1. Shematski profil dela sliva Trebišnjice sa prikazom hidrauličkih veza i čvorova kao osnovnih elemenata dekomponovanog sistema (K predstavlja oznaku karstne izdani, dok strelice označavaju hidrauličku vezu)



Slika 2. Shematski prikaz podsliva površine A i osnovnih komponenti vertikalnog vodnog bilansa

U okviru podsliva računaju se sve komponente vertikalnog vodnog bilansa, pa se isti može dekomponovati na tri zasebna rezervoara:

- rezervoar vegetacije u kome se odvija intercepcija,
- rezervoar snežnog pokrivača u kome se odvijaju procesi sublimacije i topljenja snega,
- rezervoar zemljišta koji je podeljen na nekoliko slojeva u kojima se odvijaju procesi evaporacije, transpiracije, oticaja i perkolacije.

Proračun vertikalnog vodnog bilansa počinje određivanjem potencijalne evapotranspiracije (E_o) i definisanjem da li su padavine koje su zadate (R') u formi snega ili kiše. Ukoliko nije unet podatak o potencijalnoj evapotranspiraciji, on se u okviru modela računa prema jednačini Hargreaves-a, na osnovu temperature vazduha.

Za proračun topljenja snega računa se temperatura snega T_{sno} , koja se računa kao ponderisana vrednost između temperature snega u prethodnom vremenskom koraku i srednje dnevne temperature T_{sr} :

$$T_{sno}(i) = (1 - \lambda_{sno})T_{sno}(i-1) + T_{sr}\lambda_{sno} \quad (1)$$

gde je λ_{sno} koeficijent ponderacije koji uzima vrednost 0 do 1. Količina otopljenog snega računa se prema sledećoj jednačini:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} \cdot sno_{cov} \cdot \left(\frac{T_{sno} + T_{max}}{2} - T_{mlt} \right) \quad (2)$$

gde su b_{mlt} - koeficijent topljenja snijega (mm vode $C^{-1} dan^{-1}$); T_{mlt} – temperatura pri kojoj dolazi do otapanja snega. Koeficijent topljenja snega u obzir uzima sezonsku varijaciju i u model se unosi kao vremenska serija.

Nakon proračuna otapanja potrebno je sračunati i sublimaciju, tj. isparavanje sa snežnog pokrivača (E_{sub}). Nakon toga, preostaje da se sračuna konačno stanje rezervoara ($SNO_{(i)}$). Na osnovu proračuna rezervoara vegetacije i rezervoara snežnog pokrivača, ukupne padavine su redukovane (R) i određena je dodatna količina vode koja potiče od topljenja snežnog pokrivača (SNO_{mlt}). Sada se površinski oticaj može odrediti primenom SCS metode.

Imajući u vidu da potencijano upijanje zavisi samo od usvojene vrednosti CN broja, SCS metoda nije pogodna za kontinualne simulacije jer ne uzima u obzir promenu vlažnosti zemljišta. Odnosno, potencijalno upijanje će biti isto bez obzira da li je padala kiša i zemljište je potpuno vlažno ili je kišnoj epizodi prethodio sušni period i zemljište je prosušeno. Zbog toga su uvedene određene modifikacije, koje omogućavaju da se u obzir uzme i stvarna prethodna vlažnost zemljišta.

Usvojena vrednost CN broja odnosi se na pad terena od 5%. Potrebno je obaviti korekciju na osnovu stvarnog nagiba terena koji ima podsliv. Kada se izvrši ova korekcija dobija se nova korigovana vrednost CN broja koja odgovara prosečnoj važnosti zemljišta. Na osnovu ove vrednosti se računaju brojevi CN_1 i CN_3 koji se odnose na uslove suvog zemljišta (CN_1) pri minimalnoj vlažnosti i uslove vlažnosti poljskog kapaciteta (CN_3).

Sada se mogu odrediti maksimalno i minimalno potencijalno upijanje na sledeći način:

$$S_{max} = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_1} - 10 \right) ; S_{min} = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_3} - 10 \right) \quad (3)$$

Stvarno potencijalno upijanje (mm) nalazi se u granicama između S_{min} i S_{max} , i računa se na osnovu stanja svih slojeva (layera) na početku računskog intervala:

$$S = \sum_{j=1}^{n_i+1} p_j (STO_j - SW_j(i-1)) \quad (4)$$

gde je n_i broj podpovršinskih slojeva, a p_j procentualno učešće sloja.

Nakon proračuna oticaja računa se novo stanje rezervoara površinskog sloja zemljišta ($SW^?$). Zatim sledi proračun perkolacije, odnosno procurivanja W_{perc} iz površinskog sloja u naredni podpovršinski sloj zemljišta. U zavisnosti od odnosa stanja rezervoara i njegovog kapaciteta perkolacija se može podeliti na dva dela: perkolaciju iz zasićenog zemljišta (W_{perc_sat}) i perkolaciju iz nezasićenog zemljišta (W_{perc_unsat}). Ukupna perkolacija je zbir ove dve komponente i može se sračunati prema sledećoj jednačini:

$$W_{perc} = K_{sat} \Delta T_{sat} + (STO - WP) \left(S_r - \left(S_r^{(1-n)} + \frac{K_{sat}}{STO - WP} (n-1) \Delta T_{unsat} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right) \quad (5)$$

gde je K_{sat} koeficijent filtracije za zasićeno zemljište.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Procurivanje odnosno perkolacija (W_{perc}) se transformiše kroz sistem rezervoara koji se sastoji od jednog nelineranog rezervoara sa prelivom (NLR_b) i običnog linearnog rezervoara (LR_b). Ukupna perkolacija sa svih podslivova koji se izlivaju u odgovarajući čvor hidrografske mreže se izliva u nelinerani rezervoar sa prelivom koji simulira spori-bazni oticaj, a u linerani rezervoar se preliva višak vode iz ovog rezervoara i on, nakon transformacije u njemu, predstavlja brzi podpovršinski oticaj. Zbir ova dva oticaja predstavlja ukupan podpovršinski oticaj (Slika 2).

2.2 Proračun horizontalnog vodnog bilansa

Proračun horizontalnog vodnog bilansa se zasniva na sistemu čvorova i hidrauličkih veza kojima su čvorovi povezani. Čvorovi sistema predstavljaju karstna polja, akumulacije i karstne izdani, dok hidrauličke veze povezuju, na primer, karstno polje i karstnu izdan koja se prihranjuje iz polja putem ponora, ponorskih zona i/ili estavela. Kod opisa hidrauličkih veza, one mogu da opisuju hidraulički kratke ili dugačke objekte, odnosno prelaze iz jednog u drugi oblik. To je postignuto korišćenjem opšteg izraza:

$$Q = C_1 \sqrt{2g(\Pi - Z_1)} + C_2 \sqrt{2g(\Pi - Z'_1)} \quad (6)$$

gde je: Π - nivo u polju/izdani, Z_1 - nivo gde se meri protok (ili nivo u drugoj izdani, ovisno o tome da li se radi o vezi između dve izdani ili između izdani i vrela) i Z'_1 - karakteristični nivo pri kome dolazi do promene uslova tečenja.

Važno je napomenuti da koeficijenti u prethodnoj jednačini imaju fizičko značenje, kao i da imaju dimenziju površine. Na primer, u uslovima tečenja pod pritiskom, koeficijenti C_1 i C_2 , u hidrauličkom smislu mogu izraziti kao:

$$C_1 = C_{q1} A_1 \quad (7)$$

$$C_2 = C_{q2} A_2 \quad (8)$$

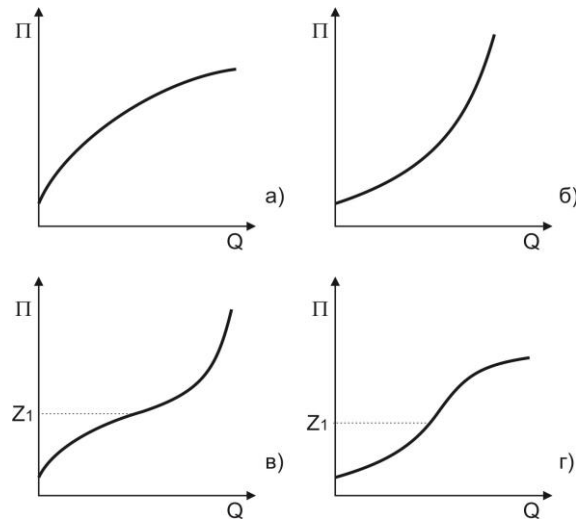
gde je A hidraulički reprezentativna površina poprečnog preseka provodnika, C_q tzv. koeficijent protoka, koji zavisi od hidrauličkih otpora duž provodnika između lokacija na kojima su definisane veličine Π i Z_1 .

Treba napomenuti da pijezometarska kota koja figuriše u jednačini (6) može da predstavlja stanje nivoa podzemne vode na proizvoljnom mestu podzemne izdani. Teži se ka tome da to bude lokacija pijezometra na kome se vrši osmatranje nivoa. To može da bude i neka druga lokacija, ali je potrebno korigovati i koeficijente C_1 i C_2 , jer od lokacije pijezometarskog nivoa zavise hidraulički gubici duž provodnika, a time i koeficijenti protoka.

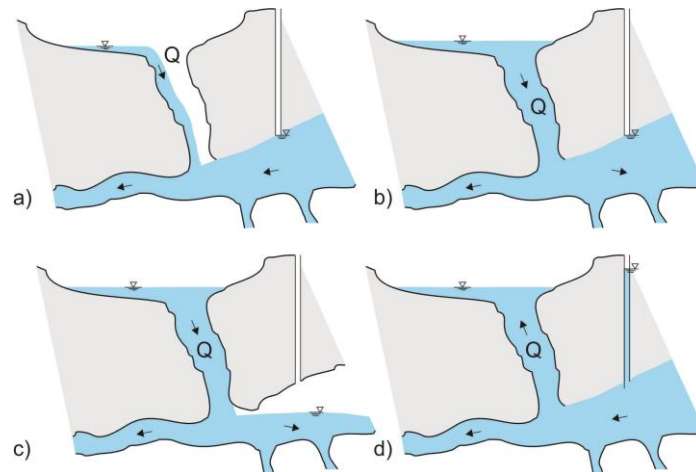
Ilustracija primene navedene jednačine za proračun protoka u hidrauličkoj vezi je prikazana na Slici 3, za slučaj tečenja između dva rezervoara, u zavisnosti od nivoa u uzvodnom i nizvodnom rezervoaru. Naravno, mogući su i složeniji uslovi tečenja. Na primer, kada se posle dostizanja određenog nivoa u karstnoj izdani aktiviraju dodatni provodnici, pa se ukupni efekat ogleda kao višestruki prelaz iz preliivanja u isticanje, i obrnuto. U okviru ove studije, utvrđeno je da se na ovaj način može hidraulički opisati rad izvorišne zone reke Bregave.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Jednačinom (6) pretpostavljen je mogući uticaj nivoa u nizvodnoj izdani na kapacitet ponora ukoliko se radi o tečenju pod pritiskom, tako da u tim uslovima, u jednačinama figuriše i nivo vode u izdani u koju se ponor prazni. Na ovaj način je moguće simulirati i rad estavela. Naime, kada nivo u nizvodnoj izdani premaši nivo u polju, dolazi do promene smera toka. Naravno, u tom slučaju se radi isključivo o strujanju pod pritiskom, pri čemu je pretpostavljeno da su hidraulički otpori duž toka isti u oba smera. Drugim rečima, važe isti koeficijenti tečenja pod pritiskom, bez obzira na smer toka.



Slika 3. Pretpostavljeni oblici veza između razlike nivoa i protoka kod modeliranja podzemnih veza: a) prelivanje, б) tečenje pod pritiskom, в) složeni uslovi tečenja – prelaz iz režima prelivanja u tečenje pod pritiskom, и g) tečenje pod pritiskom sa uključenjem dodatnih provodnika iznad karakteristične kote Z'_1 .



Slika 4. Shematski prikaz obuhvaćenih uslova tečenja u slučaju ponora: a) prelivanje-tečenje sa slobodnim nivoom, б) tečenje pod pritiskom pod uticajem nizvodnog nivoa u izdani, c) tečenje pod pritiskom-isticanje bez uticaja nizvodnog nivoa u izdani, d) estavela-tečenje u suprotnom smeru.

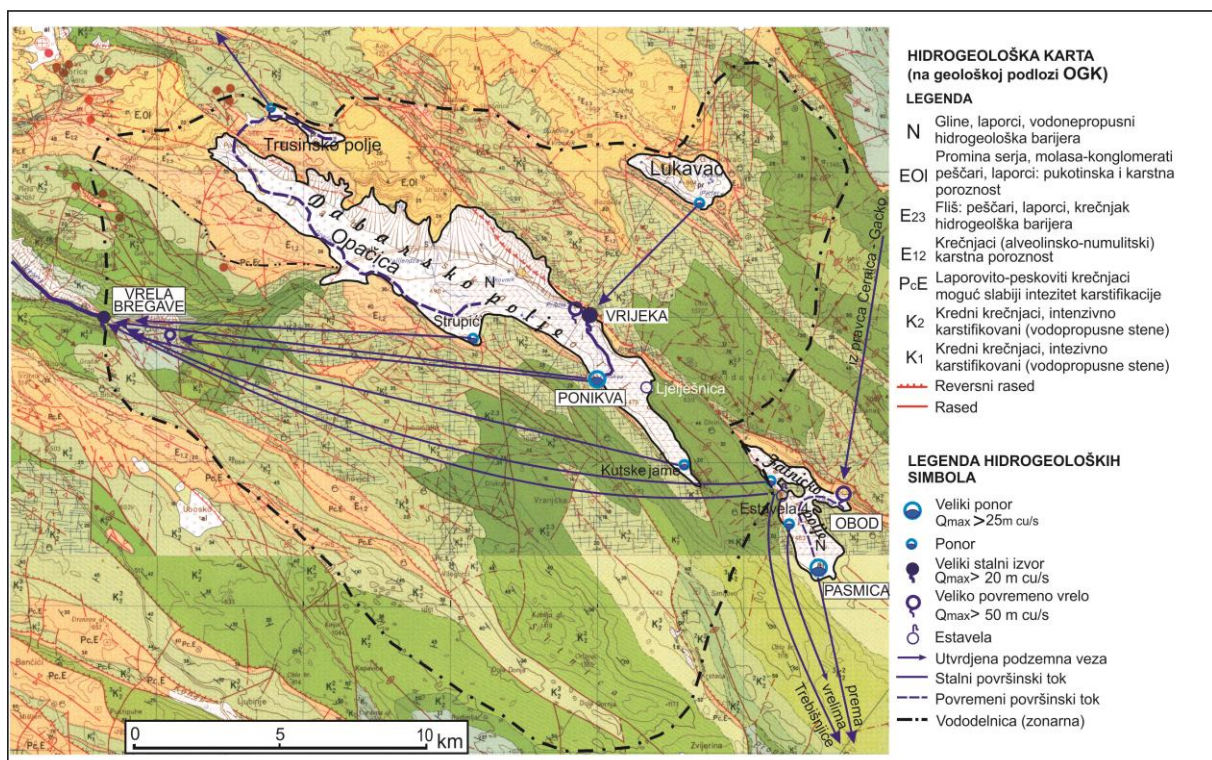
3 Slivno područje vrela reke Bregave

U ovom radu se prikazuje modeliranje oticaja ka vrelima reke Bregave. Sliv, koji je ovim modelom obuhvaćen, može se podeliti na dva dela: sliv Dabarskog polja i neposredni sliv vrela Bregave. Udeo u izdašnosti vrela Bregave ima i manji deo voda Fatničkog polja. Karstni sistemi koji odvođe vodu iz ovog polja u pravcu Bregave uključuju se postepeno sa porastom nivoa poplave i dostižu svoj maksimum kada je nivo poplave veći od 8 m (kota 471 m.n.m.), a istovremeno nivo podzemne vode u bifurkacionoj zoni znatno niži od nivoa polja.

Definisanje granica sliva Dabarskog polja i ukupnog sliva vrela Bregave zasniva se na skromnoj bazi podataka, pre svega na podacima koje pruža geološka karta. Pošto se radi o intenzivno karstifikovanom području infiltracija na većem delu ovih slivova je trenutna, a oticanje podzemno. Za definisanje vododelnica topografske karakteristike imaju mali značaj a trasiranje podzemnih tokova u neophodnom obimu je teško izvodljivo i preskupo.

Sa sigurnošću je utvrđeno da granice sliva uključuju i dve bifurkacione zone: Trusinsko i Fatničko polje. Dok bifurkaciona zona Trusinskog polja ima značaj (ne veliki) u bilansu Dabarskog polja, dotle bifurkaciona zona Fatničkog polja ima značaj za bilans vrela Bregave ali ne i za Dabarsko polje (mada mogućnost neznatnog uticaja ne treba isključiti).

Za definisanje vododelnica, pored rezultata trasiranja podzemnih tokova i geofizičkih istraživanja korišćena je hidrogeološka interpretacija litoloških članova i položaj ključnih raseda, pre svega regionalnog reversnog raseda duž severoistočnog oboda Fatničkog i Dabarskog polja [3].



Slika 5. Sliv izvorišne zone reke Bregave sa značajnijim ponorima, vrelima, estavelama i utvrđenim podzemnim vezama. Geološka podloga: osnovna geološka karta (listovi Nevesinje I Trebinje) [3].

4 Primena modela

Kalibracija hidrološkog modela 3Dnet-HET izvršena je za period od devet godina, 1.1.1972. - 31.12.1980. U tom periodu tunel između Dabarskog i Fatničkog polja, kao i tunel između Fatničkog polja i akumulacije Bileća, nisu postojali, pa je verifikacija rezultata urađena sa pretpostavkom zatvorenih tunela, odnosno prirodnog stanja na tom delu sliva.

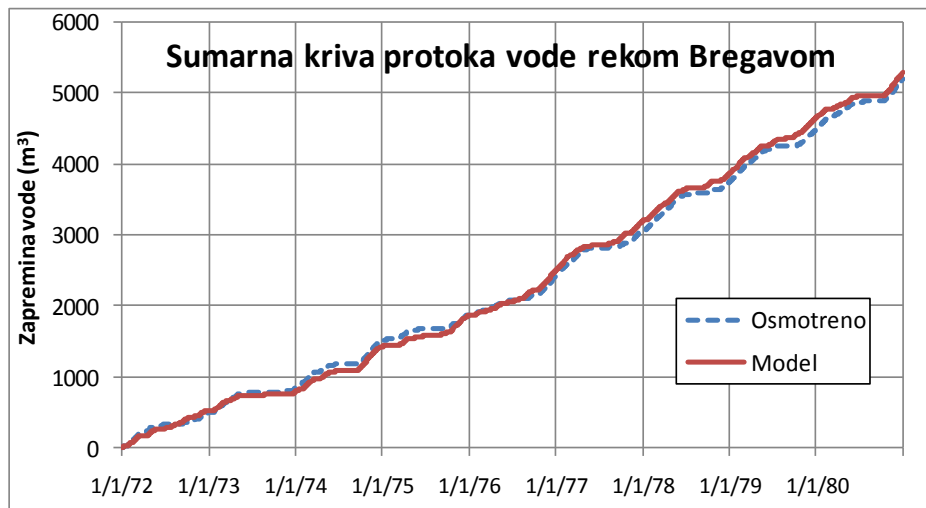
Sagledavajući globalni vodni bilans na analiziranom delu sliva zaključuje se da je ukupan oticaj sa sliva oko 88% od ukupnih količina vode koje padnu na sliv, odnosno da se na procese evapotranspiracije gubi samo oko 12% voda.

Da bi se verifikovali rezultati modela dva niza podataka su analizirana i upoređena sa osmotrenim vrednostima:

- protoci na reci Bregavi i
- nivoi vode u Dabarskom polju

Za ocenu kvaliteta modela, odnosno slaganja simuliranih vrednosti dobijenih hidrološkim modelom i osmotrenih vrednosti, korišćeni su koeficijent linearne korelacije i Nash-Sutcliffe koeficijent za ocjenu slaganja simuliranih i mjenjenih protoka.

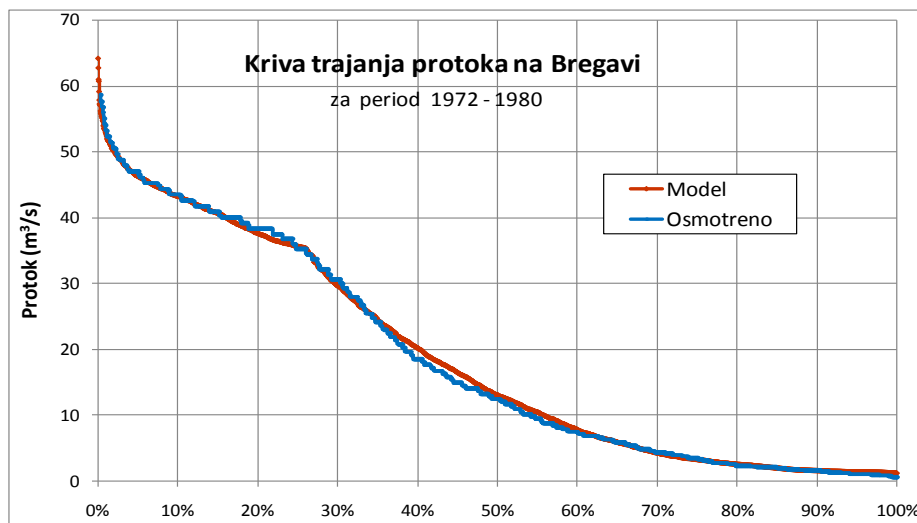
Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije za simulirani period od devet godina iznose 0,87 za protoke u reci Bregavi i 0,81 za nivoe u Dabarskom polju. Istovremeno, vrednost Nash-Sutcliffe-ov koeficijenta iznosi 0,74 što ukazuje na vrlo dobro slaganje rezultata modela i osmotrenih vrednosti. Pokazatelj performansi modela predstavlja i ocena greške ukupne zapremine vode koja protiče na mernom profilu. Upoređivanjem srednjih vrednosti merenih i simuliranih protoka za analizirani period dobijena je razlika koja iznosi manje od 1,7% ($\overline{Q}_o=18,36$ m³/s, $\overline{Q}_m=18,64$ m³/s). Analiza sumarnih krivih protoka u reci Bregavi za razmatrani period prikazana je na slici 6.



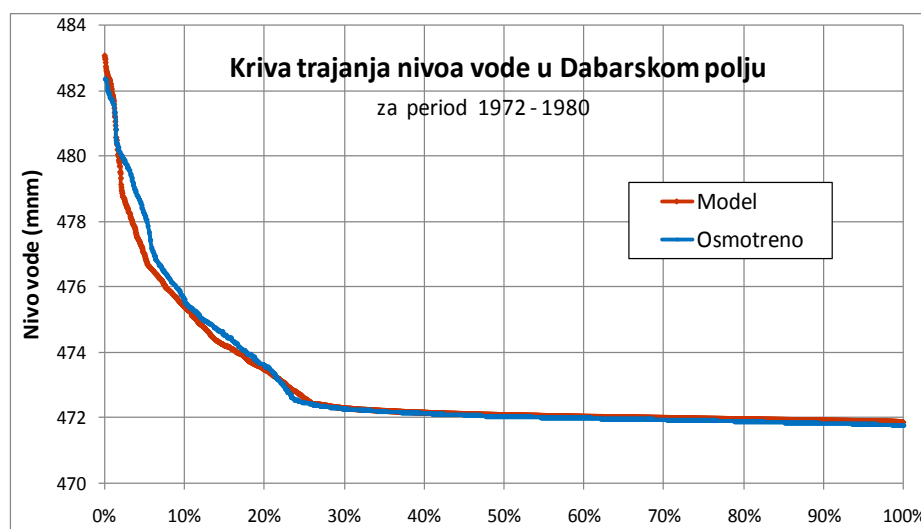
Slika 6. Sumarna kriva protoka vode reke Bregave u periodu 1972.-1980. godina

Kao posebno značajan pokazatelj valjanosti modela, poredene su i krive trajanja protoka, dobijene na modelu i merenjima na reci Bregavi (Slika 7), koje su formirane za isti period od 1972. do 1980. godina. Uočava se veoma dobro slaganje modeliranih i osmotrenih vrednosti, što ukazuje na to da su modelom, na adekvatan način obuhvaćeni svi fizički procesi

i veze polja i karstnih izdani. Kriva trajanja nivoa vode u Dabarskom takođe pokazuje veoma dobro slaganje sa krivom trajanja osmotrenih vrednosti.



Slika 7. Krive trajanja protoka na reci Bregavi za osmotreni i modelirani niz



Slika 8. Krive trajanja nivoa vode u Dabarskom polju za osmotreni i modelirani niz 1972.-1980. godina

5 Zaključak

Primena distribuiranih hidroloških modela, zasnovanih na fizičkim zakonitostima transformacije padavina u oticaj, moguća je i u uslovima karstnih slivova. Preduslov za to je postojanje kvalitetnih nizova osmatranja: padavina, oticaja, a posebno nivoa u karstnim izdanima. Verujemo da ovakvi modeli omogućavaju pouzdanije prognoze oticaja u izmenjenim (projektovanim) uslovima na slivu u odnosu na često korišćene statističke modele.

Literatura

1. Makropoulos, C., D. Koutsoyiannis, M. Stanić, S. Djordjević, D. Prodanović, T. Dašić, S. Prohaska, Č. Maksimović and H. Wheater (2008), *A multi-model approach to the simulation of large scale karst flows*, Journal of Hydrology, Vol. 348, pp 412-424.
2. Kovacs, A., Perrochet, P., Kiraly, L., Jeannin, P.Y. (2005), A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis, Journal of Hydrology, Vol. 303, pp 152-164.
3. Zavod za vodoprivredu Bijeljina (2015), *Proračun bilansa voda Dabarskog polja korišćenjem podataka o nivoima površinskih i podzemnih voda*, Elektroprivreda Republike Srpske

Вишекритеријумска калибрација хидролошких модела

Андријана Тодоровић¹

Милош Станић²

Јасна Плавшић³

Жељко Василић⁴

АПСТРАКТ: У овом раду је приказана вишекритеријумска калибрација хидролошких модела. Најпре су дате теоријске основе овог приступа, а затим је за калибрацију хидролошког модела *Catch* примењен савремени алгоритам за симултану вишекритеријумску оптимизацију AMALGAM. Модел калибрисан на овај начин поређен је са моделима који су добијени (1) калибрацијом са једном композитном критеријумском функцијом, и (2) применом неформалне бајесијанске методе GLUE. Квалитет ових модела је квантификован слагањем осмотреног и симулираних хидрограма током калибрационог и евалуационог периода. За поређење модела добијених вишекритеријумском калибрацијом и методом GLUE, који резултују интервалним оценама протока, коришћени су и додатни показатељи: проценат осмотрених протока који је обухваћен симулираним интервалом протока и релативна ширина овог интервала.

Кључне речи: вишекритеријумска калибрација, AMALGAM, Парето фронт, хидролошки модели, неизвесности у оценама параметара

Multi-objective calibration of hydrologic models

ABSTRACT: In this paper multi-objective calibration of hydrologic models is presented. Theoretical basis of this approach along with the advantages in its application to hydrological modelling are briefly discussed. A hydrologic model calibration with the contemporary algorithm aimed at multi-objective optimisation AMALGAM is presented. Advantages of this approach are demonstrated by comparing performances of the model calibrated in the multi-objective manner to the models (1) calibrated with a single objective function, and (2) obtained by applying the informal Bayesian GLUE method. Model performance is quantified in terms of few goodness-of-fit functions. Efficiency of multi-objective and GLUE ensembles is quantified in terms of two additional statistics: namely, per cent of flow observations encompassed by the prediction interval and relative width of the prediction interval.

Keywords: multi-objective calibration, the AMALGAM, Pareto front, hydrologic models, uncertainties in parameter estimates

¹ Андријана Тодоровић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, andrijana@hikom.grf.bg.ac.rs

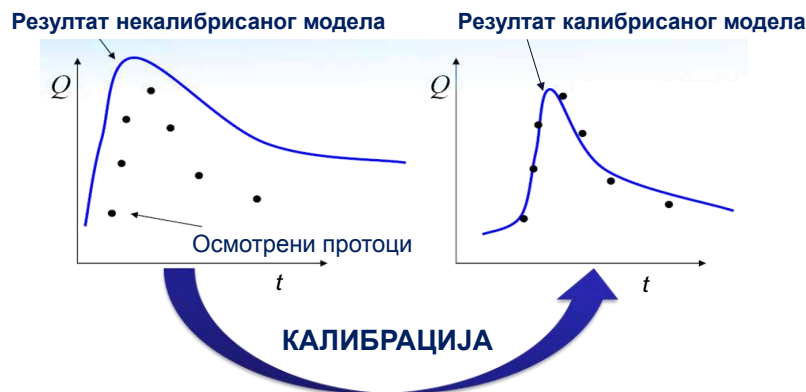
² В. проф. др Милош Станић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, mstanic@grf.bg.ac.rs

³ В. проф. др Јасна Плавшић, дипл.грађ.инж., Грађевински факултет у Београду, jplavsic@grf.bg.ac.rs

⁴ Жељко Василић, дипл.инж.грађ., Грађевински факултет у Београду, zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Увод

У једначинама модела падавине-отицај фигуришу параметри, који омогућавају да се модел прилагоди условима формирања отицаја на конкретном сливу. Вредности параметара најчешће не могу да се одреде *a priori*, на основу карактеристика слива зато што немају експлицитну физичку конотацију (тзв. процесни параметри, нпр. коефицијент нелинеарности резервоара), или због хетерогености карактеристика слива (Beven, 2001; Blasone, 2007). Вредности параметара се оптимизују тако да се добије што боље слагање између осмотрених и симулираних хидролошких величина према неком унапред дефинисаном критеријуму (калибрација модела, Слика 1). Калибрација хидролошких модела је веома комплексан процес, пре свега зато што је потребно одредити вредности великог броја параметара (димензионалност оптимизационог проблема M) на основу малог броја осмотрених величина m (најчешће само на основу осмотрених протока, $m = 1$). Разлика између M и m (енгл. *model overparameterisation*) доводи до тога да има много скупова параметара који резултују сличним степеном слагања између симулираних и осмотрених величина у периоду калибрације (енгл. *equifinality*, Beven, 2001). Међутим, ови параметри су најчешће широко распрострањени у хипер-простору параметара, па њихова примена ван периода калибрације може резултовати веома различитим хидрограмима (Wagener et al., 2003).



Слика 1. Калибрација хидролошких модела.
 Figure 1. Calibration of hydrologic models.

Вишекритеријумска калибрација (енгл. *multi-objective calibration*) је приступ који је настао у циљу убалжавања разлике између M и m . Овај приступ омогућава да се из постојећих осматрања добије више информација (Gupta et al., 1998, 2005; Wagener et al., 2003; Madsen, 2003, 2000; Blasone, 2007; Blasone et al., 2007; Yilmaz et al., 2010; Krauß et al., 2012; Shafii et al., 2014). У општем случају, вишекритеријумска калибрација подразумева укључивање (Madsen, 2003; Yilmaz et al., 2010):

- (1) осматрања неколико величина (енгл. *multi-variable calibration*): нпр. подаци о протоцима и нивоима подземних вода (нпр. Seibert, 2003);
- (2) осматрања са више мерних места (енгл. *multi-site calibration*): нпр. осматрања протока са неколико водомерних станица;

- (3) више аспеката слагања осморених и симулираних величина, најчешће протока (енгл. *multi-response calibration*): нпр. слагање осмотрених и симулираних хидрограма у домену малих и великих вода, или слагање запремина отицаја и динамике формирања отицаја. Код ручне калибрације модела обично се посматра неколико аспеката слагања симулираних и осмотрених хидрограма, па неки истраживачи и овакву калибрацију сматрају вишекритеријумском (нпр. Gupta, et al., 1998; Vanrolleghem 2010).

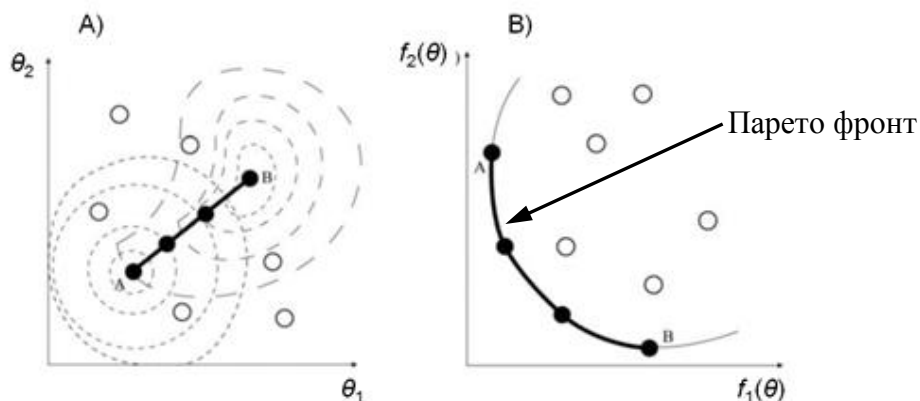
С обзиром да прва два приступа вишекритеријумској калибрацији захтевају додатна осматрања, у пракси се најчешће користи трећи.

Не постоји јединствено решење – скуп параметара који ће бити оптималан према свим критеријумима, па решење вишекритеријумске калибрације обухвата неколико скупова параметара који представљају компромис између свих критеријумских функција (енгл. *trade-off*) (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2010). Ови скупови се називају Парето-оптималним скуповима или скуповима са Парето фронта. На слици 2 је приказан Парето фронт за калибрацију према две критеријумске функције које треба минимизовати (нпр. *MSE*, *RMSE*, *MAE*, итд., Crochemore et al., 2015). За Парето-оптималне скупове је карактеристично да се вредност једне критеријумске функције не може даље побољшати, а да не дође до погоршања вредности других критеријумских функција. Другим речима, није могуће наћи Парето-оптимални скуп θ_j , такав да важи:

$$f_k(\theta_j) < f_k(\theta_i), \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

где θ_i представљају преостале скупове са Парето фронта, f_k означава k -ту критеријумску функцију, док је m број критеријумских функција (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2010).

Да би вишекритеријумска калибрација била смислена, потребно је да одабрани критеријуми буду што опречнији (енгл. *non-commensurable fitting criteria*) (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2010).



Слика 2. Вишекритеријумска калибрација са две критеријумске функције: А) површи одзива, В) Парето фронт (репродуковано из Blasone, 2007).

Figure 2. Multi-objective calibration with two objective functions: A) response surfaces, B) Pareto front (reproduced from Blasone, 2007).

Постоје два начина да се различити аспекти слагања осмотрених и симулираних величина укључе у калибрацију (Yilmaz et al., 2010):

- (1) Агрегација критеријумских функција у једну, композитну критеријумску функцију, чиме се проблем вишекритеријумске своди на једнокритеријумску оптимизацију:

$$F_{\text{agg}} = \sum_{i=1}^m w_i \tau_i F_i(\theta) \quad (2)$$

где w_i означава тежину која се додељује i -тој критеријумској функцији $F_i(\theta)$, а τ_i је фактор скалирања. Фактор скалирања омогућава се све вредности разматраних критеријумских функција, које се могу разликовати и за неколико редова величине, сведу на исти опсег (Yilmaz et al., 2010).

- (2) Симултана оптимизација према неколико критеријумских функција, која резултује Парето фронтом, или Парето површи уколико постоји више од две критеријумске функције.

Парето фронт се може добити и применом композитних критеријумских функција, уколико се варирају тежине које се додељују појединачним критеријумским функцијама (Efstratiadis & Koutsoyiannis, 2010; Yilmaz et al., 2010).

У овом раду је примењена симултана вишекритеријумска оптимизација (две критеријумске функције) за калибрацију модела *Catch*. Како би се анализирале предности вишекритеријумске калибрације, модел који је калибрисан на овај начин поређен је са моделима чији су параметри оцењени једнокритеријумском оптимизацијом и методом GLUE (поглавље 2.4).

2 Методологија

2.1 Слив и подаци

Река Топлица је највећа лева притока Јужне Мораве. Слив реке Толице до водомерне станице (в.с.) Дољевац обухвата површину од 2052 km² и распон надморских висина од 193 до 1996 m.n.m. (Слика 3). На сливу доминирају листопадне шуме и пољопривредно земљиште, док је мање од 1% површине слива урбанизовано (Todorović, 2015).

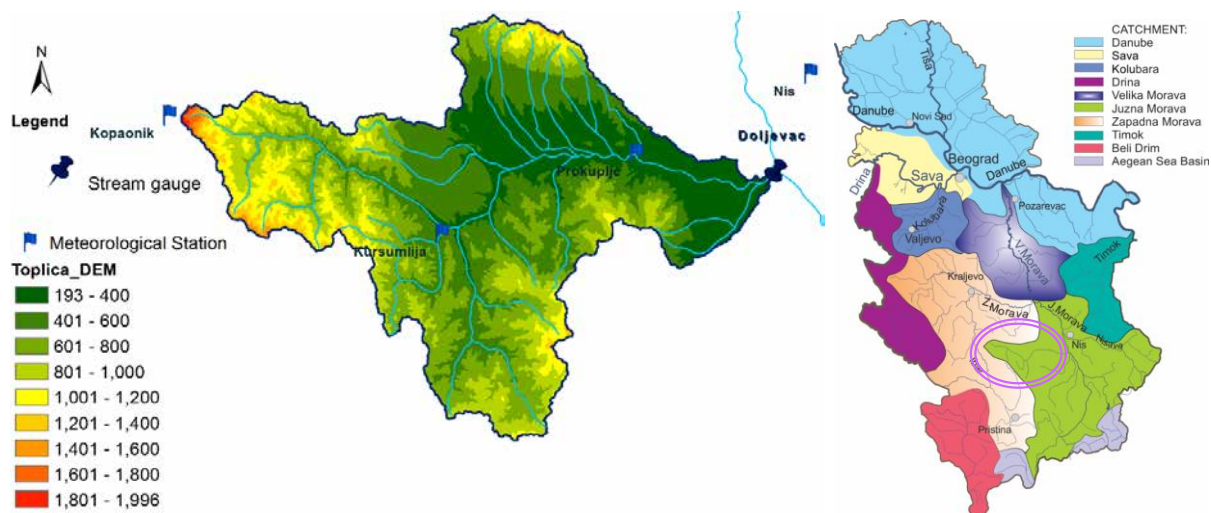
За калибрацију хидролошког модела коришћени су средњи дневни протоци осматрени на в.с. Дољевац (Слика 3, Табела 1). Просечни месечни протоци у периоду 1980-2013 (Слика 4) илуструју хидролошки режим овог слива: највећи протоци се јављају у априлу, док су најмањи осматрени у септембру. Карактеристична је правилност у овом режиму, с обзиром да и екстремни протоци (97,5 перцентил) прате исту унутаргодишњу расподелу.

За симулацију отицаја са слива реке Толице коришћени су и подаци о дневним падавинама и просечним дневним температурама осматрени на метеоролошким станицама Копаоник, Куршумлија, Прокупље и Ниш (Табела 1). Иако су осматрања на овим станицама почела 60тих година или раније, разматран је само период од 1980 због великог броја недостајућих података у ранијем периоду. Просечне падавине и температуре на сливу су одређене помоћу Тисенових полигона.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Потенцијална евапотранспирација (*ПЕТ*) рачуната је Намон-овом методом (Намон, 1961). Ова метода је одабрана зато што не захтева превише улазних података и зато што је показано да даје добре резултате за потребе хидролошког моделирања са моделима са хомогеним параметрима (Oudin et al., 2005).

Резултати теста значајности нагиба линеарне регресије потврдили су статистички значајан растући тренд у просечним годишњим температурама, док у просечним годишњим протоцима и годишњим падавинама нису детектовани статистички значајни трендови (Todorović, 2015).

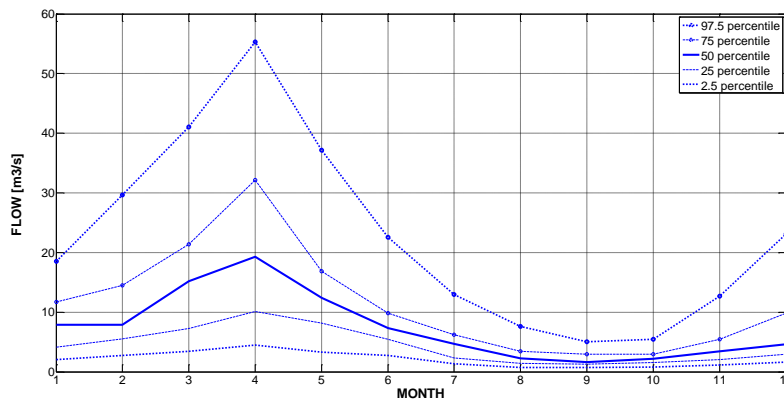


Слика 3. Слив реке Топлице до в.с. Дољевац: дигитални модел терена (ДМТ, лево) и положај слива у Србији (десно).

Figure 3. The Toplica River catchment upstream of the Doljevac stream gauge: digital elevation model (DEM, left) and its location in Serbia (right).

Табела 1. Доступни подаци за симулацију отицаја са слива реке Топлице.
Table 1. Data available for runoff simulation in the Toplica River catchment.

Станица	Величина	Надморска висина [m.n.m.]	Расположиви подаци за период	Просечна осматрана вредност (1980-2013)
Дољевац	Q	190.41	1954-2013	8.8 [m ³ /s]
Копаноник	P, T	1711	1967-2013	977.9 [mm] 3.7 [°C]
Куршумлија	P, T	383	1961-2013	631.1 [mm] 10.4 [°C]
Прокупље	P, T	266	1951-2013	549.9 [mm] 10.9 [°C]
Ниш	P, T	204	1947-2013	576.6 [mm] 11.9 [°C]



Слика 4. Просечни месечни протоци осматрени на в.с. Дољевац у периоду 1980-2013.
Figure 4. Mean monthly flows observed at the Doljevac stream gauge in 1980-2013 period.

2.2 Хидролошки модел

За симулацију отицаја коришћен је хидролошки модел *Catch* (Слика 5), који је намењен континуалним хидролошким симулацијама. Овај модел садржи модуле за симулацију задржавања падавина на вегетацији (интерцепција), за симулацију снега и влаге у земљишту (вертикални водни биланс). Површински и потповршински отицај се трансформишу линеарним и нелинеарним резервоарима (хоризонтални водни биланс). Структура модела приказана је на слици 5, а детаљи о моделу дати су у Vasilić et al. (2012), као и у другом раду истих аутора у овом Зборнику.

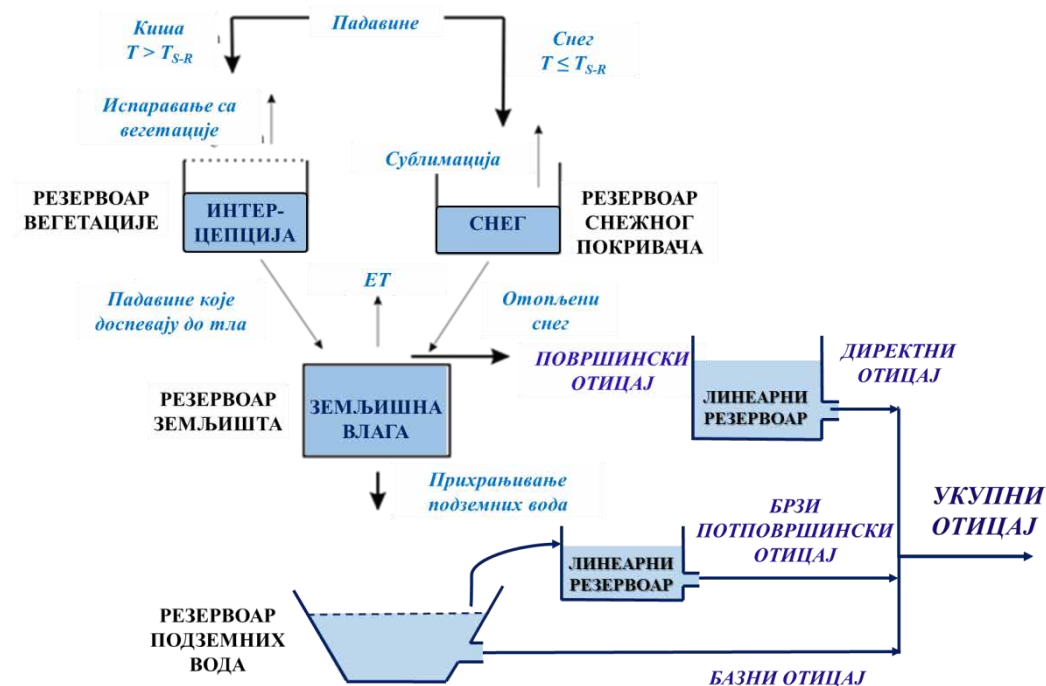
У овом раду коришћен је модел са хомогеним параметрима (24 параметра модела), с тим да су падавине, температуре и *ПЕТ* кориговани за сваку висинску зону (слив је подељен на девет висинских зона приближно истих распона) према методологији приказаној у Panagoulia (1995).

2.3 Алгоритам за вишекритеријумску оптимизацију AMALGAM

За вишекритеријумску калибрацију модела примењен је савремени оптимизациони алгоритам AMALGAM, који у себи садржи неколико различитих глобалних оптимизационих алгоритама (Vrugt et al., 2009; Vrugt & Robinson, 2007). Верзија AMALGAM-а која је коришћена у овом раду садржи четири глобална оптимизациона алгорита: *NSGA II* (*Non-Sorted Genetic Algorithm*), *DE* (*Differential Evolution*), *PSO* (*Particle Swarm Optimisation*) и *AMS* (*Adaptive Metropolis Search*). AMALGAM скрипт је написан у програмском језику MATLAB и може се преузети са: <http://www.hydro.washington.edu/pub/blivneh/CONUS/misc/tools.uw.electric/MATLAB-Code-AMALGAM-Sequential-V1.2/>

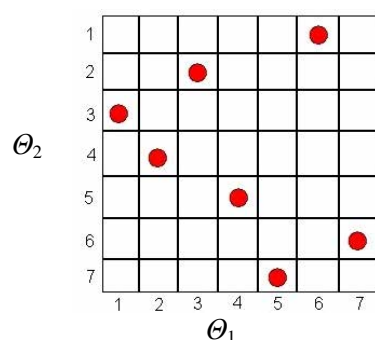
Оптимизација параметара почиње случајним одабиром N скупова параметара применом LH методе (*Latin Hypercube Sampling*). Ова метода подразумева да се почетне расподеле p параметара модела (енгл. *prior parameter distribution*) поделе на N интервала једнаке вероватноће који се не преклапају. На пример, уколико је претпостављена униформна расподела неког параметра, његов почетни опсег се дели на N интервала једнаке ширине. Затим се из сваког интервала одабере само једна вредност параметра. Одабрани параметри се спајају у N скупова, тако што се индекси за сваки

параметар, тј. редни број интервала коме та вредност параметра припада, бирају случајно. На слици 6 је показано како је од два параметра формирано седам скупова (вредности на слици представљају редне бројеве интервала): на пример, један скуп је формиран спајањем вредности θ_1 из трећег, и θ_2 из првог интервала. Према Sieber & Uhlenbrook (2005), овај начин одабира скупова је ефикаснији у односу на случајни одабир (енгл. *random sampling*). Почетно одабрани скупови параметара се даље прослеђују оптимизационим алгоритмима.



Слика 5. Схематски приказ структуре модела *Catch*.

Figure 5. Structure of the *Catch* model.



Извор: <http://www.glondish.com/blog/>

Слика 6. LH метода: комбиновање два параметра у седам различитих скупова.

Figure 6. Latin Hypercube Sampling method: seven sets obtained from two model parameters.

Број скупова параметара који се додељују појединим оптимизационим алгоритмима који су садржани у AMALGAM-у динамички се мења током оптимизације у зависности од претходног успеха датог алгоритма. Један оптимизациони алгритам не

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

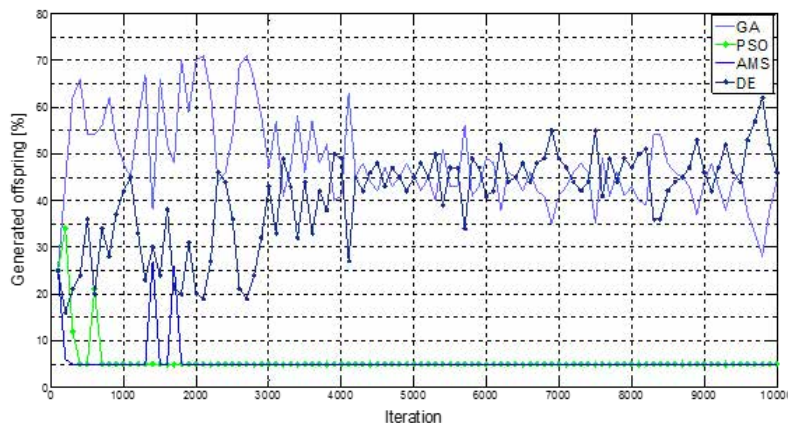
може да нађе најбоља решења за сваки оптимизациони проблем, па се на овај начин фаворизује алгоритам који је најпогоднији за конкретан проблем. Захваљујући овом својству AMALGAM-а има већу ефикасност и ефективност од појединачних оптимизационих алгоритама (Vrugt & Robinson, 2007).

N скупова из претходне генерације („родитељи“) се спајају са N скупова из текуће генерације („потомство“), који су резултат оптимизације, у јединствен скуп параметара од $2N$ чланова. Ови скупови се рангирају према вредностима критеријумских функција и према удаљености од суседних скупова (енгл. *crowding distance*). Од $2N$ бира се N скупова који имају оптималније вредности критеријумских функција и са што већом удаљеношћу од осталих скупова, како би се добила што разноврснија решења. Ови скупови се даље оптимизују (стварају потомство).

Број скупова параметара који се додељују i -том оптимизационом алгоритму (од q алгоритама у AMALGAM-у) за генерисање наредне t генерације зависи од броја скупова који су одабрани за даљу оптимизацију, а које је тај оптимизациони алгоритам генерисао, $P_i^{(t)}$, релативно у односу на број скупова који је том алгоритму претходно додељен, $N_i^{(t-1)}$ (Vrugt et al., 2009; Yilmaz et al., 2010):

$$N_i^{(t)} = N \frac{P_i^{(t)}}{N_i^{(t-1)}} \left[\sum_{i=1}^q \frac{P_i^{(t)}}{N_i^{(t-1)}} \right]^{-1} \quad (3)$$

Процењени број скупова параметара $N_i^{(t)}$ се коригује, тако да се и алгоритмима који нису имали велики успех у оптимизацији додели неки проценат скупова. На овај начин онемогућава се да поједини алгоритми буду искључени из процеса калибрације, што је важно са аспекта очувања разноврсности решења (Vrugt et al., 2009). Ово својство AMALGAM-а приказано је на слици 7: највећи број параметара је додељује се алгоритмима NSGA II и DE, али се и преосталим алгоритмима (PSO и AMS) додељује мали проценат (5%) скупова параметара.



Слика 7. Процент скупова параметара који се додељују појединим оптимизационим алгоритмима у AMALGAM-у (Todorović, 2015).

Figure 7. Percentage of the parameter sets that are allocated to the individual optimisation algorithms within the AMALGAM (Todorović, 2015).

У овом раду параметри су оптимизовани према две критеријумске функције, које представљају модификацију корена из средњег кваднатног одступања $RMSE$ (*Root Mean Square Error*) тако да боље квантификују ефикасност модела у домену великих ($RMSE_{HF}$) и малих вода ($RMSE_{LF}$) (Fenicia et al., 2007):

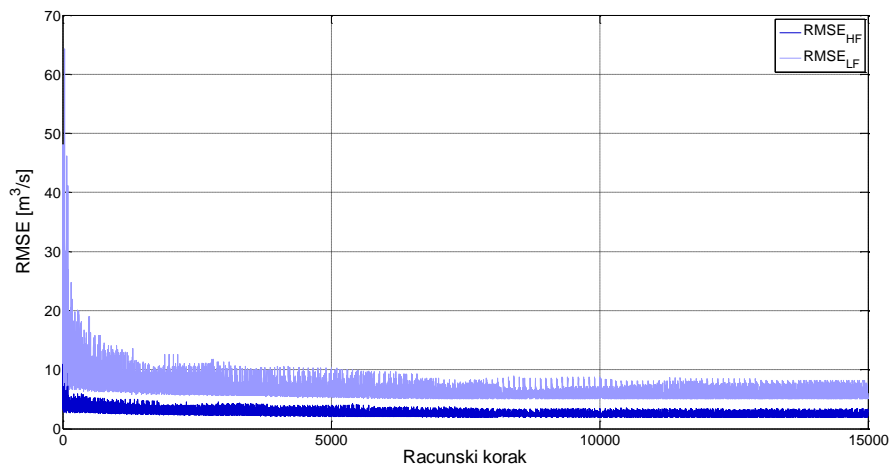
$$RMSE_{HF} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \cdot w_{HF,i}} \quad , \quad w_{HF,i} = \left(\frac{Q_{obs,i}}{Q_{obs,max}} \right)^2 \quad (4)$$

$$RMSE_{LF} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \cdot w_{LF,i}} \quad , \quad w_{LF,i} = \left(\frac{Q_{obs,max} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,max}} \right)^2 \quad (5)$$

Као и у случају $RMSE$, обе критеријумске функције је потребно минимизовати.

Применом LH методе одабрано је 100 почетних скупова параметара модела, који су оптимизовани у 15.000 рачунских корака (150 генерација). Вредности критеријумских функција током оптимизације приказане су на слици 8.

За све параметре модела је претпостављена униформна почетна расподела.



Слика 8. Вредности критеријумских функција током оптимизације у AMALGAM-у: калибрација у периоду 1984-1989.

Figure 8. Minimisation of the objective functions with the AMALGAM: calibration in 1984-1989.

2.4 Примена вишекритеријумске калибрације модела

Како би се анализирале предности примене вишекритеријумске калибрације модела, ефикасност модела чији су параметри одређени на овај начин поређени су са:

- (1) Моделом чији су параметри добијени применом GLUE методе (Beven & Binly, 1992; Beven, 2001, 2006). GLUE метода подразумева да се од великог броја случајно одабраних скупова параметара задрже тзв. GLUE добри параметри (енгл. *behavioural parameter sets*) који имају вредност критеријумске функције бољу од неког изабраног прага. Алтернативно, могу се бирати и скупови према неколико критеријумских функција (на слици 9 су приказани параметри

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

одабрани према два критеријума NSE и VE), или најбољих p (или $p\%$) скупова параметара. У овом раду је од 25.000 скупова, који су формираны применом методе LH, одабрано је 100 скупова са најмањим вредностима $RMSE_{HF}$ и $RMSE_{LF}$.

- (2) Моделом који је калибрисан према једној композитној критеријумској функцији у којој фигуришу $RMSE_{HF}$ и $RMSE_{LF}$ са истим тежинама:

$$OF = 0.5 \cdot (RMSE_{HF} + RMSE_{LF}) \quad (6)$$

И у једнокритеријумској калибрацији иницијално је одабрано 100 скупова применом методе LH. Ови скупови параметара су оптимизовани, и наком 150 генерација одабран је скуп са најмањом вредношћу OF .

Моделу су тестираны применом SST (енгл. *Split Sample Test*) и $DSST$ (енгл. *Differential Split Sample Test*). Први тест подразумева да су периоди калибрације и евалуације модела слични (пре свега по хидро-метеоролошким условима), док се периоди калибрације и евалуације у другом тесту битно разликују (Klemeš, 1986). У овом раду 5-годишњи периоди калибрације и евалуације су одабрани према просечној годишњој висини падавина (Табела 2). Све симулације су вршене током хидролошких година (од 1. октобра до 30. септембра наредне године), и свакој симулацији претходи једна хидролошка година намењена „загревању модела“ (енгл. *model spin-up*).

Ефикасност модела је квантификована према вредностима критеријумских функције. С обзиром да у калибрацији модела не фигурише слагање у запреминама отицаја, за евалуациону функцију је одабрана релативна пристрасност. Вишекритеријумска калибрација и GLUE метода резултују интервалним оценама протока, па су за оцену ефикасности ових приступа рачунате и две додатне статистике (Schuol and Abbaspour, 2006; Yang et al., 2008; Zhang et al., 2011):

- **p_factor** , који представља проценат осмотрених протока који су обухваћени интервалом симулираних хидрограма ширине 95% (енгл. *95% prediction band, 95PPU*). Границе овог интервала дефинишу 2.5 и 97.5 перцентили симулираних протока у сваком временском кораку ($Q_{SIM, 2.5\%}$ и $Q_{SIM, 97.5\%}$). Веће вредности ове статистике указују на велики проценат осматрања која су обухваћена 95PPU интервалом, односно на већу ефикасност модела. Највећа вредност ове статистике је 1 (100%).
- **r_factor** , који представља релативну ширину овог интервала, т.ј. однос просечне ширине 95PPU и стандардне девијације низа осмотрених протока:

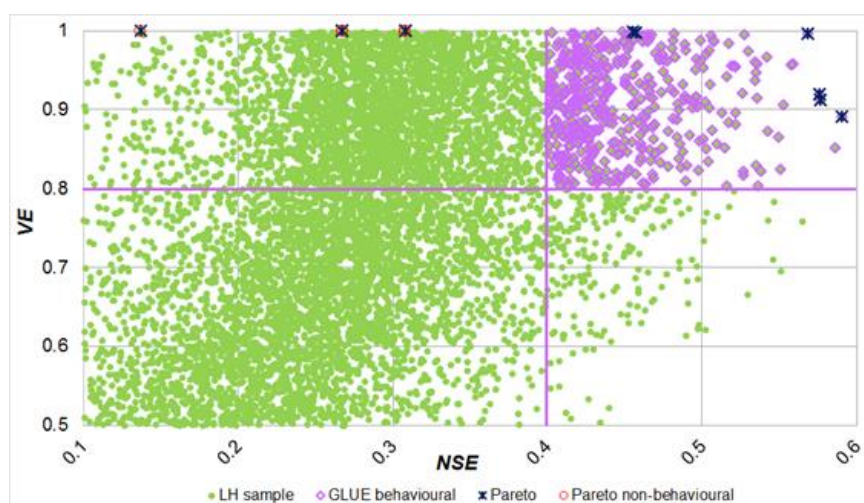
$$r_factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{SIM,97.5\%} - Q_{SIM,2.5\%})}{\sigma_{Q_{OBS}}} \quad (7)$$

Велике вредности r_factor -а могу да указују на велику ширину 95PPU (уколико вредности стандардне девијације осмотрених протока нису превише мале), што намеће питање садржаја информација у резултатима таквог модела.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Квалитетније моделе одликују велике вредности p_factor -а и мале вредности r_factor -а, односно велике вредности њиховог односа.

Иако вишекритеријумска калибрација и GLUE метода дају више скупова параметара, у општем случају нису сви Парето-оптимални скупови параметара уједно и GLUE добри, и обратно (Gupta et al., 1998; Efstratiadis and Koutsoyiannis 2010). На примеру на слици 9 су приказани GLUE добри скупови чије вредности NSE и VE превазилазе дате граничне вредности, и Парето-оптимални скупови. Неки скупови са Парето фронта нису GLUE добри, зато што имају мању вредност NSE од изабраног прага. Такође, GLUE скупова има много више од недоминантних решења.



Слика 9. Парето-оптимални и GLUE добрих скупови параметара (Todorović, 2015).
Figure 9. Pareto-optimal and GLUE-behavioural parameter sets (Todorović, 2015).

Табела 2. Периоди калибрације и евалуације за SST и $DSST$ и годишње висине падавина у сваком периоду.

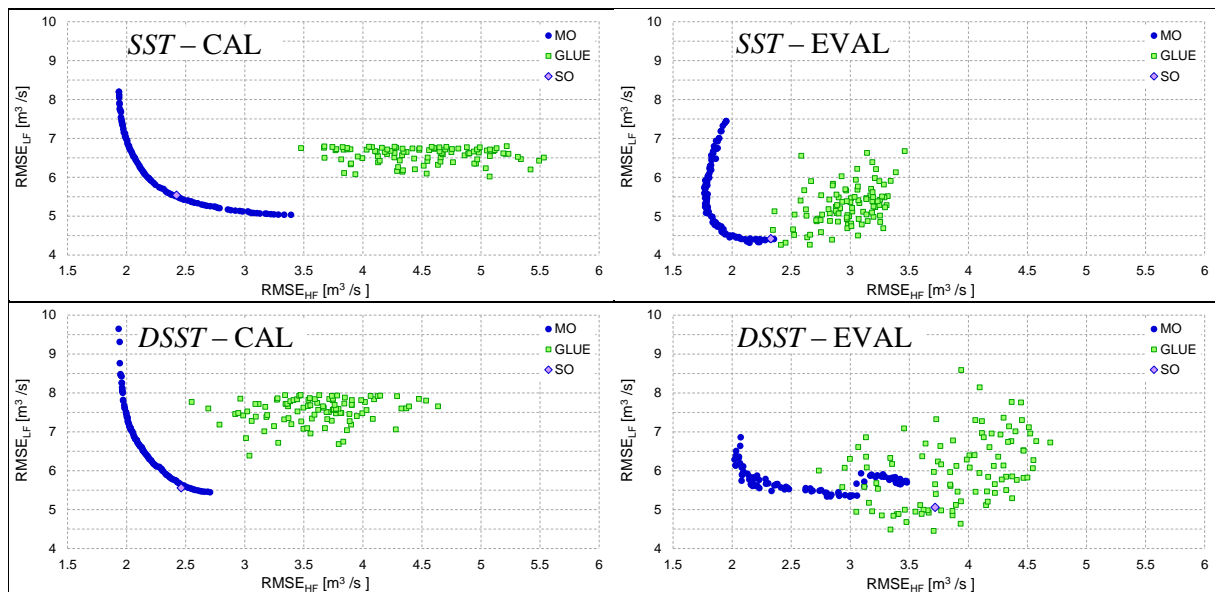
Table 2. Calibration and evaluation periods for SST and $DSST$ and annual precipitation depths over each period.

SST		$DSST$	
Калибрациони период	Евалуациони период	Калибрациони период	Евалуациони период
1984 – 1989 (643.6 mm)	1999 – 2004 (643.6 mm)	2005 – 2010 (746.8 mm)	1989 – 1994 (547.4 mm)

3 Резултати

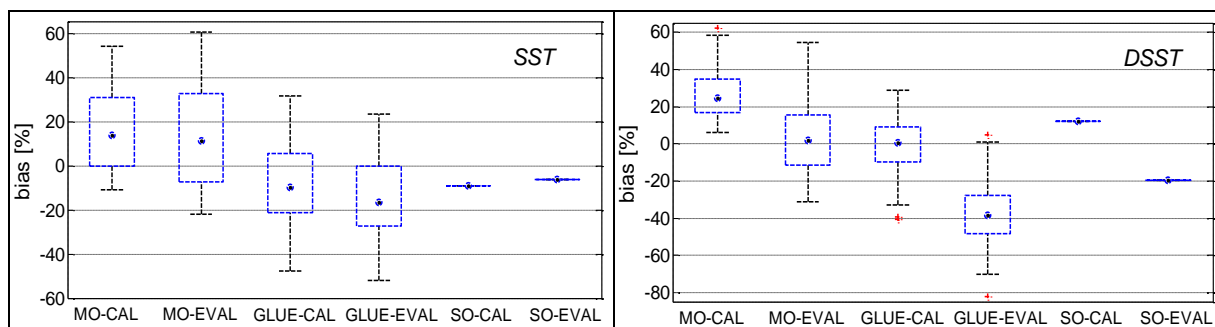
Ефикасност модела који је добијен вишекритеријумском калибрацијом (МО), применом методе GLUE и једнокритеријумском калибрацијом са композитном критеријумском функцијом (СО) приказани су на слици 10. Релативна пристрасност (евалуациона мера ефикасности модела) је приказана на слици 11. Однос између

процента осмотрених података који су обухваћени интервалом симулираних протока, и релативне ширине тог интервала дат је на слици 13.



Слика 10. Ефикасност модела *Catch* у периодима калибрације (лево) и евалуације (десно): резултати *SST* (горе) и *DSST* (доле) тестова.

Figure 10. Performance of the *Catch* hydrologic model over the calibration (left panels) and evaluation periods (right panels): the results of the *SST* (top) and *DSST* (bottom) panels.



Слика 11. Релативна пристрасност модела *Catch*: резултати тестова *SST* и *DSST*.

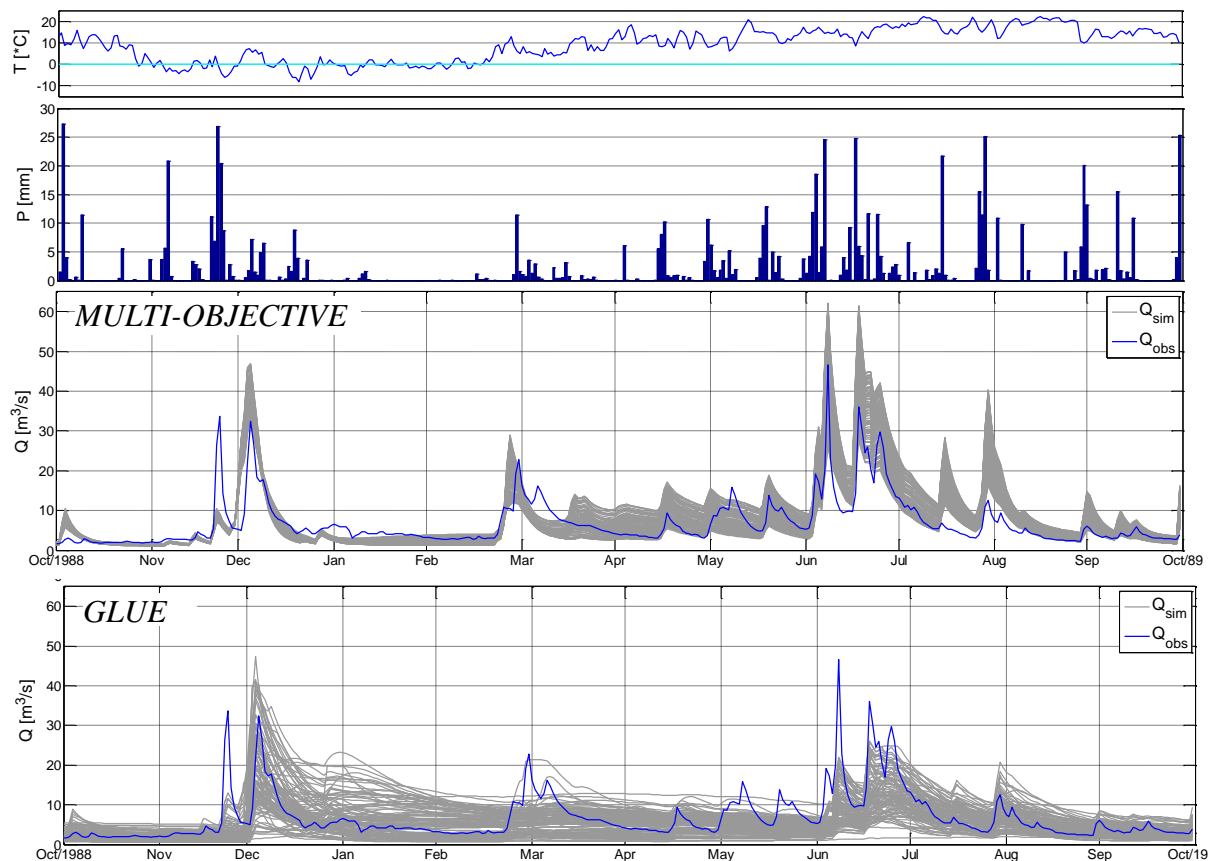
Figure 11. Relative performance of the *Catch* hydrologic model: results of the *SST* and *DSST*.

Резултати тестова *SS* и *DSS* показују да вишекритеријумска калибрација омогућава знатно боље слагање у домену великих вода, а већина Парето-оптималних скупова има далеко већу ефикасност и у домену малих вода у односу на *GLUE* решења. Квалитет Парето-оптималних решења посебно долази до изражаја током евалуационих периода, где се уочава знатно мањи пад у ефикасности модела у односу на *GLUE* решења. Ефикасност Парето решења би могла да буде и већа да су скупови са „рубних“ делова Парето фронта (пре свега са великим вредностима $RMSE_{LF}$) одбачени. *SO* скуп има приближно исту ефикасност као и недоминантна решења, с обзиром да се налази у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

непосредној близини Парето фронта. Пристрасност у симулацији запремине отицаја је знатна, с обзиром да ова мера ефикасности модела нија била укључена у калибрацију.

GLUE решења резултују веома широким интервалима симулираних протока који обухватају много осмотрених протока (преко 80%, Слика 12), за разлику од Парето-оптималних скупова параметара, код којих вредност p_factor -а износи између 30% и 45%. Међутим, однос p_factor / r_factor је нешто повољнији код GLUE решења (Слика 13). Такође, због мањих r_factor -а у DSS тесту се добијају веће вредности овог односа.



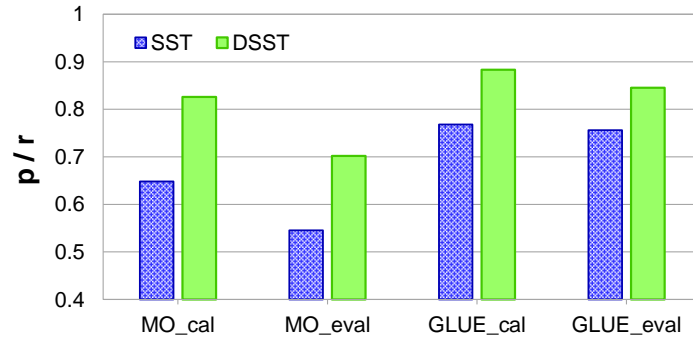
Слика 12. Осмотрени и симулирани хидрограми у периоду калибрације (1988-1989): средње дневне температуре, дневне падавине, осмотрени и симулирани хидрограми са Парето-оптималним и GLUE добрим скуповима параметара.

Figure 12. Observed and simulated flows in the calibration period (1988-1989): mean daily temperatures, daily precipitation depths, observed and simulated flows with the Pareto-optimal and GLUE-behavioural parameter sets.

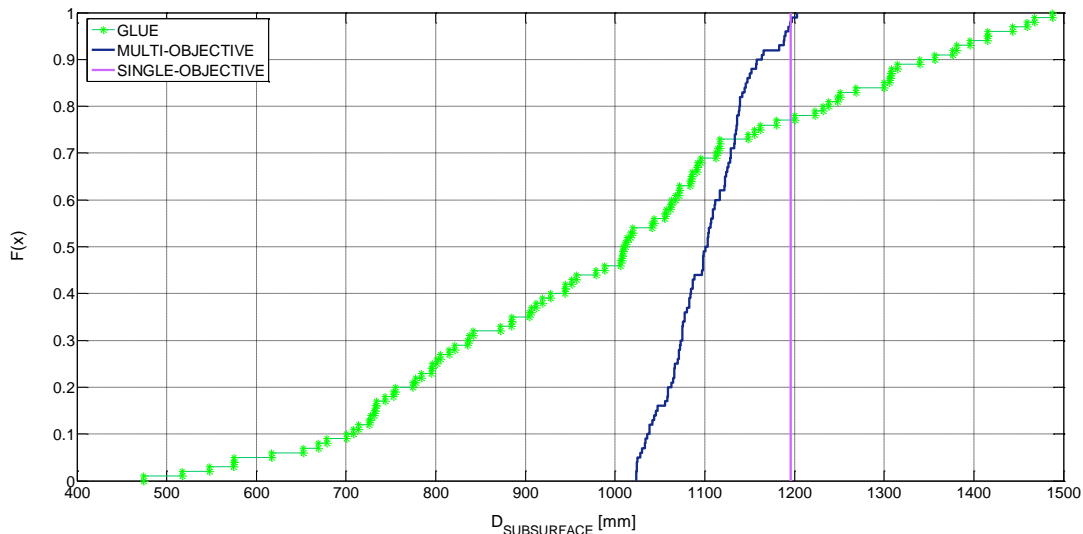
Парето-оптимална и GLUE решења се битно разликују по расподелама оптимизованих параметара. Наиме, GLUE решења су широко распрострањена у простору параметара, док оптимизација применом AMALGAM-а резултују оценама параметара који се налазе у веома уским областима. Стога су и емпиријске расподеле оптимизованих параметара мање расплнуте у односу на GLUE решења (Слика 14). Код параметара који су широко распрострањени може се очекивати да дају веома различита решења када се примене за симулације током независног периода. Иако вишекритеријумска калибрација није приступ намењен оцени неизвесности параметара

модела (т.ј. постериорним расподелама параметара), неки истраживачи сматрају да се може користити и у ту сврху (нпр. Engeland et al., 2006; Blasone, 2007; Dotto et al., 2012).

Посебан аспект модела представљају и захтевани рачунарски ресурси и време прорачуна. У општем случају, вишекритеријумска калибрација захтева много мање времена за прорачуне у односу на GLUE методу, посебно уколико се користи AMALGAM. Такође, за неке критеријумске функције (нпр. *NSE*) случајно одабрани скупови (GLUE решења) не могу да достигну ефикасност Парето-оптималних скупова.



Слика 13. Однос p_factor / r_factor .
Figure 13. Ratio between p_factor and r_factor .



Слика 14. Постериорне емпиријске расподеле дебљине потповршинског слоја земљишта ($D_{\text{subsurface}}$): калибрација модела у периоду 1984-1989.
Figure 14. Posterior empirical cumulative distributions of the subsurface soil layer thickness ($D_{\text{subsurface}}$): model calibration in 1984-1989.

4 Закључци

У раду је приказана примена вишекритеријумске калибрације хидролошких модела. За калибрацију хидролошког модела *Catch* коришћен је савремени алгоритам за

симулану вишекритеријумску калибрацију AMALGAM. Параметри модела су оптимизовани према две критеријумске функције, које квантификују ефикасност модела за симулацију великих и малих вода. Калибрација модела резултовала је Парето фронтом правилног облика, с тим да је ефикасност модела у домену великих вода много боља у односу на мале воде. Овакав резултат показује да комбинација критеријумских функција $RMSE_{HF}$ и $RMSE_{LF}$ не омогућава избалансирану калибрацију, односно да слагање у домену малих вода није у довољној мери наглашено.

Модел добијен вишекритеријумском калибрацијом поређен је са моделима чији су параметри добијени применом GLUE методе, и оптимизацијом према једној критеријумској функцији. На овај начин добијени су MO, GLUE и SO модели.

Сваки модел има одређене предности у односу на остале. MO модели имају већу ефикасност у односу на GLUE решења, пре свега у евалуационим периодима, и њихова калибрација краће траје. Модели са GLUE добрим параметрима имају повољнији однос процента осматраних протока који су обухваћени интервалом симулираних протока (који је код ових модела посебно висок), и релативне ширине тог интервала. Релативна пристрасност SO модела је задовољавајућа и у калибрационим и у евалуационим периодима, док су вредности критеријумских функција приближно исте као код неких Парето-оптималних скупова. Међутим, у новије време у хидрологији се напушта концепт јединственог оптималног решења и све више примењују методе које дају интервалне оцене протока (Beven & Young, 2013).

Да би се добио што квалитетнији (свестранији) модел, потребно је да се, поред слагања у домену великих и малих вода, у процес калибрације укључи и слагање симулиране и осматрене запремине отицаја, коју у овом раду ни MO ни GLUE модели нису добро репродуковали. Квалитет модела може се квантификовати евалуационим статистикама, које нису биле укључене у калибрацију модела, и применом тестова, пре свега DSS теста, који је много захтевнији у односу на SS тест.

Захвалница

Истраживање приказано у овом раду подржано је од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја (пројекти TP37010 и TP37005). Коришћени подаци добијени су од Републичког хидрометеоролошког завода Србије.

Литература

1. Beven, K. (2001). *Rainfall-Runoff Modelling - The Primer*. West Sussex: John Wiley & Sons.
2. Beven, K. (2006). A Manifesto for the Equifinality Thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18–36.
3. Beven, K., & Binly, A. (1992). The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298.
4. Beven, K., & Young, P. (2013). A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees. *Water Resources Research*, 49, 1–7.
5. Blasone, R.-S. (2007). *Parameter Estimation and Uncertainty Assessment in Hydrological Modelling*. Technical University of Denmark.

6. Blasone, R.-S., Madsen, H., & Rosbjerg, D. (2007). Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques. *Nordic Hydrology*, 38(4-5), 451.
7. Crochemore, L., Perrin, C., Andréassian, V., Ehret, U., Seibert, S. P., Grimaldi, S., ... Paturol, J.-E. (2015). Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal*.
8. Dotto, C. B. S., Mannina, G., Kleidorfer, M., Vezzaro, L., Henrichs, M., McCarthy, D. T., ... Deletic, A. (2012). Comparison of different uncertainty techniques in urban stormwater quantity and quality modelling. *Water Research*, 46(8), 2545–2558.
9. Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2010). One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling : A review. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1), 58–78.
10. Engeland, K., Braud, I., Gottschalk, L., & Leblois, E. (2006). Multi-objective regional modelling. *Journal of Hydrology*, 327, 339–351. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.022
11. Fenicia, F., Solomatine, D. P., Savenije, H. H. G., & Matgen, P. (2007). Soft combination of local models in a multi-objective framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 275–301.
12. Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751–763.
13. Gupta, H. V., Beven, K. J., & Wagener, T. (2005). Model Calibration and Uncertainty Estimation. In M. Anderson (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (pp. 1–20). John Wiley & Sons Ltd.
14. Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evaporation. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Division, J.o.H.* (pp. 107–120).
15. Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences*, 31(1), 13–24.
16. Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(3-4), 276–288.
17. Madsen, H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources*, 26(2), 205–216.
18. Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290–306.
19. Panagoulia, D. (1995). Assessment of daily catchment precipitation in mountainous regions for climate change interpretation. *Hydrological Sciences Journal*, 40(3), 331–350.
20. Seibert, J. (2003). Reliability of Model Predictions Outside Calibration Conditions. *Nordic Hydrology*, 34(5), 477–492.
21. Sieber, A., & Uhlenbrook, S. (2005). Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 216–235.
22. Todorović, A. (2015). Impact of Calibration Period na Parameter Estimates in Conceptual Hydrologic Models of Various Structures. University of Belgrade. Retrieved from <http://uvidok.rcub.bg.ac.rs/handle/123456789/448>
23. Vanrolleghem, P. (2010). *Modelling Aspects of Water Framework Implementation*. IWA Publishing.
24. Vasilić, Ž., Stanić, M., & Plavšić, J. (2012). Razvoj distribuiranog hidrološkog modela 3Dnet-Catch. In *Zbornik radova sa 16. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH) Donji Milanovac 2012* (pp. 1–11). Građevinski fakultet u Beogradu.
25. Vrugt, J. A., & Robinson, B. A. (2007). Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 104, pp. 708–11).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

26. Vrugt, J. A., Robinson, B. A., & Hyman, J. M. (2009). Self-Adaptive Multimethod Search for Global Optimization in Real-Parameter Spaces. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 243–259.
27. Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M. J., Wheater, H. S., & Gupta, H. V. (2003). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, 17(2), 455–476.
28. Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., Xia, J., & Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1-2), 1–23.
29. Yilmaz, K. K., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2010). Model Calibration in Watershed Hydrology. In B. Sivakumar & R. Berndtsson (Eds.), *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting* (pp. 53–105). Singapore: World Scientific Publishing.
30. Zhang, H., Huang, G. H., Wang, D., & Zhang, X. (2011). Multi-period calibration of a semi-distributed hydrological model based on hydroclimatic clustering. *Advances in Water Resources*, 34(10), 1292–1303.

Dinamičke karakteristike pluviografa

Predrag Vojt¹
Dragutin Pavlović²

APSTRAKT: U novijoj praksi često se možemo sresti sa pluviografom baziranom na mernim ćelijama za masu. Ovo su slučajevi kada se koriste automatske meteorološke stanice sa pluviografom. Pluviografi na bazi mernih ćelija za masu osetljivi su na vibracije jer onda i inercijalna sila utiče na konačan rezultat količine tj intenziteta kiše. U radu će biti opisane moguće neželjene pojave na uticaj merenja kiša i mere za njihovo suzbijanje. Izvršeno je i poređenje sa kišomerom sa klackalicom kao jednim od standardnih mernih uređaja.

Ključne reči: pluviograf, kišomer, dinamičke karakteristike

Dynamic characteristics of rain gauge

ABSTRAKT: Modern raingauges are often based on weighing sensors – load cells. Automatic meteorological stations use them as a precipitation measuring device of choice. The weighing precipitation gauges are vibration sensitive due to the inertia of system and the rain drops impact forces. As the consequence, there are difficulties in determination of the true precipitation intensities. This paper describes and discusses unwanted influences on rain gauging and how to cope with them. Performance of one weighting precipitation gauge is compared to tipping bucket rain gauge.

Keywords: load cell, rain gauge, dynamic characteristics

¹ Predrag Vojt, dipl.ing.građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava-Beograd, predrag.vojt@jcerni.co.rs

² Doc. dr Dragutin Pavlović, dipl.ing.građ., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, epavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Za pluviografska merenja se u hidrometeorološkoj praksi često koriste kišomeri sa klackalicom. Pokazivanja ovih kišomera su najčešće nelinearna sa promenom intenziteta kiše pa se za njih mora izraditi kalibraciona funkcija. Za kišomere sa klackalicom postoje i modifikacije koje im fizički koriguju nelinearnost uz pomoć sifona. Međutim, u savremenom merenju kiša često se možemo sresti sa pluviografom baziranom na mernim ćelijama za masu. U našoj zemlji to su najčešće uređaji iz familije Pluvio nemačkog proizvođača OTT.

U tekstu su prikazani rezultati eksperimentalnih laboratorijskih analiza i uporednih merenja u realnim uslovima (u meteorološkom krugu Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu) za ova dva tipa pluviografa. Za kišomer sa klackalicom data su ranija laboratorijska istraživanja [2] i upoređena sa osobinama kišomera na bazi masene merne ćelije za koju su izvršene statička kalibracija i dinamička kalibracija i delimično ispitan uticaj spoljnih faktora.

2 Funkcionalni princip senzora

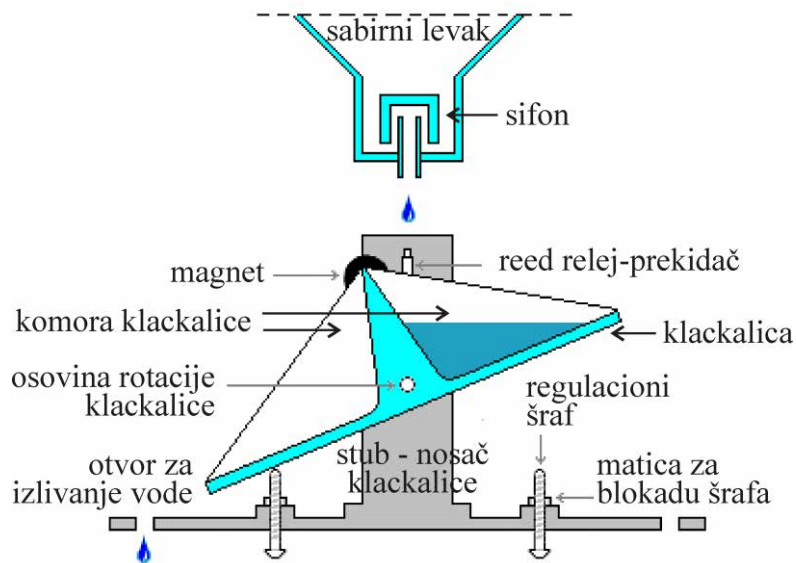
2.1 Kišomer sa klackalicom

Princip rada kišomera sa klackalicom sa sifonom (elementom za linearizaciju rada uređaja) prikazan je na slici 1. Kišnica sakupljena levkom prolazi kroz sifon. Sifon služi za ujednačeno doziranje vode na klackalici, i služi za redukovanje osetljivosti mehaničkog mernog sistema na promene intenziteta padavina. Zapremina vode koja ističe iz prihvatnih komora na klackalici se podešava sa dva šrafa i ona mora biti jednaka. Rotacija klackalice oko osovine generiše tip – impuls prolaskom magneta pričvršćenog za klackalicu pored magnetno osetljivog prekidača fiksiranog na vertikalnom nosaču osovine rotacije klackalice (vidi sliku 1). Uobičajno je da zapremina vode prihvaćene u prihvatnu komoru klackalice koja izaziva njenu rotaciju iznosi ekvivalentno 0.2 mm kiše za određenu površinu sabirnog levka kišomera. Brojanjem tipova n_{tip} dobija se h sumarna količina pale kiše $h = 0.2 \text{ mm} * n_{tip}$. Pohranjivanjem vremenskih trenutaka kada su zabeleženi tipovi moguće je rekonstruisati intenzitet kiše u formi prosečnog intenziteta između dva vremenski neekvidistantna trenutka.

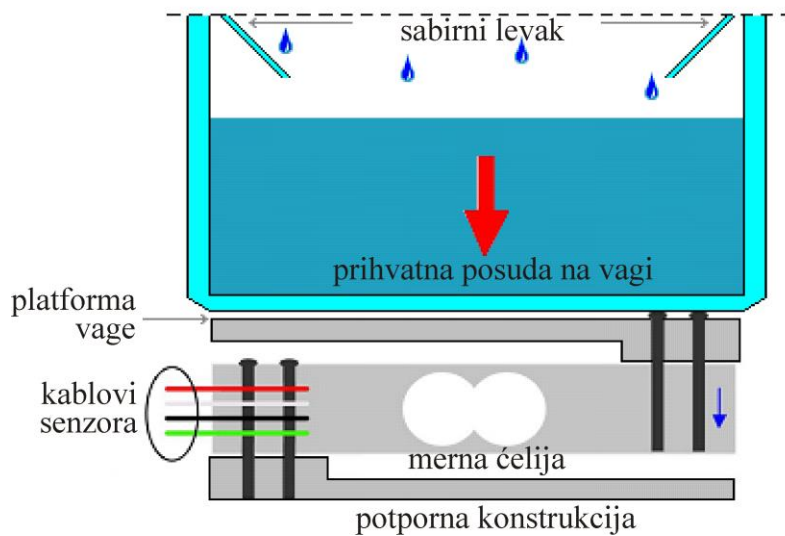
2.2 Kišomer sa ćelijom za masu

Princip rada kišomera sa ćelijom za masu prikazana je na slici 2. Kišnica sakupljena levkom prolazi ka posudi za sakupljanje. Zapremina sakupljene vode meri se gravimetrijskom metodom $V=M/\rho_{vode}$. Masa se meri mernom ćelijom. Količina pale kiše dobija se preko površine levka $h=V/A$.

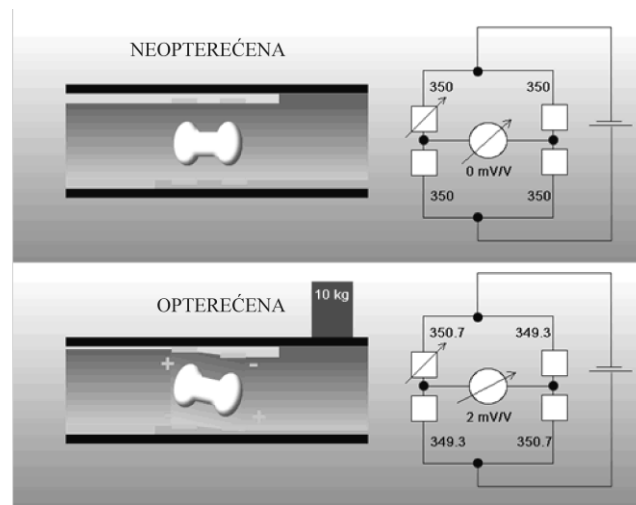
Princip rada merne ćelije prikazana je na slici 3. Merna ćelija radi na principu deformacija, a mere se mernim trakama koje su postavljene u puni merni most. Merna traka za određenu promenu deformacije ima promenu otpornosti koje se može izmeriti u konfiguraciji mernog mosta.



Slika 1. Šematski prikaz konstrukcije i principa rada kišomera sa klackalicom sa sifonom.
 Figure 1. Scheme and the working principle of the tipping bucket rain gauge.



Slika 2. Šematski prikaz konstrukcije i principa rada kišomera na težinskom principu.
 Figure 2. Scheme and the working principle of the weighing rain gauge.

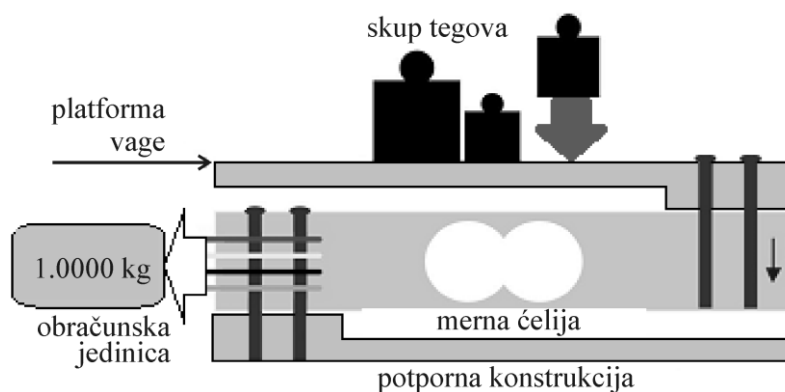


Slika 3. Šematski prikaz konstrukcije i principa rada masene merne ćelije.
 Figure 3. Scheme and the working principle of the load cell.

3 Kalibracija kišomera

3.1 Statička kalibracija kišomera sa ćelijom za masu

Princip kalibracije kišomera sa ćelijom za masu prikazan je na slici 4. Na platformu kišomera umesto posude za sakupljanje kišnice postavljaju se postepeno teg po teg i sukcesivno očitava rezultat sa digitalne jedinice za očitavanje. Ovi rezultati očitane mase pretvaraju se u količinu kiše na osnovu površine levka kišomera kao $h=M/(A*\rho_{vode})$. Treba naglasiti da se ceo ekperiment obavlja pri konstantnoj temperaturi. Ovi podaci se koriste kao kalibracija i služe za dalju upotrebu kišomera.



Slika 4. Kalibracija merne ćelije.
 Figure 4. Load cell calibration.

3.1 Dinamička kalibracija kišomera sa ćelijom za masu

Dinamička kalibracija kišomera služi za proveru osetljivosti intenziteta, a urađena je prema intenzitetu i postupak je prikazan u nastavku u poglavlju ekperimentlne procedure.

4 Eksperimentalna procedura i rezultati

4.1 Eksperimentalna procedura

Princip sintetičkog testa kišomera sa ćelijom za masu prikazan je na slici 5. Eksperimentalna procedura sadrži sledeće korake:

1. Prethodna priprema za sintetički test podrazumeva statičku kalibraciju kišomera sa tegovima.
2. Otvaranje ventila za početak „kiše” (konstantan protok vode) koja se prikuplja u posudi kišomera. Nakon uspostavljanja konstantnog protoka prelazi se na sledeći korak.
3. Pokretanje brze akvizicije (uzorkovanje od 1200Hz) pomoću računara, a nakon par minuta zaustavljanje akvizicije. Jedan od eksperimentat isproban je i sa ventilatorom kako bi se dobio uvid u uticaj vetra. Za neke od eksperimenata snimljeno je vreme prolaska kapljica kroz dva optička prekidača kako bi se dobila brzina i masa kapljica.
4. Merenje protoka vode gravimetrijskom metodom sa štopericom, čašom i analitičkom vagom. Istovremeno postavljanje čaše ispod kapljica i pokretanje štoperice, nakon nekog vremena istovremeno zaustavljanje štoperice i skidanje čaše, prikupljena masa vode meri se na analitičkoj vagi sa 0.1 mg rezolucije. Protok vode dobija se kao $Q=M/(t \rho_{\text{vode}})$ iz kojeg se može dobiti intentitet za kišomer kao $i=Q/A$.

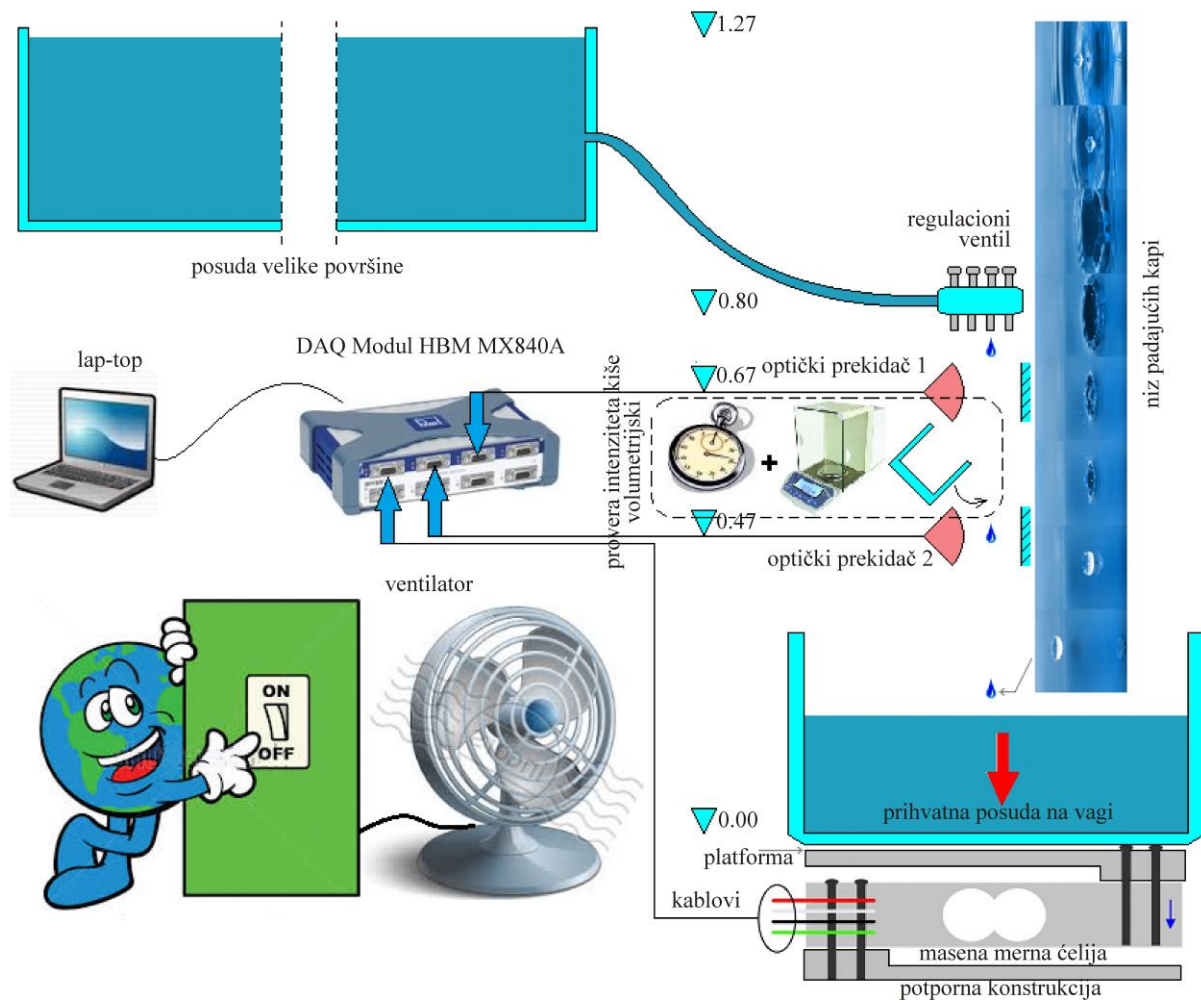
4.2 Rezultati

Statička kalibracija urađena je sa mernom ćelijom za masu HBM SP4M C3 opsega 50kg. Pomenuta ćelija prema specifikacijama [4] za C3 klasu dozvoljava maksimalno 10000 podeoka što bi za 50kg iznosilo 5g. Pošto su testovi obavljeni sa dosta manjom masom i pri konstantnoj temperaturi, izmereni podaci bi očekivano trebalo da budu bolji što je i prikazano u tabeli 1. Kada se usvoji površina levka kišomera od $A=314 \text{ cm}^2$ dobija se greška u mm kiše.

Nakon statičke kalibracije izvršena je dinamička kalibracija sa istom ćelijom. Može se videti snimak jedne kapi kako prolazi pored optičkih prekidača i udara u sabirnu posudu kišomera (slika 6), i pri tome pravi dinamičku silu udara od približno 20 g.

Snimak dinamičkog testa prikazan je na slici 7. Prikazan je obrada sirovog signala primenom niskopropusnog filtera sa presečnom frekvencijom od 1 Hz kako bi se neutralisao efekat dinamičke sile udara kapljica.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 5. Šema laboratorijskog eksperimentalnog postupka za testiranje kišomera na težinskom principu.

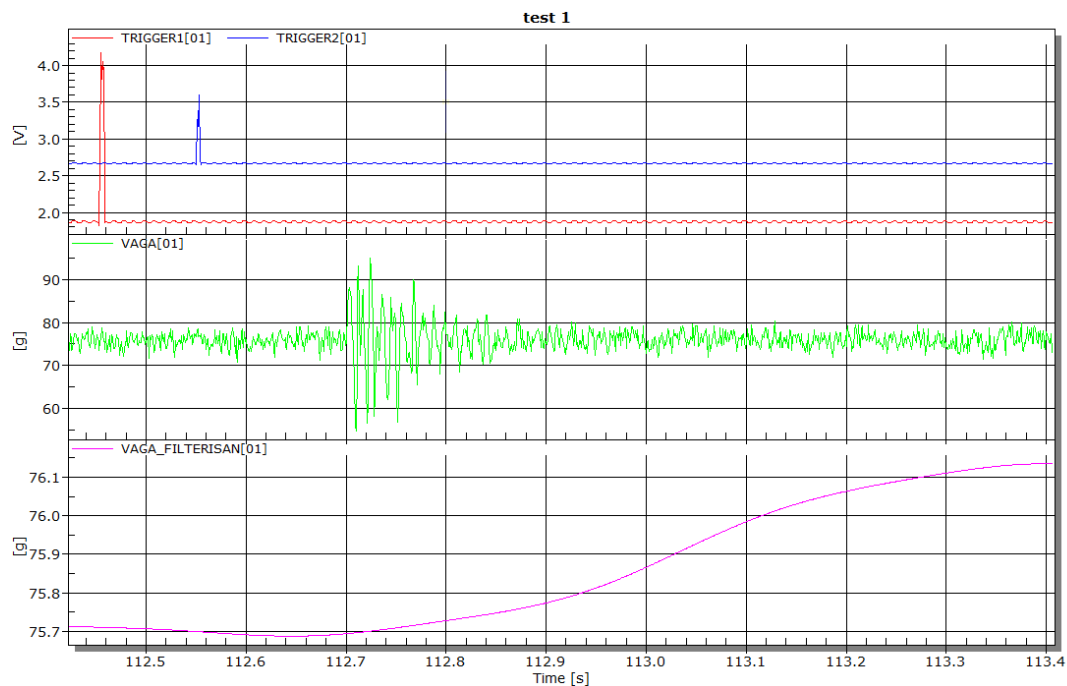
Figure 5. Scheme of the experimental laboratory setup for the weighing precipitation gauge testing.

Tabela 1. Rezultati statičke kalibracije masene erne ćelije.

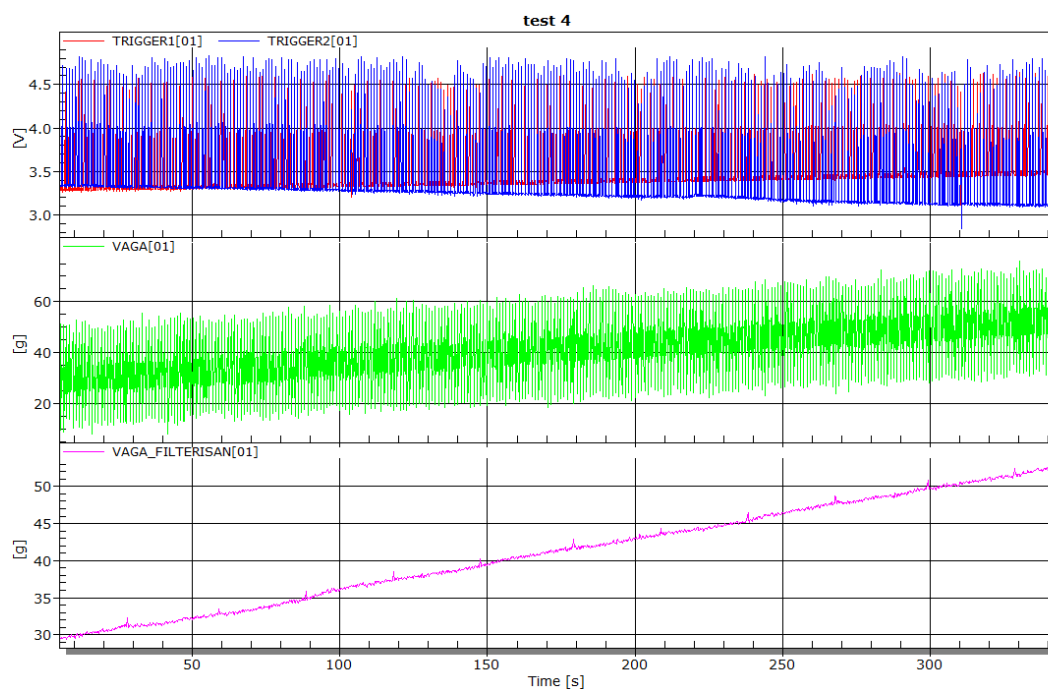
Table 1. The results of the load cell static calibration.

M_{teg} [g]	0	10	20	40	90	190	290	490	990	990	490	290	190	90	40	20	10	0
$M_{kišo.}$ [g]	-0.8	9.2	19.6	40.2	89.8	190.1	290.0	490.2	991.2	991.2	490.8	291.0	190.5	90.4	40.4	20.9	10.7	0.8
$M_{teg} - M_{kišo.}$ [g]	-0.8	-0.8	-0.4	0.2	-0.2	0.1	0.0	0.2	1.2	1.2	0.8	1.0	0.5	0.4	0.4	0.9	0.7	0.8
$M_{teg} - M_{kišo.}$ [mm]	-0.03	-0.03	-0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



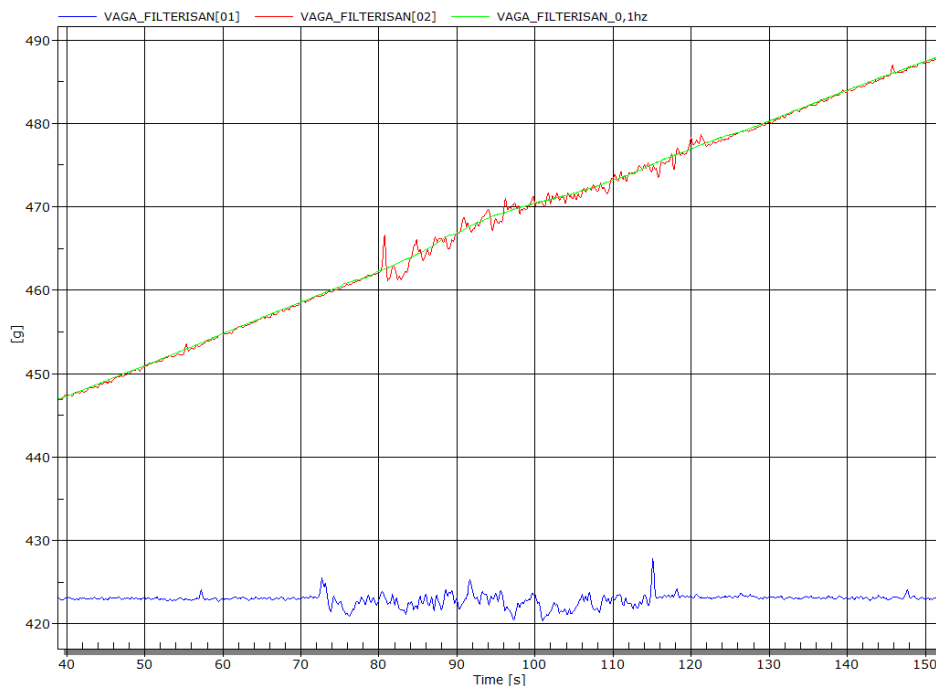
Slika 6. Snimak testa padanja kapi vode u prihvatnu posudu vage – kišomera.
Figure 6. The test record display of the water drop impact in gauge collecting vessel.



Slika 7. Zapis laboratorijskog dinamičkog test rada kišomera vage.
Figure 7. Laboratory dynamic test of the weighing precipitation gauge.

Na slici 8 prikazan je uticaj vetra (ventilatora) na posudu za prikupljanje kiše, gde su prikazana dva slučaja - kada kiša pada (crvena i zelena linija) i kada ne pada (plava linija) a pri tome se ventilator uključuje-isključuje na ~40 sec. Svi signali su filterirani sa niskopropusnim filterom nad sirovim signalom. Pošto kapljice koje padaju pojačavaju rezonantnu frekvenciju sistema ćelija-platforma-posuda-prikupljena voda koja iznosi oko 10 do 20 Hz one se moraju prigušiti kako bi se izmerila prava vrednost priraštaja samo od količine kiše koja je pala. Tako se nad sirovim signalom primenio niskopropusni filter sa presečnom frekvencijom od 1 Hz koji se na slici 8 može videti crvenom i plavom bojom. Međutim kada se uključi uticaj vetra tj. ventilatora, u signalu se pojavljuju i druge frekvencije koje su ispod 1 Hz. Tako se onda prešlo sa prvog filtera na drugi, da se sirov signal kondicionira niskopropusnim filterom koji ima presečnu frekvenciju od 0.1 Hz. Ovaj drugi filtrirani signal dao je bolje rezultate na uticaj vetra, a prikazan je zelenom bojom na slici 8.

U tabeli 2 date su izmerene vrednosti dinamičke kalibracije kišomera. Tu su prvo prikazane izmerene vrednosti vremena merna štopericom t_{stoper} i mase merene analitičkom vagom $M_{\text{a.vaga}}$ iz koje se računskim putem dobio protok $Q_{\text{stop.a.vaga}}$, a za usvojenu površinu sabirnog levka od 314 cm^2 se računskim putem dobio intenzitet „sintetičke kiše” $i_{\text{stop.a.vaga}}$. Ovako izmeren intenzitet služio je kao referentni u daljoj računici. U drugom delu tabele prikazane su izmerene vrednosti vremena merena sistemom za akviziciju podataka HBM MX840A kao $t_{\text{kišomer}}$ i mase merene sa istom akvizicijom uz pomoć platformske merne ćelije HBM SP4M C3 od 50 kg iz



Slika 8. Uticaj rada ventilatora na zapis padavina na kišomeru vagi (u laboratoriji).
Figure 8. Fan air stream influence on naked weighing rain gauge record (in lab).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Rezultati dinamičke kalibracije kišomera vage.
Table 2. The results of the weighing precipitation gauge dynamic calibration.

$t_{\text{štoper.}}$ [s]	$M_{\text{a.vaga}}$ [g]	$Q_{\text{štop.a.vaga}}$ [g/min]	$i_{\text{štop.a.vaga}}$ [mm/min]	$t_{\text{kišomer}}$ [s]	$M_{\text{kišomer}}$ [g]	$Q_{\text{kišomer}}$ [g/min]	$i_{\text{kišomer}}$ [mm/min]	rel.greška [%]
121.13	3.286	1.628	0.052	310.55	8.35	1.613	0.051	-0.89
960.37	49.466	3.090	0.098	308	16.47	3.208	0.102	3.82
125.77	8.625	4.115	0.131	339.49	23.22	4.104	0.131	-0.26
127.22	18.266	8.615	0.274	307.96	44.92	8.752	0.279	1.59
122.69	33.105	16.190	0.516	366.78	100	16.36	0.521	1.04
120.42	37.311	18.590	0.592	314.209	100.08	19.111	0.609	2.80
120.94	63.843	31.673	1.009	370.029	200	32.431	1.033	2.39
120.72	83.348	41.425	1.319	383.5	274.1	42.884	1.366	3.52
90.54	151.09	100.12	3.189	120.68	200	99.44	3.167	-0.69
81.35	161.20	118.89	3.786	99.15	200	121.03	3.854	1.80
71.21	156.36	131.74	4.196	89.16	200	134.59	4.286	2.16
56.07	163.06	174.49	5.557	67.39	200	178.07	5.671	2.05

koje se računskim putem dobio protok $Q_{\text{kišomer}}$, a uz usvojenu površinu sabirnog levka od 314 cm² se računskim putem dobio intenzitet $i_{\text{kišomer}}$. Nakon izračunavanja intenziteta sa obe metode sračunata je relativna greška u merenju. Iz ovih podataka se može videti da su u granicama od oko 2-4 %, a da se kreću i u negativnom i u pozitivnom smeru.

U tabeli 3 prikazani su rezultati ranijih ispitivanja [2] kišomera sa klackalicom koji nema sifon. Tu su prvo prikazane izmerene vrednosti vremena merna štopericom dt i merene zapremine dV iz koje se računskim putem dobio protok q , a za usvojenu površinu levka od 310.24 cm² se računskim putem dobio intenzitet „sintetičke kiše” i . Ovako izmeren intenzitet služio je kao referentni u daljnim proračunima. U drugom delu tabele prikazane su izmerene vrednosti brojača tipova iz koje se računskim putem, a uz usvojenu površinu levka od 310,24 cm² dobila osetljivost kišomera na intenzitet padavina. Međutim, bez obzira što se osetljivost menja prema intenzitetu u ovom radu ćemo usvojiti da se osetljivost ne menja i da iznosi 0.2 mm/tip i sa takvom osetljivošću sračunati intenzitet. Nakon izračunavanja intenziteta po obe metode računata je relativna greška u merenju. Iz ovih podataka se može videti da su greške u granicama od oko 10 % i da su i negativne i pozitivne.

U tabeli 4 prikazani su rezultati ranijih istraživanja [2] kišomera sa klackalicom koji ima sifon. Tu su prvo prikazane izmerene vrednosti vremena merene štopericom dt i merene zapremine dV iz koje se računskim putem dobio protok q , i za usvojenu površinu levka od 310.24 cm² se računskim putem dobio intenzitet „sintetičke kiše” i . Na ovaj način izmeren intenzitet ima ulogu referentne vrednosti u daljoj računici prikazanoj u tabeli. U drugom delu tabele date su izmerene vrednosti brojača klacova iz koje se računskim putem, a uz usvojenu površinu levka od 310,24 cm² dobila osetljivost kišomera na intenzitet padavina. Pošto se osetljivost ne menja prema intenzitetu u ovom radu je usvojena osetljivost od 0.2298 mm/tip i sa njomje sračunat intenzitet. Nakon izračunavanja intenziteta sa obe metode računata je relativna greška u merenju. Iz ovih podataka se može videti da su u granicama od oko 2 %, a da se kreću i u negativnom i u pozitivnom smeru. Na slici 9 prikazane su uporedo relativne greške u funkciji intenziteta za sva tri kišomera.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

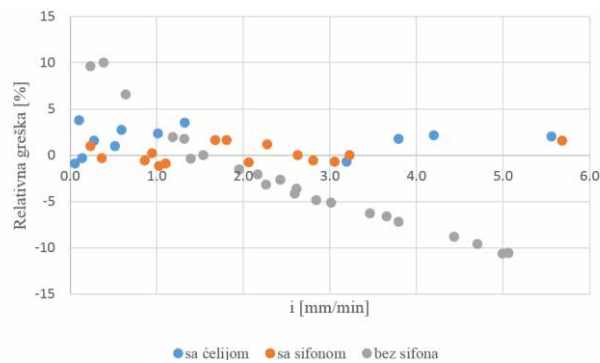
Tabela 3. Testiranje kišomera s klackalicom bez sifona - preuzeto iz [2].
Table 3. Tipping bucket rain gauge (w/o siphon) testing – according to [2].

dt [s]	dV [cm ³]	q [cm ³ /s]	i [mm/min]	brojac [tip]	osetljivost [mm/tip]	kišomer [mm/min]	rel. greška [%]
5423	651.0	0.12	0.23	114	0.184	0.25	9.68
2870	579.5	0.2	0.38	100	0.186	0.42	10.03
1759	594.5	0.33	0.64	100	0.191	0.68	6.60
997	614.0	0.61	1.18	100	0.198	1.20	2.00
900	615.5	0.68	1.31	100	0.198	1.33	1.78
866	625.5	0.72	1.39	100	0.201	1.39	-0.31
784	620.0	0.79	1.53	100	0.199	1.53	0.04
625	632.0	1.01	1.95	100	0.204	1.92	-1.54
567	637.0	1.12	2.16	100	0.205	2.12	-2.02
548	641.5	1.17	2.26	100	0.206	2.19	-3.11
560	705.0	1.25	2.42	110	0.206	2.36	-2.60
483	646.5	1.34	2.59	100	0.208	2.48	-4.07
477	647.0	1.35	2.61	100	0.208	2.52	-3.61
444	652.0	1.47	2.84	100	0.21	2.70	-4.83
420	654.0	1.56	3.01	100	0.211	2.86	-5.08
370	662.0	1.79	3.46	100	0.213	3.24	-6.27
352	667.5	1.89	3.65	100	0.215	3.41	-6.60
341	671.0	1.96	3.79	100	0.219	3.52	-7.15
297	681.0	2.29	4.43	100	0.219	4.04	-8.79
288	701.5	2.43	4.70	102	0.221	4.25	-9.57
269	695.0	2.58	4.99	100	0.244	4.46	-10.60
265	694.0	2.62	5.06	100	0.224	4.53	-10.51

Tabela 4. Testiranje kišomera s klackalicom sa sifonom - preuzeto iz [2].
Table 4. Tipping bucket rain gauge with siphon testing – according to [2].

dt [s]	dV [cm ³]	q [cm ³ /s]	i [mm/min]	brojac [tip]	osetljivost [mm/tip]	kišomer [mm/min]	rel. greška [%]
5935	712.2	0.120	0.23	100	0.229	0.23	1.01
1920	359.0	0.190	0.36	50	0.231	0.36	-0.26
2305	1021.0	0.440	0.86	143	0.23	0.86	-0.54
1083	526.5	0.490	0.94	74	0.229	0.94	0.23
1381	728.0	0.530	1.02	101	0.232	1.01	-1.14
1530	867.0	0.570	1.10	121	0.231	1.09	-0.87
820	710.0	0.870	1.67	101	0.226	1.70	1.69
1650	1537.0	0.930	1.80	219	0.226	1.83	1.67
681	726.5	1.070	2.06	101	0.232	2.04	-0.73
600	705.0	1.180	2.27	100	0.227	2.30	1.23
526	711.5	1.350	2.62	100	0.229	2.62	0.05
505	732.0	1.450	2.80	102	0.231	2.78	-0.54
546	862.0	1.580	3.05	120	0.231	3.03	-0.64
505	840.0	1.660	3.22	118	0.229	3.22	0.05
246	722.0	2.930	5.68	103	0.226	5.77	1.64

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

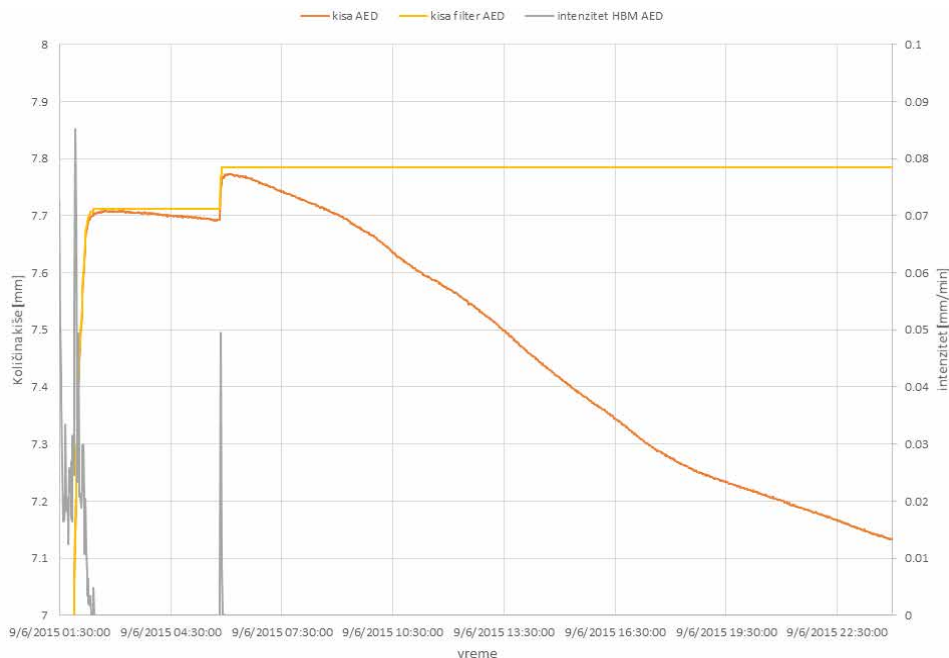


Slika 9. Relativne grške za tri tipa kišomera – uporedni prikaz.

Figure 9. Measuring relative errors for three rain gauge types – blue: weighing; tipping bucket – red: w/o siphon, - gray: with siphon.

Nakon testova u laboratoriji izvršeni su testovi na otvorenom. Za prototip kišomer vage iskorišćena je platformska merna ćelija visoke klase HBM SP4M C6 10 kg, jedinica visoke klase za očitavanje HBM AED [5] koja podržava digitalno filtriranje (prema ispitivanjima u laboratoriji došlo se do zaključka da je pogodno koristiti niskopropusni filter od 0.1 Hz te je jedinica podešena na taj način), a za akviziciju podataka korišćen je DATATAKER DT800 akvizicioni uređaj. Levak kišomera je sa otvorom kružne površine 725.85 cm².

U praksi je očigledan uticaj isparavanja vode iz posude za prikupljanje kišnice (videti sliku 10 - narandžasta kriva). Ako se pogledaju tehničke karakteristike komercijalno dostupnog kišomera OTT PLUVIO2 [3] uočava se parametar „precipitation intensity threshold” koji iznosi 0.1 mm/min.



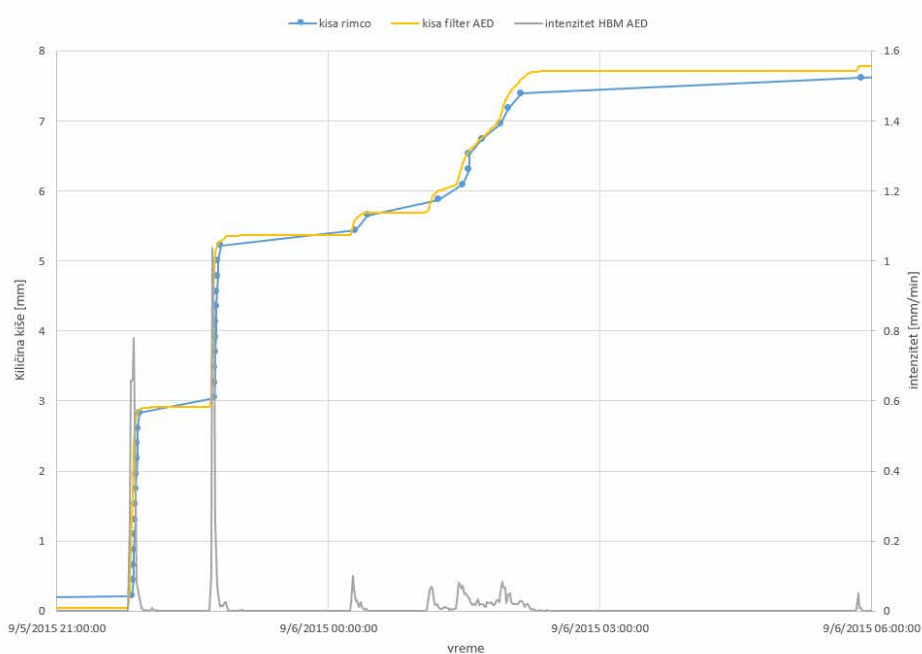
Slika 10. Kišomer sa vagom – zapis kiše: sirov zapis – narandžasta linija, sumarna linija padavina – žuta linija.

Figure 10. Weighing precipitation gauge - real rain: raw record – the orange line, cumulative precipitation – the yellow line.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Pomenut parametar je iskorišćen i u ovde prikazanom slučaju samo što je usvojena manja vrednost koja iznosi 0.0015 mm/min. Na ovaj način se svaki intenzitet manji od nevedene vrednosti izjednačava sa 0, a onda se putem intenziteta računskim putem dobija sumarna kriva pale kiše što se može videti na slici 10 kao žuta kriva.

Posle primene svih filtera i računskih operacija za eliminisanje isparavanja dobija se sumarna linija padavina, slika 11 – žuta linija, koja se može uporediti sa zapisom kišomera sa klackalicom RIMCO, na slici 11 – plava linija.



Slika 11. Prikaz realne kiše; obrađen zapis kišomera vage – žuta linija, kišomer sa klackalicom RIMCO – plava linija.

Figure 11. Display of the real rain episode; conditioned weighing precipitation gauge record – the yellow line, tipping bucket rain gauge RIMCO – the blue line.

Kada se na slici 11 pogleda druga kišna epizoda uočava se da kišomer sa klackalicom ima lokalno manju sumarnu liniju pa bi iz takvih podataka ocena trajanja kišne epizode bila sa velikom greškom. Razlog ove pojave nalazi se u kišomeru sa klackalicom koji beleži količinu kiše sa ~0.2 mm/tip, dok kišomer na bazi merne ćelije za masu ima daleko manji kvant za količinu kiše. Ovaj kvant se može dobiti iz korišćene merne ćelije HBM SP4M C6 10 kg koja prema specifikacijama [4] za C6 kalsu dozvoljava maksimalno 20000 podeoka što bi za 10kg iznosilo 0.5g tj. pri korišćenom levku kišomera iznosi 0.0007 mm.

5 Zaključak

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata laboratorijskih analiza i uporednih rezultata u meteorološkom krugu Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu može se zaključiti sledeće:

1. Kada se koristi kišomer sa klackalicom bez sifona, prikupljeni podaci se moraju korigovati sa nelinearnom krivom jer su osetljivi na intenzitet padavina,
2. Kada se koristi kišomer sa klackalicom sa sifonom podaci su neosetljivi na intenzitet padavina i mogu se bez korekcija koristiti u daljim proračunima,
3. Kada se koristi kišomer na bazi ćelija za masu zapis padavina je neosetljiv na intenzitet padavina,
4. Za kišomere na bazi ćelija za masu moraju se koristiti procedure filtriranja i eliminacije isparavanja kako bi se došlo do sumarne krive pale kiše,
5. U praksi su se dobila dobra poklapanja sumarnih krivih kišomera sa klackalicom i kišomera na bazi merne ćelije za masu koje su u granicama do 5%,
6. Sa kišomerom na bazi merne ćelije dobijaju se bolje ocene trajanja kišnih epizode zbog veće rezolucije očitavanja.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, za finansijsku podršku kroz projekte tehnološkog razvoja TR 37005, 37009, 37010 i 37014.

Literatura

1. Maksimović Č., Bužek L., Petrović J., (1991), *Corrections of rainfall data obtained by tipping bucket raingauge*, Atmospheric Research, 27, pp 45-53.
2. Simić M., Maksimović Č., (1994), *Effect of the siphon control on the dynamic characteristics of a tipping bucket raingauge*, Hydrological Sciences Journal, 39:1, pp 34-46.
3. Operating instructions Precipitation Gauge OTT Pluvio2
4. Operating instructions Single point load cell HBM SP4M
5. Operating Manual AED9401A + AD103C

Principi modelisanja interakcije zagađivača i nanosa u rečnom toku

Zoltan Horvat¹
Mirjana Horvat²
Ognjen Gabrić³

APSTRAKT: U okviru ovog rada je prikazan princip modelisanja interakcije zagađivača i nanosa u rečnom toku. Pažnja je posvećena procesima transporta nekonzervativne zagađujuće materije koja je u interakciji sa nanosom preko procesa adsorpcije/desorpcije. Formulirane jednačine transporta zagađivača obuhvataju njegovu pojavu u rastvorenom i adsorbovanom obliku, pri čemu se u skladu sa konceptom ponašanja nanosa posebno tretira materija adsorbovana na suspendovani nanos i materija adsorbovana na nanos u aktivnom sloju i stratumima ispod njega. Detaljno je predstavljen mehanizam razmene između rastvorenog i adsorbovanog zagađivača. U tu svrhu se koristi kinetički procesa prvog reda, pri čemu je modelisanje koeficijenata razmene usko povezano sa dostupnom površinom za adsorpciju. Sa druge strane, razmena između materije adsorbovane na suspendovani nanos, odnosno materije adsorbovane na nanos u aktivnom sloju je neposredno vezana za odgovarajuće nanosne procese.

Ključne reči: nekonzervativni zagađivač, nanos, interakcija, rečni tok

Principles of modeling sediment and pollutant interaction in rivers

ABSTRACT: This work presents the principles of modeling sediment and pollutant interaction in rivers. The focus of the paper is to describe the processes of nonconservative pollutant transport including its interaction with sediment particles by adsorption/desorption. Deriving the governing equations for pollutant transport included the dissolved and adsorbed pollutant. However, taking into account the modeling concept for sediment transport, the adsorbed pollutant was further divided into its portion adsorbed on suspended sediment and its portion adsorbed on sediment in the active layer and the stratum below it. The paper describes the exchange between the dissolved and adsorbed pollutant, using a first order kinetic process, while the modeling of the exchange coefficients remained closely related to the sediment surface available for adsorption. On the other hand, the exchange between the pollutant adsorbed on suspended sediment and the pollutant adsorbed on active layer sediment was directly related to the appropriate sediment processes.

Keywords: nonconservative pollutant, sediment, interaction, rivers

¹ Dr. Zoltan Horvat, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, horvath.czoczek.zoltan@gmail.com

² Dr. Mirjana Horvat, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, horvat.isic.mirjana@gmail.com

³ Dr. Ognjen Gabrić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, ogabric@gmail.com

1 Uvod

Zagađujuće materije koje dospevaju u rečni tok mogu biti *konzervativne* ili *nekonzervativne*. Nekonzervativne zagađujuće materije karakteriše svojstvo da ne ostaju rastvorene u vodi nego imaju određenu tendenciju da se procesom *adsorpcije* vezuju za sitna zrna nanosa. Adsorpcija je definisana kao adhezija atoma, jona ili rastvora za neku površinu. Slično kao u slučaju površinskog napona, adsorpcija je posledica postojanja površinske energije. Naime, u unutrašnjosti materijala vezivni potencijali atoma i molekula su zadovoljeni prisustvom drugih atoma i molekula. Izuzetak predstavljaju atomi koji čine površinu materijala, jer nisu potpuno okruženi drugim atomima, pa imaju afinitet da formiraju veze sa nekim drugim atomom koji se može naći u njihovoj blizini. Na samom početku je važno jasno naglasiti da u interakciji zagađujuće materije i nanosa učestvuju samo ona zrna koja su manja od granične vrednosti koja je uslovljena karakteristikama razmatrane materije [4,5,6]. One frakcije mešavine nanosa koje učestvuju u razmatranoj interakciji se nazivaju *aktivnim frakcijama*. Dakle, ako nekonzervativna zagađujuća materija dospe u rečni tok jedan njen deo se vezuje za zrna nanosa (bilo da se radi o suspendovanom, vučenom ili nanosu na dnu) a preostali deo ostaje rastvoren u vodi na molekularnom nivou. Iako količina adsorbovane i rastvorene materije teži da dostigne ravnotežno stanje, ponašanje ovakvog zagađivača postaje usko povezano sa kretanjem vode, odnosno nanosa. Nekonzervativni zagađivač se vezuje za sitna zrna suspendovanog nanosa, koja taloženjem mogu dovesti do zagađenja nanosa koji čini rečno dno. Sa druge strane, uvlačenjem zrna nanosa sa zagađenog dna može doći do pojave neželjene materije u inče čistoj vodi. Na zagađivač u rastvorenom obliku deluju procesi advekcije i difuzije koji su posledica strujanja vode, kao i direktna adsorpcija/desorpcija sa zrna nanosa (koji mogu biti u suspenziji ili na dnu). Dakle, ponašanje nekonzervativne zagađujuće materije u rečnom toku, koja se može javiti u rastvorenom i/ili adsorbovanom obliku, je uslovljeno parametrima toka i kretanjem nanosa. Sa druge strane, konzervativna zagađujuća materija se javlja samo u rastvorenom obliku i na njeno kretanje utiču isključivo parametri toka. Korisno je napomenuti da prisustvo zagađivača nema uticaj na strujanje vode, odnosno ponašanje nanosa.

Cilj ovog rada je detaljno izlaganje vezano za matematičko modelisanje procesa adsorpcije/desorpcije nekonzervativne zagađujuće materije na sitnija zrna nanosa u rečnom toku. Takođe se smatra da je čitalac upoznat sa principima modelisanja ponašanja nanosa koji se zasniva na principu aktivnog sloja [1,3].

2 Jednačine transporta zagađujuće materije

U nastavku se jednačine transporta zagađujuće materije daju u vektorskoj formi. Ovo je učinjeno da bi se sačuvao princip uopštenosti.

Zagađujuća materija u rastvorenom obliku podrazumeva materiju koja je sa vodom pomešana na molekularnom nivou. Navedeno znači da je delovanje gravitacionog ubrzanja na ovu materiju zanemarljivo, kao i da na nju deluju proseci advekcije i difuzije nametnuti kretanjem vode. Jednačina kretanja rastvorene zagađujuće materije se može napisati u obliku

$$\frac{\partial(\rho C^\dagger)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C^\dagger \vec{v}) = -\nabla \cdot (\vec{\zeta}_{\text{mol}}) - \sum_{k_s=1}^{K_a} (\mu_1)_{k_s} \rho C^\dagger + \sum_{k_s=1}^{K_a} (\mu_2)_{k_s} \rho C_{k_s} C_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (1)$$

gde je ρ gustina fluida, C^\dagger je bezdimenzionalna koncentracija rastvorene zagađujuće materije, t je vreme, \vec{V} je vektor brzine strujanja vode, $\vec{\zeta}_{\text{mol}}$ je fluks rastvorene zagađujuće materije usled molekularne difuzije, k_s je oznaka granulometrijskog intervala (frakcije) mešavine nanosa, K_a je oznaka poslednjeg granulometrijskog intervala mešavine nanosa koji učestvuje u procesu adsorpcije/desorpcije zagađujuće materije (aktivne frakcije), μ_1 je kinetički koeficijent procesa adsorpcije na zrna suspendovanog nanosa, μ_2 je kinetički koeficijent procesa desorpcije sa zrna suspendovanog nanosa, C je bezdimenzionalna koncentracija suspendovanog nanosa, dok $C^{\dagger\dagger}$ označava bezdimenzionalnu koncentraciju zagađujuće materije adsorbovane na zrna suspendovanog nanosa. Jednačina održanja mase rastvorenog zagađivača (1) važi za *trenutne* vrednosti promenljivih koji se u njoj javljaju.

Po definiciji je zagađujuća materija, koja čini predmet narednog izlaganja, vezana (adsorbovana) za zrna suspendovanog nanosa adhezionim silama. U saglasnosti sa do sadašnjim formulacijama i ovde se koriste bezdimenzionalne koncentracije. Jednačina kretanja zagađujuće materije adsorbovane za zrna suspendovanog nanosa se može napisati u obliku

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_{k_s} C_{k_s}^{\dagger\dagger}) + \nabla \cdot (\rho C_{k_s} C_{k_s}^{\dagger\dagger} \vec{V}) = -\nabla \cdot (\vec{\mathcal{G}}_{\text{grav}})_{k_s} + (\mu_1)_{k_s} \rho C^\dagger - (\mu_2)_{k_s} \rho C_{k_s} C_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (2)$$

gde je $\vec{\mathcal{G}}_{\text{grav}}$ fluks zagađujuće materije adsorbovane na zrna suspendovanog nanosa usled delovanja gravitacionog ubrzanja. Poslednje navedena jednačina takođe važi za *trenutne* vrednosti promenljivih. Neophodno je naglasiti da jednačina (2) ima koliko i *aktivnih* frakcija mešavine nanosa.

Tokom raznih faza neustaljenog tečenja aktivne frakcije nanosa, koje učestvuju u interakciji sa zagađujućom materijom, mogu da se nađu na dnu rečnog korita. Na ovaj način tokom morfoloških promena nepoželjna materija može dospeti i u dublje slojeve nanosnog materijala. Jednačina održanja mase adsorbovane zagađujuće materije u aktivnom sloju je

$$\rho_s (1 - p_s) \frac{\partial}{\partial t} (\beta_{k_s} \beta_{k_s}^{\dagger\dagger} E_a) = -\nabla \cdot (\vec{\varepsilon}_{k_s}) - S_{k_s}^\dagger - S_{k_s}^{\dagger\dagger} + (S_f^{\dagger\dagger})_{k_s}, \quad (3)$$

gde je ρ_s gustina zrna nanosa, p_s je poroznost mešavine nanosa u aktivnom sloju, β_{k_s} je frakciona zastupljenost granulometrijskog intervala k_s u mešavini nanosa aktivnog sloja, $\beta^{\dagger\dagger}$ je bezdimenzionalna koncentracija zagađujuće materije adsorbovane na zrna nanosa u aktivnom sloju, E_a je debljina aktivnog sloja, $\vec{\varepsilon}$ je fluks zagađujuće materije adsorbovane na zrna vučenog nanosa po jedinici širine, S^\dagger je član izvora (fluks) rastvorene zagađujuće materije usled adsorpcije/desorpcije na/sa zrna nanosa u aktivnom sloju, $S^{\dagger\dagger}$ je član izvora (fluks) zagađujuće materije adsorbovane na zrna suspendovanog nanosa iz aktivnog sloja, a $S_f^{\dagger\dagger}$ je član razmene (fluks) zagađujuće materije adsorbovane na zrna nanosa između aktivnog sloja i aktivnog stratuma. Jednačina (3) ima koliko i *aktivnih* frakcija mešavine nanosa.

3 Modelisanje procesa adsorpcije i desorpcije

Predmet narednog izlaganja je princip modelisanja kinetičkog koeficijenta procesa adsorpcije zagađujuće materije na zrna suspendovanog nanosa, kinetičkog koeficijenta procesa desorpcije zagađujuće materije sa zrna suspendovanog nanosa, kao i princip modelisanja člana izvora rastvorene zagađujuće materije usled adsorpcije/desorpcije na/sa zrna nanosa u aktivnom sloju, odnosno člana izvora zagađujuće materije adsorbovane na zrna suspendovanog nanosa iz aktivnog sloja.

3.1 Desorpcija

Prvo se razmatra proces desorpcije zbog njegove jednostavnosti. Ovde usvojeni koncept modelisanja podrazumeva da je kinetički koeficijent koji reguliše desorpciju zagađujuće materije sa zrna nanosa konstanta [4,5], pa se prosto konstatuje da je

$$(\mu_2)_{k_s} = \mu_2 = \text{const.} \quad (4)$$

Proces prelaska zagađivača iz rastvorenog u adsorbovani oblik zahteva postojanje odgovarajuće površine za koju se ona može vezati adhezionim silama. Međutim, desorpcija podrazumeva da je zagađivač već vezan na površinu zrna nanosa, pa njegovo „otpuštanje” ne zavisi od dostupnosti površine pogodne za adsorpciju, nego samo od kinetike procesa. Navedeno opravdava modelisanje odgovarajućeg kinetičkog koeficijenta kao konstantne veličine. Takođe je bitno naglasiti da se ne pravi razlika između desorpcije zagađivača sa zrna suspendovanog nanosa ili nanosa koji se nalazi u aktivnom sloju, što proizilazi iz same prirode razmatranog procesa.

3.2 Adsorpcija na suspendovani nanos

Ranije je navedeno da proces adsorpcije ima površinski karakter u smislu da neposredno zavisi od dostupnosti površine zrna nanosa za koje se zagađujuća materija vezuje adhezionim silama. Dakle, kinetički koeficijent koji reguliše proces adsorpcije na zrna suspendovanog nanosa se može modelisati tako da se njena vrednost vezuje za dostupnu površinu razmene preko kalibracionog koeficijenta koji ima dimenziju brzine i naziva se „brzina” razmene [4,5,6]. U nastavku se navodi odgovarajuća jednačina

$$(\mu_1)_{k_s} = \chi_{k_s}^{ss} \omega_{k_s}^{ss}, \quad (5)$$

gde je χ^{ss} „brzina” razmene pri modelisanju procesa adsorpcije na zrna suspendovanog nanosa, a ω^{ss} označava površinu zrna suspendovanog nanosa dostupnu za adsorpciju po jedinici zapremine vode sadržane u kontrolnoj zapremini.

Površina zrna suspendovanog nanosa koja učestvuje u interakciji nanosa i zagađivača se izražava kao površina po jedinici zapremine vode sadržane u posmatranoj kontrolnoj zapremini. Ovo ima svoju fizičku opravdanost, jer ako se određena površina pogodna za adsorpciju nalazi u manjoj količini vode, molekuli zagađivača lakše dospevaju do nje i proces

adsorpcije je intenzivniji pa onda i vrednost odgovarajućeg kinetičkog koeficijenta mora biti veća nego da se ista ta površina nalazi u većoj zapremini vode. Dakle, za istu vrednost brzine razmene, ista površina zrna nanosa će izazvati intenzivniji proces adsorpcije ako se ona nalazi u manjoj zapremini vode, nego ako se nalazi u većoj. Zaključuje se da obračunavanje predmetne površine po jedinici zapremine vode obezbeđuje postojanje opisanog mehanizma u formulisanom modelu. Pod pretpostavkom da su zrna suspendovanog nanosa idealno sfernog oblika i identična po granulometrijskim intervalima, površina zrna (po jedinici zapremine vode sadržane u kontrolnoj zapremini) dostupna za proces adsorpcije se računa po obrazcu

$$\omega_{k_s}^{ss} = \frac{6 C_{k_s} \rho}{D_{k_s} \rho_s}, \quad (6)$$

gde je D reprezentativni prečnik zrna za odgovarajući granulometrijski interval. Naravno, poznato je da zrna suspendovanog nanosa u rečnim tokovima nisu idealno sfernog oblika. Međutim, ako se uzme u obzir činjenica da u procesu adsorpcije zagađivača na zrna suspendovanog nanosa učestvuju samo aktivne frakcije (sa karakterističnim prečnikom $< 62.5 \mu\text{m}$), na ovde opisan način je moguće dobiti realne vrednosti za dostupnu površinu razmene [2].

3.3 Transport zagađivača vučenim nanosom

Fluks zagađujuće materije adsorbovane na zrna vučenog nanosa je usko vezan za fluks vučenog nanosa. Dakle, predmetni fluks se načelno dobija pomoću izraza

$$\bar{\varepsilon}_{k_s} = \bar{\phi}_{k_s} \beta_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (7)$$

gde je $\bar{\phi}$ fluks vučenog nanosa po jedinici širine. Konstatuje se da je prirodno vezati ovaj vid kretanja zagađujuće materije za kretanje zrna vučenog nanosa, kao što je to urađeno u prethodnoj jednačini. Molekul zagađivača koji je adhezionim silama vezan za zrno koje se kreće kotrljanjem, klizanjem i kratkim poskakivanjem na dnu korita ima identičnu putanju kao i pomenuto zrno nanosa dok se ne ispune uslovi za njegovu desorpciju. Pošto samo aktivne frakcije ($D_{k_s} < 62.5 \mu\text{m}$) učestvuju u kretanju zagađivača na ovaj način, razumno je pretpostaviti da učešće fluksa zagađujuće materije adsorbovane na zrna vučenog nanosa u ukupnom transportu materije nije značajno, ali se ono ipak uzima u obzir radi sveobuhvatnosti formulisanog modela.

3.4 Zagađujuća materija u aktivnom sloju

Posmatra se član izvora (fluks) rastvorene zagađujuće materije usled adsorpcije/desorpcije na/sa zrna nanosa u aktivnom sloju. Ovaj član se po svojoj prirodi sastoji od mase zagađujuće materije (po jedinici površine i po jedinici vremena) koja se adsorbuje na zrna nanosa u aktivnom sloju (gubitak za zagađivač u rastvorenem obliku) i mase zagađujuće materije koja se desorbuje sa zrna nanosa u aktivnom sloju (dobitak za zagađivač u rastvorenem obliku). Na osnovu ovoga se može napisati da je

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$S_{k_s}^\dagger = (S_{k_s}^\dagger)^{\text{des}} - (S_{k_s}^\dagger)^{\text{ads}}. \quad (8)$$

Masa koja se desorbuje sa zrna nanosa granulometrijskog intervala k_s u aktivnom sloju se može odrediti koristeći odgovarajući kinetički koeficijent. Princip ovakvog načina modelisanja podrazumeva da je desorbovana masa (po jedinici površine i po jedinici vremena) proporcionalna masi adsorbovanog zagađivača u aktivnom sloju (po jedinici površine) dostupnoj za ovaj proces. Koeficijent proporcionalnosti je upravo kinetički koeficijent desorpcije.

$$(S_{k_s}^\dagger)^{\text{des}} = \mu_2 \rho_s (1 - p_s) E_a \beta_{k_s} \beta_{k_s}^{\dagger\dagger} t_c. \quad (9)$$

U navedenom izrazu se javlja koeficijent korekcije t_c , koji ovde služi za redukciju količine zagađivača dostupne za desorpciju [5,6]. Određena površina nanosa koja na sebi sadrži zagađujuću materiju nije u neposrednom kontaktu sa vodom, nego je u kontaktu sa drugim zrnima pa materija vezana za nju nije dostupna procesu desorpcije. Ova pojava je moguća samo u slučaju nanosa na dnu a ne i u slučaju suspendovanog nanosa. Analogno prehodnom razmatranju, masa zagađujuće materije (po jedinici površine i po jedinici vremena) koja se adsorbuje na zrna nanosa granulometrijskog intervala k_s u aktivnom sloju je proporcionalna masi rastvorenog zagađivača u aktivnom sloju. Koeficijent proporcionalnosti je upravo kinetički koeficijent adsorpcije.

$$(S_{k_s}^\dagger)^{\text{ads}} = (\mu_1^{bs})_{k_s} p_s E_a \rho C^\dagger, \quad (10)$$

gde je μ_1^{bs} kinetički koeficijent procesa adsorpcije na zrna nanosa u aktivnom sloju. U skladu sa razlozima iznetim u ranijem izlaganju, kinetički koeficijent u poslednjoj jednačini se modeliše tako da se njegova vrednost vezuje za dostupnu površinu razmene preko „brzine” razmene, pa se piše da je

$$(\mu_1^{bs})_{k_s} = \chi_{k_s}^{bs} \omega_{k_s}^{bs}. \quad (11)$$

U poslednjoj jednačini je χ^{bs} „brzina” razmene pri modelisanju procesa adsorpcije na zrna nanosa u aktivnom sloju, a ω^{bs} označava površinu zrna nanosa u aktivnom sloju dostupnu za adsorpciju po jedinici zapremine vode sadržane u kontrolnoj zapremini. Slično kao i ranije, i ovde se površina zrna nanosa u aktivnom sloju koja učestvuje u interakciji nanosa i zagađivača, izražava kao površina po jedinici zapremine vode sadržane u posmatranoj kontrolnoj zapremini. Na ovaj način se u model ugrađuje mehanizam da površina dostupna procesu adsorpcije u manjoj zapremini vode daje veću vrednost kinetičkog koeficijenta nego kada se ista površina nalazi u većoj zapremini vode. Pod pretpostavkom da su zrna nanosa u aktivnom sloju sfernog oblika i identična po granulometrijskim intervalima, onda se površina

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

zrna (po jedinici zapremine vode sadržane u kontrolnoj zapremini) dostupna za proces adsorpcije može napisati kao

$$\omega_{k_s}^{bs} = \frac{6(1-p_s)\beta_{k_s} \iota_c}{D_{k_s} p_s}. \quad (12)$$

Koeficijent redukcije površine dostupne za adsorpciju ι_c u poslednjoj jednačini kvantifikuje pojavu da se u mešavini nanosa na dnu korita pojedina zrna dodiruju smanjujući tako površinu koja može učestvovati u interakciji nanosa i zagađujuće materije. Iako zrna nanosa nisu idealno sfernog oblika na ovde opisan način je moguće dobiti realne vrednosti za dostupnu površinu razmene [2], pošto u procesu adsorpcije učestvuju samo aktivne frakcije (sa karakterističnim prečnikom zrna $< 62.5 \mu\text{m}$).

Izvor zagađujuće materije adsorbovane na zrna suspendovanog nanosa granulometrijskog intervala k_s sa rečnog dna proizilazi iz usvojenog koncepta modelisanja nanosa [1,3]. Ovaj član je neposredno uslovljen mehanizmima uvlačenja zrna nanosa sa dna u suspenziju i deponovanja nanosa iz suspenzije na rečno dno, jer predmetna zrna mogu na sebi nositi adsorbovanu zagađujuću materiju. Zbog ovoga se piše da je

$$S_{k_s}^{\dagger\dagger} = E_{k_s}^{\dagger\dagger} - D_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (13)$$

pri čemu $D^{\dagger\dagger}$ označava deponovanje zagađujuće materije adsorbovane na zrna nanosa iz suspenzije, a $E^{\dagger\dagger}$ je uvlačenje zagađujuće materije adsorbovane na zrna nanosa sa dna u suspenziju. Kada se usled turbulentnih događaja na dnu i/ili homogene turbulencije, zrna nanosa sa dna uvuku u suspenziju, ona sa sobom mogu poneti zagađujuću materiju adsorbovanu na njih. Dakle, opisana pojava pored fluksa mase nanosa podrazumeva i fluks koji predstavlja dobitak za masu zagađivača adsorbovanu na zrnima suspendovanog nanosa i modeliše se po izrazu

$$E_{k_s}^{\dagger\dagger} = E_{k_s}^{\text{sed}} \beta_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (14)$$

gde je E^{sed} uvlačenje nanosa sa dna u suspenziju. Inverzni proces u odnosu na prethodno opisani se javlja deponovanjem zrna nanosa iz suspenzije na dno usled delovanja gravitacionog ubrzanja. Ova zrna sa sobom takođe mogu poneti adsorbovanu zagađujuću materiju, pa se definiše fluks koji predstavlja gubitak za masu zagađivača adsorbovanu na zrnima suspendovanog nanosa i računa se po jednačini

$$D_{k_s}^{\dagger\dagger} = D_{k_s}^{\text{sed}} C_{k_s}^{\dagger\dagger}, \quad (15)$$

gde je D^{sed} deponovanje nanosa iz suspenzije na dno. Ovde opisani vidovi kretanja zagađujuće materije su uslovljeni postojanjem nanosnih procesa uvlačenja zrna u suspenziju i njihovog deponovanja iz suspenzije. Zbog ovoga je flukseve zagađivača, koji su posledica ovog kretanja, zgodno vezati za odgovarajuće mehanizme ponašanja nanosa kao što je to i urađeno sa prikazanim jednačinama.

4 Zaključak

U okviru rada je detaljno prikazan koncept modelisanja interakcije zagađujuće materije i nanosa u rečnom toku. Posebna pažnja je posvećena procesu adsorpcije i desorpcije nekonzervativne zagađujuće materije, koja nije podložna biološkom i/ili hemijskom nastajanju i/ili nestajanju, a stupa u interakciju sa pojedinim zrnima nanosne mešavine. Prikazani koncept modelisanja predmetne interakcije obuhvata pojavu zagađivača u rastvorenom i adsorbovanom obliku, pri čemu se posebno prati masa materije adsorbovane na suspendovani nanos, nanos u aktivnom sloju, odnosno nanos u stratumima ispod njega. Takođe su formulisani i mehanizmi razmene između navedenih vidova pojave zagađujuće materije, koji obuhvataju procese adsorpcije i desorpcije, odnosno procese transporta adsorbovane materije vezane za zrna svih vidova pojave nanosa (suspendovani, vučeni, stratumi, itd.).

Literatura

1. Budinski L., Spasojević M., (2013), *2D modeling of flow and sediment interaction: sediment mixtures*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 140(2), pp. 199-209.
2. Duursma E. K., Carroll J., (1996), *Environmental compartments*, Springer-Verlag, Berlin.
3. Horvat Z., Isic M., Spasojevic M., (2015), *Two dimensional river flow and sediment transport model*, Environmental fluid mechanics, Vol. 15, pp. 595-625.
4. Perianez R., (2003), *Redissolution and long-term transport of radionuclides released from a contaminated sediment*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 56, pp 5-14.
5. Perianez R., (2009), *Environmental modelling in the Gulf of Cadiz: Heavy metal distributions in water and sediments*, Science of the Total Environment, Vol. 407, pp 3392-3406.
6. Perianez R., (2012), *Modelling the environmental behaviour of pollutants in Algeciras Bay (south Spain)*, Marine Pollution Bulletin, Vol. 64, pp 221-232.

Kalibracija linijskog modela transporta nanosa

Mirjana Horvat¹
Zoltan Horvat²
Ognjen Gabrić³

APSTRAKT: Cilj prikazanog rada je da se pruži uvid u postupak i poteškoće procesa kalibracije linijskog modela transporta nanosa u mreži otvorenih tokova. U okviru toga se daje pregled koraka koji prethode samoj kalibraciji modela. Prvi korak je definisanja jednačina strujanja i transporta nanosa na kojima se zasniva razvijen numerički model. Nakon formiranja modela slede šematski primeri posle kojih se prelazi na modelisanje transporta kod realnog toka. Za realan primer je odabrana deonica Dunava u Srbiji sa glavnim pritokama Tisom i Savom. Pošto je definisana oblast predviđena za modelisanje, prelazi se na kalibraciju hidrauličkog dela modela, nako čega se konačno može pristupiti kalibraciji modela transporta nanosa. S obzirom na slaganje računatih i merenih vrednosti se smatra da je kalibracija modela zadovoljavajuća.

Ključne reči: linijski model, transport nanosa, kalibracija modela

Calibration of a 1-D sediment transport model

ABSTRACT: The goal of the presented paper is to provide an insight into the calibration process of the developed sediment transport model. In doing so, the authors provided a short overview of the steps leading up to the calibration. The first step is the development of the mathematical equations used to describe the water flow and sediment transport processes. After formulation the numerical model is tested on schematic examples following which it can be further examined using field measurements on the reach of the Danube River in Serbia and its main tributaries, Tisa and Sava. Since the modeled domain is identified, one can initiate the hydraulic models calibration that is followed by the sediment models calibration. Due to the coinciding of measured and computed values it can be concluded that the sediment models calibration process was successful.

Keywords: one dimensional model, sediment transport, model calibration

¹ Dr. Mirjana Horvat, dipl.inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Srbija, tel: 024 554 300, horvat.isic.mirjana@gmail.com

² Dr. Zoltan Horvat, dipl.inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Srbija, tel: 024 554 300, horvath.czoczek.zoltan@gmail.com

³ Dr. Ognjen Gabrić, dipl.inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Srbija, tel: 024 554 300, ogabric@gmail.com

1 Uvod

Prilikom razvijanja numeričkih modela za modelisanje tečenja vode u mreži otvorenih tokova i transport nanosa se nakon matematičkog formulisanja razmatranih procesa i njihovog programiranja prelazi na testiranje razvijenog programa. Vodeći se ovim principima se u [6] može naći detaljan opis osnovnih jednačina i šematskog prikaza razvijenog matematičkog modela koji se razmatra. Dok su preliminarni testovi prilično jednostavni i obuhvataju primenu programa na šematske primere za pojednostavljene slučajeve strujanja kako bi rezultati proračuna mogli da se predvide i kvalitetnije ocene, konačna provera ispravnosti razvijenog numeričkog modela je njegova primena na realnom primeru. S obzirom da se ovde radi o složenom modelu koji obuhvata modelisanje neustaljenog tečenja i transporta nanosa i deformacije korita u mreži otvorenih tokova, proces verifikacije ovakvog modela je prilično zahtevan.

U prikazanom radu se razmatra postupak kalibracije dela modela kojim se simulira transport nanosa u mreži otvorenih tokova kao prvi korak u postupku ka njegovoj verifikaciji.

2 Linijski model interakcije vode i nanosa u mreži otvorenih tokova

Detaljne informacije o razvijenom numeričkom modelu mogu da se nađu u [6] dok se ovde daje kratak pregled modela sa ciljem boljeg shvatanja suštine rada.

Primenjen matematički model interakcije vode i nanosa u mreži otvorenih tokova se sastoji od hidrauličkog dela modela opisanog u poglavlju 2.1. i modela transporta nanosa i deformacije korita opisanog u poglavlju 2.2.

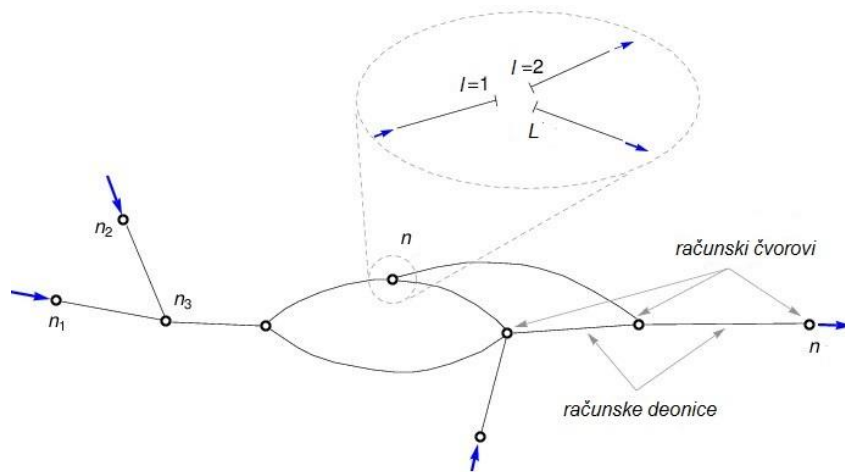
2.1 Hidraulički model

Hidraulički deo modela se zasniva na *St. Venant*-ovim jednačinama kojima se opisuje linijsko strujanje u otvorenim tokovima. Jednačine strujanja su diskretizovane koristeći *Preissmann*-ovu šemu metode konačnih razlika [8] sa čime su dobijene nelinearne algebarske jednačine za čiju linearizaciju je primenjen *Newton-Raphson*-ov iterativni postupak. Ovako dobijen sistem jednačina može da se primeni za proračun neustaljenog strujanja u jednoj deonici toka. Kako bi se omogućila primena modela na strujaje u mreži otvorenih tokova, slika 1, ove jednačine su dopunjene sa dodatnim jednačinama za modelisanje neustaljenog strujanja u granatoj mreži otvorenih tokova.

Prva grupa dodatnih jednačina je jednačina kontinuiteta u čvorovima kojom se definiše da je suma proticaja Q svih deonica $l=1, \dots, L$ koje ulaze u proizvoljan čvor n jednaka sumi proticaja po svim deonicama koje iz tog čvora izlaze. Jednačina kontinuiteta je navedena u diskretizovanom obliku, jednačina 1, gde indeks $m+1$ označava tekuću iteraciju a indeks $t+1$ tekući vremenski nivo. Po jedna jednačina kontinuiteta može da se napiše za svaki od čvorova u sistemu. Drugi tip dodatnih jednačina je pojednostavljen oblik energetske jednačine, jednačina 2, gde se kao uslov nameće jednakost priraštaja nivoa ΔZ u čvorovima. Po jedna jednačina 2 može da se napiše za svaki čvor u sistemu.

$$\sum_{l=1}^L ({}^{m+1}Q_l^{t+1}) = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Z_{l=1} = \Delta Z_{l=2} = \dots = \Delta Z_L = \Delta Z_n \quad (2)$$



Slika 1. Granata mreža
 Figure 1. Looped network

Sa opisanim postupkom se dobija sistem jednačina sa nepoznatim priraštajima nivoa i proticaja. Sa poznatim uzvodnim i nizvodnim graničnim uslovom je sistem jednačina rešiv a njegovim rešenjem se dobija kompletan hidraulički proračun proizvoljne mreže otvorenih tokova [7].

2.2 Model transporta nanosa

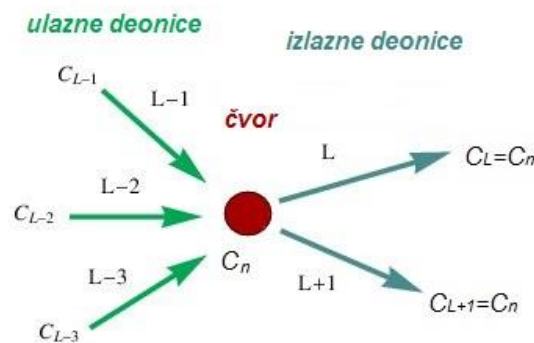
Nakon rešavanja hidrauličkog dela, može da se pristupi delu modela koji se odnosi na proračun transporta nanosa i deformacije korita.

Za modelisanje transporta nanosa i deformacije korita je usvojen pristup kojim su obuhvaćena dva vida kretanja nanosa, suspendovanog nanosa i nanosa na i pri dnu. Ovaj koncept takođe obuhvata i interakciju vode i nanosa sa čime se ostavlja mogućnost uticanja strujne slike na transport nanosa sa jedne strane, i povratno dejstvo deformacije korita na promenu strujne slike. Transport nanosa je modelisan oslanjajući se na koncept aktivnog sloja [5], pri čemu je mešavina nanosa podeljena na proizvoljan broj frakcija \$k\$ pomoću kojih su definisani procesi razmene materijala između nanosa u suspenziji i nanosa u aktivnom sloju. Jednačine transporta nanosa i deformacije korita su rešavane primenom metode etapnog rešavanja sa čime se rešenje dobija u dva koraka, advektivnom i difuzionom koraku. Prednost ove metode se ogleda u mogućnosti primene numerički najpogodnije metode za svaki od koraka. Jednačine advektivnog koraka su rešavane metodom karakteristika [8], dok su jednačine difuzionog koraka rešavane Crank-Nicholson-ovom šemom metode konačnih razlika, [8]. Dobijen model može da se primeni za proračun transporta nanosa i deformacije korita jedne deonice toka, a da bi se omogućila njegova primena na proračun transporta nanosa u mreži otvorenih tokova prethodno izveden sistem jednačina je dopunjen sa dodatnim jednačinama. Dodatne jednačine obuhvataju jednačinu održanja mase suspendovanog nanosa u čvorovima kojih ima koliko i čvorova u sistemu, a koje se izvode uz pretpostavku potpunog mešanja suspendovanog nanosa u čvorovima. Primenom ove pretpostavke se može napisati

jednačina kojom se tvrdi da je suma proizvoda koncentracije suspendovanog nanosa C i proticaja po svim ulaznim deonicama pojedine frakcije jednaka proizvodu jedne čvorne koncentracije iste frakcije i sumi proticaja po svim izlaznim deonicama, jednačina 3.

$$Q_{lok} \cdot C_{lok} + \sum_{l_{ulaz}=1}^{L_{ulaz}} (Q_{ulaz} \cdot C_{ulaz}) = C_n \cdot \sum_{l_{izlaz}=1}^{L_{izlaz}} (Q_{izlaz}) \quad (3)$$

U jednačini 3 prvi član sa leve strane označava lokalni dotok u posmatrani čvor. Ukoliko nema lokalnog dotoka onda je ovaj član nula. Drugi član sa leve strane je suma ulaza nanosa kroz sve deonice koje u posmatrani čvor n ulaze. Kako svaka ulazna deonica može da ima sopstvenu koncentraciju, ovde se koncentracija proizvoljne ulazne deonice množi sa pripadajućim proticajem iste deonice da bi se dobio ulaz date koncentracije od posmatrane deonice, slika 2.



Slika 2. Održanje mase suspendovanog nanosa u čvoru
Figure 2. Node mass conservation equation for suspended sediment

Sabiranjem ulaza po svim ulaznim deonicama se dobija ukupan suspendovani nanos koji ulazi u posmatrani čvor. Primenom pretpostavke o potpunom mešanju u čvoru je formulisan član sa desne strane znaka jednakosti. Naime, ako u čvoru dolazi do potpunog mešanja suspendovanog nanosa, onda je koncentracija u svim izlaznim deonicama ista i jednaka "čvornoj" koncentraciji C_n , a izlaz suspendovanog nanosa po određenim deonicama se raspodeljuje proporcionalno protoku. Sa ovime je sistem jednačina za proračun transporta nanosa i deformacije korita kompletiran. U procesu izrade programa je sledeći korak testiranje razvijenog modela na šematskim primerima. Detaljan opis šematskih primera na kojima je prikazan model testiran može da se pronađe u [6], a ovde se u nastavku prelazi na kalibraciju modela.

3 Kalibracija modela

U okviru ovog rada se razmatra proces kalibracije linijskog modela transporta nanosa te se ukratko navode samo osnovne informacije neophodne za razumevanje rada, dok se detaljan pregled svih međukoraka od faze razvoja programa do njegove kalibracije može pronaći u [6].

U poglavlju 3.1. je prikazana oblast koja je obuhvaćena modelom sa osnovnim informacijama o merenjima koja su bila na raspolaganju za proces kalibracije. Mada kalibracija hidrauličkog modela nije tema ovog rada, ona predstavlja neophodan korak u kalibraciji modela transporta nanosa i preduslov je za dalju kvalitetnu kalibraciju. Zbog toga se u okviru poglavlja 3.2. daje kratak pregled kalibracije hidrauličkog dela modela, nakon čega se u poglavlju 3.3 prelazi na kalibraciju modela transporta nanosa.

3.1 Oblast modela

Izbor oblasti modela je zavisila od merenja koja su stajala na raspolaganju za definisanje graničnih i početnih uslova, odnosno za kalibraciju i verifikaciju razvijenog modela. U konkretnom slučaju se razmatrala deonica Dunava u Srbiji sa svim pritokama. Analizom raspoloživih merenja se međutim ispostavilo da u manjim pritokama nema raspoloživih merenja koja su potrebna za model transporta nanosa. Sistematizacija i analiza raspoloživih merenja su prikazani u [6], dok se ovde daju rezultati sprovedenih analiza. Na osnovu raspoloživih merenja potrebnih za modelisanje strujanja vode i transporta nanosa se opredelilo da se modeliše deonica Dunava u Srbiji koja se proteže od Bezdana do HE Đerdap 1, sa pritokama Savom od Sremske Mitrovice do ušća Save u Dunav, Tisom od Sente do ušća u Dunav, Tisom od Sente do ušća u Dunav i Velikom Moravom, slika 3.



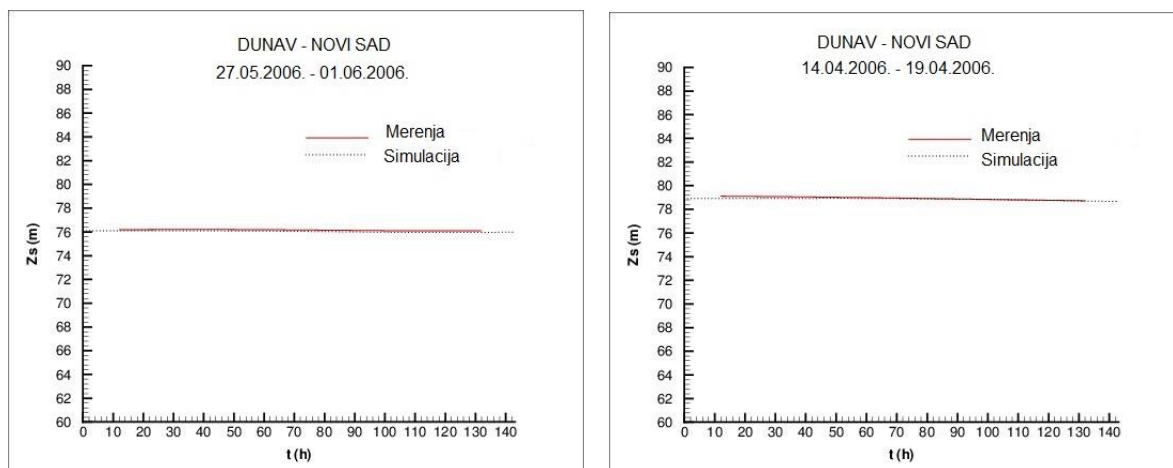
Slika 3. Karta oblasti modela
Figure 3. The modeled domain

Na odabranoj deonici se raspolagalo sa merenjima potrebnim za definisanje početnih i graničnih uslova i dodatnim merenjima unutar modelisane oblasti za kvalitetnu kalibraciju hidrauličkog i modela transporta nanosa. Još jednom se ističe da modelisana deonica Dunava

ima i druge pritoke osim onih obuhvaćenih modelom, međutim s obzirom da na drugim pritokama nije bilo raspoloživih merenja nanosa za definisanje graničnih uslova ni za kontrolu kalibracije, koncentracija suspendovanog nanosa koja ulazi u sistem putem ovih pritoka je zanemarena.

3.2 Kalibracija hidrauličkog modela

Hidraulički model zahteva zadavanje uzvodnih i nizvodnih graničnih uslova, za razliku od modela transporta nanosa gde se zadaju samo uzvodni granični uslovi. Nizvodni granični uslov hidrauličkog modela je zadat nivogram na HE Đerdap 1, slika 3. Uzvodni granični uslovi su poznati hidrogrami na svim granicama. Hidroelektrana na nizvodnom kraju modelisane oblasti uzrokuje izrazite oscilacije pa je za kaibraciju hidrauličkog modela usvojen računski korak po vremenu od 15 minuta. Kalibracija hidrauličkog modela je urađena zadavanjem apsolutne hrapavosti k duž modelisane oblasti za odabran šestodnevni period od 27.05. do 01.06.2006. godine sa merodavnim proticajem za ovaj vremenski interval, $Q_{sr} \approx 7600 m^3 / s$ i poređenjem računatih nivoa sa raspoloživim merenjima nivoa, slika 4. levo. Nakon kalibracije je simulacija je ponovljena za više različitih šestodnevnih perioda u 2006. godini kako bi se proverio kvalitet kalibracije. Rezultati proračuna za period od 14.04. do 19.04.2006. godine sa merodavnim protokom $Q_{sr} \approx 15600 m^3 / s$ su prikazani na slici 4. desno. Poređenjem merenih i računatih nivoa za preostale šestodnevne periode se konstatovalo da je kalibracija hidrauličkog modela dobra i prešlo se na verifikaciju hidrauličkog modela. Ostali rezultati kalibracije i verifikacije hidrauličkog modela su dati u [6].



Slika 4. Kalibracija hidrauličkog dela modela
Figure 4. Calibration of the hydraulic model

3.3 Kalibracija modela transporta

Model transporta nanosa zahteva zadavanje graničnih uslova samo na uzvodnim granicama. Prilikom izbora perioda kalibracije su uzete u obzir godišnje oscilacije u

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

koncentracijama nanosa zbog čega je za kalibraciju usvojen period od godinu dana, od 01.01. do 31.12.2006. godine. Za razliku od hidrauličkih procesa, procesi transporta nanosa i deformacije korita se odvijaju znatno sporije. Pored toga, ovaj deo modela nije toliko osetljiv na veličinu računskog koraka po vremenu zbog čega je za kalibraciju modela transporta nanosa usvojen računski korak od 30 minuta. Dodatna prednost većeg vremenskog koraka je kraće trajanje simulacija. Kao kontrolni preseki za proces kalibracije modela transporta nanosa su korišćeni preseki sa merenjima u Novom Sadu, Starim Banovcima, Smederevu i na brani HE Đerdap 1. Za odabranu godinu se na modelisanoj deonici Tise raspolagalo sa merenjima nanosa samo u mernom preseku kod Titela, na Savi kod Beograda dok na Velikoj Moravi nije bilo raspoloživih merenja nanosa koja bi poslužila kao kontrola procesa kalibracije.

Kalibracija ovog dela modela je rađena zadavanjem rastojanja na kojem se računa merodavna koncentracija za proračun fluksa uvlačenja nanosa sa dna i fluksa deponovanja. Ovakav pristup kalibracije se pravda sa činjenicom da zbirno dejstvo ova dva mehanizma daje član izvora suspendovanog nanosa koji predstavlja primarni mehanizam razmene između raznih vidova kretanja nanosa. Rastojanje za proračun koncentracije merodavne za deponovanje je isto za sve frakcije, dok se rastojanje za proračun koncentracije merodavne za određivanje vertikalnog fluksa uvlačenja sa dna zadaje posebno za sve frakcije. Nanosna mešavina je podeljena na deset frakcija za koje su srednji prečnici zrna dati u tabeli 1.

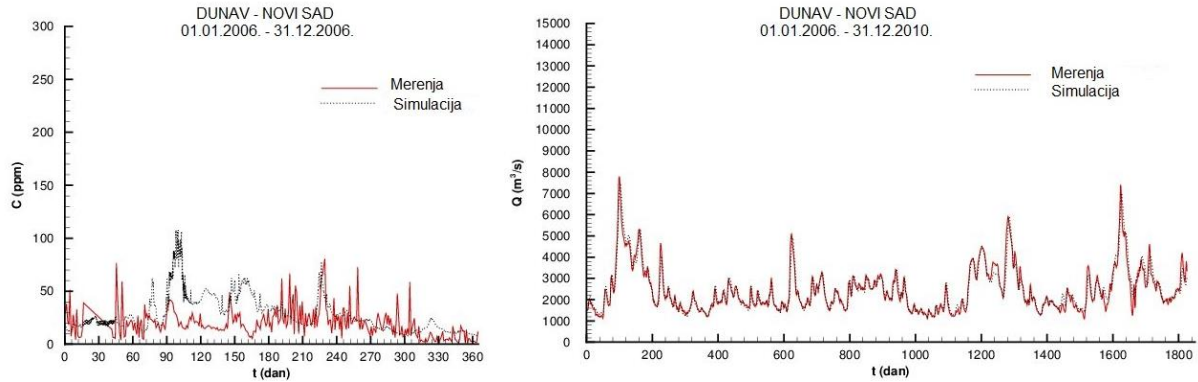
Tabela 1. Pregled usvojenih frakcija i srednjih prečnika zrna u modelu
Table 1. Natpis iznad tabele na drugom jeziku, veličina 12 pt.

frakcija	otvor sita	srednje zrno
-	mm	mm
1	0.01-0.001	0.003
2	0.06-0.01	0.024
3	0.1-0.06	0.077
4	0.2-0.1	0.141
5	0.6-0.2	0.346
6	1-0.6	0.775
7	2-1	1.414
8	6-2	3.464
9	10-6	7.746
10	30-10	17.321

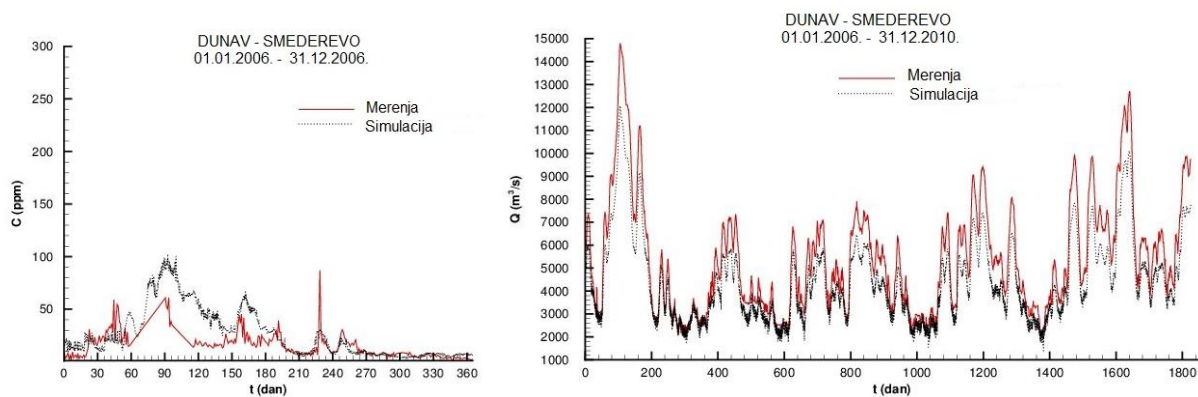
Za određivanje srednjih prečnika i početnih uslova na dnu su korišćeni godišnji izveštaji [1, 2, 3, 4] koji sadrže srednje krive granulometrijskog sastava za pojedine preseke pomoću kojih su merenja na granicama rastavljena na frakcije. Imajući u vidu da raspoloživa merenja nanosa nisu data po frakcijama, simulacije su puštane sa deset frakcija ali su rezultati prikazivani u obliku sume koncentracije po svim frakcijama kako bi bili uporedivi sa raspoloživim merenjima. Modelom je obuhvaćena mreža tokova sa međusobno izuzetno različitim karakteristikama po pitanju materijala koji se u njima nalazi što je prevaziđeno dopunjavanjem modela sa mogućnošću da se vrednost koeficijenata kalibracije koriguje duž toka. Na taj način su se prvo za kompletan sistem zadali koeficijenti kalibracije, nakon čega su se koeficijenti po potrebi lokalno korigovali. Za kalibraciju su korišćene koncentracije

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

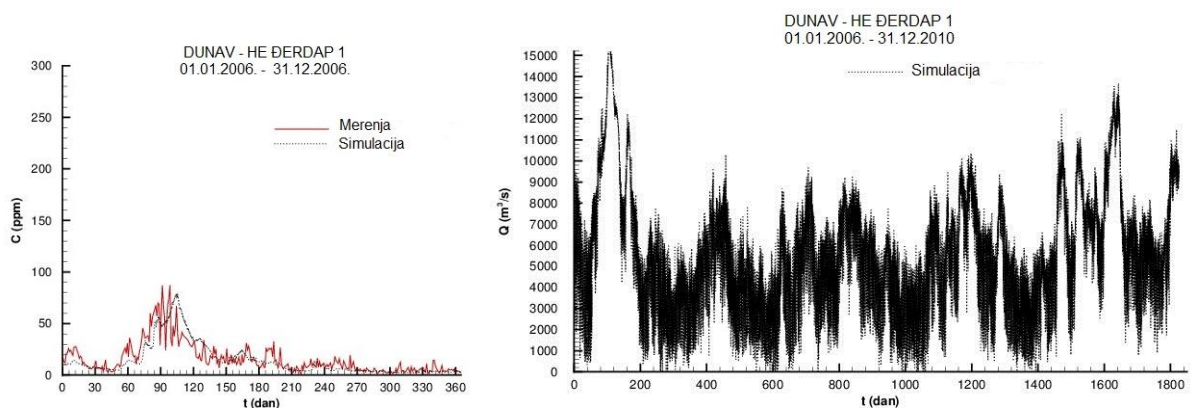
suspendovanog nanosa a rezultati kalibracije modela transporta nanosa su prikazani na slikama 5, 6 i 7 levo.



Slika 5. Kalibracija modela transporta nanosa – Dunav kod Novog Sada
Figure 5. Calibration of the sediment transport model, Danube river at Novi Sad



Slika 6. Kalibracija modela transporta nanosa – Dunav kod Smedereva
Figure 6. Calibration of the sediment transport model – Danube river at Smederevo



Slika 7. Kalibracija modela transporta nanosa – Dunav kod HE Đerdap 1
Figure 7. Calibration of the sediment transport model – Danube river at HE Đerdap 1

Analizom rezultata u preseku kod Novog Sada, slika 5 levo, može da se primeti veliko odstupanje između merenih i računatih koncentracija suspendovanog nanosa u periodu od oko trećeg do šestog meseca (interval od 90 do 180 dana). Generalno bi se na osnovu izrazitih odstupanja došlo do zaključka da model nije dobro kalibrisan u kom slučaju se postavlja pitanje kako je moguće slaganje rezultata u prva tri meseca i u periodu od devetog meseca do kraja modelisanog perioda. Primećena pojava može bolje da se razume ako se rezultati iz Novog Sada uporede sa rezultatima u drugim kontrolnim presecima, na primer u mernom preseku kod Smedereva, slika 6 levo, gde se takođe primećuje odstupanje između merenih i računatih vrednosti. Pored odstupanja, u ovim presecima se uočava i nedostatak merenja ovom periodu. Ako se pored rezultata proračuna suspendovanog nanosa istovremeno posmatraju i rezultati hidraulikog proračuna u istim presecima, slike 5, 6 i 7 desno prikazuju hidrograme u istim presecima, primećuje se da se ovi vremenski intervali poklapaju sa periodima nailaska talasa. Analizom rezultata pre i posle talasa se primećuje da je slaganje merenih i računatih vrednosti koncentracija suspendovanog nanosa odgovarajuća tako da se dolazi do zaključka da je primećeno odstupanje posledica nedostajućih merenja nastalih zbog poplavnog talasa.

4 Završna razmatranja

U radu je prikazan kratak pregled razvijenog linijskog modela tečenja u mreži otvorenih tokova i transporta nanosa sa naglaskom na procesu kalibracije dela modela transporta nanosa. Pošto je preduslov za rad modela transporta funkcionisanje hidrauličkog proračuna, u rad je uključen i kratak osvrt na kalibraciju hidrauličkog dela modela. Za oblast modelisanja je usvojena deonica Dunava u Srbiji sa glavnim pritokama Tisom, Savom i Velikom Moravom. Cilj rada je prikaz procesa kalibracije linijskom modela transporta nanosa za mrežu otvorenih tokova sa osvrtom na prepreke koje se u ovom postupku javljaju. Konačno, analizom dobijenih rezultata kalibracije je zaključeno da je kalibracija razvijenog modela odgovarajuća i da bi sledeći logičan korak bio njegova verifikacija puštanjem dugoročne simulacije.

5 Zahvalnica

Sprovođenje ovog rada je omogućeno u okviru projekta „Merenje i modeliranje fizičkih, hemijskih, bioloških i morfodinamičkih parametara reka i vodnih akumulacija“, broj projekta TP 37009, koji je finansiran od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Literatura

1. Damjanović V., Babić Mladenović M., Knežević Z., Tasić D., Mitrović M., Stokić D., Kostić M., Ljumović Đ, Dišlieski A. i Matović N., (2009), *Program III: Osmatranja, merenja i analiza uticaja uspora Dunava na priobalje izazvanih izgradnjom i radom HE Đerdap 1. Režim nanosa*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ A. D. Beograd, R.J. Zavod za uređenje vodnih tokova, Izveštaj za 2008. godinu.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

2. Damjanović V., Babić Mladenović M., Knežević Z., Ljumović Đ., Kostić M., Ljumović Đ, Dišlieski A. i Matović N., (2010), *Program III: Osmatranja, merenja i analiza uticaja uspora Dunava na priobalje izazvanih izgradnjom i radom HE Đerdap 1. Režim nanosa*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ A. D. Beograd, R.J. Zavod za uređenje vodnih tokova, Izveštaj za 2009. godinu.
3. Damjanović V., Babić Mladenović M., Tasić D., Mitrović M., Kostić M., Ljumović Đ, Dišlieski A. i Matović N., (2011), *Program III: Osmatranja, merenja i analiza uticaja uspora Dunava na priobalje izazvanog eksploatacijom HE Đerdap 1. Režim nanosa*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ A. D. Beograd, R.J. Zavod za uređenje vodnih tokova, Izveštaj za 2010. godinu.
4. Damjanović V., Babić Mladenović M., Knežević Z., Ljumović Đ, Mitrović M., Kostić M., Dišlieski A. i Matović N., (2009), *Program III: Osmatranja, merenja i analiza uticaja uspora Dunava na priobalje izazvanog eksploatacijom HE Đerdap 1. Režim nanosa*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ A. D. Beograd, R.J. Zavod za uređenje vodnih tokova, Izveštaj za 2011. godinu.
5. Holly F. M. and Rahuel J. L., (1990), *New numerical/physical framework for mobile-bed modelling, Part 1: Numerical and physical principles*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, No. 5, pp.401-416.
6. Isić M., (2014), *Linijski model interakcije vode i nanosa u mreži prirodnih vodotoka*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica.
7. Isić M., (2014), *Development of a 1-D flow model for a looped river network*, Zbornik radova Građevinskog fakulteta, Specijalno izdanje, Međunarodna konferencija „Savremena dostignuća u građevinarstvu“, 24. i 25. april 2014, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica.
8. Wu W., (2008), *Computational River Dynamics*, Taylor & Francis Group, London.

Prikaz i analiza rezultata merenja erozije u laboratorijskim uslovima

Ognjen Gabrić¹
Jasna Plavšić²

APSTRAKT: Erozijski proces predstavlja dvofazni proces koji se sastoji od odvajanja čestica zemlje iz osnovne mase i njihovog transporta energijom vode ili vetra. Istraživanje procesa erozije počelo je u SAD, međutim, s obzirom na kompleksnost procesa, ovaj proces do danas nije u potpunosti razjašnjen. U cilju utvrđivanja veze između erozije, dužine i nagiba slivne površine, i intenziteta kiše izrađena je laboratorijska instalacija sa simulatorom kiše na kojoj su vršena istraživanja. Prikazani su rezultati erozije sa slivova dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara, širine 0.5 metara, pri nagibima od 4, 7 i 10% i intenzitetima kiše od 2.0, 2.2, 2.4, 2.8 i 3.1 mm/min. Disperzija rezultata merenja je prikazana određivanjem merne nesigurnosti, sproveden je Kruskal-Wallis-ov test homogenosti rezultata sa različitih slivnih površina a regresionom analizom utvrđena je veza analiziranih parametara. Regresija ukazuje na linearnu vezu erozije, dužine i nagiba slivne površine i intenziteta kiše.

Ključne reči: erozija, laboratorijsko ispitivanje simulator

Overview and analysis of the results of the erosion measurements in laboratory conditions

ABSTRACT: Erosion is a two-phase process consisting of detachment of soil particles and their transport by energy of water or wind. Studying of erosion process began in USA by agro-technology engineers in the early twentieth century, however, given the complexity of the process, it has not been fully investigated. In order to establish relationship between erosion, slope length, slope inclination and the rainfall intensity, laboratory installation with a rainfall simulator was built. Erosion results, from slope lengths of 1.5, 2.5, 3.5 and 4.5 meters, width of 0.5 meters, with inclinations of 4, 7 and 10% and the rainfall intensity of 2.0, 2.2, 2.4, 2.8 and 3.1 mm/min, are shown in this paper. The dispersion of the measurement results is shown by determining measurement uncertainty, Kruskal-Wallis's test was conducted to investigate homogeneity of results from different plots and regression analysis was used to determine relationship between analysed parameters. Regression indicates linear relationship of erosion, slope length, slope inclination and the rainfall intensity.

Key words: erosion, laboratory, rainfall simulator

¹ Dr Ognjen Gabrić, docent, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, 24000 Subotica ogabric@gf.uns.ac.rs

² Dr Jasna Plavšić, v.prof., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, jplavsic@grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Proces erozije tla na slivu počinje u trenutku kada kišne kapi svojom udarnom energijom razdvoje čestice tla stvarajući na površini terena male kratere koji se ruše pod dejstvom površinskog oticaja. Erođovani materijal se dalje transportuje do otvorenog toka ili se taloži na slivu. Pored padavina, erozija tla sa sliva zavisi od kompleksne veze između topografije terena, geološkog/pedološkog sastava tla, klime, vegetacije, načina upotrebe zemljišta i ljudskih aktivnosti na slivu.

Iz dostupne literature može se zaključiti da postoje različiti načini u pristupu izučavanja problema vezanih za eroziju. Pojedini autori su fokusirani isključivo na eroziju kišom ([7], [8]), drugi analiziraju eroziju pod uticajem površinskog toka bez apliciranja padavina ([13], [17]), dok je najveći broj onih koji pokušavaju da utvrde eroziju usled kombinovanog dejstva padavina i površinskog oticaja [3], [4], [18], [7], [12], [14], [5], [10], [2], [1], [6], [8]. Sve ovo uslovalo je izradu laboratorijskih instalacija i terenskih instalacija namenjenih za upotrebu u prirodi koji u značajnoj meri odstupaju jedni od drugih, ne samo po nameni već i po dimenzijama.

Iz gore navedenih radova se uočava da se veličine instalacija za izučavanje ovog procesa kreću od izuzetno malih, veličine 30.5x30.5 cm [3], pa sve do instalacija veličine 9x1 m [13], nagibi instalacija kreću se u rasponu od 0.1% [12] do 100% [8], a intenziteti kiše od 1.3 mm/h [5] do 320 mm/h [11].

Sva ispitivanja iz literature sprovedena su na zemljištima različitog granulometrijskog sastava i teksture. Najzastupljenija su istraživanja erozije na glinovitom zemljištu [13], [1], [12], [6] i praškastoj ilovači [15], [13], [17], [3], a istraživanja su sprovedena i na praškasto glinovitoj ilovači [3], [12], glinovitoj ilovači [18], [5], [6], peskovito glinovitoj ilovači [7], ilovači [12], [8], peskovitoj ilovači [6], [18], [3], ilovastom pesku [2] i pesku [1], [12].

Od dostupnih radova, uticaj različitih dužina slivne površine na eroziju izučavan je u jednom slučaju [5] – sa glinovite ilovače. Rezultati ukazuju na postojanje zavisnosti između dužine slivne površine i erozije bez navođenja vrste veze.

Za nepeskovita zemljišta veza između nagiba slivne površine i erozije se pokazala kao eksponencijalna u nekim istraživanjima [18], [17], odnosno kao linearna u drugim istraživanjima [7], [6]. U nekim slučajevima [2], pri manjim intenzitetima kiše, erozija je u linearnoj vezi sa nagibom, dok je pri većim intenzitetima kiše veza eksponencijalna. Za peskovita zemljišta vrsta veze nije definisana (za dužinu instalacije od 5 metara) odnosno ne postoji (za dužine od 0.81 i 1 metar) [5], [1].

Većina dostupne literature upućuje na to da je veza između erozije i intenziteta kiše linearna [12], [18], [5], [2], dok manji broj [2] upućuje i na eksponencijalnu vezu.

Cilj ovog rada je da se prikažu rezultati laboratorijskog utvrđivanja veze između erozije i dužine slivne površine, nagiba i intenziteta kiše na peskovitom zemljištu koje je sprovedeno na eksperimentalnoj instalaciji pri Građevinskom fakultetu u Subotici.

2 Metode istraživanja

2.1 Opis instalacije

Eksperimentalna instalacija sastoji se iz:

- slivne površine sa podesivim nagibom kosine i
- simulatora kiše sa mlaznicama pod pritiskom.

Slivna površina izrađena je u ukupnoj dužini od 6 metara, širine 1 metar i izdvojena je na četiri nezavisna dela. Svaki od četiri dela predstavlja kutiju za smeštaj zemljišta. Dužine kutija su 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 m, širina svake kutije iznosi 0.5 m a dubina 7 cm. Na kraju svake kutije nalazi se slivnik za prikupljanje erodovanog zemljišta i površinskog oticaja. Dno slivne površine je izrađeno od čeličnih cevi kvadratnog preseka i limova. Cevi su perforirane i služe za dovod vode kojom se zemljište natapa pre izvođenja opita i za drenažu tokom opita.

Podešavanje nagiba slivne površine omogućeno je pomoću obrtnog mehanizma koji se nalazi na nizvodnom kraju instalacije i dizalice koja se nalazila na uzvodnom kraju. Na ovaj način omogućeno je izvođenje opita u rasponu nagiba od 0° do 45° (0% - 100%).

Simulator koristi šest mlaznica VeeJet 80100 koje su postavljene na horizontalnu cev prečnika 50 mm i dužine 6 m [9].

Pre svakog opita zemljište u suvom stanju je unošeno u tekstilom obložene kutije na slivnoj površini i sabijano. Uloga tekstila je bila da spreči unošenje frakcija peska kroz perforacije na dnu. Zemljište je zatim lagano natapano vodom do potpunog zasićenja. Nakon 24 časa sledilo je dreniranje vode iz zemljišta i apliciranje simulirane kiše, tako da se smatra da su prethodni uslovi vlažnosti zemljišta bili isti u svim eksperimentima.

Za ispitivanje erozije korišćeno je pet intenziteta kiše (2.0 mm/min, 2.2 mm/min, 2.4 mm/min, 2.8 mm/min i 3.1 mm/min) trajanja 15 minuta i tri nagiba slivne površine (4%, 7% i 10%). Uzorkovanje vode i spranog nanosa sa slivne površine vršilo se plastičnim posudama zapremine 20 l postavljenim na izlivu svake table. Na svaka 3 minuta posuda ispod izliva je zamenjivana kako bi se odredio prosečan oticaj i erozija u pet vremenskih intervala. Na taj način se, za svaku kombinaciju kiše i nagiba, sa svake slivne površine sakupi suspenzija vode i nanosa u pet posuda (ukupno 20 posuda tokom jednog opita). Svaka kombinacija intenziteta i nagiba ponovljena je pet puta. Izvršeno je ukupno 75 opita. Nakon opita izmerena je zapremina suspenzije u svakoj posudi tačnošću od 0.25 litara, a nakon 24 časa taloženja suspenzije izvršeno je odlivanje viška vode i sušenje erodovanog zemljišta na 105°C do konstantne težine. Težina erodovanog materijala određivana je vagom tačnosti 1 gram.

2.2 Merna nesigurnost

Erozija je određivana direktnim merenjem težine spranog peska sa svake slivne površine u vremenskim intervalima od tri minuta. Statističkom obradom rezultata merenja određena je proširena standardna nesigurnost tipa A [19]. Ukoliko se raspolaže sa više ponovljenih merenja, može se sračunati srednja vrednost uzorka x_s kao:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

gde su x_i vrednosti pojedinih rezultata merenja a n broj merenja.

Standardno odstupanje pojedinih elemenata, koje je u stvari jednako standardnoj nesigurnosti u_A pojedinih rezultata merenja računa se kao:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n-1}} \quad (2)$$

Standardno odstupanje srednje vrednosti merenja, odnosno standardna nesigurnost srednje vrednosti u_{Ax_s} iznosi:

$$u_{Ax_s} = \frac{u_A}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

gde je u_A standardna nesigurnost rezultata merenja.

Iz jednačine (3) se vidi da se, ponavljanjem merenja i računanjem srednje vrednosti, merna nesigurnost nastala slučajnim odstupanjem može smanjiti za faktor $1/\sqrt{n}$.

Kombinovana merna nesigurnost se koristi u slučajevima kada su merenja izvršena jednom, ali na sigurnost utiče više merenih veličina, odnosno kada se rezultat dobija indirektno. Merna nesigurnost veličine y , u_y , se računa kao:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \right]} \quad (4)$$

Proširena merna nesigurnost, U , predstavlja umnožak standardne merne nesigurnosti, u , i koeficijenta proširenja K :

$$U = K \cdot u \quad (5)$$

Koeficijent proširenja K ima vrednost u intervalu 1.732 do 3, u zavisnosti od raspodele. Ovim koeficijentom definiše se širina intervala poverenja za merene vrednosti. Proširenoj mernoj nesigurnosti odgovara visoka vrednost statističke sigurnosti, npr. 99%. To znači da se merena veličina sa tom verovatnoćom nalazi u intervalu $x_s \pm U$.

2.3 Test homogenosti

Radi utvrđivanja uticaja razmatranih dužina slivnih površina na eroziju, na količine spranog peska sa svake table primenjen je test homogenosti. Za ispitivanje homogenosti korišćen je Kruskal-Wallis test varijansi više grupa podataka [16]. Nulta hipoteza testa (H_0) je da k grupa podataka pripada istoj populaciji sa različitim medijanama. S obzirom da je test neparametarski, pripadnost normalnoj ili nekoj drugoj raspodeli grupa podataka nije uslov.

Kontrolna statistika testa je data izrazom:

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \left[\frac{(\sum R_j)^2}{n_j} \right] - 3(N+1) \quad (6)$$

gde je K statistika testa, N ukupan broj podataka u svim grupama, R_j rang podatka u grupi, n_j broj podataka u grupi.

Za svaki intenzitet kiše i nagib, mereni podaci su poređani u grupe po dužinama slivnih površina. Određena je kritična vrednost statistike za prag značajnosti 5%, rang svakog podatka i sračunata je statistika testa.

2.4 Regresiona analiza

Međusobna zavisnost erozije i dužine slivnih površina, nagiba i intenziteta kiše određena je linearnom regresionom analizom. Razmatrani su modeli jednostruke linearne regresije u kojima erozija zavisi od nagiba slivne površine i od intenziteta kiše, kao i model višestruke linearne regresije u kome erozija zavisi od obe pomenute veličine.

3 Rezultati

3.1. Merna nesigurnost

Standardne merne nesigurnosti u , odnosno proširene merne nesigurnosti U za svaki intenzitet kiše, prikazane su u tabeli 1. Za koeficijent proširenja K , usvojena je vrednost 2.132 na osnovu Studentove raspodele za četiri stepena slobode i prag poverenja 95% (tj. prag značajnosti 5%).

Erozija je određivana direktnim merenjem težine spranog peska sa svake slivne površine u vremenskim intervalima od tri minuta. Statističkom obradom rezultata merenja određena je proširena standardna nesigurnost tipa A. Rezultati su prikazani u tabeli 2 za svaki nagib, intenzitet kiše i dužinu slivne površine.

Tabela 1. Merna nesigurnost intenziteta kiše
 Table 1. Measuring uncertainty of rainfall intensity

	3.1 (mm/min)	2.8 (mm/min)	2.4 (mm/min)	2.2 (mm/min)	2.0 (mm/min)
u_i (g)	±0.035	±0.039	±0.045	±0.040	±0.037
U (g)	±0.074	±0.083	±0.095	±0.086	±0.078

3.2 Test homogenosti

Pomoću χ^2 raspodele, za prag značajnosti $\alpha=0.05$ i tri stepena slobode određena je kritična vrednost statistike K_{krit} i ona iznosi 7.81. U slučajevima kada je vrednost statistike K manja od kritične vrednosti statistike K_{krit} , usvaja se nulta hipoteza (H_0) o pripadnosti podataka istoj populaciji. U suprotnom, nulta pretpostavka se odbacuje.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Merna nesigurnost erozije za nagibe od 10, 7 i 4%
Table 2. Measuring uncertainty of erosion for 10, 7 and 4% slopes

10%					
	i=3.1 (mm/min)	i=2.80 (mm/min)	i=2.40 (mm/min)	i=2.20 (mm/min)	i=2.00 (mm/min)
L=2.5 m	508 ± 27.52 g	358 ± 15.24 g	224 ± 19.63 g	189 ± 21.66 g	168 ± 33.14 g
L=3.5 m	711 ± 34.46 g	482 ± 18.57 g	331 ± 16.33 g	282 ± 8.88 g	267 ± 18.88 g
L=4.5 m	903 ± 26.01 g	636 ± 27.18 g	389 ± 26.71 g	326 ± 19.07 g	306 ± 27.36 g
L=1.5 m	295 ± 14.86 g	224 ± 11.78 g	146 ± 13.99 g	124 ± 10.54 g	116 ± 27.52 g
7%					
	i=3.1 (mm/min)	i=2.80 (mm/min)	i=2.40 (mm/min)	i=2.20 (mm/min)	i=2.00 (mm/min)
L=2.5 m	149 ± 11.42 g	134 ± 13.16 g	97 ± 11.16 g	90 ± 11.44 g	87 ± 10.44 g
L=3.5 m	208 ± 25.01 g	189 ± 12.18 g	142 ± 10.50 g	140 ± 12.92 g	136 ± 18.32 g
L=4.5 m	267 ± 16.85 g	251 ± 22.60 g	173 ± 14.86 g	159 ± 13.88 g	155 ± 20.09 g
L=1.5 m	84 ± 11.68 g	76 ± 8.62 g	63 ± 8.82 g	61 ± 7.90 g	56 ± 8.24 g
4%					
	i=3.1 (mm/min)	i=2.80 (mm/min)	i=2.40 (mm/min)	i=2.20 (mm/min)	i=2.00 (mm/min)
L=2.5 m	101 ± 9.76 g	88 ± 9.04 g	72 ± 9.39 g	71 ± 9.72 g	55 ± 6.68 g
L=3.5 m	120 ± 12.41 g	125 ± 9.55 g	91 ± 9.18 g	91 ± 9.10 g	83 ± 8.75 g
L=4.5 m	158 ± 17.81 g	159 ± 12.08 g	116 ± 8.90 g	115 ± 8.52 g	88 ± 8.22 g
L=1.5 m	59 ± 8.62 g	60 ± 9.41 g	37 ± 3.91 g	43 ± 8.16 g	35 ± 4.63 g

Za sve analizirane slučajeve statistike K su manje od K_{krit} i kreću se u granicama 0.4 – 7.62 odnosno usvaja se nulta hipoteza o pripadnosti svih grupa podataka istoj populaciji. Ovaj rezultat ukazuje da je produkcija nanosa sa površina različite dužine konstanta tj. da je veza između dužine slivne površine i erozije linearna.

3.3 Regresiona analiza

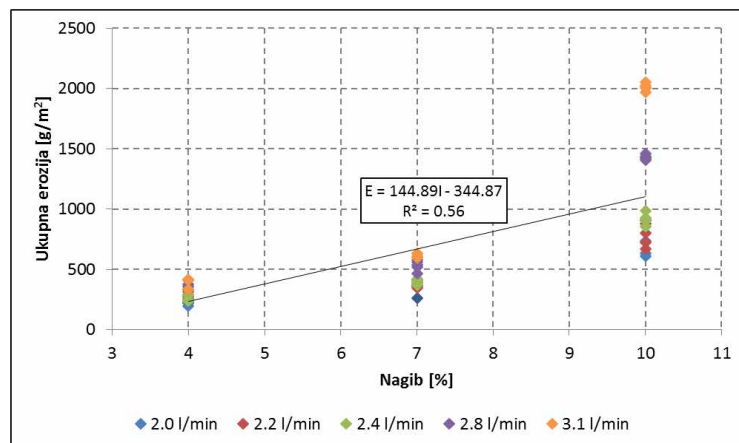
Zavisnost erozije i nagiba slivne površine po jedinici površine prikazana je na slici 1.

Regresionom analizom je dobijena jednačina za proračun erozije u zavisnosti od nagiba slivne površine. U ovom slučaju pretpostavka je da intenzitet kiše ne utiče na eroziju. Jednačina glasi:

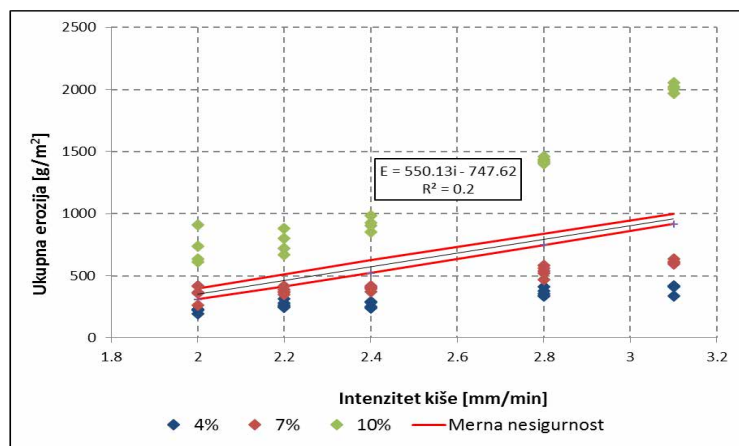
$$E = 144.89I - 344.87 \quad (7)$$

gde je E ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m^2], I nagib slivne površine [%]. U ovoj regresiji koeficijent determinacije R^2 iznosi 0.56.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Ukupna erozija sa slivnih površina pod nagibom 4, 7 i 10%
Figure 1. Total erosion from 4, 7 and 10% slopes



Slika 2. Ukupna erozija od kiša intenziteta 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 i 2.0 mm/min
Figure 2. Total erosion from 3.1, 2.8, 2.4, 2.2 and 2.0 mm/min intensity rainfalls

Na slici 2 prikazana je kumulativna erozija, izražena po m^2 površine, sa sliva površine $6 m^2$ pri intenzitetima kiše 2.0, 2.2, 2.4, 2.8 i 3.1 mm/min pri nagibima od 4, 7 i 10%.

Regresionom analizom je dobijena jednačina za proračun erozije u zavisnosti od intenziteta kiše:

$$E = 550.13(i \pm U) - 747.62 \quad (8)$$

gde je E ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m^2], i intenzitet kiše [mm/min], U proširena merna nesigurnost [mm/min]. U ovom slučaju koeficijent determinacije iznosi svega 0.2.

Na rezultate ukupne erozije nakon kiše trajanja 15 minuta sprovedena je višestruka regresiona analiza koja obuhvata uticaj nagiba slivne površine i intenziteta kiše. Regresionom analizom dobijena je sledeća veza:

$$E = 156.61I + 437.726(i \pm U) - 1516.82 \quad (9)$$

gde je E ukupna erozija usled kiše trajanja 15 minuta [g/m^2], I nagib slivne površine [%], i intenzitet kiše [mm/min] i U proširena merna nesigurnost [mm/min].

Za ovaj slučaj koeficijent determinacije, R^2 , iznosi 0.74, što je veće nego u oba slučaja jednostruke regresije. To pokazuje da obe nezavisne promenljive (nagib slivne površine i intenzitet kiše) doprinose objašnjavanju varijacija zavisne promenljive, odnosno erozije.

4 Diskusija i zaključci

Eksperimentalne površine za izučavanje erozije u ovom radu kreću se u opsegu od 0.75-2.25 m^2 , odnosno one su dužine 1.5-4.5 metara a širine 0.5 m.

Eroziju sa ovakvog tipa zemljišta su izučavali Liu [12] i Asadi [1], dok je najveći broj autora ispitivao zemljišta sa primesama gline.

Uticao dužine slivne površine na eroziju u ovom radu je istraživano na instalaciji dužine 1.5, 2.5, 3.5 i 4.5 metara. Ove dužine su u opsegu dužina instalacija na kojima se izučavala erozija sa peskovitog zemljišta. Rezultati ovog rada su potvrdili zaključak da između erozije i dužine slivne površine postoji veza uz dodatak da je ona linearna.

Eksperimenti u ovom radu sprovedeni su pri nagibima slivnih površina od 4, 7 i 10%. Navedeni nagibi su veći od izučavanih nagiba za peskovita zemljišta ali su u opsegu nagiba pri kojima su vršena ostala istraživanja. Rezultati ovog rada potvrdili su da linearna veza najbolje prikazuje odnos između nagiba slivne površine i erozije. Primetno je veće rasipanje rezultata merenja pri nagibima od 10%.

Intenziteti kiše u ovom radu variraju od 2.0 – 3.1 mm/min i oni su uglavnom veći od intenziteta navedenih u literaturi. Merenja u ovom radu su potvrdila linearnu vezu erozije i intenziteta kiše, ali model jednostruke linearne regresije nije mogao da da dobre rezultate za objedinjene podatke za sve nagibe slivnih površina.

Model višestruke regresije u kome erozija zavisi i od nagiba površine i od intenziteta kiše daje najveći koeficijent determinacije R^2 , što ukazuje na opravdanost ispitivanja erozije variranjem dužine instalacije, nagiba instalacije i intenziteta kiše.

Međusobnim poređenjem rezultata, prikazanih po jedinici površine (g/m^2) i sprovođenjem testa homogenosti utvrđeno je da su rezultati homogeni, odnosno da je za analizirane intenzitete kiše, nagibe i dužine slivnih površina produkcija nanosa konstantna. U dostupnoj literaturi nisu pronađene slične analize.

Zahvalnost

Rezultati istraživanja prezentovani u ovom radu su dobijeni u okviru naučnog projekta broj TR 37010 "Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture" koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Literatura

1. Asadi H, Ghadiri H, Rose CW, Rouhipour H. (2007), *Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes*. Earth Surf. Process. Landf, 32(5):711–724.
2. Assouline S, Ben-Hur M. (2006), *Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing*. CATENA, 66(3):211–220.
3. Bryan RB. (1974), *Water Erosion by Splash and Wash and the Erodibility of Albertan Soils*. Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr. 56(3/4):159.
4. Bryan RB, Luk S-H. (1981) *Laboratory experiments on the variation of soil erosion under simulated rainfall*. Geoderma, 26(4):245–265.
5. Chaplot VA, Le Bissonnais Y. (2003), *Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope*. Soil Sci. Soc. Am. J, 67(3):844–851.
6. Ekwue EI, Harrilal A. (2010), *Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils*. Biosyst. Eng., 105(1):112–118.
7. Fox DM, Bryan RB. (1999), *The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient*. Catena, 38(3):211–222.
8. Fu S, Liu B, Liu H, Xu L. (2011), *The effect of slope on interrill erosion at short slopes*. CATENA, 84(1-2):29–34.
9. Gabrić O, Plavšić J, Prodanović D. (2012.), *Izrada i provera performansi simulatora kiše 16. naučno savetovanje Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH)*. Donji Milanovac: Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
10. Gómez JA, Nearing MA. (2005), *Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment*. CATENA, 59(3):253–266.
11. Hall MJ, Johnston PM, Wheeler HS. (1989), *Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data I. An apparatus for laboratory catchment studies*. Hydrol. Sci. J, 34(3):277–288.
12. Liu H. (1999) *Bare soil erosion dependence on soil and rainfall properties* [Internet]. Available from: http://cleveland2.ce.ttu.edu/publications/thesis/huliu_dissertation/huliu_dissertation.pdf
13. Nearing MA, Bradford JM, Parker SC. (1991) *Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes*. Soil Sci. Soc. Am. J. 55(2):339.
14. Römkens MJM, Helming K, Prasad SN. (2002) *Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes*. CATENA, 46(2–3):103–123.
15. Römkens MJM, Prasad SN, Rao SM. (2005) *Sediment transport research in shallow overland flow—a phenomenological description* US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydrosience & Engineering. p. 2–5.
16. Sheskin D. (2004) *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC,
17. Zhang GH, Liu BY, Nearing MA, Huang CH, Zhang KL. (2002) *Technical note: Soil detachment by shallow flow*. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. ASAE, 45(2):351–357.
18. Zhang XC, Nearing MA, Norton LD, Miller WP, West LT. (1998) *Modeling Interrill Sediment Delivery*. Soil Sci. Soc. Am. J, 62(2):438.
19. Expression of the Uncertainty of Measurements in Calibration. 1999

Merenje hidrauličkih veličina u dvofaznom fluidu

Predrag Vojt¹
Budo Zindović²
Dušan Prodanović³

APSTRAKT: U hidrotehničkoj praksi često se srećemo sa tečenjem mešavine vode i vazduha, koje nastaje kada tok sa slobodnom površinom usled velike brzine i izražene turbulencije uvlači vazduh koji se meša sa vodom. Tečenje mešavine vazduha i vode se po pravilu javlja na brzotocima. U ovom radu su prikazani rezultati sa hidrauličkih modelskih ispitivanja stepenastog brzotoka. U praksi se često za ove tipove brzotoka vezuje dubina pri 90% koncentracije vazduha u vodi, što praktično znači da se koncentracija vazduha mora meriti. Takođe kako bi opisali pojavu kretanja dvofaznog fluida moramo meriti i njegovu brzinu. U radu su opisane moguće metode ovih merenja i njihova primena. Dobijeno je dobro slaganje protoka izmerenog na uzvodnom kraju modela standardnim postupkom sa protokom izračunatim pomoću rasporeda brzine mešavine i koncentracije vazduha. Pokazano je i da je senzor koncentracije vazduha i brzine vode osetljiv na promenu pravca vektora brzine fluidne struje.

Ključne reči: hidraulika, stepenasti brzotok, mešavina vode i vazduha, merenje brzine, merenje koncentracije vazduha

Measurements in two-phase flows

ABSTRACT: In hydraulic engineering, the flow of air-water mixture is common. This type of flows develop due to inception of air-entrainment in the high velocity free-surface flows and is usually associated with the spillway chutes. This paper presents the two-phase flow measurement for a scale model of stepped spillway. In practice, these types of spillways are associated with the depth corresponding to the concentration of 90% of the air in the water. This means that the measurement of air concentration is required. Furthermore, to describe the occurrence of two-phase flow, we must measure the fluid velocity as well. Measurement methods for two-phase flows were presented in the paper. Good agreement for the flow-rate measurement was obtained between the standard methods and the flow-rate computed from two-phase flow field measurement. It was also shown that the sensor used in the study detected changes in the direction of the velocity vector.

Keywords: hydraulics, stepped spillway, air-water flow, velocity measurement, air-concentration measurement

¹ Predrag Vojt, dipl. građ. inž., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Pinosava-Beograd, predrag.vojt@jcerni.co.rs

² Budo Zindović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Prof. dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, dprodanovic@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

U praksi, često se javlja strujanje mešavine vode i vazduha. Ova pojava se po pravilu javlja na brzotocima. U ovom radu biće prikazani rezultati merenja sa hidrauličkih modelskih ispitivanja stepenastog brzotoka sa suženjem. Sva merenja hidrauličkih veličina u ovom radu obavljena su sa senzorom na bazi elektroprovodnosti ali se daje i osvrt na druge metode i njihova ograničenja.

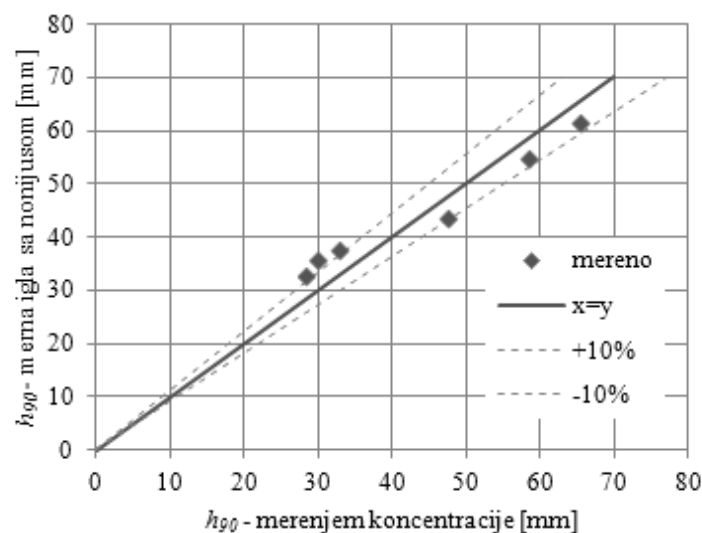
2 Merenje hidrauličkih veličina

Hidrauličke veličine obrađene u ovom radu su: dubine, koncentracije vazduha u vodi, brzine mešavine vazduha i vode kao i njenog pravca. Merenja su obavljena sa senzorom kojim se registruje promena elektroprovodnosti sačinjenog od tri elektrode postavljene u trougaonu strukturu (Slika 2).

2.1 Merenje dubina

Za merenje nivoa vode i nivoa mešavine vode i vazduha korišćene su merne igle sa nonijusom. Zbog velikog nagiba brzotoka sve dubine su merene upravno na strujnice, od fiktivnog dna određenog „vrhovima” stepenika stepenastog brzotoka. U praksi se često za ove tipove brzotoka vezuje dubina, h_{90} , pri 90% koncentracije vazduha u vodi. Dubina h_{90} dobro je procenjena merenjem mernom iglom sa nonijusom, što se može pokazati poređenjem sa dubinom određenom pomoću izmerenog rasporeda koncentracije (slika 1.).

Dubine mešavine vode i vazduha merene su u nekoliko profila duž brzotoka, a u svakom od profila u nekoliko tačaka po širini profila, što je prikazano u nastavku (slika 3).



Slika 1. Poređenje dubina h_{90} izmerenih iglom sa nonijusom i pomoću rasporeda koncentracija [5].

Figure 1. Comparison of depths h_{90} measured with pointer gauge and computed from air-concentration profile [5].

2.2 Merenje koncentracije vazduha u vodi

Koncentracija vazduha u vodi, C , menja se i po dubini i duž toka, i zato je neophodno primeniti metodu kojom se meri u tački, odnosno, u relativno maloj reprezentativnoj zapremini. Metode za merenje mogu biti optičke i na bazi elektroprovodnosti. Optičke metode koriste razliku u indeksu prelamanja svetlosti vode i vazduha. Metode na bazi elektroprovodnosti koriste razliku u elektroprovodnosti između fluida (provodnost vode je oko hiljadu puta veća od elektroprovodnosti vazduha [3]). Obe metode često se koriste u ispitivanjima stepenastih brzotoka [2].

Pri merenju koncentracije vazduha u vodi koristi se električni otpor, P , koji je obrnuto proporcionalan elektroprovodnosti. Usvaja se da je u vodi $P = 0\%$, a u vazduhu $P = 100\%$. Mešavina vode i vazduha, kod koje je $P = 35\%$, smatra se vazduhom. Granica od 35% preuzeta je iz ispitivanja kretanja dvofaznih fluida, u nuklearnim postrojenjima [4]. Uzorkovanje se sprovodi sa učestanošću od 20 KHz, a vremenski interval merenja je $T = 30$ s. Vremenski osrednjena koncentracija vazduha u vodi, može se proračinati prema sledećem izrazu:

$$C = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \quad (1)$$

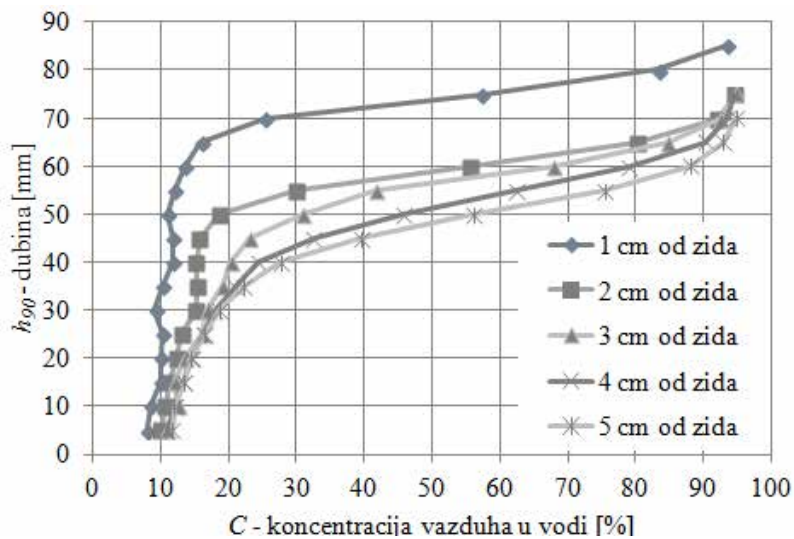
Na Slici 2 prikazan je originalan senzor za merenje elektroprovodnosti sa tri elektrode, koji je korišćen u ispitivanjima [5]. Elektroprovodnost se meri između zajedničke mase senzora i svake elektrode posebno, pa se prvo primeni jednačina (1), a zatim se tri dobijene vrednosti osrednjavaju i tako dobija vrednost u tački. Senzor se postavlja na nosač, kao u slučaju merne igle pri merenju nivoa mešavine. Položaj merne tačke, po dubini, određuje se nonijusom, sa tačnošću $\pm 0,1$ mm.



Slika 2. Senzor za merenje elektroprovodnosti, sa tri elektrode [5].

Figure 2. The sensor for measuring the electric conductivity, with three electrodes [5].

Na Slici 3 prikazane su koncentracije vazduha, zavisno od dubine, na rastojanju 1, 2, 3, 4 i 5 cm od zida, na nizvodnom kraju stepenastog brzotoka [5]. U vertikalama, koje su dalje od razdelnog zida, intenzitet mešanja vazduha i vode je veći, što se vidi po većim koncentracijama u dubljim delovima toka. Tako je pri dubini od 50 mm, koncentracija vazduha uz zid (na 1 cm od zida) $C = 11\%$ dok u najudaljenijoj vertikali (na 5 cm od zida) iznosi čak $C = 56\%$.



Slika 3. Raspored koncentracije vazduha po dubini i po širini u zoni zida [5].

Figure 3. Air concentration distribution in the wall region [5].

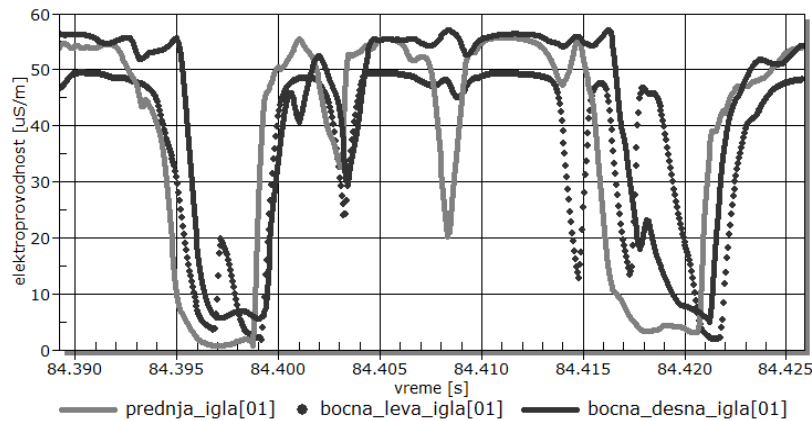
2.3 Merenje intenziteta brzine

Slično koncentracijama vazduha, i brzine se menjaju i po dubini i po širini i dužini toka pa je brzinu neophodno meriti u tački. U realnosti, svaka merna metoda brzinu meri, umesto u tački, u zapremini konačnih dimenzija: hidrometrijsko krilo ima prečnik elise oko 2,5 cm, LDA (laser dopler anemometar) ima mernu zapreminu prečnika 1 mm, ADV (ultrazvučni dopler anemometar) prečnika 3-5 mm, topli film (hot-film) prečnika 2-5 mm, Pitoova cev prečnika 1-5 mm. Kako bi merenje na modelu (pri dubinama oko par cm) bilo reprezentativno, dimenzije ovih zapremina moraju biti što manje u odnosu na karakterističnu dužinu fluidne struje (u slučaju modela otvorenih tokova je dubina vode/mešavine). Korišćena kroskorelaciona metoda sa senzorom za merenje elektroprovodnosti ima mernu zapreminu prečnika 2 mm, te je primenljiva u ovim uslovima. Sa druge strane, najčešće korišćeno hidrometrijsko krilo nije pogodno za merenje brzine na modelu stepenastog brzotoka jer je prečnik elise uporediv sa dubinom strujanja, a tariranje krila se sprovodi sa čistom vodom dok se meri u mešavini vode i vazduha koja ima manju gustinu [6]. Takođe, karakteristike mešavine vode i vazduha sa koncentracijom vazduha većom od 10% nisu pogodne ni za primenu metoda LDA, ADV, hot-film kao ni i Pitoove cevi [1].

Brzine mešavine vode i vazduha uspešno su u prikazanom radu merene metodom kroskorelacije koncentracije vazduha merenjem elektroprovodnosti. Mehurići vazduha igraju ulogu trasera, pa tako ne ometaju merenje kao kod drugih metoda, već su neophodan uslov za merenje brzina. Metoda za merenje brzine preko kroskorelacije elektroprovodnosti detaljno je opisana u [3].

Za merenje brzine mešavine vode i vazduha koristi se isti senzor kao i za merenje koncentracije vazduha preko elektroprovodnosti, prikazan na slici 2. Na primeru sa slike 4., prikazan je deo podataka prikupljen sa tri elektrode [5]. Pošto je jedna elektroda isturenija u pravcu toka u odnosu na druge dve, promene kroz vreme su slične, ali postoji vremensko kašnjenje, koje je potrebno da jedan mehurić pređe rastojanje od jedne do druge elektrode.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



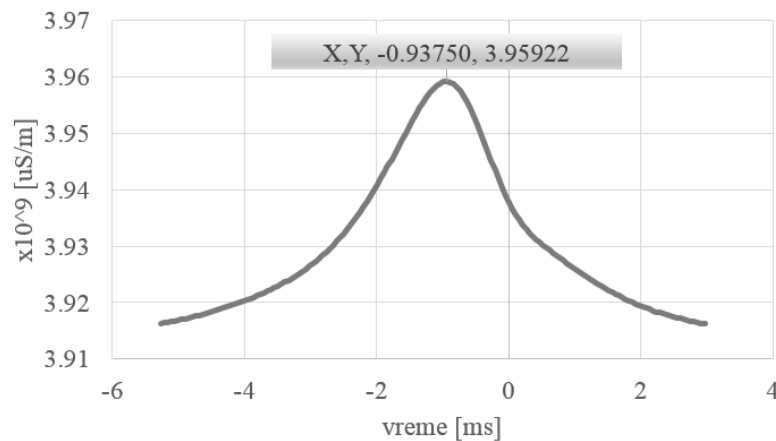
Slika 4. Promena elektroprovodnosti u vremenu za tri senzora [5].

Figure 4. Changes in electric conductivity over time, for the three probes [5].

Vremensko kašnjenje numerički se određuje kroskorelacijom podataka sa dve elektrode. Na slici 5. prikazana je kroskorelacija podataka, sa vremenom kašnjenja od $dt = 0.9375$ ms, što predstavlja vremensku razliku između najveće vrednosti kroskorelacije i koordinatnog početka. Za taj slučaj brzina strujanja mešavine vode i vazduha, v , odnosno brzina kretanja mehurića, je:

$$v = dL / dt = 3 \text{ mm} / 0,9375 \text{ ms} = 3,20 \text{ m/s} \quad (2)$$

gde je dL rastojanje između elektroda u pravcu toka.



Slika 5. Kroskorelacija elektroprovodnosti, za dve elektrode [5].

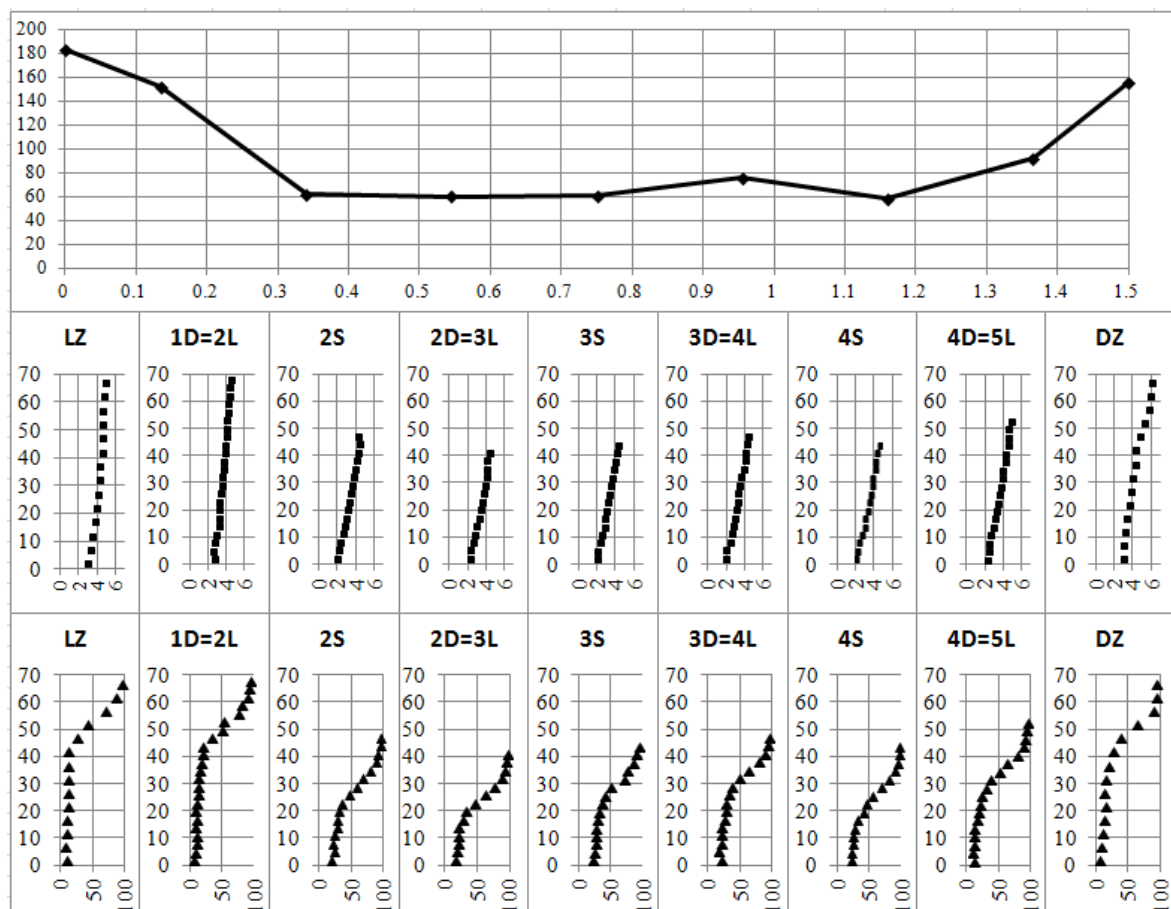
Figure 5. Electric conductivity cross-correlations for two probes [5].

Pravac izmerene komponente brzine jednak je pravcu ose senzora, jer se sensor postavlja paralelno sa strujnicama. Pošto se prikuplja veliki broj podataka, vremenska serija se deli na više delova i za svaki se računa odgovarajuća brzina v . Ovako izračunate brzine se osrednjavaju, ali se ne mogu koristiti za određivanje fluktuacija brzina, mada neki autori [7] koriste sličnu metodu za ocenu fluktuacije što nikako nije prava fluktuacija.

Tačnost izložene metode merenja brzine mešavine vode i vazduha se može proveriti poređenjem protoka dobijenih na dva načina. Porede se izmereni protok čiste vode na mernoj komori (na uzvodnom kraju modela) i protok na nizvodnom kraju stepenastog brzotoka (integriranjem izmerenog polja brzina mešavine i koncentracija vazduha, po poprečnom preseku).

Na Slici 6 prikazane su hidrauličke veličine na kraju stepenastog brzotoka brane Buzina [5]. Na gornjem dijagramu dat je raspored jediničnog protoka čiste vode, q , sa položajima mernih vertikala. Na dijagramima u sredini, po vertikalama su dati rasporedi brzina mešavine a na dijagramima dole, rasporedi koncentracija vazduha u vodi.

Protok vode u komori iznosio je 130 L/s. Izračunati protok na kraju stepenastog brzotoka iznosio je 129 L/s, a greška u merenju protoka iznosi $\varepsilon_Q = -0,8\%$.



Slika 6. Jedinični protok (gore), raspored brzine mešavine po dubini (sredina) i koncentracije vazduha po dubini (dole), na kraju stepenastog brzotoka [5].

Figure 6. Unit flow discharge (top row), flow velocity - depth distribution (mid-row) and air concentrations with regard to the depth (bottom row) at the end of the stepped spillway [5].

Može se zaključiti da je merenje brzine preko elektroprovodnosti pouzdana metoda. Takođe, može se uočiti da se usled sužavanja širine stepenastog brzotoka, u nizvodnom smeru, uz razdelne zidove povećavaju dubine i jedinični protok.

2.4 Merenje pravca brzine

Pošto se u merenju (prikazani su rezultati sa fizičkog modela u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu) koristio senzor sa tri elektrode iz izmerenih podataka je pokušano da se odredi i pravac vektora brzine. Ovaj pravac je sa korišćenim senzorom (slika 2) moguće meriti u malom opsegu uglovne zavisnosti. U opitu se senzor rotirao za zadati ugao pri konstantnoj brzini fluidne struje. Na osnovu izmerenih kroskorelacionih vremena računskim putem je određen ugao, a prikazana je i greška izmerenog ugla kao i transformisana brzina u pravcu toka (tabela 1).

Tabela 1. Rezultati opita osetljivosti senzora na promenu ugla.

Table 1. The results of the angle relation.

zadat ugao	vreme leve igle	brzina leve igle	vreme desne igle	brzina desne igle	vreme od leve do desne igle	izmeren ugao	greška izmernog ugla	brzina u pravcu toka
[°]	[ms]	[m/s]	[ms]	[m/s]	[ms]	[°]	[°]	[m/s]
-25	1.04	2.88	0.92	3.26	-0.36	-22.3	2.7	2.84
-20	1.04	2.88	0.97	3.09	-0.35	-20.7	-0.7	2.79
-15	1.04	2.88	1.01	2.98	-0.26	-15.3	-0.3	2.83
-10	1.04	2.88	1.04	2.88	-0.17	-10.0	0.0	2.84
-5	1.06	2.83	1.09	2.74	-0.10	-5.8	-0.8	2.77
0	1.02	2.93	1.11	2.70	0.00	0.0	0.0	2.82
5	0.99	3.03	1.09	2.74	0.07	4.0	-1.0	2.88
10	0.95	3.14	1.09	2.74	0.16	9.2	-0.8	2.91
15	0.89	3.39	1.09	2.74	0.23	13.7	-1.3	2.98
20	0.83	3.60	1.09	2.74	0.31	19.5	-0.5	2.99
25	0.80	3.76	1.08	2.79	0.33	21.1	-3.9	3.05

2.5 Merenje protoka

Merenje protoka u profilu sa mešavinom vode i vazduha u hidrotehničkoj praksi obično se izbegava. Međutim, pošto je u ovom radu akcenat na merne veličine u ovakvoj mešavini, u tabeli 2 su prikazani rezultati sa fizičkog modela u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Beogradu. Može se videti koje su vrednosti izmerene pri zadatom protoku na Thompson-ovom prelivu na uzvodnom delu modela. Protok je izmeren integracionom metodom preko brzine, koncentracije, dubine i širine brzotoka.

Tabela 2. Rezultati opita merenja protoka.

Table 1. The results of the flow measurement.

Varijanta brzotoka	opit sa Q=20	opit sa Q=40	opit sa Q=60
br.	L/s	L/s	L/s
1	18	39	60
2	20	42	57
3	19	39	57
4	18	39	58
5	21	42	62

3 Zaključak

Na osnovu izmerenih hidrauličkih veličina mogu se dati sledeći zaključci:

1. Dubina mešavine vode i vazduha, h_{90} , sa dovoljnom pouzdanošću može se izmeriti mernom iglom sa nonijusom.
2. Merenja koncentracije vazduha u vodi mogu se dobiti metodom promene elektroprovodnosti po vremenu.
3. Pri merenju brzina metodom elektroprovodnosti dobile su se očekivane vrednosti u opsegu koncentracije 5 do 95% koja su potvrđena merenjem protoka. Pri koncentracijama manjim od 10% treba koristiti metode kao što su: LDA, ADV, hot-film i Pitoova cev.
4. Korišćenjem senzora sa tri elektrode moguće je dobiti pravac vektora brzine.
5. Rezultati provere protoka su dokaz da bi se ova metoda mogla primeniti i u praksi na hidrotehničkim objektima, kada nije moguće izmeriti protok drugom metodom.

Zahvalnica. Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, za finansijsku podršku u okviru projekata tehnološkog razvoja po rednim brojevima TR 37005, 37009, 37010 i 37014.

Literatura

1. Da Silva, M. J. (2008), *Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging*, Doctoral thesis, Electrical and Computer Engineering, Technische Universität Dresden, Dresden.
2. Frizell, K.W., Svoboda, C.D. (2012), *Performance of Type III Stilling Basins – Stepped Spillway Studies*, Hydraulic Laboratory Report HL-2012-02, USBR.
3. Gonzales, C.A. (2005), *An Experimental Study of Free-surface Aeration on Embankment Stepped Chutes*, Doctoral thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Physical Sciences and Architecture, The University of Queensland Brisbane, Australia.
4. Kim, S., Wang, X., Fu, X.Y., Ishii, M. (1999), Development of noble four-sensor conductivity probe and its signal processing scheme, 7th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo.
5. Starinac, D. (2013), Hidraulička modelska ispitivanja brane Buzina, Konačni izveštaj, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd.
6. Žugić, D., Kapor, R., Pop Trajković, V., Petrović, N., Rula, M. (2006), Hidraulička modelska ispitivanja stepenastog preliva na dva modela različitih razmera, Zbornik radova 14. savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja, Fruška Gora, ISBN 86-7892-011-4, CD, str. 19 – 28
7. Chanson, H. (2013). Advective Diffusion of Air Bubbles in Turbulent Water Flows, in: *Fluid Mechanics of Environmental Interfaces*, Taylor & Francis, Leiden, The Netherlands, C. Gualtieri and D.T. Mihailovic (Editors), 2nd edition, Chapter 7, pp. 181-219 (ISBN 9780415621564).

Hidraulička laboratorija Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Slobodan Kolaković¹

Goran Jeftenić²

Ljubomir Budinski³

Matija Stipić⁴

Svetlana Vujović⁵

APSTRAKT: Studentima tehničkih nauka je veoma važno da povežu teorijske osnove sa realnim problemima u praksi. U svrhu lakšeg savladavanja baznih principa hidraulike otvorenih tokova, strujanja pod pritiskom i filtracije kroz poroznu sredinu, kao i praktične demonstracije realnih problema na modelima, projektovana je i izvedena hidraulička laboratorija na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. U radu su prikazani osnovni modeli kojima je opremljena laboratorija za potrebe eksperimentalne hidraulike, kao i sprovedena osnovna merenja sa dobijenim rezultatima.

Ključne reči: hidraulička laboratorija, hidraulički kanal, model bunara i brane

Hydraulic laboratory of the Faculty for Technical Sciences in Novi Sad

ABSTRAKT: Good connections between theoretical and practical knowledge is very important for students in engineering sciences. In order to overcome basic theoretical principles of open channel hydraulic, groundwater flows and pressure flows, as well as practical demonstration of real problems by using different models, at the Faculty of technical sciences in Novi Sad hydraulic laboratory has been designed and constructed. Hence, a brief review of several experimental models installed in the laboratory, followed by the corresponding measurements, is presented in this paper.

Keywords: hydraulic laboratory, model of hydraulic channel, Venturi system, model of wells and dam

¹ Mast. Slobodan Kolaković, dipl.inž.građ., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, cole86grb@gmail.com

² Mast. Goran Jeftenić, dipl.inž.građ., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, goran.jeftenic@yahoo.com

³ Doc. dr Ljubomir Budinski, dipl.inž.građ., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, ljubabu@gmail.com

⁴ Doc. dr Matija Stipić, dipl.inž.građ., AD“Vojvodinaprojekt”, Novi Sad, matija@vojvodinaprojekt.rs

⁵ Doc. dr Svetlana Vujović, dipl. ekolog za zžs, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, vujovics@uns.ac.rs

1 Uvod

Na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na katedri za hidrotehniku i geodeziju, donacijom evropske unije kao i stranih kompanija, u vrednosti od oko 65000 eura, započeto je opremanje hidrauličke laboratorije. U laboratoriji se nalaze savremeni hidraulički instrumenti za potrebe vežbi iz eksperimentalne hidraulike (model hidrauličkog kanala, uređaj za demonstraciju hidrostatičkog stanja tečnosti, Venturijeva cev, model bunara, model strujanja ispod i kroz nasip) i laboratorijska postavka instalacije vodovoda i kanalizacije sa svim pratećim armaturama. Prostorija laboratorije se nalazi u suterenu novog objekta Departmana i dimenzija je u osnovi 18x8 m. Oprema je postavljena tokom 2014 g. i u upotrebi je za eksperimentalne vežbe iz predmeta Hidraulika i Komunalna hidrotehnika za studente hidrotehnike.

2 Laboratorijska oprema

2.1 Model hidrauličkog kanala

Hidraulički kanal (Slika 1.) ima prevashodno za cilj da u okviru praktičnog dela nastave studentima obezbedi praktičnu i vizuelnu demonstraciju baznih principa dva osnovna tipa tečenja: tečenja sa slobodnom površinom i strujanja pod pritiskom (tečenje u zatvorenom provodniku). Jednostavn i praktičan koncept instalacije omogućava studentima prvenstveno da u kanal veoma lako ugradjuju modele različitih tipova objekata, dostupnih iz palete modela, i shodno tome posmatraju uticaje koje takvi objekti imaju na strujnu sliku. Hidraulički kanal omogućava praktičnu demonstraciju strujanja sa slobodnom površinom uz mogućnost ugradnje sledećih tipova modela:

- oštroični i oblikovani (Krigerov) preliv,
- prag sa opcijom ugradnje uzvodne i nizvodne rampe,
- ustava.

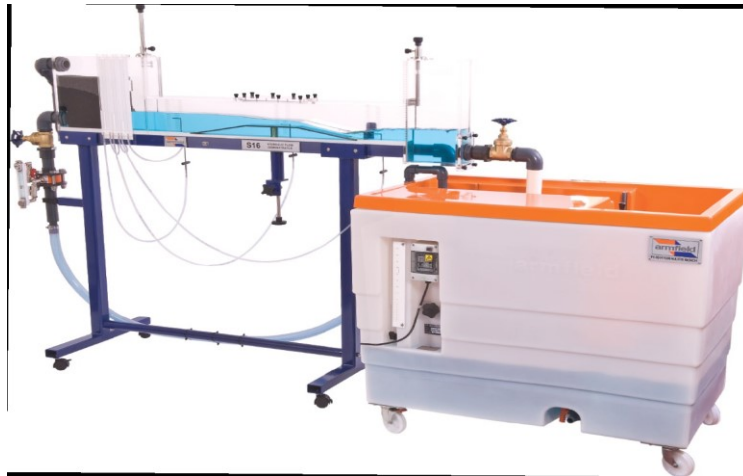
Pored toga model hidrauličkog kanala omogućava i demonstraciju strujanja u zatvorenom provodniku (strujanje pod pritiskom), gde je takođe uz ugradju pojedinih elemenata i modifikacije zidova samog provodnika (podesivo dno) moguće fimirati lokalne poremećaje strujanja u provodniku. Merenja pijezometarske kote na dnu provodnika i vertikalnog rasporeda ukupne energije u mernom preseku vrši se na tri lokacije duž kanala, primenom pijezometra i Pito cevi, redosledno.

2.1.1 Primer određivanja vertikalnog rasporeda brzina

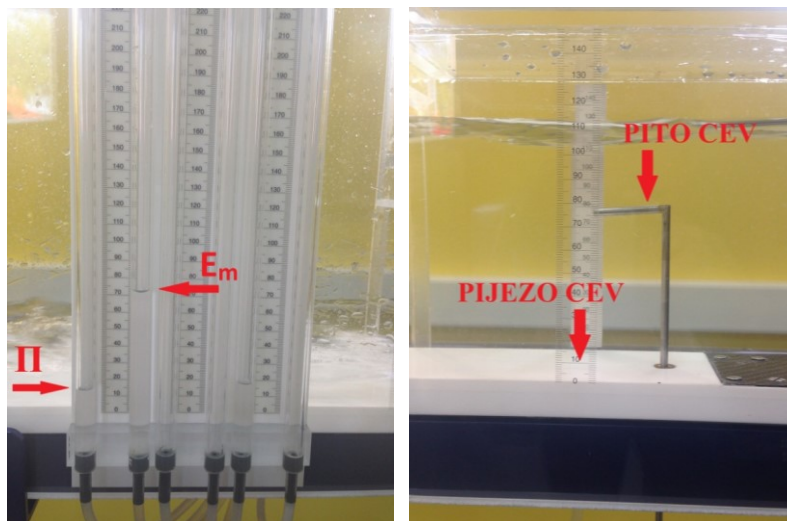
Za potrebe određivanja vertikalnog rasporeda brzina u mernom preseku lociranom uzvodno od prelivne pregrade (Slika 2.), izvršeno je merenje ukupnog energetskeg potencijala u pet tačaka po vertikali i pijezometarske kote Π , i to za četiri različita protoka. Na osnovu pomenutog merenja i relacije kojom se definiše razlika između energetske i pijezometarske kote, dobijen je vertikalni raspored komponente brzine u pravcu toka. Vrednosti brzina za pet

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

tačkaka po vertikali i određen protok prikazani su u tabeli 1. Na slici 3 prikazana je zavisnost dubine u kanalu i sračunate brzine.



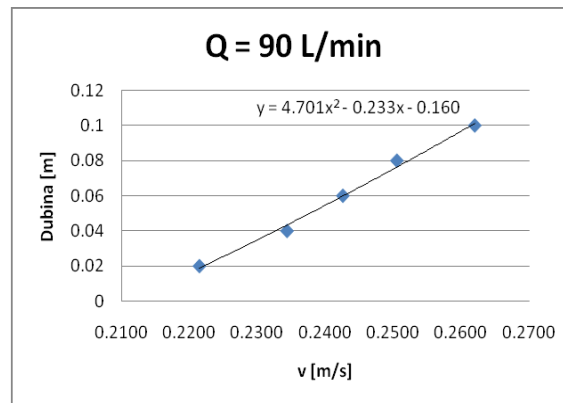
Slika 1. Hidraulički kanal
Figure 1. Hydraulic bench



Slika 2. Položaj Pito i pjezometarske cevi
Figure 2. Pitot and piezometric tubes

Tabela 1. Vrednost brzina po vertikali za protok $Q=90$ L/min
Table 1. Vertical velocity distribution for $Q=90$ L/min

$Q=90$ L/min	E_m	Π	$E_m-\Pi$	v
	[mm]	[mm]	[m]	[m/s]
20 mm	123.5	121	0.0025	0.2215
40 mm	123.8	121	0.0028	0.2344
60 mm	124	121	0.003	0.2426
80 mm	124.2	121	0.0032	0.2506
100 mm	124.5	121	0.0035	0.2620



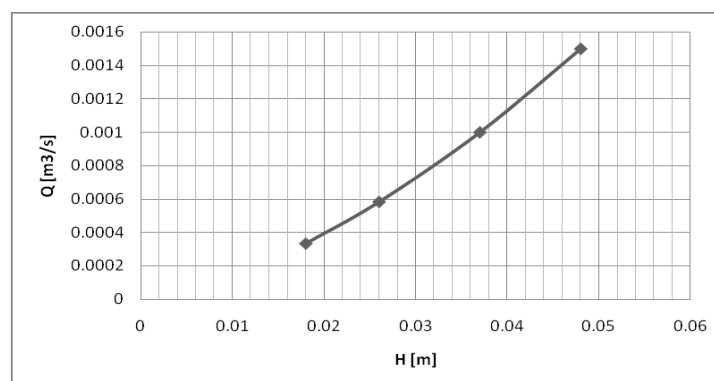
Slika 3. Raspored brzina pri proticaju Q = 90 L/min
 Figure 3. Vertical velocity distribution for Q= 90 L/min

2.1.2 Oštrovični preliv

Za potrebe određivanja koeficijenta preliivanja m_H izmeren je nivo slobodne površine z_v u uzvodnom preseku, na dovoljnom udaljenom rastojanju od oštrovičnog preliva (ispunjen je uslov $L > 3H_{max}$). Dobijeni rezultati koeficijenta preliivanja za četiri protoka dati su u tabeli 2., dok je Q - H kriva preliva prikazana na slici 4.

Tabela 2. Koeficijent preliivanja m_H
 Table 2. Overflow coefficient m_H

Q [L/min]	Z_v [mm]	P [m]	H [m]	b [m]	m_H
20	92	0.074	0.018	0.075	0.415
35	100	0.074	0.026	0.075	0.419
60	111	0.074	0.037	0.075	0.423
90	122	0.074	0.048	0.075	0.429



Slika 4. Q - H kriva oštrovičnog preliva
 Figure 4. Sharp crested weir, Q - H curve

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

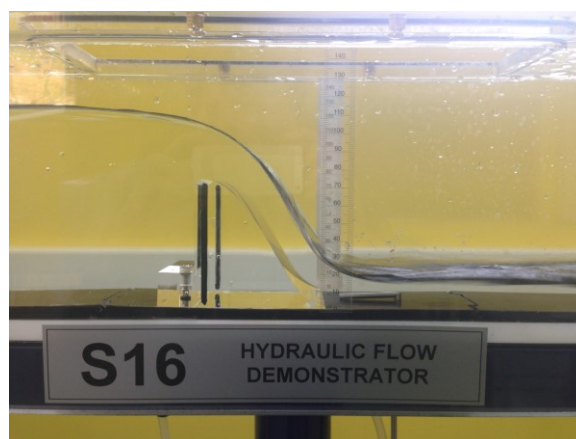
Treba napomenuti da se prilikom ispitivanja strogo vodilo računa da prelivni mlaz nije slepljen za zid oštroičnog preliva, odnosno da se prilikom prelivanja pojavi vazdušni jastuk ispod prelivnog mlaza (slika 5).



Slika 5. Oštroični preliv
Figure 5. Sharp crested weir

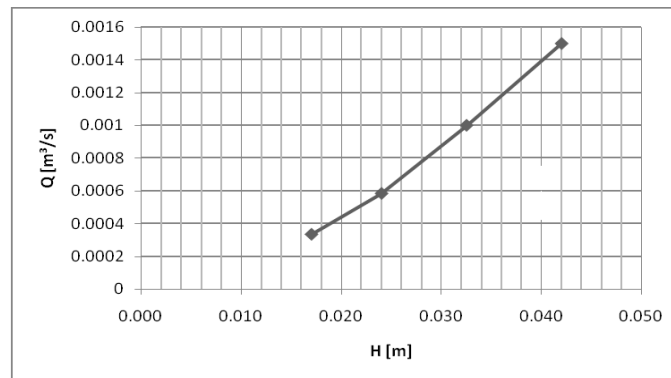
2.1.3 Oblikovani (Krigerov) preliv

Za oblikovani preliv sproveden je isti postupak za određivanje koeficijenta prelivanja kao i kod oštroičnog preliva. Kod ovog tipa preliva donja ivica prelivnog mlaza se poklapa sa nizvodnim licem preliva čime je izbegnuta pojava podpritiska (Slika 6.). Na osnovu dobijenih rezultata definisana je $Q - H$ kriva preliva (Slika 7.) i izračunate su visine energetskih gubitaka između preseka uzvodno i nizvodno od preliva (Tabela 3.).



Slika 6. Oblikovan (Krigerov) preliv
Figure 5. Ogee weir

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 7. Q - H kriva Krigerovog preliva
Figure 7. Ogee weir, Q - H curve

Tabela 3. Visine energetske gubitaka
Table 3. Energy losses

Q	b	Z _{niz=p/γ}	A _{niz}	v _{niz}	E _{niz}	Z _{uz=p/γ}	A _{uz}	v _{uz}	E _{uz}	ΔE
[L/min]	[m]	[mm]	[m²]	[m/s]	[m]	[mm]	[m²]	[m/s]	[m]	[m]
20	0.075	6	0.0005	0.7407	0.0340	91	0.0068	0.0488	0.0911	0.0572
35	0.075	9.1	0.0007	0.8547	0.0463	98	0.0074	0.0794	0.0983	0.0520
60	0.075	11.8	0.0009	1.1299	0.0769	106.5	0.0080	0.1252	0.1073	0.0304
90	0.075	17	0.0013	1.1765	0.0875	116	0.0087	0.1724	0.1175	0.0300

2.1.4 Prag

Za slučaj praga, gde je pored standardnog tipa razmatran i prag sa uzvodnom i nizvodnom rampom (Slika 8.), prvo je izvršena provera da li se za četiri predhodno definisana protoka na pragu formira kritična dubina. Za dužinu praga $l = 0.15$ m potvrđena je ispunjenost uslova za formiranje kritične dubine na pragu $L \geq 3h_{kr}$.



Slika 8. Oštrovični i zaobljeni široki prag
Figure 8. Broad crested weir – general and roof shaped type

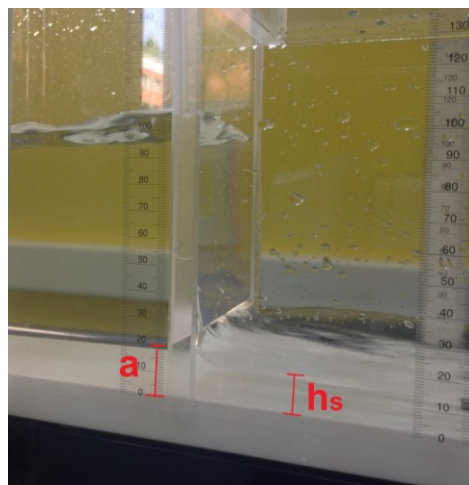
Nakon obrađenih rezultata određene su vrednosti koeficijenta prelivanja. Poređenjem izmerenih rezultata za koeficijent prelivanja sa preporukama literature za realan fluid, uočena

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

su neznatna odstupanja, koja kao i u slučaju prethodnih eksperimenata možemo da pripišemo ljudskom faktoru, odnosno ne mogućnosti ljudskog oka da detektuje promenu nivoa vode manju od 1 mm. Međutim, kod svih ispitivanja koja su vršena na hidrauličkom kanalu postavlja se uopšteno pitanje uticaja širine kanala od 7.5 cm? Prilikom merenja jasno se vidi i da pri manjim proticajima dobijamo veća odstupanja jer viskoznost znatno doprinosi povećanju greške merenja. Takođe treba napomenuti da je radni deo kanala dugačak 110 cm.

2.1.5 Ustava

Pri različitoj otvorenosti ustave i konstantnom nivou ispred ustave od $H = 100$ mm mereni su protoci i dubine u suženom preseku h_s (Slika 9.). Izračunati koeficijenti kontrakcije, koeficijenti brzine i koeficijent protoka prikazani su u tabeli 4.



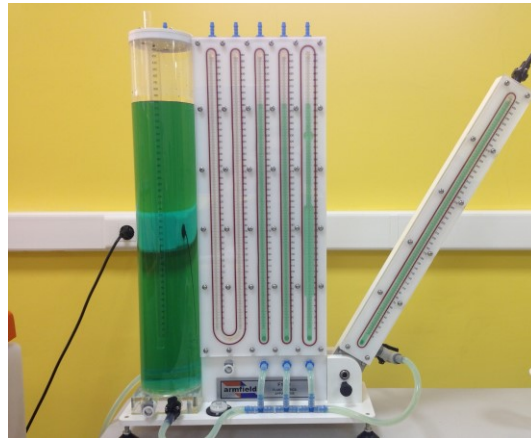
Slika 9. Isticanje ispod ustave
Figure 9. Flow under a sluice gate

Tabela 4. Vrednosti koeficijenata kontrakcije, brzine i protoka
Table 4. Contraction, discharge and velocity coefficient

Otvorenost ustave a	h_s	H	Q	C_A	C_V	C_q
[mm]	[mm]	[mm]	[L/min]			
19	10	100	75	0.526	1.2542	0.6601
20	13	100	77.7	0.650	1.0166	0.7127
21	14	100	80.3	0.667	0.9812	0.6542
22	15	100	83.6	0.682	0.9591	0.6539
23	16	100	87.7	0.696	0.9488	0.6600
24	16.5	100	90.2	0.688	0.9491	0.6525
25	17	100	93.9	0.680	0.9619	0.6541

2.2 Uređaj za testiranje hidrostatičkog stanja tečnosti

Uređaj za demonstraciju ponašanja tečnosti u uslovima mirovanja (slika 10.) pruža studentima prvenstveno vizuelni prikaz osnovnih principa hidrostatičkog stanja fluida uz mogućnost merenja elementarnih slučajeva. Uređaj je pogodan za utvrđivanje horizontalnog nivoa tečnosti, stanja sistema u rezervoaru ili 'U' cevi pri nadpritiscima/podpritiscima.



Slika 10. Utvrđivanje horizontalnog nivoa tečnosti
Figure 10. Measuring horizontal liquid level

2.3 Venturijeva cev

Venturijeva cev, uređaj koji se prevashodno koristi za merenje protoka, instaliran je takođe u laboratoriji departmana za građevinarstvo i geodeziju. Pored demonstracije ponašanja fluida kao posledice postepenog sužavanja protočnog preseka u zatvorenom provodniku, koja je omogućena instalacijom seta pjezomatara u odgovarajućim mernim presecima duž cevi, uređaj se u ovoj formi takođe može koristiti i u kombinaciji sa instalacijom hidrauličkog kanala za merenje vrednosti protoka. Konfiguracija mernog uređaja data je na slici 11.



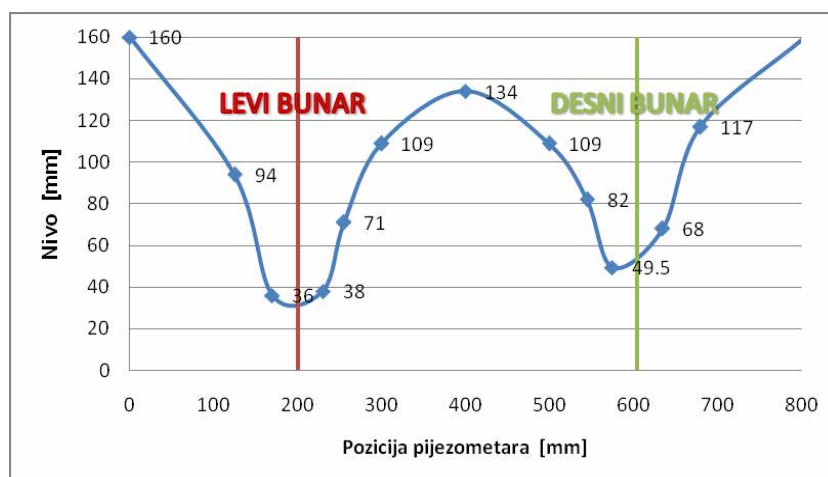
Slika 11. Venturijeva cev
Figure 11. Venturi tube

2.4 Eksperimentalna instalacija za ispitivanje strujanja u poroznoj sredini u horizontalnoj ravni

Model u određenoj razmeri demonstrira strujanje vode kroz poroznu sredinu u horizontalnoj ravni, gde je dostupnom opremom (slika 12.) omogućeno eksperimentalno ispitivanje snižavanje nivoa vode upotrebom dva bunara, isušivanje jezera ili poldera. Svakako, dimenzije same instalacije kao i opseg raspoloživih vrednosti protoka, filtracionih brzina i granulometrijskog sastava ugrađenog tla limitiraju mogućnosti eksperimentalne primene samog modela.



Slika 12. Laboratorijski model bunara
 Figure 12. Groundwater flow and well abstraction

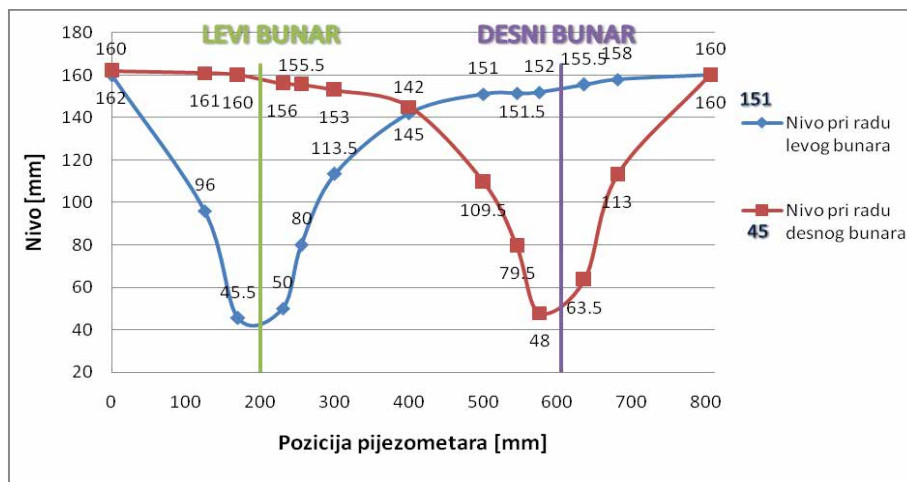


Slika 13. Nivoi pri radu oba bunara
 Figure 13. Two wells working in parallel, water level distribution

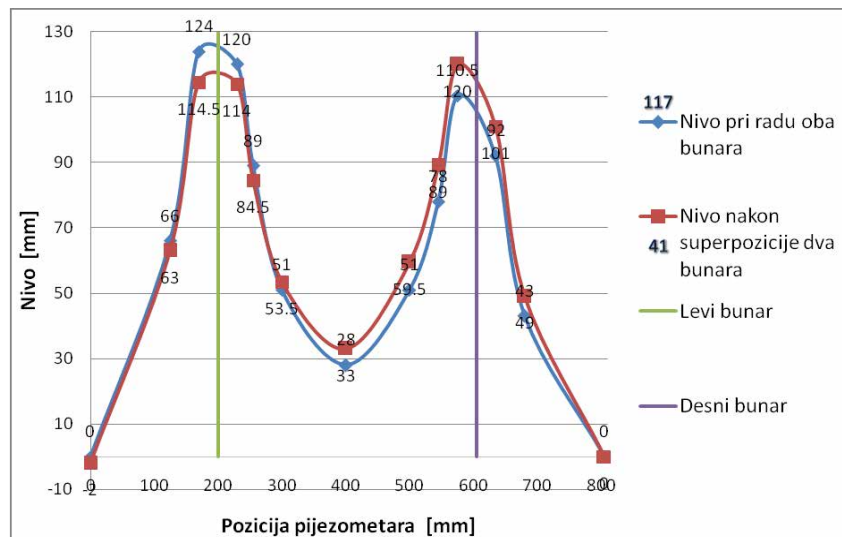
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Za potrebe eksperimentalnog modeliranja strujanja podzemne vode na raspoloživom fizičkom modelu izvršeno je eksperimentalno merenje nivoa vode u zemljištu nastalog kao posledica crpljenja vode iz dva bunara. Očitane su vrednosti pijezometarskih nivoa duž merne ose i prikazane na slici 13. Isti postupak je sproveden i za slučaj rada svakog bunara pojedinačno (slika 14.).

Na slici 15 prikazan je grafik nivoa vode kada se sračunaju denivelacije između maksimalnog nivoa i izmerenih pijezometarskih kota i zatim superponiraju denivelacije pri radu pojedinačnih bunara.



Slika 14. Nivoi pri radu svakog bunara pojedinačno
Figure 14. Single well, water level distribution



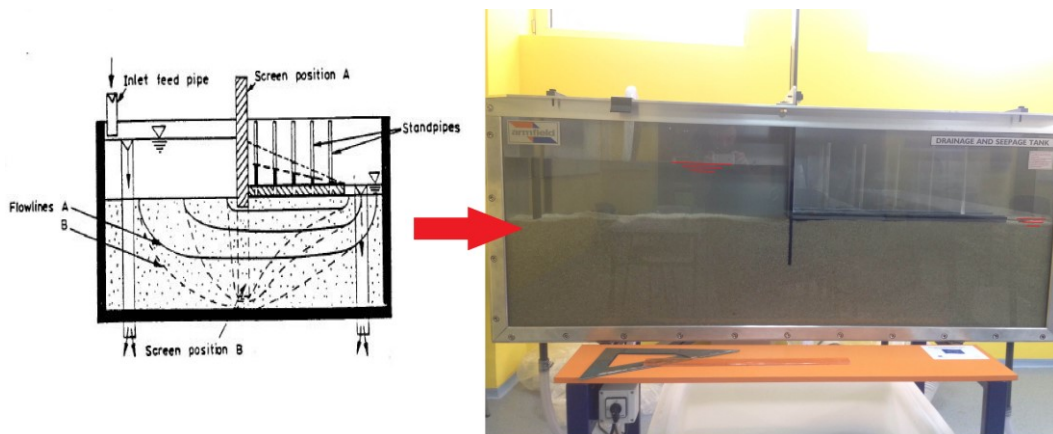
Slika 15. Prikaz nivoa podzemne vode usled crpljenja iz oba bunara i superpozicije nivoa pri radu pojedinačnih bunara

Figure 15. Two wells, comparison between actual and super positioned case

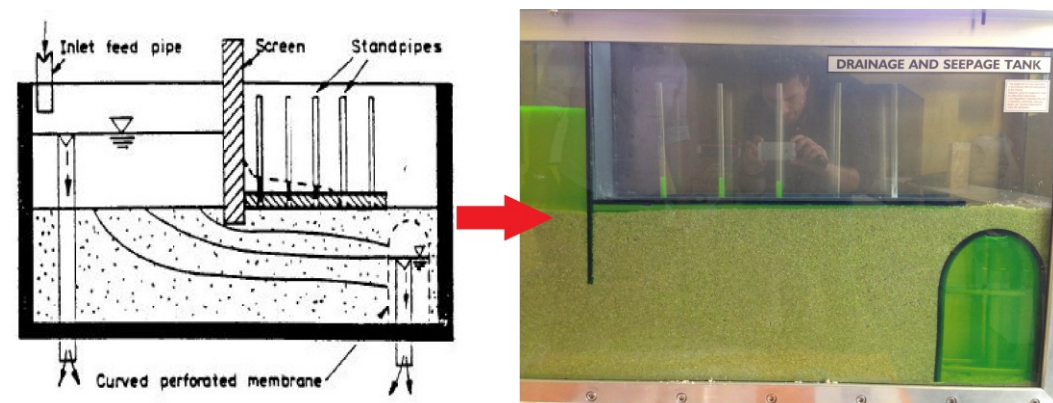
Rezultujući nivoi bi u idealnim uslovima trebali da se poklope, međutim, u uslovima gde se javljaju problemi zapušavanja pijezometara, usled nemogućnosti preciznog prosejavanja peska kako bi se dobila frakcija koju proizvođač preporučuje i potrebe za volumetrijskim merenjima proticaja pri čemu je određeni procenat greške neminovan, dobijeni rezultati su prihvatljivi.

2.5 Eksperimentalna instalacija za ispitivanje strujanja u poroznoj sredini u vertikalnoj ravni - strujanje ispod objekta i kroz nasip

Model omogućava eksperimentalno ispitivanje strujanja fluida kroz poroznu sredinu u vertikalnoj ravni, sa akcentom na strujanje ispod brane i strujanje kroz telo nasipa. Sama konfiguracija modela omogućava prikaz filtracione mreže nastale kao posledice procurivanja kroz telo brane ili ispod nasipa (slika 16.), zatim proveru sile uzgona na horizontalnu ploču očitavanjem nivoa tečnosti u unapred definisanim pijezometrima, kao i modeliranje obaranja nivoa podzemne vode primenom bunara ili drenažnih kanala (slika 17.).



Slika 16. Prikaz strujanja ispod nasipa
Figure 16. Flow below the dike



Slika 17. Prikaz situacije smanjenja uzgona na horizontalnu ploču
Figure 17. Horizontal panel, uplift pressure reduction

2.6 Primer spoljne vodovodne i kanalizacione instalacije sa pratećim elementima

Laboratorijska postavka instalacije cevovoda vodovoda i kanalizacije (slika 18.) ima za cilj upoznavanje studenata hidrotehničkog smera sa osnovnim elementima koji čine jedan vodovodni i kanalizacioni sistem. Pored više različitih tipova vodovodnih i kanalizacionih cevi, instalacija kao takva sadrži i određen broj fazonskih komada, kao što su zatvarači, kolena, ventili, T komadi i spojevi, kao i jedan hidrant i uređaj za merenje protoka u zatvorenom provodniku. Na ovaj način studenti imaju mogućnost "direktnog" uvida u samu konstrukciju i način rada nekoliko bitnih elemenata jedne cevne mreže, što je jedan od suštinskih faktora za bolje razumevanaje rada kompletnog sistema i pripremu studenata za praksu.



Slika 18. Instalacija cevovoda sa armaturom
Figure 18. Pipeline instalation

3 Zaključak

U prostoriji Departmana za građevinarstvo i geodeziju 2014 g. projektovana je i instalirana laboratorijska oprema za potrebe predmeta Hidraulika na odseku za hidrotehniku. Oprema dobijena donacijom ima prevashodno za cilj da studentima hidrotehlike pruži uvid u praktičan aspekt ponašanja fluida, i to kroz instalacije za demonstraciju tečenja vode u otvorenim i zatvorenim provodnicima kao i modela za eksperimentalno ispitivanje strujanja u poroznoj sredini. Time im se omogućava da sigurnije i pouzdanije rešavaju probleme sa i oko

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

hidrotehničkih objekata. Pored modela, kojim se mogu sračunati stvarni uticaji na objekte, primer instalacije vodovoda i kanalizacije omogućava studentima upoznavanje sa osnovnim elementima jednog cevnog sistema, uz mogućnost uvida u sam rad i konstrukciju svakog elementa ponaosob.

Literatura

1. <http://www.discoverarmfield.com>
2. <http://www.pamline.com>
3. Chow V.T., Open Channel Hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 1959.
4. Seminarski rad: Laboratorijske vežbe, Budinski Lj., Jeftenić G., Mašić B., Kolaković S., FTN Novi Sad, 2014.

Bezbedno vodosnabdevanje i rizici – primer dva grada

Milan Ivetić¹
Tamara Srdić²
Marko Ivetić³

APSTRAKT: U radu se razmatraju hidraulički aspekti potencijalnih opasnosti za ugrožavanje bezbednog snabdevanja vodom nekog grada, sa težištem na kvalitet i higijensko-zdravstvenu ispravnost vode. U situaciji u kojoj je došlo do nedozvoljenog prekoračenja nekog od pokazatelja kvaliteta i/ili zdravstvene ispravnosti vode, nesporno je da se put zagađenja, većim ili manjim delom, poklapa sa putem vode, pa je za upravljanje sistemom i sprečavanje zagađenja, neophodno poznavanje stanja sistema, kako u delu koji je u nadležnosti vodovoda (od vodozahvata, preko postrojenja i mreže, do potrošača), tako i u delu uzvodno od vodozahvata. Za ilustraciju osnovne ideje rada iskoristiće se raspoloživi podaci o događajima u dva grada, Bergenu u Norveškoj i Užicu u Srbiji, gde je došlo do zabrane korišćenja vode zbog prodora zagađenja u vodovodnu mrežu. Ukazaće se na sličnosti, da se incident može desiti bilo gde i bilo kada, ali i na razlike, kako se postupalo za vreme vanredne situacije i posle toga i koliko je ko naučio iz onoga šta se desilo.

KLjučne reči: bezbedno vodosnabdevanje, kvalitet vode, višestruke prepreke, higijensko zdravstveni rizik

Safe water supply and risks – two cities

ABSTRACT: The paper deals with the hydraulic aspects of potential threats to water safety of some public water supply, with the emphasis on the water quality and sanitary and hygienic requirements. In the case when some of the water quality indicators goes beyond the limit, and/or water safety is questioned, the most probable cause is that the pollution path has intercepted the path of water. In order to be able to prevent pollution, one has to have full control over the system, to be aware of system condition, not only within the water utility responsibility (from water intake, water treatment plant, distribution network till the user's tap), but much more beyond. Two case studies, where accidents causing the disruption of the water supply had happened, Bergen in Norway, and Uzice in Serbia, have been chosen to illustrate the concept of water safety. The existing similarities are pointed out, like, that the accident could have happened anywhere, but the main difference was, who benefitted from the accident more.

Key words: water safety, water quality, multi-barrier approach, public health risk

¹ IWA Consalt d.o.o., Beograd

² IWA Consalt d.o.o., Beograd

³ Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

1 Uvodna razmatranja

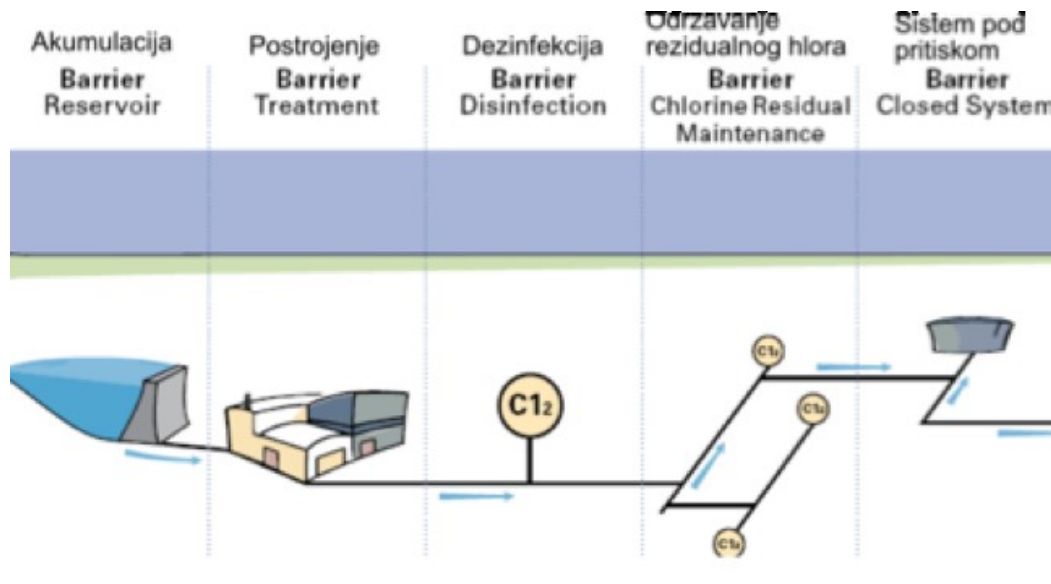
Osnovni zadatak javnih komunalnih preduzeća vodovoda, je da obezbede vodu koja zadovoljava propisane mikrobiološke i fizičko hemijske uslove, koja je prihvatljiva korisnicima po (ceni,) ukusu, mirisu i izgledu, neprekidno snabdevanje, i po količini i po kvalitetu. Na prvi pogled, ovo nije komplikovano, i ako pitate bilo kog korisnika vode iz javnog vodovoda on bi rekao da se to podrazumeva. Međutim, to ni u društvima koja su bogatija od našeg, nije ni malo jednostavno. U uslovima gde se očekivanja i korisnika i onih koji propisuju (ili, prepisuju) regulativu i standarde stalno povećavaju, gde se na kvalitet sirove vode može malo uticati, upravljati sistemom čija infrastrukturna sredstva neminovno stare, sa nedovoljnim sredstvima za održavanje, pravi je izazov, na koji javno komunalno preduzeće ne može da odgovori bez šire podrške. Podrška se može shvatiti dosta fleksibilno i ako ne postoje dovoljno jasno definisane procedure kako se rizici mogu prepoznati, proceniti, otkloniti ili ublažiti, kako postupati u slučaju kada se osnovna funkcija vodosnabdevanja dovede u pitanje, može da se desi da i najbolja volja i namera ne dovedu do očekivanih efekata.

Da bi se pomoglo vodovodima i lokalnim zajednicama bolje snalaženje u takvim situacijama, Svetska zdravstvena organizacija (WHO) i IWA, objavili su Uputstvo za bezbedno vodosnabdevanje (Water Safety Plan Manual, 2004, prvo izdanje, i 2009, drugo). Ovaj dokument je mnogo širi i konkretniji u odnosu na prethodne izveštaje WHO, jer predstavlja i kompilaciju dobre prakse koja postoji u mnogim zemljama (DVGW u Nemačkoj, AWWA i US EPA u Americi, u Australiji, u Norveškoj itd). Detaljno je objašnjeno je kako se utvrđuje stanje sistema, kako identifikuju opasnosti i pretnje, procenjuje i rangira rizik, definišu korektivne i kontrolne mere, kako se organizuju monitoring, upravljanje i komunikacija između svih aktera, i kada se, po potrebi, predviđaju saniranje i nadogradnju sistema. Plan se mora ažurirati periodično, a posebno, posle nekog incidenta. Pored niza važnih konkretnih unapređenja, izdvajamo poruku za uspostavljanje višestrukih kontrola (barijera) na putu vode od momenta kada kap kiše padne na sliv, pa sve do korisnika (Slika 1). Iako je tema vezana za higijensko zdravstvenu ispravnost vode, ukazaće se i na ulogu hidraulike, i potrebu dobrog poznavanja i kontrole celokupnog kretanja vode, jer put zagađenja do korisnika, je i put vode.

Da bi se lakše prihvatilo da su problemi sa higijensko - zdravstvenom ispravnošću vode mogući bilo gde i bilo kada, izabrana su dva primera, uslovno rečeno, sa dva kraja sveta. Tu se ne misli u geografskom smislu, već u smislu preduslova koje je država i lokalna zajednica obezbedila javnom (komunalnom) preduzeću, institucionalni okvir, procedure, naravno i tehnološki nivo, ekonomska moć, itd. Jedno je epidemija koju je, 2004. godine, izazvala protozoa *Giardia* u Bergenu, u Norveškoj, a drugo je, cvetanje Cijanobakterija u akumulaciji Vrutci i kontaminacija vodovoda Užica. Prvi slučaj, iz Norveške, kada je nekoliko hiljada ljudi imalo ozbiljne stomadne tegobe, odlično je i objektivno dokumentovan [6]. Drugi slučaj u kojem, srećom, nije bilo obolelih, otkrio je mnoge probleme u sektoru voda u Srbiji. A da li se nešto, i koliko, naučilo, teško je odgonetnuti. Autori ovog rada su imali priliku da iz relativne blizine prate događanja u oba slučaja.

Pored ukazivanja na svu kompleksnost sistema vodosnabdevanja i kanaliziranja, i složenosti funkcionisanja u stalno promenljivim i teško predvidivim uslovima, u kojima se zahtevi stalno povećavaju i pooštavanju, ova dva primera otkrivaju da inženjeri dobijaju nove uloge i nove zadatke. Trebaju im nova, interdisciplinarna, znanja i nove veštine da bi odgovorili na sve zadatke koji ih čekaju. Nova znanja i nove veštine neće koristiti da bi preuzeli uloge drugih struka, nego da bi bili dobri saradnici/rukovodioci u multidisciplinarnim timovima, kao

reprezentu svoje struke, ali i kao koordinatori saradnje sa drugim inženjerskim strukama u oblasti vodosnabdevanja i kanalizisanja. Oni treba da budu i dobri komunikatori tehničkih ideja i rešenja sa lokalnom zajednicom i društveno političkim okruženjem. Iz načina kako se upravljalo rizikom u Bergenu, pre i posle epidemije, može se dosta naučiti.



Slika 1. Sistem višestrukih barijera
 Figure 1. Multi-barrier approach

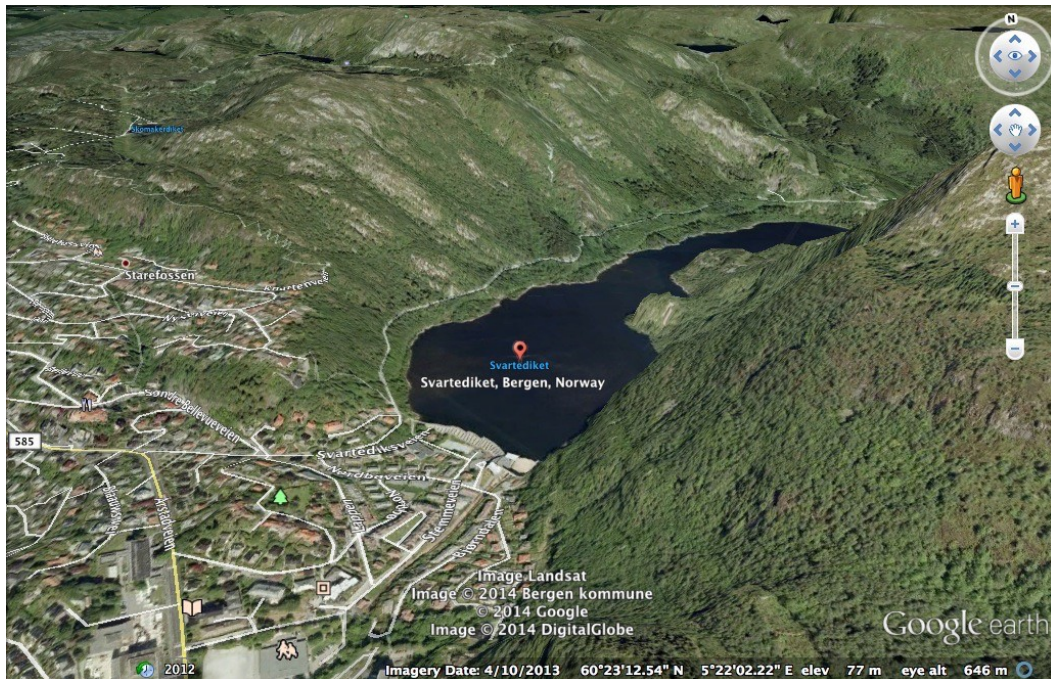
2 Bergen – epidemija protozoe *GIARDIA*

Krajem 2004 godine došlo je do epidemije izazvane patogenom protozooom *Giardia* u Bergenu (Norveška). Od oko 250 000 stanovnika, njih 1400 je imalo dijagnozu *Giardioza*, a procenjuje se da je određene stomačne tegobe imalo između 4 000 i 6000 ljudi. Takođe, posle godinu i po dana, između 200 do 400 ljudi je i dalje imalo tegobe izazvane ovom hidričnom infekcijom. Izvor epidemije je bio deo vodovodnog sistema koji zahvata vodu iz jezera Svartediket, i snabdeva centralni deo grada (Slika 2).

Posle izbijanja epidemije, glavni zainteresovani, Vodovod i kanalizacija Bergena, Zavod za javno zdravlje i Zavod za bezbednost hrane, formirali su Kriznu grupu koja je sačinila Interni izveštaj o svom delovanju tokom epidemije i nakon nje. Nezavisno od toga, Gradska uprava Bergena imenovala je nezavisnu Radnu grupu čiji je zadatak bio da utvrdi uzroke i okolnosti koji su doveli do epidemije, kao i da oceni kako se postupalo u vanrednoj situaciji. Interesantno je da su razlike između zaključaka u dva izveštaja bile male.

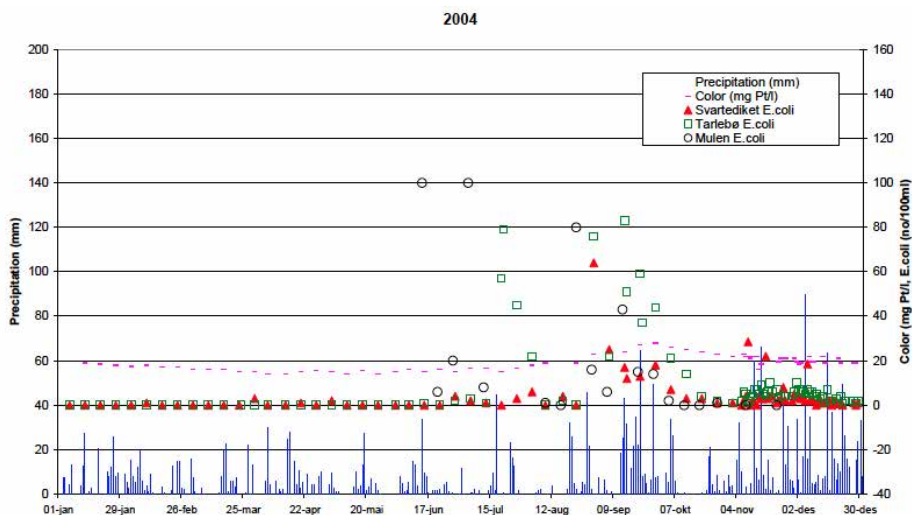
U sistemu bezbednog snabdevanja vodom Bergena, jezero (akumulacija) Svartediket predstavlja jedan važan bezbednosni segment/prepreku, jer se o ekološkom statusu jezera i kvalitetu vode strogo vodi računa. Akumulacija i ceo sliv su u nadležnosti Vodovoda i predstavljaju zonu sa strogo ograničenim aktivnostima.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2. Akumulacija Svartediket
Figure 2. Svartediket Reservoir

Padavine i pokazatelji kvaliteta vode za jezero Svartediket prate se dugo, a za ovu priliku, analiziran je period od 1995-2005. Na slici 3 prikazana je 2004, kao jedna tipična godina.



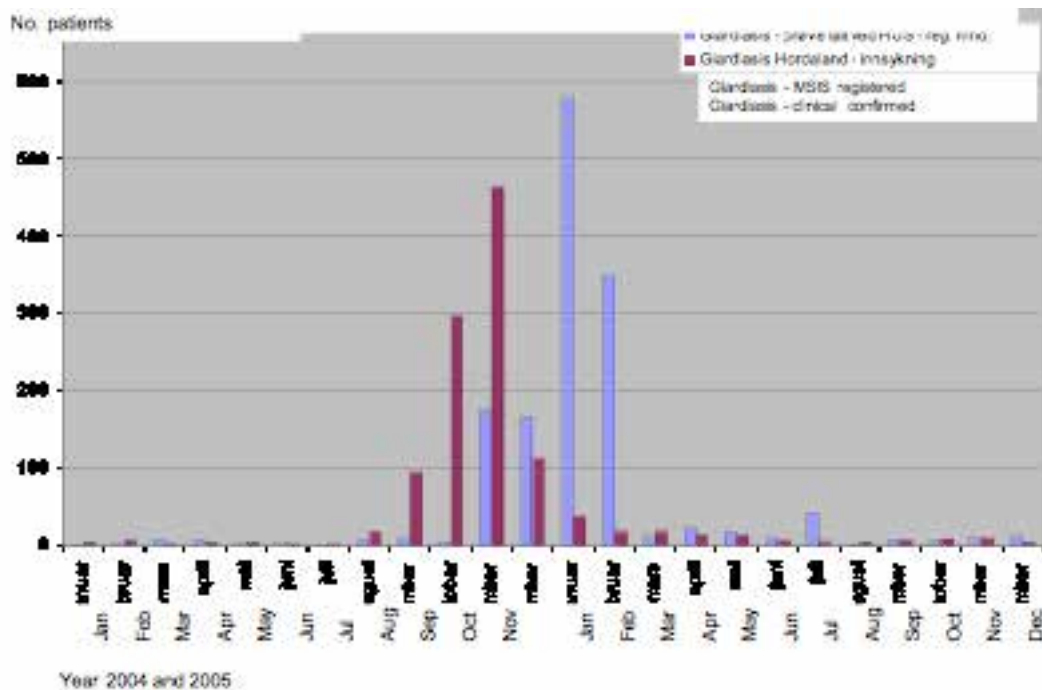
Slika 3: Padavine i podaci o pokazateljima kvaliteta vode u jezeru Svartediket (2004. god)
Figure 3: Precipitation and water quality data in lake Svartediket for year 2004.)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Padavine u Bergenu su dosta velike, oko 2250 mm/god, ali i neki pokazatelji kvaliteta vode (boja i E. Coli) u jezeru su povećani. Epidemija je proglašena 29. oktobra, a zbog relativno duge inkubacije, najverovatnije su ciste Giardie (koje nisu bile predmet monitoringa) dospele u sirovu vodu još u avgustu i septembru 2004.

Korišćenjem 3D hidraučkog simulacionog modela transporta i disperzije zagađenja u jezeru Svartediket, utvrđeno je da je najverovatniji izvor zagađena, curenje iz oštećene kanalizacija grupe kuća (bespravno) sagrađenih na ivici granice sliva. Kuće su sagrađene sredinom šezdesetih, ali su građevinsku dozvolu (ipak) dobile krajem osamdesetih. U GIS bazi kanalizacione mreže i prijavljenih kvarova, registrovano je nekoliko kvarova i intervencija na tom delu mreže. Posle epidemije, najveći deo cevi je zamenjen da bi se smanjio rizik od potencijalnog curenja.

U izveštajima Krizne i Radne grupe, vodovod nije naveden kao glavni krivac za epidemiju. Imajući u vidu našu praksu, da se odmah nadje krivac, i da je to obično, vodovod, postavlja se pitanje, da li je i u kojoj meri vodovod Svartediket, koji je deo vodovoda Bergen, i jedan je od najstarijih u Norveškoj (osnovan 1855), odgovoran za epidemiju. Vodovod je imao važeći sertifikat za rad, za koji je utvrđeno da je sporan, jer postrojenje nema dva stepena zaštite, neophodna da se spreči širenje zagađenja/uzročnika epidemije. Odgovornost je i na vlasniku vodovoda, ali i na Agenciji koja izdaje sertifikate, ali ne zbog sertifikata, nego zbog nepotpunih istraživanja u cilju analize i ocene rizika, na osnovu kojih se izdaje sertifikat. Tokom takve analize mogle bi se identifikovati opasnosti i scenariji koji mogu ugroziti bezbedno vodosnabdevanje iz jezera Svartediket.



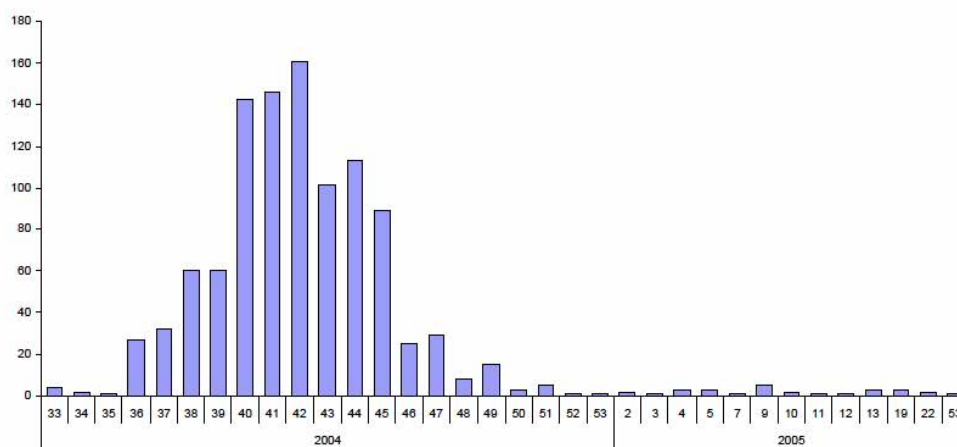
Slika 4. Vreme prijave obolelih pacijenata u sistemu "rane najave epidemije" u poredjenju sa klinički potvrđenim slučajevima u 2004 i 2005. godini.

Figure 4. Time for registration in "early warning system" compared to time for clinical observation for giardiasis in the affected region for the years 2004 and 2005.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Postavlja se pitanje, da li je kod prvog znaka zagađenja, epidemija mogla biti proglašena ranije? Kao i većina zemalja, i Norveška ima sistem za praćenje (i ranu najavu) epidemije zaraznih bolesti. Podaci na Slici 4. daju uporedo, klinički zbrinute pacijente (bordo), kao i pacijente koji su registrovani u pomenutom sistemu na ambulantnom lečenju (plavo). Pošto procedura prijavljivanja potencijalnih slučajeva nije sprovedena, postoji velika razlika između dve linije. Umesto rane najave, zbog čega je i uveden, sistem je poslužio kao evidencija (istorija bolesti).

Na slici 5 zbirno je prikazano 1053 obradjenih slučajeva epidemije, evidentirani po nedeljama. U 36. nedelji (početak septembra), zabeležen je porast, a najveći deo se desio između 38 i 45 nedelje. Epidemija je proglašena 29 oktobra (44 nedelja), kada je epidemija praktično prošla.



Slika 5: Vremenska raspodela potvrđenih slučajeva epidemije – 1053 pacijenta.
Figure 5: Distribution of the confirmed giardiasis in time, for 1053 patients analysed.

U razgovorima sa lekarima koji su bili uključeni u ovaj sistem, kao i na osnovu analize postojeće literature i medicinskih priručnika, zaključeno je da su postojali svi uslovi da se pretpostavi da bi i Giardia mogla biti uzročnik povećanog broja pacijenata sa stomačnim tegobama. Međutim, to se nije desilo jer se smatralo da je Giardioza tropska bolest i da se ne može javiti u Bergenu.

Dva najvažnija zaključka do kojih je Radna grupa došla mogla bi se sažeto navesti:

1. Epidemija izazvana protozom Giardia u Bergenu 2004. godine, mogla je se izbeći da su sprovedeni određeni suštinski zahtevi važeće regulative u oblasti vodosnabdevanja.
2. Međutim, po izbijanju epidemije, u vanrednoj situaciji, postupalo se u svemu prema principima i procedurama u operativnim planovima. Naime, u Norveškoj su sva javna preduzeća, kao što su vodovodi, obavezna da se u vanrednim situacijama organizuju u skladu sa tri osnovna principa:
 - Princip odgovornosti, tj. da je odgovornost imaju službe koje su i dnevno odgovorne.
 - Princip jednakosti, tj. da organizacija rada u vanrednim okolnostima bude što sličnija onoj u redovnim, i
 - Princip neposrednosti, ili decentralizacije, tj. krizom se upravlja na najnižem nivou organizacije.

Radna grupa je utvrdila da ima više indirektnih uzroka, odnosno, onih koji su omogućili da jednom unet uzročnik epidemije prodje sve kontrole i izazove epidemiju:

1. Važni propisi o bezbednosti vodovodnih sistema (sistem višestrukih kontrola/barijera) nisu sprovedeni.
2. Lokalne vlasti u Bergenu su dozvolile legalizaciju privatne gradnje u zoni granice sliva sa delom kanizacionog sistema u zaštitnoj zoni, koji nije bio odgovarajuće održavan.
3. Sezonska varijacija pokazatelja kvaliteta vode u kišnom periodu smatrana je "normalnom" što je uticalo na smanjenje budnosti na opasnost od zagadjenja patogenim mikroorganizmima.
4. Za vreme vanredne situacije, Javno preduzeće vodovod i kanalizacija Bergena, iskoristilo je postojeće baze podataka i simulacione modele u otkrivanju izvora zagadjenja, kao i za smanjenje štete izazvane epidemijom. U prethodnom periodu uradjeno je dosta u izgradnji paralelnih veza u vodovodnom mrežu, što je omogućilo efektivno smanjenje zone koja se napaja vodom iz jezera Svartediket.
5. Mišljenje/preporuka Radne grupe je bila da se hitno instalira linija za UV dezinfekciju, kao mera sanacije problema, a i kao povećanje zdravstvene bezbednosti.
6. Novo postrojenje za tretman vode iz jezera Svartediket će unaprediti stepen zaštite sistema i poboljšati kvalitet vode. Medjutim, Radna grupa posebno insistira da uvođenje poboljšanog tretmana vode ni na koji način ne sme da utiče na ublažavanje ili ukidanje ograničenja na aktivnosti, izgradnju i instalacije u slivu/zaštitnoj zoni izvorišta, koji mogu da ugroze kvalitet vode.
7. U vreme epidemije, Norveški sistem za praćenje i najavu zaraznih bolesti nije funkcionisao onako kako je to bilo potrebno, pa je između ostalog, i zbog toga, epidemija mogla biti otkrivena bar dve do četiri nedelje ranije.
8. Lokalna uprava Bergena je obezbeđivala pravovremene informacije stanovništvu tokom vanredne situacije preko web-stranice i preko medija.

Na osnovu činjenice da određeni broj vodovoda u Norveškoj takodje ne ispunjava zahteve po pitanju zaštite od prodora patogenih mikroorganizama, Radna grupa smatra da se sličan incident mogao desiti i na drugim mestima u Norveškoj. Radna grupa je utvrdila da ima prostora i potrebe da se unapredi postojeća praksa u upravljanju ovakvim situacijama i date su preporuke kako bi se smanjio rizik pojave hidričnih epidemija u budućnosti. Preporuke su date širokom krugu aktera: Gradu Bergenu (kao vlasniku), Vodovodu (kao operateru), Agenciji za javno zdravlje, Ministarstvima, lekarima opšte prakse i medicinskim službama, istraživačkim institucijama itd.

3 Akumulacija Vrutci - cvetanje cijanobakterija

Akumulacija Vrutci na reci Đetinji predstavlja glavno izvorište užičkog vodovoda koji snabdeva Grad Užice, okolna naselja i lokalnu industriju. Po prijavi građana koji su u uzvodnom delu akumulacije uočili crvenu mrlju veličine cca 0,5 ha, 14. decembra na teren su izašli predstavnici Gradskog zavoda za javno zdravlje (GZJZ) iz Užica i predstavnici Štaba za vanredne situacije. U dva od deset ispitanih uzoraka, GZJZ Užice je 19. decembra utvrdio prisustvo algi u pijaćoj vodi, pri čemu nije identifikovana vrsta. Decembra 26. ustanovljeno je prisustvo cijanobakterija u vodi iz gradske mreže. Na predlog Instituta za javno zdravlje Srbije, Mini-

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

starstvo zdravlja Republike Srbije, Republička sanitarna inspekcija donosi odluku o zabrani korišćenja vode za piće i pripremu hrane.

Planktothrix rubescens je potencijalno toksična cijanobakterija. Pigment fikoeritrin joj daje crvenu boju. U procesu fotosintetize može da koristi ceo spektar (od 400 do 700 nm) fotosintetički aktivne radijacije, zbog čega je prisutna i na velikim dubinama. Za razliku od većine cijanobakterijskih vrsta, može da koristi fosfor organskog i neorganskog porekla. Zbog toga ima veliku moć adaptacije i gde se jednom nastani, ostaje trajno ili veoma dugo. Karakteristična je za hladna jezera i akumulacije na velikim nadmorskim visinama, a pre svega za alpska jezera (Ženevsko jezero, Jezero Garda kod Verone, Jezero Bled u Sloveniji, Jezero Berže u Francuskoj, akumulacija Uvac u Srbiji itd.). Iskustva u svetu ukazuju da je nema u vodama, gde su koncentracije ukupnog fosfora ispod 10 mikrograma po litru.

Rezultati toksikoloških analiza koje su rađene u inostranstvu bili su negativni na prisustvo cijanotoksina u pijaćoj vodi. U međuvremenu, na cevovod sirove vode, povezan je cevovod koji zahvata vodu sa novoizgrađenog izvorišta "Sušička Vrela". Po ugledu na PPV Majdevo, uveden je predtretman jakim oksidacionim sredstvom (hlor dioksid) a sprovedeno je višednevno ispiranje cevovoda sirove vode i sekundarne vodovodne mreže od naslaga biofilma i cijanobakterija koje su "probile" peščane filtere. Nakon 43 dana zabrane, 7. februara, voda za piće je proglašena ispravnom. Novo iznenađenje desilo se polovinom jula, kada su u sirovoj vodi sa "Sušičkih vrela" i u vodi za piće ponovo otkrivene cijanobakterije i nematode. Izdata je nova zabrana za korišćenje vode za piće i kuvanje, koja je trajala 37 dana. I ovoga puta javnost je svu odgovornost svalila na JKP Vodovod.

Ovaj događaj ukazao je da i u slivu Sušice postoje određeni rizici, da postoje vodna tela u kojima su se nastanile cijanobakterije, što i nije veliko iznenađenje, jer u slivu ne postoje nikakve posebne mere zaštite. Alternativni zahvat sa "Sušičkih vrela" koji je završen u rekordnom roku pod veoma teškim meteorološkim uslovima, značajno je skratio vanredno stanje rada JKP Vodovod, i pokazao da treba da ostane - alternativni zahvat. Trajno rešenje treba tražiti u sanaciji akumulacije Vrutci.

Može se konstatovati da se ovaj slučaj razlikuje od epidemije u Bergenu po tome što se ovde ne zna istorija promene kvaliteta vode u akumulaciji Vrutci. Tadašnji monitoring koji je bio u nadležnosti Agencije za zaštitu životne sredine, bio je neadekvatan, sa dosta prekida u nizovima podataka, tako da se o početku i uzrocima cvetanja cijanobakterije *Planktothrix rubescens* može samo nagadjati.

U upravljanju akumulacijom, apsolutni prioritet je imala zaštita od poplava, a odskora i proizvodnja električne energije na mini hidroelektrani koja je montirana na cevovodu vodozahvata čiste vode. Nivo vode u akumulaciji je obaran u kasnu jesen zbog prihvatanja prolećnih velikih voda, a zavisio je i od rada minihidroelektrane. Pored toga, umesto da MHE bude priključena na temeljni ispust i ispušta iz akumulacije vodu siromašnu kiseonikom i bogatu fosfatima, što bi pogodovalo ekosistemu akumulacije, ispuštana je izbistrena voda bogata kiseonikom. U upravljanje ribljim fondom, koje je povereno privatnoj firmi preko javnih nabavki, niko iz vodovoda i lokalne uprave nije imao uvid. Takodje, većina republičkih institucija je pokazivala nezainteresovanost da pomogne lokalnoj upravi oko sprečavanja ilegalne gradnje i uspostavljanja režima zaštitnih zona oko akumulacije.

Sa druge strane, pomoć susednih gradova, njihovih javnih preduzeća i zdravstvenih ustanova u obezbeđivanju cisterni za dopremu pijaće vode i u zbrinjavanju težih pacijenata, bila je izvanredna. Posebno se ističe pomoć Javnog preduzeća vodovod iz Kruševca, koji su

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

imali slične probleme u prošlosti. Njihova stručnost i podrška bili su od velike pomoći Vodovodu Užica.



Slika 6. Pas koji pije crvenkastu vodu u blizini značke V2 (levo), i vidra (*Lutra lutra*) koja pliva uzvodno od brane u zoni debele skrame cijanobakterija (Figure 6. A dog drinking (reddish) water from reservoir Vrutci (left), and an otter (*Lutra lutra*) swimming upstream of the dam in a zone of thick layer of cyanobacteria.)

JVP Srbijavode, kao odgovorno za upravljanje akumulacijom Vrutci, predložilo je Ekspertsku grupu, koja je polovinom januara 2014. imenovana rešenjem Gradonačelnika Užica. Ekspertska grupa (koja se negde zove i Stručna komisija Vlade Srbije) je sastavila Integralni Projektni zadatak za dugoročnu sanaciju akumulacije Vrutci i rekonstrukciju postrojenja na Cerovića brdu, koji je jednoglasno usvojen 24. februara u Užicu. Rad na realizaciji usvojenog Projektnog zadatka nije počeo sve do ponovne pojave cijanobakterija i nematoda u vodi za piće, kada je tim Instituta Jaroslav Černi dostavio Izveštaj o uzrocima pojave povećanih koncentracija algi i nematoda u vodi za piće, u kojem je predložio faznu realizaciju Integralnog projekta, na nivou Glavnog projekta, gde bi u prvoj fazi rekonstrukcije obuhvatili procesi bistrenja, taloženja i predozonizacije, a u drugoj fazi proces adsorpcije aktivnim ugljem. Nakon usvajanja Projektnog zadatka prve faze, projekti monitoringa i sanacije akumulacije Vrutci, kao i rekonstrukcije postrojenja, dodeljeni su Insitutu Jaroslav Černi.

Tokom 2015 godine, nadležno Ministarstvo je zahtevalo da se poštuje zakonska procedura i da se najpre radi Idejni projekat, pa onda Projekat za građevinsku dozvolu, uz zadržavanje predložene faznosti izrade. Iako je više puta ukazivano na neprirodnu podelu po faznosti i na neuobičajenu praksu da se građevinska dozvola traži za nefunkcionalnu celinu, kojoj nedostaju bitni segmenti projektne dokumentacije (selektivni vodozahvat u akumulaciji, dovod vode do postrojenja, monitoring procesa, upravljanje, tretman mulja itd.), rad je nastavljen i Projekat prve faze rekonstrukcije postrojenja na Cerovića brdu je početkom 2016. godine ušao u završnu fazu dobijanja građevinske dozvole, a izvori finansiranja i početak realizacije su i dalje neizvesni.

3.1 Poređenje sa epidemijom u Bergenu

Poređenje sa situacijom u Bergenu nije bilo moguće uraditi, jer za slučaj cijanobakterija u užičkom vodovodu, nikada nije urađena objektivna i sveobuhvatna analiza. Pre nešto manje od dve godine, urađena je preliminarna analiza [3] u očekivanju objektivne analize, koju bi trebalo da uradi, u to vreme, upravo imenovana, Ekspertska grupa.

Situacija sa upravljanjem rizikom u vodovodnom sistemu Užica može se prikazati shematski (Slika 7). Na definisanim delovima/podsistemima, sliv reke Djetinje do profila brane, akumulacija Vrutci, vodozahvat sirove vode kojim voda prolazi na svom putu do korisnika, postoji mogućnost da u nju dospeju zagadjujuće materije ili mikroorganizmi koji mogu da ugroze bezbedno vodosnabdevanje.

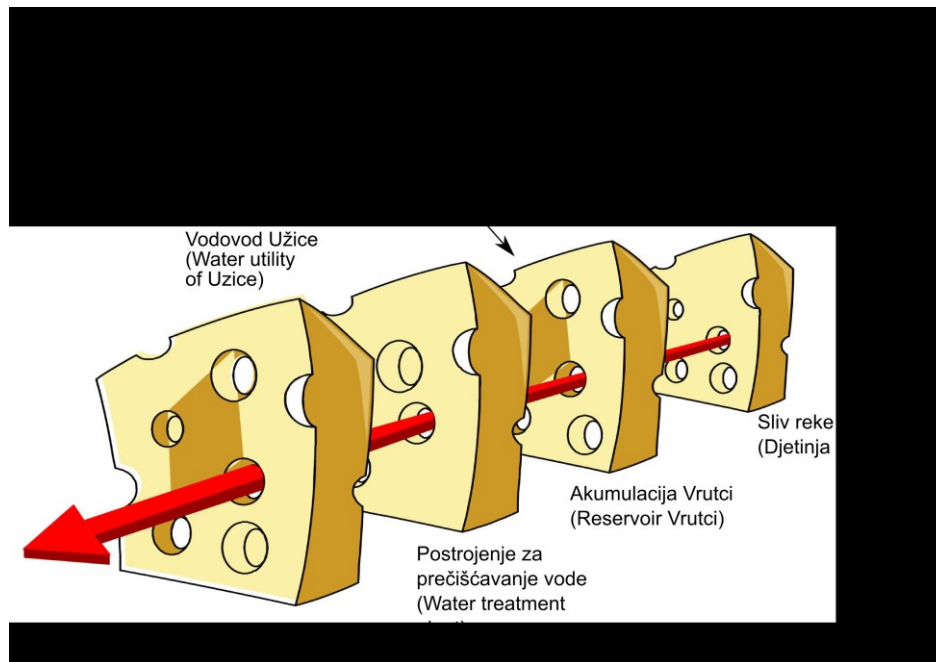
Zbog toga bi trebalo da postoje i da se sprovode određena ograničenja aktivnosti, da se sprovode kontrole i da se razmenjuju informacije i koordiniraju aktivnosti. Međutim, to u praksi nije bilo tako, umesto projektovanih barijera/prepreka, imamo fiktivne prepreke koje više liče na sir, čija efikasnost je značajno umanjena zbog ne postojanja komunikacije i koordinacije aktivnosti zainteresovanih strana na slivu reke Djetinje i u akumulaciji Vrutci.

Sliv reke Djetinje i aktivnosti u njemu su van nadležnosti vodovoda. Aktivnosti koje ugrožavaju sistem su:

1. Nelegalna gradnja vikendica, seoskih kuća itd. (prijavljivano nadležnima u Republici, bez odgovora).
2. Otpad i neprečišćene otpadne vode, iz hotela na Tari, iz naselja Kremna, Bioska, usled poljoprivrednih aktivnosti, ispaša stoke itd.
3. Neodgovarajuća kontrola erozije. Navodno, jedan od razloga zašto nije dobijena upotrebna dozvola za branu i akumulaciju je i to što izgrađene sve projektovane protivbujične pregrade. Pored toga pre par godina bilo je nekoliko šumskih požara, koji su povećali eroziju i oticaj, kao i sadržaj mineralnih materija u oticaju kišnih voda.

Akumulacija Vrutci je u nadležnosti više institucija, koje ne koordiniraju svoje akcije sa Vodovodom:

1. Zbog sprovođenja plana odbrane od poplava, nivo vode u akumulaciji je obaran, što se pokazalo da nije baš povoljno za stvaranje i održavanje stabilnog i funkcionalnog vodnog ekosistem.
2. I pored protivljenja Javnog preduzeća Srbijavode, Užičkog vodovoda, građevinska dozvola kao i koncesija za subvencionisano korišćenje hidropotencijala, dodeljeni su privatnim investitorima. Korišćenje hidropotencijala, je takodje dovelo do značajnih promena nivoa vode u akumulaciji, sa istim posledicama po ekosistem akumulacije.
3. Da bi smanjili troškove izgradnje, mini hidroelektrana je priključena na cevovod čiste vode, umesto na temeljni ispust, što bi bilo normalno i što je po projektu.
4. Agencija za zaštitu životne sredine koja je odgovorna za monitoring, nije to radila kontinualno. Uzorkovano je tri puta u 2012. godini, rezultati objavljeni na sajtu Agencije u avgustu 2013. Za 2013, nije planirano uzorkovanje, pa nije ni uradjeno.
5. Upravljanje ribljim fondom nije radjeno na domaćinski način.



Slika 7. Realna situacija u upravljanju rizikom JKP Vodovod Užice (model Švajcarskog sira)
 Figure 7. Realistic view of Risk management of WSS of Užice- “Swiss cheese model”.

Vodozahvat i postrojenje za tretman vode (nadležnost Javnog preduzeća Vodovod, mesto gde uzorkuje i Gradski zavod za javno zdravlje). Analiza rizika može stati ovde, jer kada cijanobakterija probije sve barijere do ove tačke, nema šta da je spreči od ulaska u vodovodnu mrežu. Za rekonstrukciju vodovoda postoji projektna dokumentacija iz 2004. godine, koja zbog nedostatka sredstava nije realizovana.

Tokom vanrednog stanja, postupajući u skladu sa ozbiljnošću situacije, određen je Projektant kome je dodeljen Glavni projekat rekonstrukcije (i proširenja) postrojenja prve faze, po Integralnom projektu sanacije akumulacije Vrutci i rekonstrukcije postrojenja na Cerovića brdu koji je pripremila Ekspertska grupa/Stučna komisija Vlade Srbije. Zbog nedostatka finansija, projekat je podeljen u dve faze, prva, od ulaska vode u postrojenje do ozonizacije, a druga, od ozonizacije, preko aktivnog uglja, laboratorije, monitoringa procesa i upravljanja, završne dezinfekcije.

Nadležno ministarstvo je zahtevalo poštovanje procedure i izradu Idejnog projekta, pa onda, Projekta za građevinsku dozvolu. Idejni projekat I faze je dobio pozitivno mišljenje Republičke revizione komisije. JP Vodovod je angažovao Tehničku kontrolu za pregled projektne dokumentacije I i II faze, i postavio određena (veoma teška) pitanja na koja Tehnička kontrola mora da odgovori. Priča još nije završena, a prošlo je skoro dve godine.

4 Završne napomene

Prikazana su dva primera havarija na sistemima vodosnabdevanja, primeri novih izazova sa kojima se suočavaju savremeni vodovodi, ali i novih mogućnosti koje se otvaraju pred hidrograđevinskim inženjerima.

Epidemija izazvana protozom *Giardia* u Bergenu detaljno je objektivno istražena i stavljena na uvid javnosti. Interni izveštaj Krizne grupe (koju je formirao Vodovod) i javni izveštaj nezavisne Radne grupe nisu se razlikovali mnogo.

Na osnovu činjenice da određeni broj vodovoda u Norveškoj takodje ne ispunjava zahteve po pitanju zaštite od prodora patogenih mikroorganizama, Radna grupa je zaključila da se sličan incident mogao desiti i na drugim mestima u Norveškoj. Radna grupa je utvrdila da ima prostora i potrebe da se unapredi postojeća praksa u upravljanju ovakvim situacijama i date su preporuke kako bi se smanjio rizik pojave hidričnih epidemija u budućnosti. Preporuke su date širokom krugu aktera: Gradu Bergenu (kao vlasniku), Vodovodu (kao operateru), Agenciji za javno zdravlje, Ministarstvima, lekarima opšte prakse i medicinskim službama. Radna grupa je posebno insistirala da uvođenje poboljšanog tretmana vode ni na koji način ne sme da utiče na ublažavanje ili ukidanje ograničenja na aktivnosti, izgradnju i instalacije u slivu/zaštitnoj zoni izvorišta, koji mogu da ugroze kvalitet vode.

Smatramo da je nezahvalno ukazivati na to šta je moglo da se uradi, a šta nije, ako ne postoji objektivna i nepristrasna analiza svega šta je dovelo do dešavanja krajem 2013. i u prvoj polovini 2014. godine. Tada bi moglo da se komentariše, da li je bilo moguće ustanoviti izvor zagađenja, kada i odakle su cijanobakterije došle, kao i ko je odgovoran za njihovo prisustvo u sistemu sirove vode.

Sa druge strane, solidarnost, pomoć susednih gradova, njihovih javnih preduzeća i zdravstvenih ustanova u obezbeđivanju cisterni za dopremu pijaće vode i u zbrinjavanju težih pacijenata, bila je izvanredna. Posebno se ističe pomoć Javnog preduzeća vodovod iz Kruševca, koji su imali slične probleme u prošlosti. Uz pomoć Vojske Srbije, cevovod od Sušičkih vrela (oko 800 m), uradjen je u rekordno kratkom roku.

Literatura

1. Bartram J. et al. (2009) Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers. WHO, Geneva.
2. Hruday S.E., Hruday E.J. and Pollard S.J.T. (2006) Risk management for assuring safe drinking water, *Environmental International*. Vol. 32, 2006, pp. 948-957.
3. Ivetić M., Kostić D. (2014) Analiza i ocena rizika u funkciji bezbednog vodosnabdevanja - Primeri iz sveta i Srbije, Konferencija SGP 2014, Andrevlje.
4. Johansen I.L., (2010), Foundations of risk assessment, Report No. ROSS (NTNU) 201002, NTNU, Trondheim.
5. Kostic, D., Blagojevic, A., Subakov Simic, G., Ivetic, M., Naunovic, Z. (2014), Jesenje cvetanje potencijalno toksične cijanobakterije *Planktothrix rubescens* u višenamenskoj akumulaciji Vrutci, *Voda i sanitarna tehnika*. Vol. 44, br. 1, str. 5-12.UTVSI.
6. Kostic, D., Blagojevic, A., Subakov Simic, G., Naunovic, Z., Ivetic, M. (2014) Late Autumn Bloom of Potentially Toxic Cyanobacteria *Planktothrix rubescens* in the Reservoir Vrutci (Serbia), 2nd Caspian International Aqua Technologies Conference, April 2014, Baku, Azerbaijan.
7. MacGillivray B.H. and Pollard S.J.T. (2008) What can water utilities do to improve risk management within their business functions? An improved tool and application of process benchmarking, *Environmental International*. Vol. 34, 2008, pp. 1120-1131.
8. Rostum J., November V. and Vatn J. (2008) Proactive Crisis Management of Urban Infrastructure, Final report, COST C19.

Mogući uzroci havarije cevovoda Makiš – (Petlovo brdo –) Mladenovac

Marko Ivetić¹

Aleksandra Krsmanović²

Ana Popović-Milijić³

APSTRAKT: Cevovod Makiš (- Petlovo Brdo) – Mladenovac, deo Regionalnog vodovoda Makiš – Mladenovac, počeo je da se gradi početkom devedesetih godina prošlog veka i nije još završen. Od ukupne dužine od preko 50 km, završeno je oko 18 km, a “u funkciji” je oko 5,6 km. U leto 2014. (u noći, 28/29. avgust), došlo je do pucanja cevovoda na mestu koje je, prema analizama prelaznih režima u originalnom projektu, bilo najmanje ugroženo. Na osnovu rezultata ispitivanja karakteristika cevog materijala (prednapregnute armirano betonske cevi, ND 1200, NP 11 bara), obilaska terena i ponovljenih analiza prelaznih režima u sistemu u sadašnjoj konfiguraciji, nije se moglo utvrditi šta je dovelo do havarije. Međutim, korisno je da su identifikovani i komentarisani uslovi u kojima se havarija dogodila, koliko se oni razlikuju od projektovanih, a posebno su analizirane male promene koje imaju svoje “logično obrazloženje”, a koje povećavaju rizik od hidrauličkog udara. Takođe, konstatovano je da sadašnji monitoring sistema, kao deo informacionog upravljačkog sistema BVK, nije dovoljan da bi se rekonstruisali događaji u prelaznim režimima i utvrdili mogući uzroci havarije.

Ključne reči: hidraulički udar, prelazni režimi, havarija cevovoda, zaštita od hidrauličkog udara, bezbednost vode i vodosnabdevanja

Possible causes of the Makiš – (Petlovo Brdo –) Mladenovac pipeline accidental burst

ABSTRACT: The main part of the Regional Water Supply System, “Makiš – Mladenovac”, the pipeline from the Petlovo Brdo Reservoir to Mladenovac, has been constructed from the early nineties of the last century, without being completed so far. Out of more than 50 km of total length, only 18 km has been completed, and approximately 6 km, has been in operation. An accidental burst happened in summer 2014. (during the night 28/29. August), at the place which was, in the original design, considered as safe. Forensic analysis of the accident, which was based on the field inspection, laboratory tests of the pipe material (pre-stressed reinforced concrete pipes, ND 1200, NP 11 bar), assessment of the records of monitored pressures and flows in the affected part of the system, hydraulic transient analyses of the system under the present conditions, didn't provide any convincing evidence of the possible clue of the accident. However, several major modifications of the system working conditions have been identified, as well as, allegedly small modifications with “logical explanation”, which both increase the vulnerability of the system. Also, it was concluded that the present monitoring of the system, as a key source of data for the Management of the Belgrade Water Supply System, does not provide sufficient data for this kind of the analysis.

Keywords: Water hammer, hydraulic transients, pipeline accidental burst, pressure surge control, water and water supply system safety.

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

² JKP Beogradski vodovod i kanalizacija

³ JKP Beogradski vodovod i kanalizacija

1 Uvodna razmatranja

U nizu velikih infrastrukturnih projekata planiranih i započetih „u dobra stara vremena“, svoje mesto ima i Regionalni vodovod Makiš - Mladenovac, koji je počeo da se gradi početkom devedestih godina prošlog veka. Ključni deo tog sistema je cevovod od preko 50 km, od čega je izgrađeno oko 18 km, neki delovi pre 25 godina. Razvojna služba JKP BVK čini napore da u okviru domaćinskog gazdovanja infrastrukturom, sve delove sistema stavi u funkciju, što nije uvek jednostavno. U ovom trenutku, u funkciji je oko 5.7 km cevovoda. Iako se taj deo u nomenklaturi vodi kao cevovod AB 1200 (prednapregnuti armirano betonski cevovod 1200 mm, nazivnog prečnika) u svakodnevnoj (neformalnoj) komunikaciji on se referiše kao cevovod Makiš - Mladenovac.

2 Prethodne analize (Idejni projekat)

U vreme projektovanja cevovoda (Idejni projekat, 1989, Hidroprojekat Beograd) uradjena je Analiza prelaznih režima sa predlogom mera za zaštitu od hidrauličkog udara, imajući u vidu identifikovane scenarije koji mogu ugroziti funkcionalnost i integritet celog sistema u konačnoj konfiguraciji. Iako je planirano fazno izvodjenje sistema, zaključeno je da je u toj fazi izrade projektne dokumentacije, najveća opasnost od oštećenja opreme i cevovoda, kada sistem radi pri maksimalnom kapacitetu. Razmatrani su slučajevi manipulacije zatvaračima na priključcima rezervoara (usputnim i na kraju sistema, rezervoar Rajkovac), kao i kada pumpe u CS Vrčin ispadaju iz pogona i ponovo se uključuju.

Po preporuci Investitora, predviđeno je korišćenje prethodno napregnutih armirano betonskih cevi iako je njihova deklarirana klasa/nosivost bila u jednom delu prevaziđena. Nizvodno od CS Vrčin, predviđene su duktilne cevi, tada još nedovoljno poznate, ali mnogo hvaljene.

Iako je nekoliko puta bilo prilike da se prvobitni koncept projekta prilagodi trenutnim razvojnim i finansijskim mogućnostima, i cevovod stavi u funkciju, to se nije desilo.

3 Havarija (28/29. avgust 2014. godine)

U trenutku havarije, cevovod od rezervoara „Petlovo brdo“ do Mladenovca, nije radio u uslovima koji su predviđeni originalnim projektom [R1]. Od projektovanih 54 km, izgrađeno je manje od 20 km, a u funkciji je bilo 5,6 km.

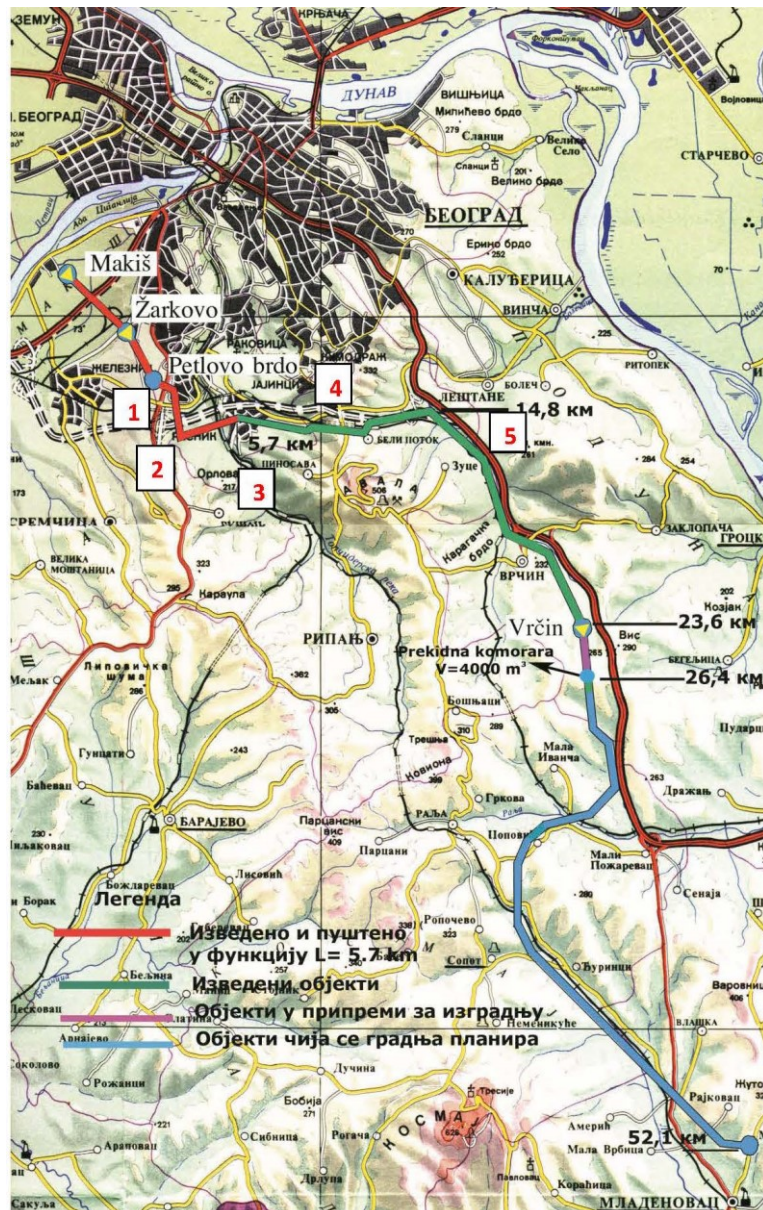
Umesto rezervoara „Petlovo brdo“, sa slobodnom površinom vode, kao fiksnim graničnim uslovom, uzvodni granični uslov je postala CS „Žarkovo 2“, a cevovod u blizini priključka je najisturenija tačka na podužnom profilu cevovoda. Verovatno pravilno projektovana zaštita od hidrauličkog udara u CS, sa rezervoarom „Petlovo brdo“, kao nizvodnim graničnim uslovom, gubi smisao, jer je rezervoar „Petlovo brdo“ bio isključen. Kod svakog ispada iz pogona pumpi u CS „Žarkovo 2“, na mestu gde se 29. avgusta 2014. godine desila havarija, javljao se vakuum.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Obilaskom terena nakon havarije utvrđeno je da zaštita od hidrauličkog udara, vazдушna komora i održavanje početne zapremine vazduha, nije funkcionisala u projektovanim uslovima.

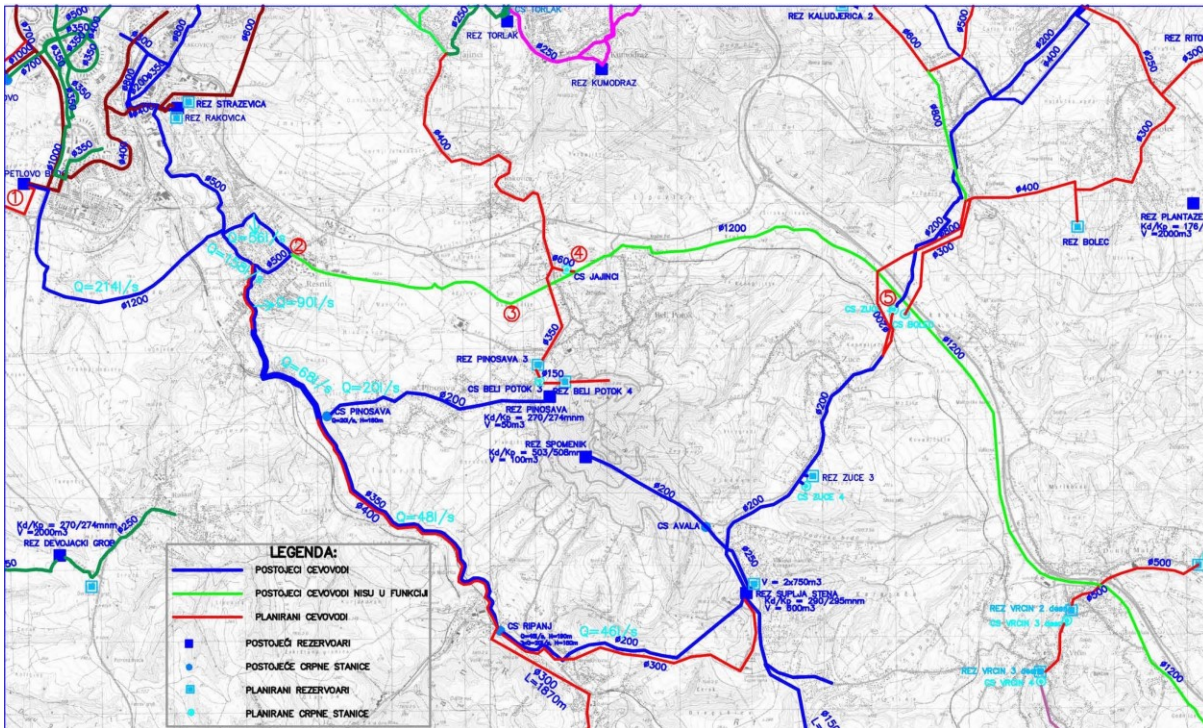
Sa druge strane, rezultati ispitivanja uzoraka cevi na mestu havarije ne ukazuju na bilo kakve nepravilnosti, gubitke nosivosti, bilo betona, bilo armature.

U Tehničkom sistemu upravljanja BVK zabeleženi su poremećaji proticaja i pritiska u vremenu kada se pretpostavlja da se havarija desila. Na CS „Žarkovo 2“, zabeleženo je samo da je 6:00, umesto pumpe 3, uključena pumpa 4. Nikakve informacije ni beleške koje bi mogle da upute na uzrok, nije bilo.

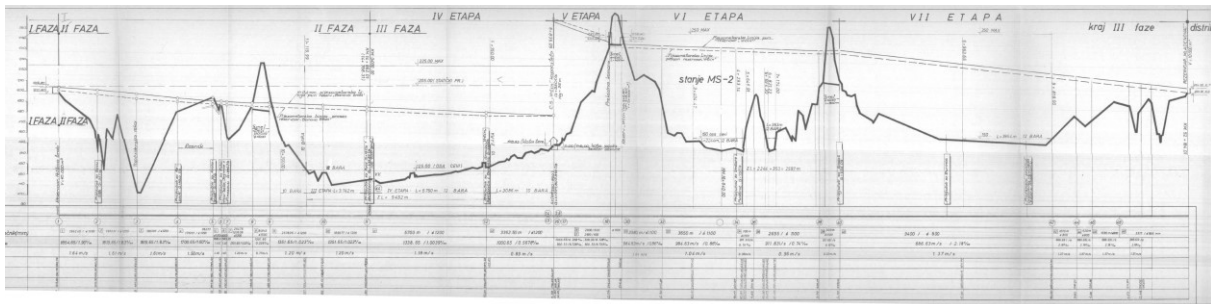


Slika 1. Regionalni vodovod: Makiš (R. Petlovo brdo) - R. Mladenovac [1].
Figure 1. Water Supply System: Makiš (R. Petlovo brdo) – R. Mladenovac” [1].

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

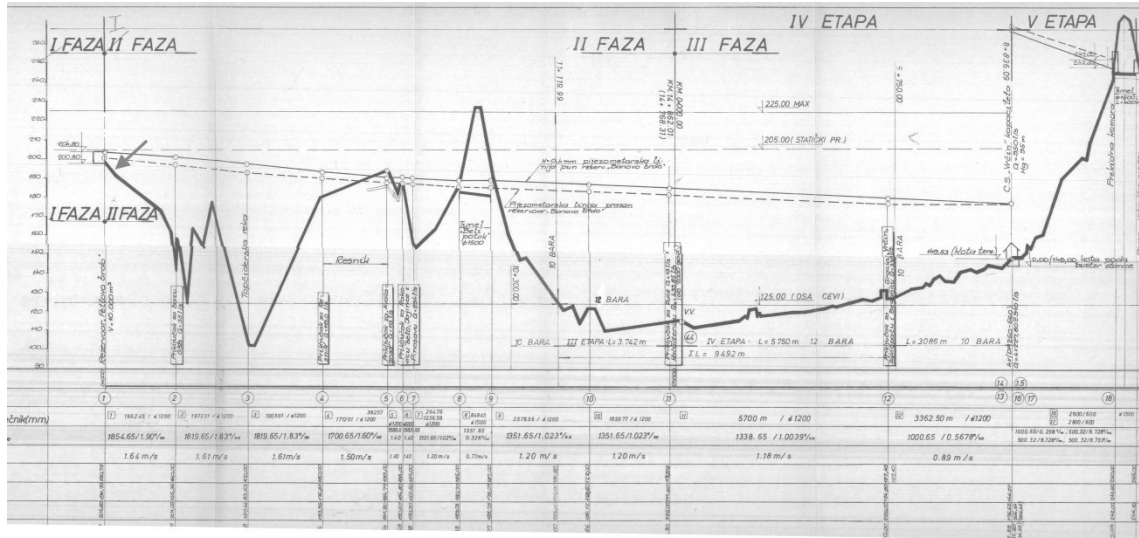


Slika 2. Regionalni vodovod (od (1) do (2)), kao deo distributivne mreže Beograda.
Figure 2. Regional WSS (between (1) and (2)), as a part of Belgrade distribution network.

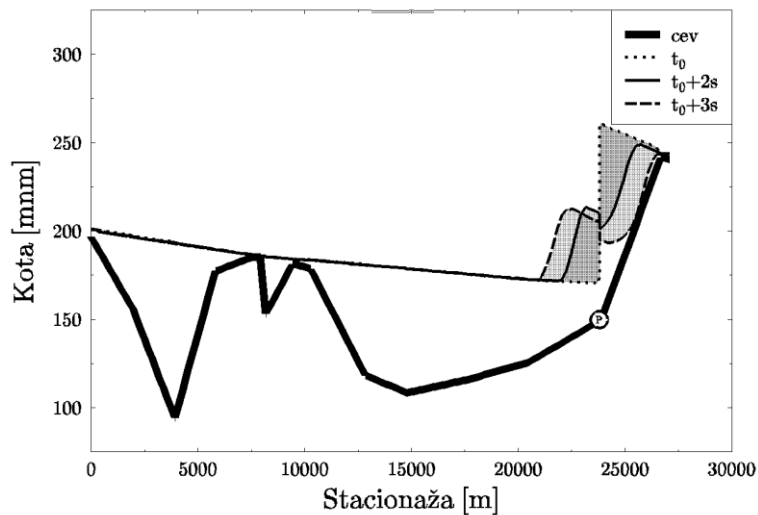


Slika 3. Podužni profil cevodova, od R. Petlovo brdo do R. Mladenovac [1].
Figure 3. Longitudinal profile of the pipeline R. Petlovo brdo – R. Mladenovac [1].

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

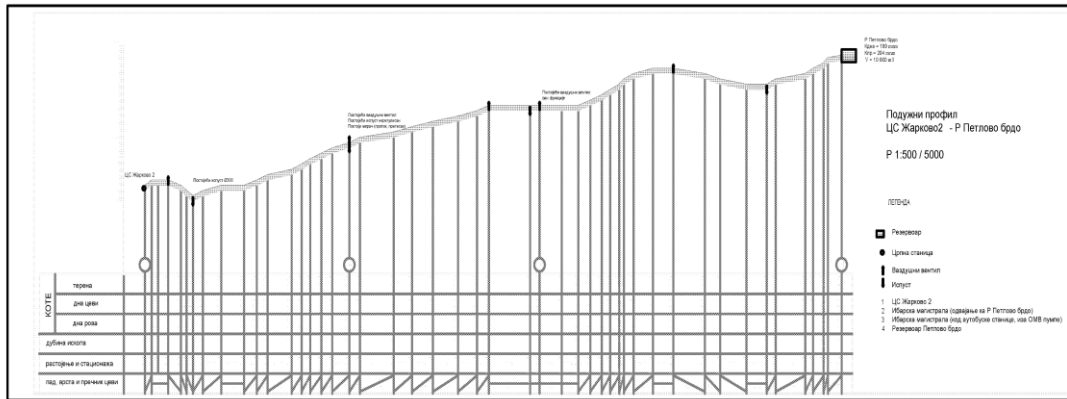


Slika 4. Podužni profil cevovoda analiziran u Idejnom projektu iz 1989 [1].
Figure 4. Section of the pipeline analysed in the original design [1].

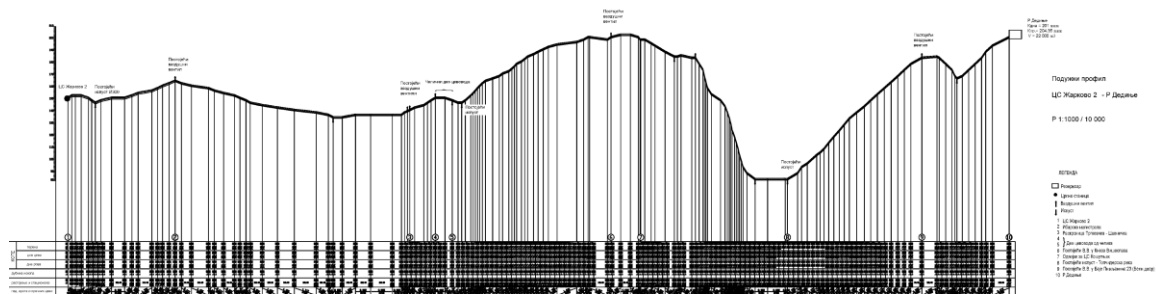


Slika 5. Ispad iz pogona pumpi u buster PS Vrčin - situacija merodavna za dimenzionisanje zaštite od hidrauličkog udara [5].
Figure 5. Power failure of pumps in PS Vrčin - scenario relevant for surge control design [5].

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

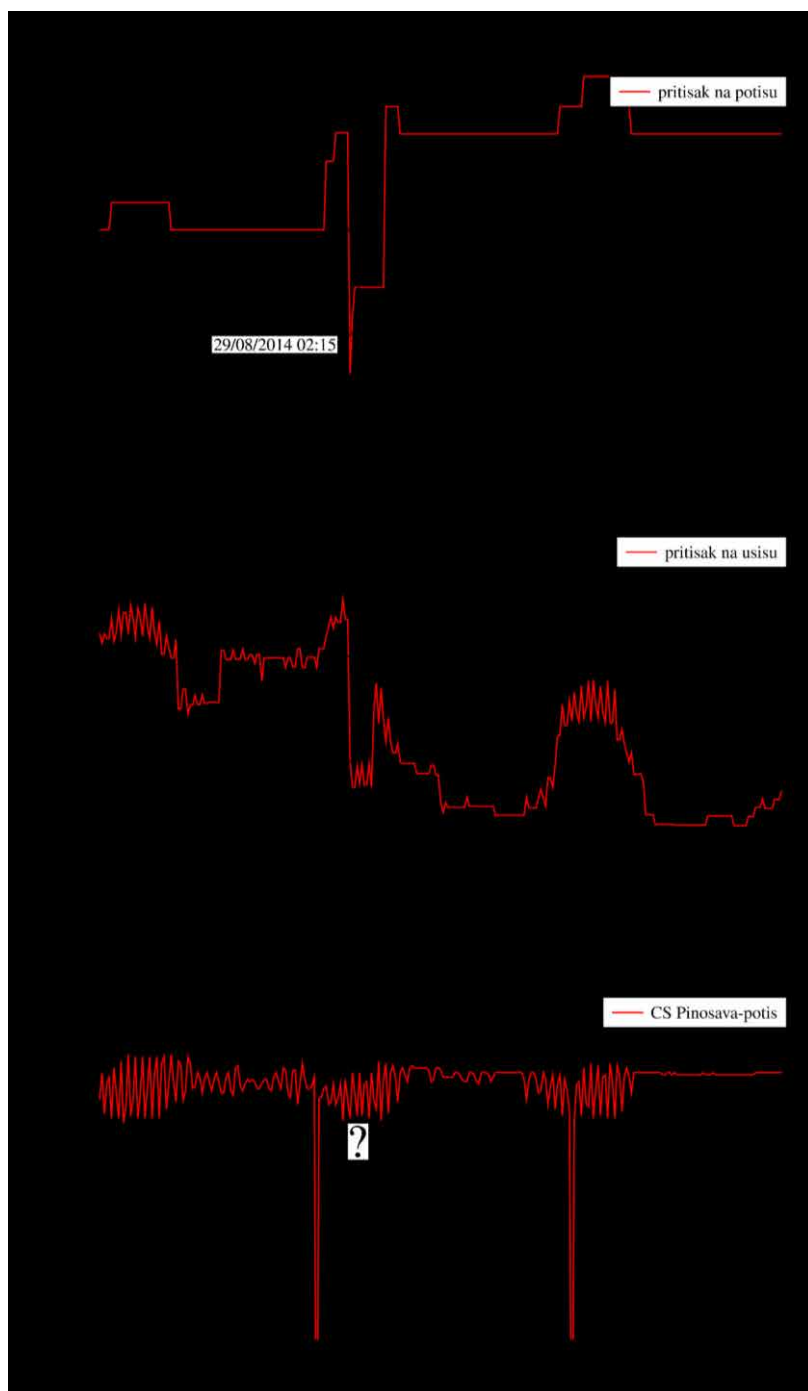


Slika 6. Poduzni profil cevovoda od PS Žarkovo 2 do R Petlovo brdo.
Figure 6. Longitudinal profile from PS Žarkovo 2 to R Petlovo brdo.



Slika 7. Poduzni profil od CS Žarkovo 2 do rezervoara Dedinje, dužina L=12 km.
Figure 7. Longitudinal profile from PS “Žarkovo 2” to R Dedinje, length app. 12 km.

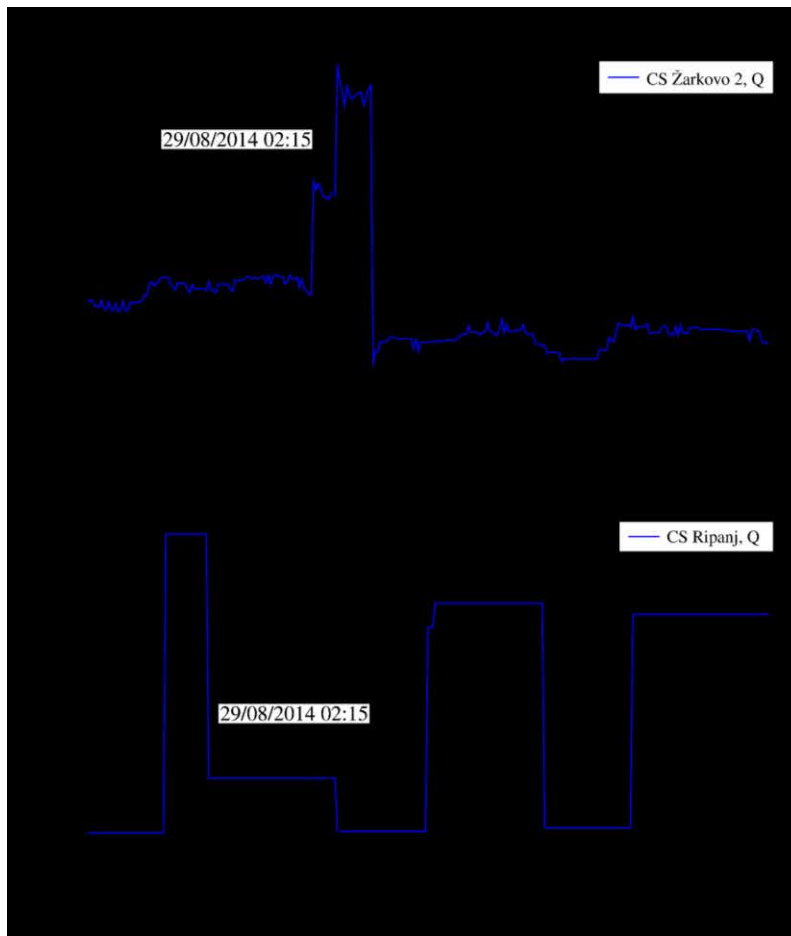
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



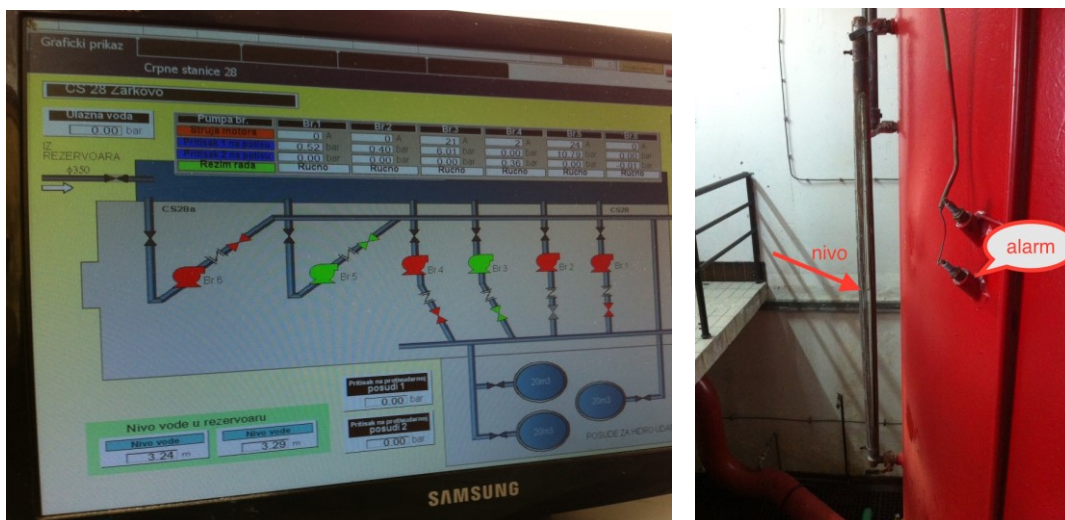
Slika 8. Zabeležene promene pritiska na potisu CS Žarkovo 2, usisu CS Ripanj i potisu CS Pinosava, u periodu kada se desila havarija. (JKP BVK).

Figure 8. Recordings of pressure at characteristic sections: discharge line of PS Žarkovo 2, suction side of PS Ripanj, and discharge line of PS Pinosava (28/29 Aug. 2014).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 9. Zabeležene promene proticaja u vreme havarije: CS Žarkovo 2 i CS Ripanj.
Figure 9. Recordings of flow rates at PS Žarkovo 2, and PS Ripanj.



Slika 10. Komandna tabla PS Žarkovo 2 (levo), protivudarne posude na potisnom cevovodu.
Snimljeno u septembru 2014. (M. Ivetić).
Figure 10. Control screen of PS Žarkovo 2 (left), surge tanks on the discharge line. (M. Ivetić)



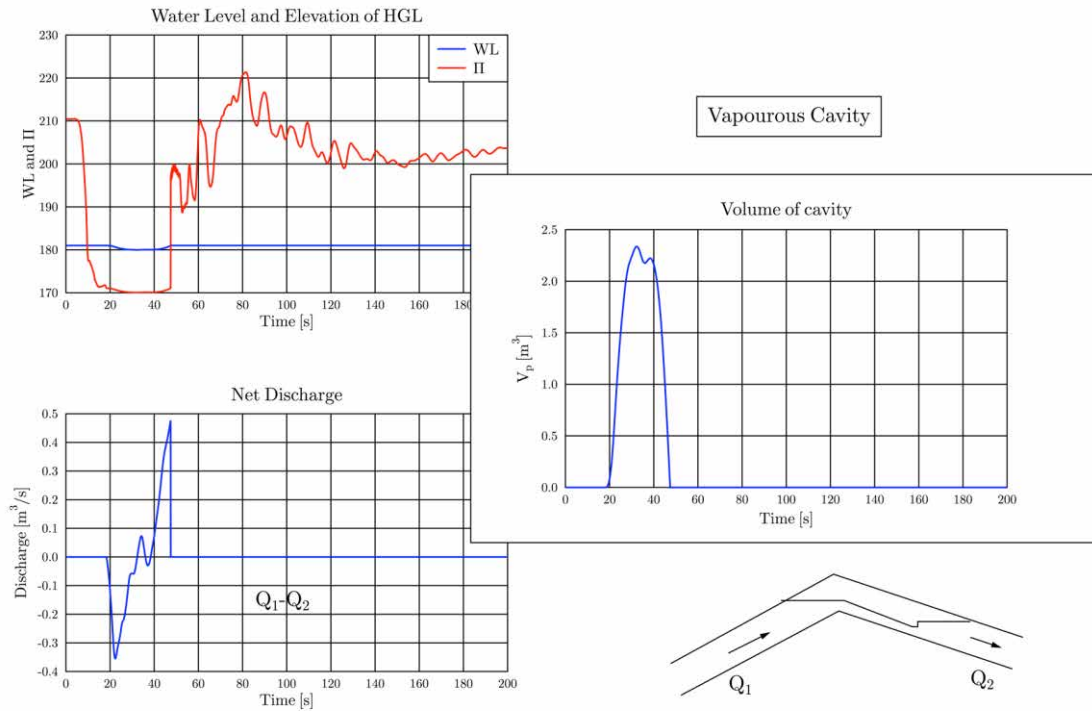
Slika 11. Mesto havarije cevodova AB1200 u blizini rezervoara “Petlovo brdo”.
Figure 11. Ruptured reinforced pipe DN 1200, near the “Petlovo brdo” reservoir.

4 Rezultati analize - pokušaj rekonstrukcije događaja

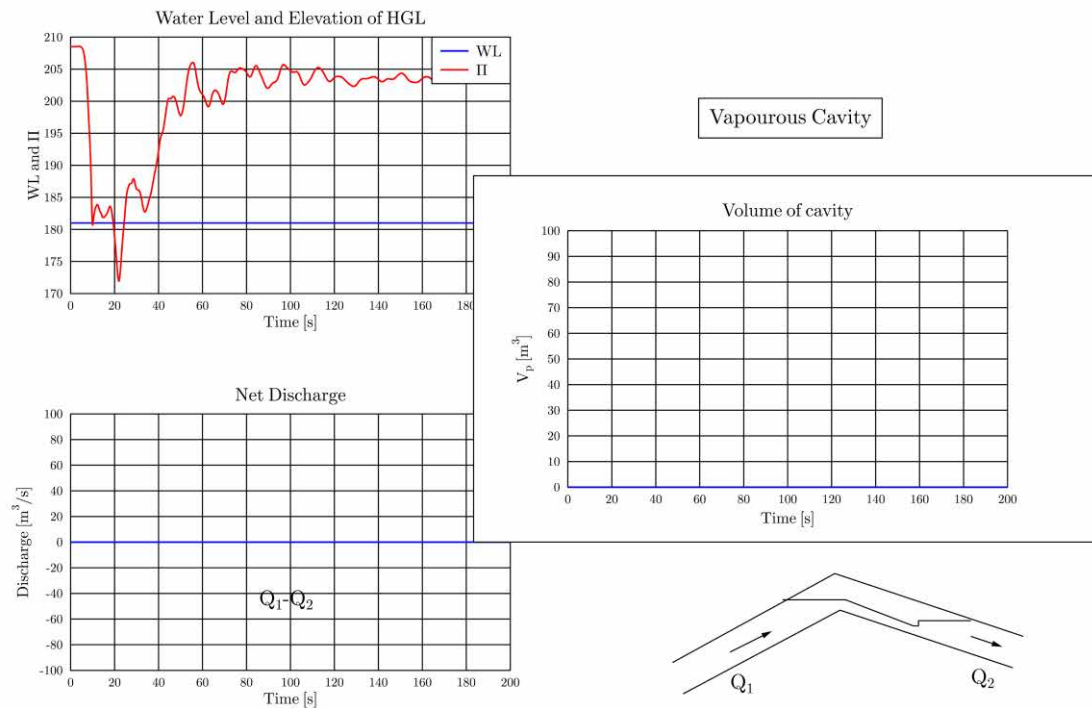
Rezultati simulacije ispada iz pogona pumpe 3 u PS Žarkovo 2, kao mogućeg uzroka havarije, ukazuju da se namestu havarije javio vakuum i kaviteta ispunjen vodenom parom, maksimalne zapremine oko 2 m³, koji je posle nekog vremena nestao. Pojava kaviteta (tzv, raskidanje stuba tečnosti u cevi) i njegov nestanak može da dovede do značajnog povećanja pritiska i ozbiljnih havarija. Međutim, u numeričkim simulacijama za ovaj slučaj, povećanje pritiska na mestu nastanka kaviteta nije prelazilo 6 do 7 bara. To nikako ne isključuje mogućnost da se havarija i desila pri relativno niskim pritiscima, jer je u prošlosti bilo sličnih havarija cevodova od istog materijala.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

BVK - Havarija AB1200 kod rezervoara "Petlovo brdo" (29.08.2014.)

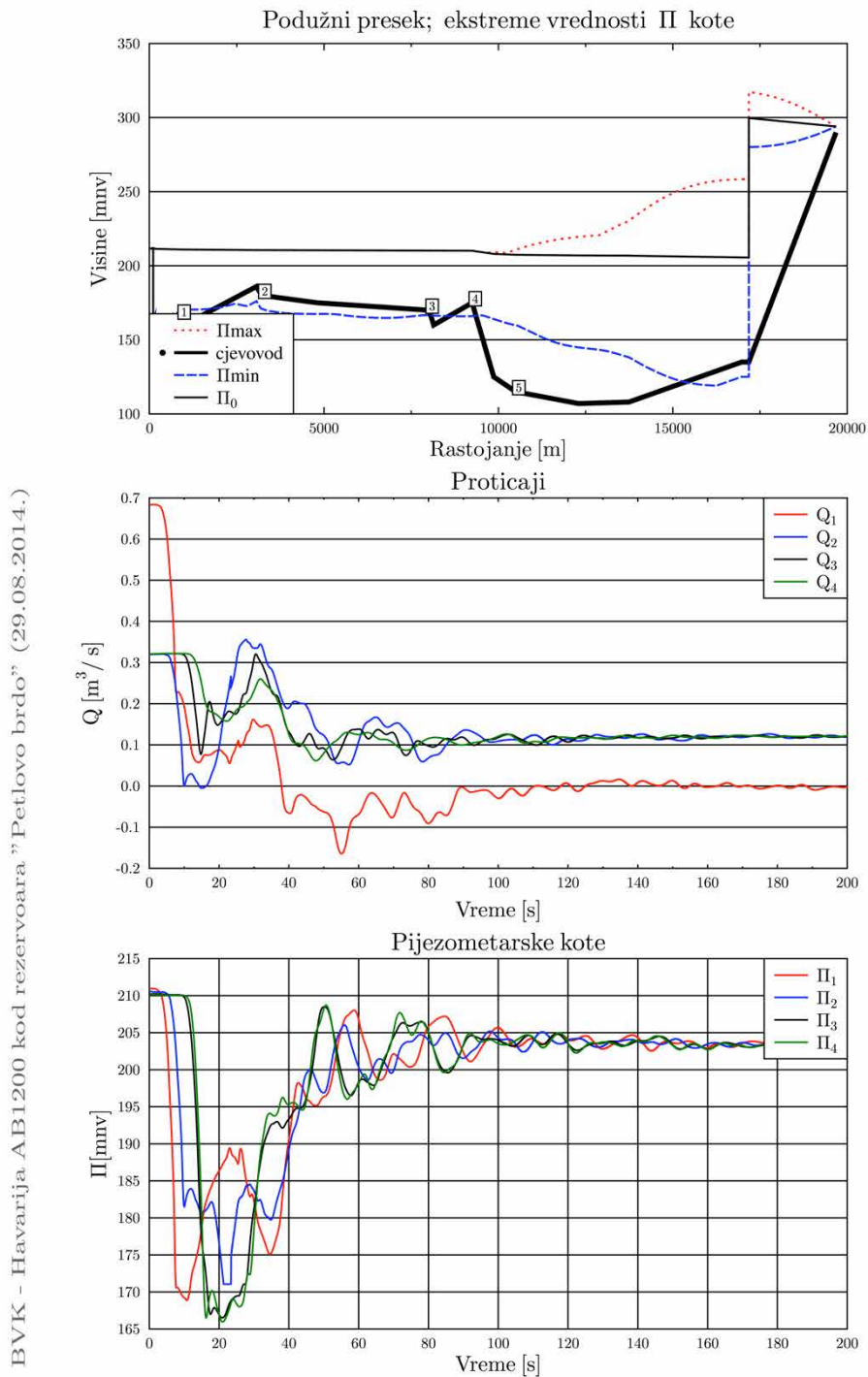


BVK - Havarija AB1200 kod rezervoara "Petlovo brdo" (29.08.2014.)



Slika 12. Rezultati proračuna ispada pumpi u CS Žarkovo 2. $V_0 = 13\text{m}^3$,
Rezervoar "P. Brdo" isključen (gore), priključen (dole).
Figure 12. Pump power failure PS Žarkovo 2; $V_0 = 13,5 \text{ m}^3$, with R. P. Brdo (lower).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 13. Rezultati proračuna ispada iz pogona pumpi u CS Žarkovo 2. Početna zapremina vazduha u komori $13 m^3$, rezervoar „Petlovo Brdo“ isključen.

Figure 13. Numerical simulation of pump power failure in PS Žarkovo 2 (HYTRA). Initial air volume in the air chamber $13 m^3$, Reservoir “Petlovo brdo” disconnected.

5 Zaključak

Ono što sigurno nije valjalo je sledeće:

Isključivanje rezervoara Petlovo brdo, da bi se uštedelo nekoliko metara pumpanja na PS Pinosava, čiji kapacitet je značajno manji od kapaciteta „PS Žarkovo 2“, 40 puta.

Osoblje zaduženo za neposredno upravljanje PS, nije upoznato sa projektovanim režimima rada.

Podaci koji se sakupljaju za potrebe upravljanja distribucijom vode i naknadnih analiza, nisu dovoljni za analizu prelaznih režima i rekonstrukciju uzroka havarije cevovoda.

Posao “eksperta” koji treba da nađe objašnjenje za havariju na cevovodu desilo, kada se havarija desila, obično je lakši nego kada u fazi projektovanja treba predvideti sve moguće (a realne) opasne situacije i projektovati odgovarajuću zaštitu od hidrauličkog udara koja treba da spreči bilo kakvu havariju. U ovom slučaju i taj lakši zadatak nije bilo moguće rešiti do kraja. U odnosu na projektovanu konfiguraciju iz Idejnog projekta iz 1989 (1), za koju je projektovana zaštita od hidrauličkog udara (2), deo sistema, cevovod od oko 6 km (od projektovanih 54 km) je radio u uslovima, koje je teško bilo zamisliti u vreme izrade projekta. Teško je bilo zamisliti da će proći više od 25 godina, a da sistem, kao ni neki njegovi delovi izgrađeni pre više od 20 godina, neće biti u funkciji.

Ono što je mnogo realnije i lakše, pre bilo kakve promene konfiguracije vodovodnog sistema, ili njegovog dela, uslova u kojima će da radi, treba razmotriti i proceniti i rizike od hidrauličkog udara.

Ovaj slučaj pokazuje da je neophodno uspostaviti redovnu kontrolu funkcionisanja i stanja opreme za zaštitu od hidrauličkog udara, kao i monitoring prelaznih režima (snimanje promena pritiska sa promenljivom brzinom uzorkovanja), za početak u blizini većih pumpnih stanica.

Literatura

1. Axworthy D.H., Karney B.W., (1998), Transient Analysis with Time-Decoupled Pumping Station, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, No. 3, 301-306.
2. Chaudhry H., (2014), Applied Hydraulic Transients, 3rd Edition, Springer - New York.
3. Feković R., Đukanović M. (1989), Idejni projekat Regionalnog vodovoda Makiš – Mladenovac, RO Hidroprojekat – Hidrotehnika, Beograd.
4. Ivetić M., (1989), Hidraulička analiza prelaznih režima i zaštita od hidrauličkog udara vodovoda Makiš – Mladenovac, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
5. Ivetić M., (1996), Računska hidraulika – tečenje u cevima, Građevinski fakultet, Beograd.
6. Ivetić M., (1988 – 2002), HYTRA (HYdraulic TRansient Analysis), Beograd.
7. Ivetić M., (2004), Forensic transient analysis of two pipeline failures, Urban Water Journal, June 2004 (2-Vol. 1), pp 85-95.
8. Streeter W.L., Wylie B., (1978), Hydraulic Transients, McGraw Hill.
9. Sharp B.B., Sharp D. B., (2003), Water hammer: Practical Solutions, Butterworth Heinemann.

Dekompozicija vodovodne mreže primenom WatNC algoritma

Željko Vasilic¹
Miloš Stanić¹
Branislav Babić¹
Dušan Prodanović¹

APSTRAKT: Dekompozicija, odnosno podela vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja (OZB) je jedna od osnovnih aktivnosti za efikasno upravljanje vodovodnim sistemima. Činjenica je da su vodovodne mreže složene a njihova dekompozicija nije jednoznačna već može zavisi od različitih kriterijuma. S toga se prilikom definisanja zona u praksi često pribegava inženjerskim metodama probanja koje će dovesti do zadovoljavajućeg rešenja. U ovom radu se prezentuje efikasan automatski algoritam za podelu mreže na OZB. Algoritam se zasniva na teoriji grafova i može se primeniti na mrežama različite složenosti. Koriste se rezultati hidrauličkog proračuna da se odrede smerovi tečenja u cevima u toku 24-časovne simulacije. Algoritam ne zahteva intervencije na mreži kao što su uklanjanje i postavljanje zatvarača i cevi. Dekompozicija je zasnovana na kriterijumu pronalazanja zona koje će biti približno jednake veličine i povezane sa što manjim brojem cevi. Prikazaće se primena algoritma na realnom primeru vodovodne mreže grada Požarevca.

Ključne reči: Dekompozicija, vodovodna mreža, osnovne zone bilansiranja, agregacija, graf

Application of the WatNC algorithm for decomposition of water distribution networks

ABSTRACT: Decomposition of water distribution networks in clusters (zones, DMAs) has become important issue in managing water companies. The fact that network complexity is rising and decomposition could be governed by so many different criteria and limitations, usually results in arbitrary solution obtained by trial and error technique done by a local expert that “knows” a water distribution system. In this paper, efficient algorithm for water network decomposition will be presented. Algorithm is based on graph theory and can be used for decomposition of real size distribution networks. Algorithm only uses results of hydraulic simulation to determine orientation of pipes according to water flows during simulation period. It also does not require interventions in network, meaning closure of valves or blockage of pipes, it only tries to find decomposition of network that would make clusters of approximately equal size with small number of links that are connecting those clusters (DMAs).

Keywords: decomposition, water distribution network, DMA, aggregation, graph

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Institut za hidrotehniku i vodno ekološki inženjering,
zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

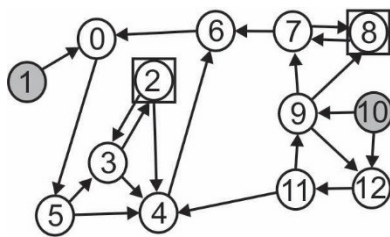
1 Uvod

Efikasno upravljanje vodovodnim preduzećima pre svega podrazumeva kontrolu vodnog bilansa i smanjenje gubitaka u sistemu. Usled toga potrebno je definisati osnovne zone bilansiranja (OZB, eng. District Meter Area - DMA) koje bi olakšale kontrolu vodnog bilansa i detekciju gubitaka u mreži (Ostfeld et al., 2008). Osim osnovne namene, mogu se koristiti i za regulaciju pritiska u mreži i kvalitetnije upravljanje resursima. OZB moraju biti definisane na jednostavan i logičan način da bi se zadovoljili primarni zahtevi za kontrolu bilansa i detekciju gubitaka. Međutim, da bi se to omogućilo često je potrebno izvršiti fizičke modifikacije na mreži kao što su ukidanje pojedinih cevi i zatvaranje zatvarača što može uticati na pritiske u sistemu i snabdevanje potrošača. Pouzdanost sistema, nivo zaštite od požara kao i zahtev za jednakim snabdevanjem u slučaju restrikcija su još neki od aspekata koji mogu biti ugroženi ovakvim intervencijama na mreži. Cilj je i da definisane zone budu adekvatne veličine, što je vrlo proizvoljan parametar i često se odnosi na broj veza unutar zone (do 3000) i dužinu mreže (do 30 km). Topologija mreže se neretko potpuno zanemaruje. Obzirom na veliki broj kriterijuma i ograničenja, u praksi je definisanje zona proces baziran na ekspertskom znanju, odnosno inženjerskom pristupu u toku koga se metodom probanja testiraju različita varijantna rešenja u potrazi za optimalnim. Ovo zahteva testiranje svakog alternativnog rešenja na hidrauličkom modelu. Iskustveno znanje se svakako ne može zanemariti i treba da bude uključeno u proces kreiranja zona, međutim, ovakav pristup zahteva dosta vremena a odabrano rešenje može biti daleko od optimalnog. Poželjno je da podela na zone ne bude jednodimenzionalna, već hijerarhijska (Schaeffer, 2007) u kojoj se svaka zona sastoji od podzona. Ovakav pristup je koristan jer se bilans može sagledavati na globalnom nivou, a zatim se svaka zona može posmatrati kao zasebna celina i dalje analizirati.

U radu se predstavlja algoritam namenjen za automatsku podelu vodovodne mreže na OZB (WatNC, eng. Water Network Clustering). Algoritam se bazira na primeni teorije grafova čiji se algoritmi vrlo efikasno mogu iskoristiti i za definisanje granatih i prstenastih delova mreže (Stanić i sar., 2012). Za realne sisteme ovo je nedovoljan nivo dekompozicije jer se prstenasti delovi često moraju dodatno podeliti u manje podzone. WatNC algoritam je vrlo efikasan jer, između ostalog, ne zahteva intervencije na mreži kao što su uklanjanje i postavljanje zatvarača i cevi. Može se iskoristiti za dekompoziciju realnih sistema što će biti ilustrovano na primeru vodovodne mreže grada Požarevca. Dva osnovna kriterijuma za definisanje zona su njihova veličina i povezanost. Zone treba da budu približno jednake veličine i povezane sa što manjim brojem cevi.

2 Metodologija

WatNC algoritam je zasnovan na primeni osnovnih algoritama teorije grafova. U teoriji grafova svaka mreža se može predstaviti u formi grafa (G) koji čine dva uređena skupa, skup čvorova (N) i skup veza (C) od kojih je svaka predstavljena kao uređen par čvorova. Da bi se koristio algoritam potrebno je posedovati matematički model vodovodne mreže. Na osnovu rezultata hidrauličkog proračuna određuju se smerovi tečenja i orijentise graf, odnosno kreira se orijentisani (direkcion) graf – digraf. Vodovodna mreža u suštini nije digraf jer se smer tečenja u cevima može menjati u toku simulacije. Cevi za koje se ustanovi da se menja smer tečenja se označavaju kao neorijentisane, odnosno kao cevi koje imaju dvostruku orijentaciju (slika 1).



$$N = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$$

$$C = \{(1, 0), (0, 5), (5, 3), (5, 4), (3, 4), (3, 2), (2, 3), (4, 6), (6, 0), (7, 6), (7, 8), (8, 7), (9, 7), (9, 8), (10, 9), (10, 12), (9, 12), (12, 11), (11, 9), (11, 4)\}$$

$$G = \langle N, C \rangle$$

Slika 1: Jednostavna mreža sa 2 izvora i 2 neorijentisane veze predstavljena u formi digrafa
 Figure 1: Digraph presentation of a simple network with 2 sources and 2 undirected links

U ovom jednostavnom primeru mreža se sastoji od 13 čvorova i 19 veza. Dve veze su neorijentisane, između čvorova 2 i 3 i između čvorova 8 i 7. Ukoliko govorimo o vodovodnoj mreži, to bi bile cevi koje povezuju rezervoare sa ostatkom sistema. Posmatrajući primer sa slike 1 može se zaključiti da bi čvorovi 8 i 2 bili identifikovani kao rezervoari a čvorovi 1 i 10 kao izvorni čvorovi.

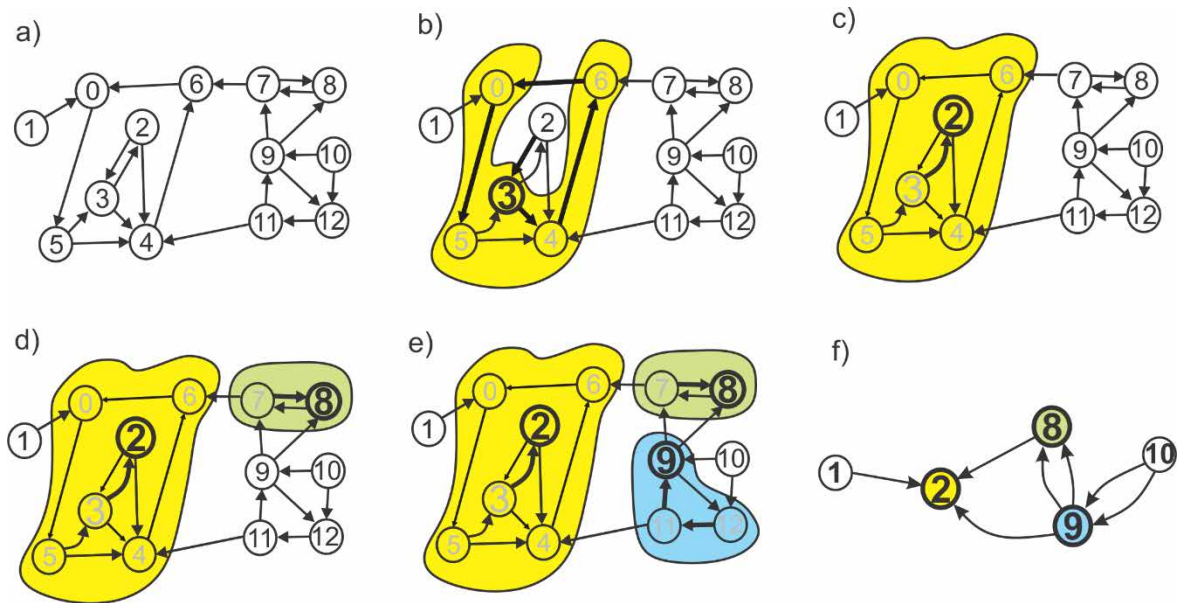
U realnosti često postoje i duple, odnosno paralelne veze pa bi prilikom predstavljanje mreže u formi grafa vezama trebalo dodeliti i jedinstveni identifikator jer ne mogu biti jednoznačno predstavljene samo kao uređen par čvorova. Čvrste potrošnje, prečnici i dužine cevi su dodatna karakteristike mreže koje su potrebne za primenu algoritma. Algoritam se sastoji iz nekoliko koraka koji će biti izloženi u nastavku teksta.

2.1 Detekcija čvrsto povezanih delova mreže

Čvrsto povezani delovi, ili čvrsto povezane komponente mreže (eng. Strong Connected Component, SCC) je termin iz teorije grafova. Jedna SCC komponenta predstavlja podgraf grafa za koji važi da se u bilo koji čvor može stići iz bilo kog čvora tog podgraфа. Prvi korak algoritma WatNC je upravo detekcija ovih komponenti u mreži, odnosno grafu (Perelman 2011). Ukoliko se definicija SCC komponente „preslika“ na vodovodnu mrežu koja je predstavljena u formi digrafa, jedna SCC komponenta predstavlja deo mreže u kome voda cirkuliše tokom perioda simulacije. Imajući u vidu ovu činjenicu, kontrola bilansa ili regulacija pritiska unutar jedne SCC komponente bila bi teško izvodljiva. Upravo zbog toga, ideja je da se identifikuju SCC komponente a da se u nastavku algoritma tretiraju kao jedinstveni, odnosno agregirani čvorovi.

Algoritmi za detekciju SCC komponenti su dobro poznati iz literature (Tarjan 1972, Kosaraju 1980, Gabow 1999). U okviru WatNC procedure koristi se algoritam Gabow-a (Sedgewick 2002) koji suštinski predstavlja modifikaciju algoritma za pretraživanje grafa po dubini (eng. Depth First Search – DFS). Modifikacija se sastoji u rekurzivnom pozivanju DFS algoritma u toku pretrage grafa, odnosno digrafa. Dovoljan je jedan prolaz kroz mrežu da se identifikuju SCC komponente. Izbor početnog čvora je potpuno proizvoljan.

Koraci algoritma se ilustruju na jednostavnom primeru sa prethodne slike (slika 1). Nakon detekcije smera tečenja i orijentacije grafa shodno tome, formiran je digraf (slika 2a). DFS algoritam za pretragu grafa startuje od čvora 2. Redom se označavaju čvorovi 3, 4, 6, 0 i 5, uz prethodnu proveru da li se označavanjem narednog čvora formira ciklična putanja. Iz čvora 5 može se propagirati u čvor 3 ili čvor 4 koji su već prethodno označeni što ukazuje na postojanje ciklične putanje. Ukoliko se detektuje ciklična putanja skup čvorova koji se nalazi na toj putanji čini jednu SCC komponentu. U konkretnom slučaju, propagacijom u čvor 3 cikličnu putanju čine čvorovi 3, 4, 6, 0 i 5 i predstavljaju prvu identifikovanu SCC komponentu označenu poslednjim označenim čvorom 3 (slika 2b).



Slika 2: Jednostavna mreža sa 3 detektovane SCC komponente
 Figure 2: three SCC components identified in a simple network

Propagacija se nastavlja iz agregiranog čvora 3 ka jedinom kandidatu, čvoru 2. Iz njega se detektuju dve veze koje formiraju cikličnu putanju ka već identifikovanoj SCC komponenti (čvor 3). Shodno tome, SCC komponenti se pridružuje čvor 2 a komponenta se tako i označava (slika 2c). Iz proširene SCC komponente (čvor 2) nije moguće nastaviti dalju propagaciju usled nedostatka validnih kandidata i zaključuje se da je završeno formiranje ove komponente.

Pretraga digrafa se nastavlja slučajnim izborom jednog od preostalih, neoznačenih čvorova. Neka to bude čvor 7. Označava se čvor 8 i veza koja formira cikličnu putanju ka polaznom čvoru 7. Detektuje se druga SCC komponenta sačinjena od ova dva čvora, označena čvorom 8, koju nije moguće dalje proširiti jer se iz čvora 8 ne može nastaviti propagacija (slika 2d).

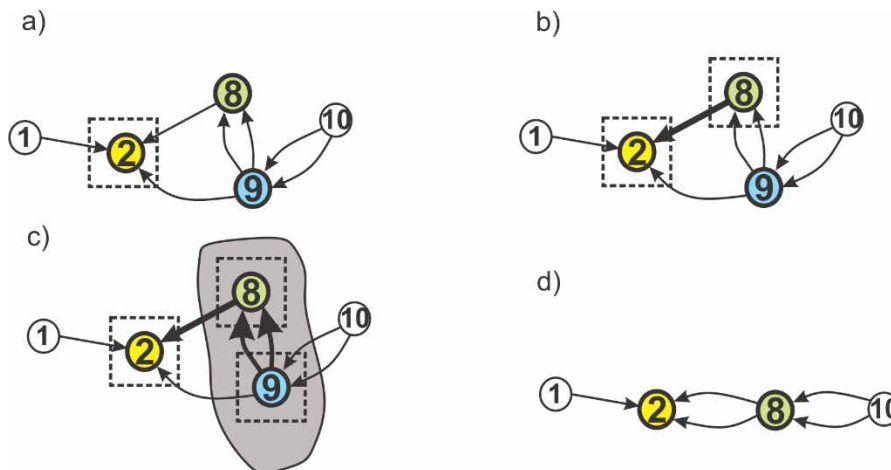
Dalje, kreće se od čvora 12, označava se čvor 11, zatim 9 i sledeća veza za propagaciju je ka polaznom čvoru 12 čime se detektuje ciklična putanja. Identifikovana je treća SCC komponenta, označena čvorom 9 koju čine čvorovi 12, 11 i 9 (slika 2e). Konačno, agregirani digraf je sastavljen od tri SCC komponente (sada označene samo čvorovima 2, 9 i 8) i izvornih čvorova 1 i 10 (slika 2f).

Najvažnija osobina novog, agregiranog digrafa je acikličnost. Ovakav digraf se naziva direkcioni aciklični graf (eng. Directed Acyclic Graph – DAG) i sa aspekta analize razmatrane vodovodne mreže vrlo je značajan jer jasno odvađa izvorne čvorove i SCC komponente olakšavajući dalju agregaciju mreže.

2.2 Topološko sortiranje i agregacija

Nakon detekcije SCC komponenata i kreiranja DAG-a može se pristupiti sledećem koraku WatNC algoritma a to je topološko sortiranje i agregacija DAG-a. I za ovu svrhu se mogu iskoristiti neki od poznatih algoritama iz teorije grafova, međutim koristi se algoritam koji sadrži određene inženjerske kriterijume koji uslovljavaju topološko sortiranje. Jedna od prednosti algoritma, koji će biti opisan u nastavku, je i što se agregacija vrši u toku samog topološkog sortiranja.

Topološko sortiranje počinje od najnižvodnijih čvorova u mreži. Algoritam prepoznaje ove čvorove u DAG-u kao one koji imaju samo „ulazne“ veze. Sortiranje započinje tako što se istovremeno označe svi najnižvodniji čvorovi i prebacuju u set sortiranih čvorova. U konkretnom primeru to je samo čvor 2 jer sve veze završavaju u njemu a ni jedna ne izlazi iz njega (Slika 3a). Propagacija se nastavlja u smeru suprotnom od smeru tečenja. Kandidati za propagaciju su agregirani čvorovi 8 i 9 koji još uvek nisu označeni u procesu sortiranja. Izvorni čvorovi (1 i 10) se ostavljaju za poslednji korak u agregiranju.



Slika 3: Topološko sortiranje i agregacija DAG-a
Figure 3: Topological sorting and aggregation of the DAG

Uslov da bi neki od čvorova kandidata bio označen sledeći, i prebačen u skup sortiranih čvorova, je da su svi čvorovi nizvodno od njega već označeni u procesu topološkog sortiranja. U razmatranom primeru od dva moguća kandidata taj uslov ispunjava čvor 8 jer se nizvodno od njega nalazi već označen čvor 2. Nizvodno od čvora 9 se nalazi i označen čvor 2 ali i neoznačen čvor 8. Označava se čvor 8 i prebacuje u skup sortiranih čvorova (slika 3b).

Obzirom da se agregacija vrši u procesu samog topološkog sortiranja pristupa se proveriti mogućnosti da se čvor 8 agregira sa svojim nizvodnim čvorom 2. Uvode se dva inženjerska kriterijuma prema kojima se vrši agregacija.

Primarni kriterijum je veličina zone sa stanovišta potrošnje. Definiše se maksimalna potrošnja za zonu i proverava da li je suma čvornih potrošnji svih agregiranih čvorova manja od nje. Agregacija se vrši dok se ne prekorači definisana maskimalna potrošnja, kada se prekida agregacija i definiše jedna agregirana komponenta (eng.Connected Component – CC). Agregacija se može nastaviti i ukoliko je definisan maksimum prevaziđen pod uslovom da je jednog od dva razmatrana čvora značajno manja od drugog. Na ovaj način se izbegava definisanje zona tj.komponenti sa jako malom potrošnjom. Uzevši u obzir izložene kriterijume, pod pretpostavkom da je potrebno podeliti razmatranu mrežu na dve zone i da svi čvorovi imaju istu čvornu potrošnju, čvor 8 nije validan kandidat za agregaciju sa čvorom 2. Prema tome, trenutno su definisane dve CC komponente, predstavljene čvorovima 2 i 8.

Za razliku od jednostavnog primera, gde postoji samo jedna opcija za propagaciju i agregaciju (čvor 8 sa čvorom 2), u realnim mrežama će postojati veći skup kandidata za propagaciju a samim tim i agregaciju. Nakon propagacije BFS-om i prebacivanja označenih čvorova u skup sortiranih čvorova potrebno je odabrati onaj koji će biti agregiran sa postojećom

CC komponentom. Najpre se proverava kriterijum maksimalne potrošnje da se selektuju kandidati validni za agregaciju. Uvode se dodatni kriterijumi za njihovo rangiranje i odabir odgovarajućeg kandidata za agregaciju:

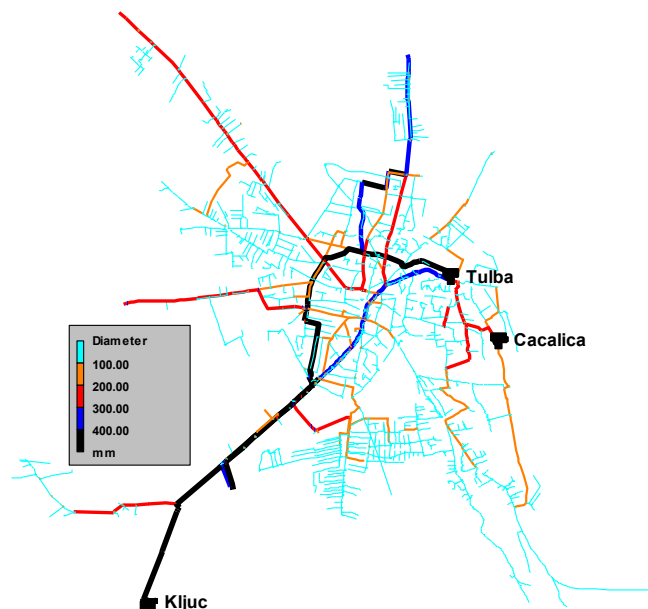
- Primarni kriterijumi su prečnik i dužina veze. Od svih kandidata selektuje se onaj do koga se propagacija vršila vezom najmanjeg prečnika. Ovim se obezbeđuje da se cevi većeg prečnika ostavljaju za kraj propagacije. Ukoliko postoji više kandidata povezanih sa označenim čvorom cevima istog prečnika bira se onaj čija je veza najkraća da bi ukupna dužina mreže u zoni bila minimalna.
- Sledeći kriterijum je broj veza koji se ukida agregiranjem. Bira se onaj kandidat čijom se agregacijom dobijaju CC komponente sa manjim brojem međusobnih veza. Ovaj kriterijum omogućava da su na kraju primene algoritma definisane CC komponente sa minimalnim brojem međusobnih veza.

Ukoliko nastavimo sa razmatranjem jednostavnog primera, sledeći i jedini kandidat za propagaciju je čvor 9. Naredni korak je provera mogućnosti za njegovu agregaciju sa već definisanim CC komponentama. Čvor 9 se može agregirati sa CC komponentom 2 ili 8. Obzirom da je CC komponenta 2 već dovoljno velika sa stanovišta ukupne čvorne potrošnje, čvor 9 se agregira sa CC komponentom 8 (slika 3c).

Na taj način smo definisali 2 CC komponente, odnosno zone sa približno jednakom čvornom potrošnjom unutar njih i minimalnim brojem veza između njih (dve, slika 3d). CC komponenta 2 se sastoji od čvorova 0, 2, 3, 4, 5 i 6 a CC komponenta 8 od čvorova 7, 8, 9, 11 i 12. Dva izvorna čvora 1 i 10 ne podležu agregaciji. Ukupan broj veza u agregiranoj mreži je pet.

3 Test primer

Primena algoritma će biti prikazana na primeru vodovodne mreže grada Požarevca (slika 4).



Slika 4: Vodovodna mreža grada Požarevca

Figure 4: Požarevac WDN Layout

3.1 Opis vodovodnog sistema

Vodovodni sistem grada Požarevca se koristi za vodosnabdevanje približno 50000 stanovnika, industrije i javnih institucija. Izvorište sistema je grupa bunara iz kojih se voda pumpa u rezervoar „Ključ“. Sistem je podeljen na tri visinske zone: I – niža od 100 mm, II – između 100 i 150 mm i III – između 150 i 200 mm. Iz rezervoara „Ključ“ voda se pumpnom stanicom „Ključ“, koja se sastoji od 4 pumpe, uvodi u distributivnu mrežu i transportuje do rezervoara „Tulba“. Režim rada pumpne stanice je kontrolisan potrošnjom u mreži i nivoom u rezervoaru „Tulba“. Tri pumpe rade 24 časa i održavaju pritisak od 5 bara. Cevovod između rezervoara „Ključ“ i „Tulba“ je prečnika Ø600/Ø500 mm. Iz rezervoara „Tulba“ voda se gravitaciono distribuira u I zonu a iz njega pumpa u rezervoar „Cacalica“ koji snabdeva II visinsku zonu. Iz rezervoara „Cacalica“ voda se pumpa u III visinsku zonu. Ukupna dužina glavne distributivne mreže je 175 km. Dužina mreže cevi prečnika manjih od 100 mm je 110 km (64,5% od ukupne dužine). Prosečna dnevna potrošnja vode je 203 L/s. Na osnovu rezultata hidrauličkog proračuna prosečan pritisak u mreži je 42.5 m.

3.2 Rezultati

Prilikom pokretanja algoritma potrebno je definisati željeni broj zona (CC komponenti) na koje je potrebno podeliti vodovodni sistem. Hidraulički proračun se pokreće samo jednom da se odredi orijentacija tečenja i formira digraf. Koristi se 24-časovna simulacija a maksimalna potrošnja se identifikuje u 19h. Algoritam je detektovao 5 zona (slika 5) međusobno povezanih sa 14 veza (cevi, zatvarača i pumpi). Ovaj broj se može smatrati relativno malim obzirom da je mreža sastavljena od ukupno 2272 cevi, 568 zatvarača i 12 pumpi. Proračun je sproveden na personalnom računaru PC Intel i5 CPU i traje svega nekoliko sekundi za relativno veliki primer.

3.3 Diskusija

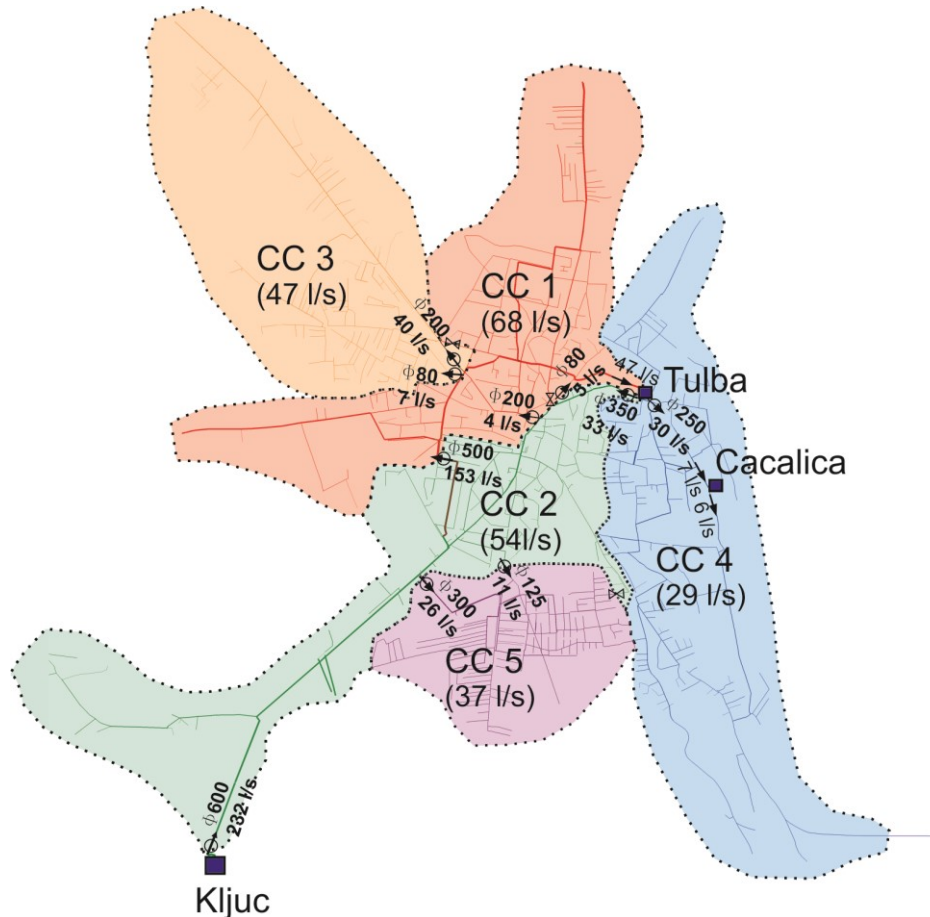
Algoritam je izuzetno efikasan sa stanovišta brzine proračuna, odnosno upotrebe računarskih resursa što omogućava njegovu eventualnu primenu u optimizacionim algoritmima. Na osnovu analize rezultata algoritma, zaključuje se da se vodni bilans u mreži može kontrolisati sa relativno malim brojem mernih mesta. Protok na potisnom cevovodu iz rezervoara „Ključ“ i „Tulba“, kao i nivoi u istim rezervoarima, moraju biti kontinualno mereni.

Uža gradska zona je podeljena na dve zone (CC1 i CC2) koje su povezane sa ukupno 4 cevi. Najvažnija od njih je cev prečnika Ø500 mm sa protokom koji varira od 100 do 153 L/s. Druge dve su prečnika Ø200 mm i Ø80 mm kroz koje protiče značajno manji, praktično zanemarljiv protok. Smer tečenja u sva tri slučaja je iz zone CC2 u zonu CC1. Četvrta veza ove dve zone je cev prečnika Ø200 mm u neposrednoj blizini prethodno pomenute cevi Ø80 mm. Protok kroz ovu cev je u času maksimalne potrošnje zanemarljiv i iznosi 0.1 L/s. Shodno tome, nema smisla postavljati merno mesto na ovoj lokaciji već se predlaže ukidanje ove deonice jer ni na koji način neće uticati na hidrauliku mreže a postiže se manji broj veza između zona. Dakle, između zona CC1 i CC2 predviđena su ukupno tri merna mesta.

Da bi se omogućila potpuna kontrola bilansa u zoni CC2 potrebno je uspostaviti još tri merna mesta. Prvo na cevi prečnika Ø350 mm kroz koju se zona CC2 snabdeva iz rezervoara „Tulba“, a druga dva na dve cevi prečnika Ø300 mm i Ø125 mm kojima je ova zona poveza-

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

na sa zonom CC5. Ovime se u kontroliše i bilans u zoni CC5 jer se ona u potpunosti snabdeva vodom iz zone CC2 kroz pomenute dve cevi. Treba napomenuti da je i u ovom slučaju ukinuta jedna veza (cev) između razmatranih zona, prečnika Ø80 mm zbog zanemarljivog protoka.



Slika 5: Vodovodna mreža grada Požarevca podeljena na 5 OZB (maksimalni protoci u 19h)
Figure 5: Požarevac WDN decomposed into 5 DMAs (maximum flows at 19h)

Obzirom da se zona CC3 u potpunosti snabdeva vodom iz zone CC1, potrebno je uspostaviti još dva merna mesta između ovih zona da bi se mogao kontrolisati njihov bilans. Merna mesta su na cevima prečnika Ø200 mm i Ø80 mm. Kao i u prethodna dva slučaja, ukinuta je jedna veza (cev) između razmatranih zona, prečnika Ø100 mm zbog zanemarljivog protoka. Sada je moguće sračunati i protok koji iz zone CC1 snabdeva rezervoar „Tulba“. Nema potrebe za uspostavljanjem dodatnog mernog mesta jer je su već predviđena merenja nivoa u samom rezervoaru, protoka na potisu iz rezervoara i protoka ka zoni CC2. Uvođenjem svih predloženih mernih mesta (ukupno 10) u potpunosti se kontroliše vodni bilans u zonama CC1, CC2, CC3 i CC5.

Za potpunu kontrolu bilansa u zoni CC4 koja se snabdeva iz rezervoara „Tulba“ dovoljno je još meriti nivo u rezervoaru „Čačalica“. Konačno da bi se kontrolisao bilans u celoj vodovodnoj mreži potrebno je uspostaviti 11 mernih mesta. Ukidanjem veza kroz koje protiče zanemarljiv protok u času maksimalne potrošnje broj veza između zona je sveden na 11 umesto početnih 14.

Na osnovu predloženih mernih mesta zaključuje se da neka mogu biti korišćena isključivo za kontrolu bilansa a neka i za kontrolu pritiska u mreži. Merna mesta na cevima većeg prečnika, Ø600 mm i Ø500 mm mogu biti korišćena samo za kontrolu bilansa dok ostala merna mesta mogu biti opremljena regulacionim zatvaračima koji bi se mogli koristiti za kontrolu pritiska što bi za posledicu imalo i smanjenje gubitaka u mreži.

Predložena dekompozicija se može dalje usložiti tako što bi se ukinule veze između zona i za svaku zonu ponaosob pokrenuo algoritam. Na taj način bi svaka zona bila podeljena više podzona.

4 Zaključak

U radu je predstavljen jednostavan i efikasan WatNC algoritam za automatsku podelu vodovodne mreže na osnovne zone bilansiranja (OZB). Algoritam je baziran na teoriji grafova i koristi rezultate 24-časovne simulacije matematičkog modela mreže da odredi smerove tečenja i definiše digraf. Potrebno je uneti željeni broj zona nakon čega se topološko sortiranje i agregacija odvijaju prema definisanim inženjerskim kriterijumima u cilju postizanja optimalnog rešenja. Upotreba algoritma je ilustrovana na primeru realne vodovodne mreže grada Požarevca. Na osnovu rezultata zaključuje se da se prezentovani algoritam može upotrebiti za podelu mreže na OZB i generalno kao vrlo koristan alat za potrebe analize realnih vodovodnih sistema.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju kompaniji „Ehting“ na ustupanju kalibrisanog hidrauličkog modela vodovodne mreže grada Požarevca.

Literatura

1. Giustolisi O., Savic D. and Kapelan Z. (2008), *Effects of Redesign of Water Systems for Security and Water Quality Factors, Integrating Water Systems* (CRC Press, Taylor & Francis Group, London).
2. Perelman L. & Ostfeld A. (2011) Water distribution systems simplifications through clustering, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000173.
3. Ostfeld A. et al. (2008) The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 134, No. 6, pp. 556-568.
4. Ulanicki B., Zehnpfund A., and Martinez F. (1996). Simplification of water distribution network models. *Proceedings of the Second International Conference on Hydroinformatics*, Zurich, Switzerland, pp. 493-500.
5. Stanić M., Kapelan Z., Avakumović D. (1998) Evolutionary algorithm for determining optimal tree layout of water distribution networks, *Proc. Hydroinformatics 98*, pp. 901-910.
6. Sedgewick R. (2002) *Algorithms in C++, Part 5: Graph Algorithms*, Addison Wesley.
7. Schaeffer S.E. (2007) Graph clustering, *Computer Science Review* 1, pp. 27-64.
8. Stanić M., Vasilic Ž., Prodanović D., Branisavljević N. (2012) Algoritmi za dekompoziciju, agregaciju i hidraulički proračun mreža pod pritiskom, *Zbornik radova 12. međunarodne konferencije VIK sistemi, Jahorina, UTVSI Belgrade*, ISSN: 978-86-82931-48-5, pp. 187-192.

Hidraulička analiza i proračun nedostajućih rezervoarskih kapaciteta pitke vode u NIVOS-u

Dejan Jordanović¹

APSTRAKT: Rad predstavlja segmente hidrauličke analize i proračuna nedostajućih kapaciteta kada su u pitanju rezervoari pitke vode u sistemu snabdevanja vodom grada Niša (NIVOS – niški vodovodni sistem). Obrađuje modele dnevnog izravnjanja potrošnje i dotoka vode, grafičke prikaze varijacija nivoa vode u postojećim rezervoarima za različita simulirana stanja sistema, kao i dimenzionisanje novoplaniranog rezervoarskog kompleksa na lokaciji “Bubanj” u Nišu. Predmetna analiza je, zajedno sa izabranom projektantskom kućom, urađena kao osnov za izradu glavnog projekta ovog kompleksa, koji se sastoji od višekomornih rezervoarskih građevina sa zajedničkom zatvaračnicom i raspletom ulazno-izlaznih cevovoda i prelivno-ispusnih vodova, pumpne stanice i ostalim pripadajućim objektima. Objekat će predstavljati izuzetno kompleksan sistem sa različitim ulogama u sistemu pre i nakon priključenja na budući regionalni system Selova – Niš.

Ključne reči: hidraulička analiza, rezervoar, vodosnabdevanje, potrošnja vode

Hydraulic analysis and calculation of deficiency in water reservoir capacity in NIVOS

ABSTRACT: This paper presents segments of the hydraulic analysis and calculation of shortage of drinking water reservoir capacities in water supply system of the city of Nis (NIVOS – Nis Water Supply System). Models of adjustment in daily consumption and water flow are treated, followed by graphics, variations in water levels in existing reservoirs for different simulated conditions of the system, as well as the dimensioning of the newly planned reservoir complex at the "Bubanj" location in Nis. The presented analysis was prepared, together with the nominated designing company, as a basis for the detailed design of this complex, which consists of a multi-chamber reservoir construction with a shared valve chamber and the inlet - outlet pipelines and overflow-discharge lines, pumping station and other related facilities. The facility will represent a very complex structure with different roles in the system before and after the connection to the future regional WS system Selova - Nis.

Keywords: hydraulic analysis, reservoir, water supply, consumption

¹ Dejan Jordanović, vodeći inženjer razvoja u JKP za vodovod i kanalizaciju NAISSUS – Niš, Kneginje Ljubice I/1, dejan.jordanovic@naissus.co.rs

1 Uvod

Lokacija budućeg rezervoara Bubanj se nalazi na severo – zapadnoj strani grada u području spomen parka Bubanj. U visinskom pogledu lokacija budućeg rezervoara smeštena je između kota terena 255.00 i 265.00 mnm što odgovara kotama fundiranja postojećih rezervoara prve visinske zone distribucionog vodovodnog sistema Grada Niša. Od izabranog projektanta je traženo da se nakon sprovedene hidrauličke analize i definisanja stvarne potrebe konzumnog područja za dodatnim rezervoarskim prostorom, izradi glavni projekat kompleksa, koji će predvideti buduću faznu izgradnju, i to: Faza 1, kapaciteta koji zadovoljava potrebe uvažavajući trenutno stanje i zahteve konzuma i Faza 2, koja pokriva potrebe budućeg projektovanog stanja sa uključenjem sistema Selova.

2 Proračun nedostajućeg rezervoarskih kapaciteta

Analizirani su podaci o izmerenim količinama vode koje dolaze u sistem za vodosnabdevanje grada Niša u dužem vremenskom periodu. Merenja su vršena na glavnim dovodima iz Ljuberađe, Studene i Medijane, pri čemu su merene ukupne količine vode koje su ušle u sistem, što znači ukupnu obračunatu potrošnju za stanovništvo, javne ustanove, komercijalne zgrade i industriju, kao i neobračunate količine vode (gubici, gašenje požara, pranje ulica, unutrašnja potrošnja u sistemu, itd.). U tabeli 1 date su srednje godišnje količine vode, kao i specifične potrošnje vode po stanovniku, za karakterističnu godinu:

Tabela 1. Merodavni podaci o potrošnji
 Table 1. Relevant data on consumption

Q_{sr} (m ³ /dan)	85.475,03
q_{sp} (l/st/dan)	407,0
$Q_{max\ dn}$ (m ³ /dan)	101.926,0
$K_{max\ dn}$	1,19

U tabeli su prikazane i zabeležene karakteristične količine, kao i odgovarajući koeficijenti maksimalne dnevne neravnomernosti koji su se kretali u rasponu od 1,12 do 1,19.

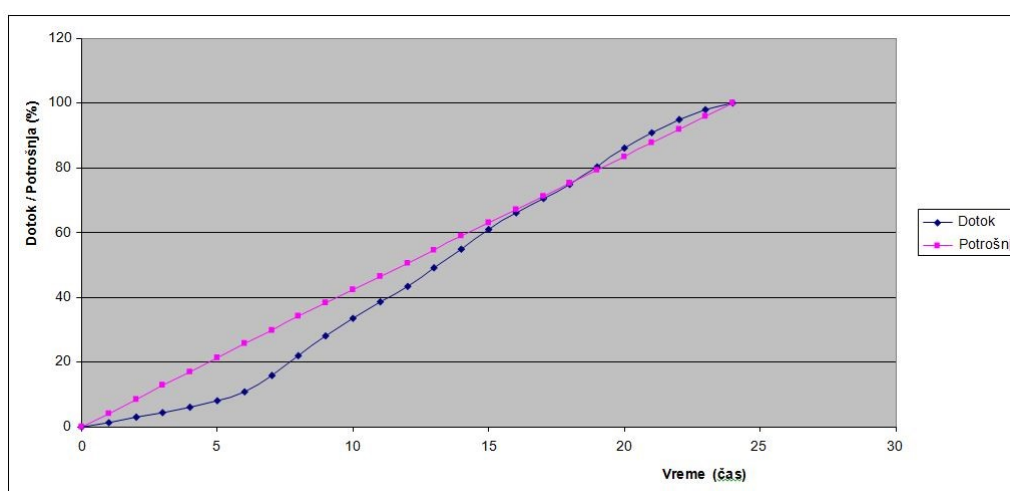
Ove količine predstavljaju ukupnu količinu plasirane čiste vode po stanovniku na dan, uključujući gubitke u sistemu i realno su dosta veće od onih koje norme specifične potrošnje danas preporučuju.

Vremenska raspodela dotoka vode u sistem je dobijena na osnovu zabeleženih podataka, pri čemu je kao merodavan uzet dan kada je zabeležena maksimalna dnevna potrošnja vode u sistemu. Dijagram dnevne raspodele potrošnje je usvojen prema literaturi za odgovarajuće gradove ove veličine i tipa, obzirom da nisu bili raspoloživi svi podaci na bazi kojih bi se odredio stvarni dijagram neravnomernosti potrošnje za grad Niš. Proračun zapremine rezervoarskog prostora potrebne za dnevno izravnjanje potrošnje u sistemu izvršen je tabelarno i prikazan u tabeli 2 i grafički na dijagramu u nastavku.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Dnevno izravnanje potrošnje u sistemu
Table 2. Daily equalization of consumption

Vreme (čas)	Potrošnja		Dotok		Ukupno ±%
	%	Σ%	%	Σ%	
0 - 1	1,5	1,5	4,22	4,22	+2,72
1 - 2	1,5	3,0	4,24	8,46	+5,46
2 - 3	1,5	4,5	4,31	12,77	+8,27
3 - 4	1,5	6,0	4,32	17,09	+11,09
4 - 5	2,0	8,0	4,29	21,38	+13,38
5 - 6	3,0	11,0	4,26	25,64	+14,64
6 - 7	5,0	16,0	4,24	29,88	+13,88
7 - 8	6,0	22,0	4,21	34,09	+12,09
8 - 9	6,0	28,0	4,18	38,27	+10,27
9 - 10	5,5	33,5	4,12	42,39	+8,89
10 - 11	5,0	38,5	4,09	46,48	+7,98
11 - 12	5,0	43,5	4,10	50,58	+7,08
12 - 13	5,5	49,0	4,16	54,74	+5,74
13 - 14	6,0	55,0	4,17	58,91	+3,91
14 - 15	6,0	61,0	4,15	63,06	+2,06
15 - 16	5,0	66,0	4,15	67,21	+1,21
16 - 17	4,5	70,5	4,11	71,32	+0,82
17 - 18	4,5	75,0	4,07	75,39	+0,39
18 - 19	5,5	80,5	4,07	79,46	-1,04
19 - 20	5,5	86,0	4,06	83,52	-2,48
20 - 21	5,0	91,0	4,12	87,64	-3,36
21 - 22	4,0	95,0	4,11	91,75	-3,25
22 - 23	3,0	98,0	4,09	95,84	-2,16
23 - 24	2,0	100,0	4,16	100,0	0,00
a (%)					18,0
a					0,18



Slika 1. Dijagram dnevno izravnjanja potrošnje i dotoka
Figure 1. Diagram on equalization of daily consumption and inflow

2.1 Trenutno stanje

Potrebna rezervoarska zapremina se sastoji iz tri dela:

- zapremina potrebna za izravnanje dnevne potrošnje u vodovodnom sistemu,
- zapremina potrebna za gašenje požara i
- rezervna zapremina za slučaj kvara na dovodima i sl.

$$V_{izr} = 0,18 \times 101.926,0 = 18.346,7 \text{ m}^3$$

Količina vode potrebna za gašenje požara u naseljima gradskog tipa, zavisno od broja stanovnika i računskog broja istovremenih požara propisana je "Pravilnikom o tehničkim normativima za hidrantsku mrežu za gašenje požara" (Službeni list SFRJ, br. 30/91). Za gradove sa brojem stanovnika između 200.000 i 300.000 računski broj istovremenih požara iznosi tri, a najmanja količina vode po jednom požaru iznosi 45 l/s.

U skladu sa napred navedenim, ukupna zapremina protivpožarne vode koja mora da se obezbedi iznosi:

$$V_{pož} = 3 \times 0,045 \times 2 \times 3600 = 972,0 \text{ m}^3$$

Potrebna zapremina rezervoara za obezbeđenje snabdevanja za vreme kvara zavisi od vremena trajanja kvara. Otklanjanje kvarova na cevovodima, naročito dugim i teško pristupačnim, koji nisu pod stalnom kontrolom je mnogo teže i zahteva duže vreme, što direktno utiče na zapreminu rezervoara.

Rezerva za slučaj kvara se može sračunati za najnepovoljniji slučaj i to: $V_{rez} = Q \times T$ gde je Q količina vode koja se usled kvara ne može dovesti do potrošača, odnosno rezervoara, a T je vreme trajanja kvara.

Za sistem za vodosnabdevanje grada Niša u prvoj fazi, odnosno u sadašnjem momentu je usvojeno da je vreme potrebno za otklanjanje kvara na nekom od glavnih dovoda, tj. na dovodu sa sistema Ljuberađa koji je najduži i dovodi se najveća količina vode, a koji podrazumeva detekciju kvara, pražnjenje dela cevovoda, otklanjanje kvara, punjenje cevovoda, itd. iznosi 6 časova.

Maksimalna količina vode koja je dobijena iz Ljuberađe u danu sa maksimalnom potrošnjom analiziranoj godini iznosi:

$$Q_{Ljuberađe} = 888,6 \text{ l/s} = 0,8886 \text{ m}^3/\text{s}$$

pa će potrebna rezervna zapremina iznositi:

$$V_{rez} = 0,8886 \times 6 \times 3600 = 19.193,8 \text{ m}^3$$

Ukupna potrebna zapremina rezervoarskog prostora za grad Niš, u sadašnjem trenutku iznosi:

$$V_{uk} = 18.346,7 + 972 + 19.193,8 = 38.512,5 \text{ m}^3$$

Tabela 3. Postojeća zapremina rezervoara u sistemu
 Table 3. The current reservoir volume in the system

	Zapremina po visinskim zonama (m³)			
	Sadašnje stanje (2011)		Buduće stanje (2023)	
	I zona	II zona	I zona	II zona
Σ	20.000	11.500	20.000	16.000
Σ ukupno I + II	31500		36.000	
Bubanj	7.500		30.000	
Σ sa Bbnjem	27.500	11.500	50.000	16.000
	39.000		66.000	

Nedostajući rezervoarski prostor u sistemu za vodosnabdevanje grada Niša u sadašnjem stanju iznosi po zonama:

$$V_{\text{rez pot}} = 38.512,5 - 31.500 = 7.012,5 \text{ m}^3$$

Na osnovu gornje analize usvaja se kapacitet rezervoara za prvu fazu od $V = 7.500 \text{ m}^3$.

2.2 Stanje na kraju projektog perioda

Analogno prethodnom i po istoj metodologiji, određena je nedostajuća zapremina rezervoarskog prostora za buduće projektovano stanje. Za specifičnu potrošnju na kraju projektog perioda je usvojena bruto potrošnja od: $q_{\text{spec}} = 400,0 \text{ l/st/dan}$.

Ovom količinom su obuhvaćeni svi potrošači (privredni subjekti, ustanove, škole i sl.). Ukupan broj stanovnika u Nišu 2023. godine, prema planskom dokumentu, iznosiće 260.000.

Srednja dnevna potrošnja vode će iznositi:

$$Q_{\text{max dn}} = 0,400 \times 260.000 = 104.000 \text{ m}^3/\text{dan} \quad V_{\text{izr}} = 0,1749 \times 130.000,0 = 22.737,0 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{pož}} = 3 \times 0,045 \times 2 \times 3600 = 972,0 \text{ m}^3$$

Projektovana količina vode koja će dolaziti u sistem

$$Q = 1.180 \text{ l/s} = 1,18 \text{ m}^3/\text{s}$$

Prognozirana buduća potrošnja vode za 2023. godinu iznosiće $1.18 \text{ m}^3/\text{s}$ odnosno $101.952 \text{ m}^3/\text{dan}$. Imajući u vidu da će se grad Niš u budućnosti snabdevati iz tri odnosno četiri izvorišta, to za stabilno snabdevanje grada vodom nisu potrebne posebne rezervoarske zapremine za slučaj havarije na nekom dovodnom sistemu. Za ovakvu veličinu grada i obezbeđenost snabdevanja vodom iz više izvorišta dovoljne su zapreminske rezerve od cca 50 – 60% od maksimalnog dnevnog protoka ($Q_{\text{max dn}}$).

Iz toga proizilazi da nedostajući rezervoarski kapaciteti koji će biti izgrađeni na lokaciji brda Bujanj treba da iznose:

$$(101.952 \times 0,60) - 36.000 = 25.171 \text{ m}^3$$

pa se usvajaju ukupni budući rezervoarski kapaciteti od 30.000 m³. Predviđena je etapna izgradnja tako da je moguće građenje u četiri faze, svaka 7.500 m³ (dve komore po 3.750 m³ korisne zapremine).

3 Hidraulička simulacija rada

U I fazi punjenje vodom novoprojektovanog rezervoara na lokaciji Bubanj će se vršiti iz rezervoara Vinik preko magistralnog prstena DN 1000 mm, dužine 7.5 km, koji će usput imati odvojke za snabdevanje postojeće vodovodne mreže. U ovoj fazi na lokaciji Bubanj će se, kako je to napred rečeno, izgraditi jedan rezervoar sa kotom dna na istoj koti kao i R. Vinik i dubinom od 5,0 m, koliko iznose i dubine ostalih, postojećih rezervoara za snabdevanje I zone. Dotok vode u rezervoar na lokaciji Bubanj će se vršiti u periodima dana kada je propusna moć magistralnog prstena, diktirana prečnikom ovog cevovoda i visinskom razlikom nivoa vode između rezervoara Vinik i Bubanj, veća od usputne potrošnje. U periodima vršne dnevne potrošnje vode će ići u mrežu iz rezervoara Bubanj. Za dobar rad sistema potrebno je nivo vode u rezervoaru Vinik držati stalno blizu maksimalne kote.

Kao reprezentativni podaci za analizu kapaciteta distribucionog sistema, korišćeni su podaci iz dana kada je ostvarena najveća potrošnja u sistemu. Ulazni podaci preuzeti su sa karakterističnih mernih mesta (na kojima se nalaze odgovarajući merači protoka, a period analize obuhvatio je 24h rada sistema).

Vremenski korak usvojen za proračun $t = 15 \text{ min}$. Period simulacije je 24 sata.

Početno stanje u rezervoarima je usvojeno na polovinu nivoa vode u njima.

Sa ovim podacima ušlo se u hidrauličke proračune preko paketa programa WaterCAD koji simulira rad sistema sa dovoljnom tačnošću tokom posmatranog perioda.

3.1 Varijante uključivanja dovoda za simulaciju

U ovoj fazi uključuje se novi rezervoar Bubanj 1 (prva faza). Predviđeno je da novi rezervoar u ovoj fazi bude zapremine $V = 7500 \text{ m}^3$ (dve komore dimenzija 30 x 25 m, visine vode $H = 5 \text{ m}$, tj $V_1 = 3750 \text{ m}^3$). Takođe je predviđeno da uz ovaj rezervoar bude smeštena CS za II zonu kapaciteta:

$$Q = (1+1) \cdot 60 \text{ l/s}$$

$$H = 51 - 64.5 \text{ m } N = (1+1) \cdot 75 \text{ kW}$$

koja prepumpava u rezervoar II zone za naselje Pasi Poljana kapaciteta $V = 500 \text{ m}^3$, kote preliva $KP = 310 \text{ mm}$.

Za uključenje novog rezervoara Bubanj neophodna je izgradnja magistralnog cevovoda Ø1000 od R. Vinik do R. Bubanj koji je predviđen razvojem distribucionog sistema I visinske zone. Ovaj cevovod je obuhvaćen daljim hidrauličkim proračunima.

U ovoj fazi R. Bubanj 1 (prva faza) ima ulogu kontra rezervoara I visinske zone i tranzitnog rezervoara II visinske zone.

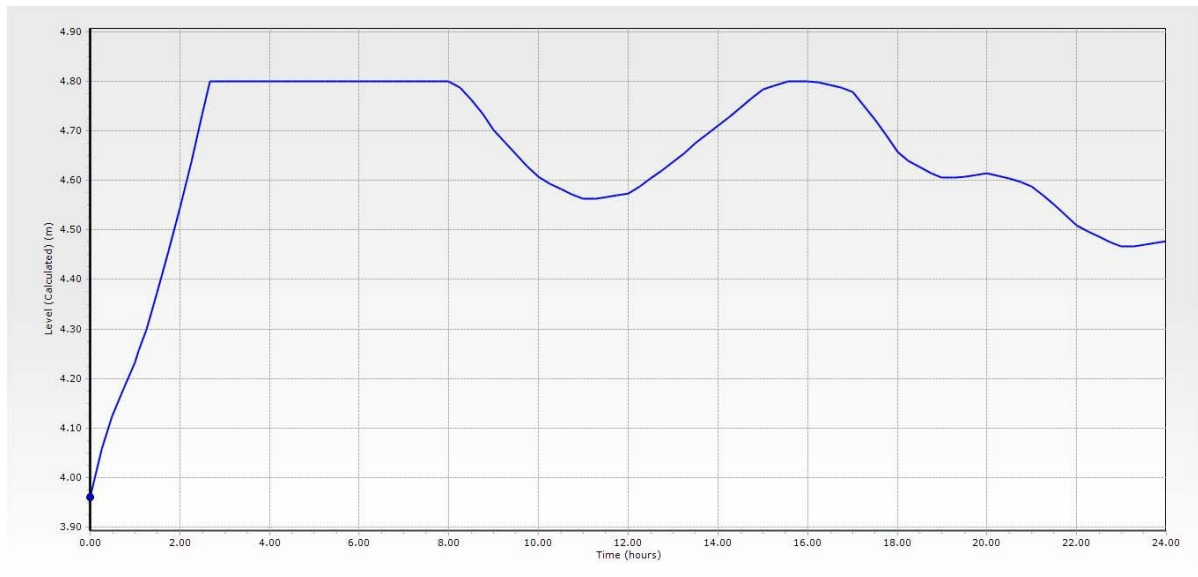
Tabela 4. Varijante bilansnih količina
 Table 4. Variants balance amount

Varijanta	Uključeni dovodni sistemi sa kapacitetima (l/s)				
	Dotok u Vinik (l/s)	Dotok u Delijski Vis (l/s)	CS Medijana 1 (l/s)	CS Medijana 2 (l/s)	Ukupno (l/s)
F1-1	591.89	223.07	80.08	273.11	1168.15
F1-2	671.97	223.07	0	273.11	1168.15
F1-3	865.00	223.07	80.08	0	1168.15
F1-4	945.08	223.07	0	0	1168.15

3.2 Grafički prikaz varijacije nivoa vode u postojećim rezervoarima

Kao ilustracija i za prikaz u radu izabrana je varijanta F1-4, varijanta pri kojoj su isključene pumpne stanice Medijana 1 i 2 (Faza 1 koja podrazumeva postojeće zahteve konzuma).

I u ovom režimu funkcija novog rezervoara u Bubnju je izraženija u smislu pokrivanja časovnih neravnomernosti, dok bi u R. Vinik u periodu od 2h 15 min do 8h trebalo smanjiti dotok vode.

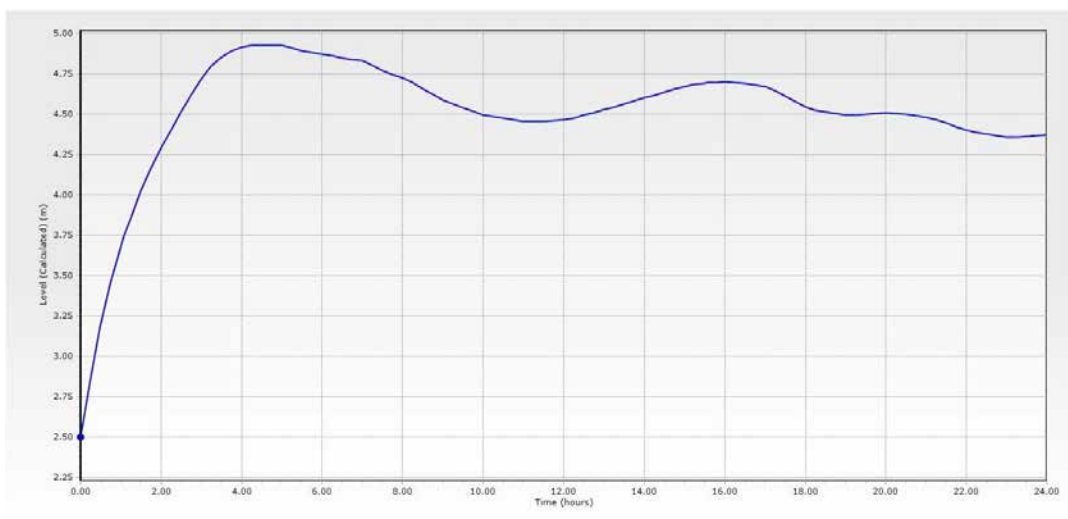


Slika 2. Dijagram nivoa vode u rezervoaru Vinik tokom 24h
 Figure 2. Diagram of water level in the Vinik reservoir for 24h

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 3. Dijagram nivoa vode u rezervoaru D. Vis tokom 24h
Figure 3. Diagram of water level in the D. Vis reservoir for 24h



Slika 4. Dijagram nivoa vode u rezervoaru Bubanj 1 tokom 24h
Figure 4. Diagram of water level in the Bubanj 1 reservoir for 24h

Literatura

1. Glavni projekat rezervoara pitke vode na lokaciji „bubanj“ u Nišu, IK Consulting Engineers 2011
2. Arhiva JKP za vodovod i kanalizaciju NAISSUS, Niš

Modeliranje hidrauličkog udara u softverskom paketu AFT impulse

Ljubomir Budinski¹
Slobodan Kolaković²
Matija Stipičić³
Goran Jeftenić⁴
Svetlana Vujović⁵

APSTRAKT: U svrhu testiranja rada nove crpne stanice za gradski kanalizacioni sliv Novog Sada, koja prepumpava kombinovanu otpadnu vodu prema projektovanom PPOV-u, izvršena je simulacija hidrauličkog udara u softverskom paketu AFT Impulse. U radu su prikazani dobijeni rezultati grafički za dve izabrane varijante trase sistema i izvršena je analiza rezultata. U cilju eliminisanja negativnih efekata udara urađeno je i modeliranje sistema pri uslovima aktivnih rasteretnih komora. Kako bi se eliminisale ekstremno niske vrednosti pritiska nastale kao posledica hidrauličkog udara, sa posebnim akcentom na rešavanja pitanja kavitacije, prikazani su i rezultati simulacije sa postavljenim vazдушnim (rasteretnim) ventilima.

Ključne reči: hidraulički udar, ATF Impulse

Modeling of water hammer using the AFT impulse software

ABSTRACT: The simulation of hydraulic impact (water hummer) in software package AFT impulse was conducted in purpose of testing of new pumping station for Novi Sad city sewerage confluence. This pumping station pumps combined waste water according to projected wastewater treatment plant (WWTP). This work included obtained graphic results for two selected variances of system path and results analysis has been conducted. In order to eliminate negative effects of water hummer, system modeling was performed in conditions with active relief chambers. The issues related to cavitation were one of objectives in order to eliminate extremely low values of pressures developed as a consequence of hydraulic impact. Also, results of simulation with placed air (relief) valves are presented.

Keywords: water hummer, ATF Impulse

¹ Doc. dr Ljubomir Budinski, dipl.inž.građ. Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, ljubabu@gmail.com

² Mast Slobodan Kolaković, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, cole86grb@gmail.com

³ Doc dr Matija Stipičić, dipl.inž.građ., AD“VOJVODINAPROJEKT”, Novi Sad, matija@vojvodinaprojekt.rs

⁴ Mast Goran Jeftenić, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, goran.jeftenic@yahoo.com

⁵ Doc. dr Svetlana Vujović, dipl. ekolog za zžs, Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, vujovics@uns.ac.rs

1 Uvod

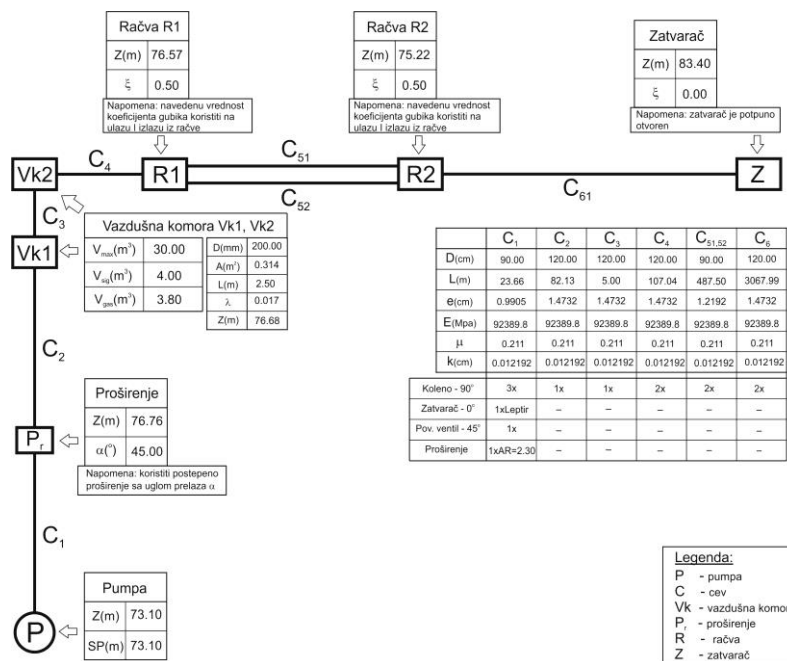
U periodu izgradnje kanalizacionog sistema grada Novog Sada obim postojećeg broja stanovnika i očekivana urbanizacija nije mogla da ukaže na nagli razvoj u poslednjim decenijama i sa napretkom tehnologija i novim standardima Evropske unije nametnula se potreba za izgradnjom novog kanalizacionog sistema odnosno nove crpne stanice koja prepumpava kombinovanu otpadnu vodu prema projektovanom PPOV-u na fruškogorskoj strani Novog Sada. Predviđene su dve varijante trase kombinovanog kanalizacionog sistema u neposrednoj blizini Žeželjevog mosta preko Dunava. Prva varijanta je da cevovod sistema prolazi ispod Dunava, a druga da trasa cevovoda ide preko mosta.

Zbog opasnosti od pojave hidrauličkog udara izvršena je simulacija udara u softverskom paketu AFT Impulse koji je razvijen od strane kompanije Applied Flow Technology iz SAD-a i rezultati su prikazani u daljem tekstu. Softverski paket AFT Impulse predstavlja pogodan alat za računanje promene pritiska u sistemu cevovoda izazvane pojavom hidrauličkog udara.

2 Simulacija hidrauličkog udara

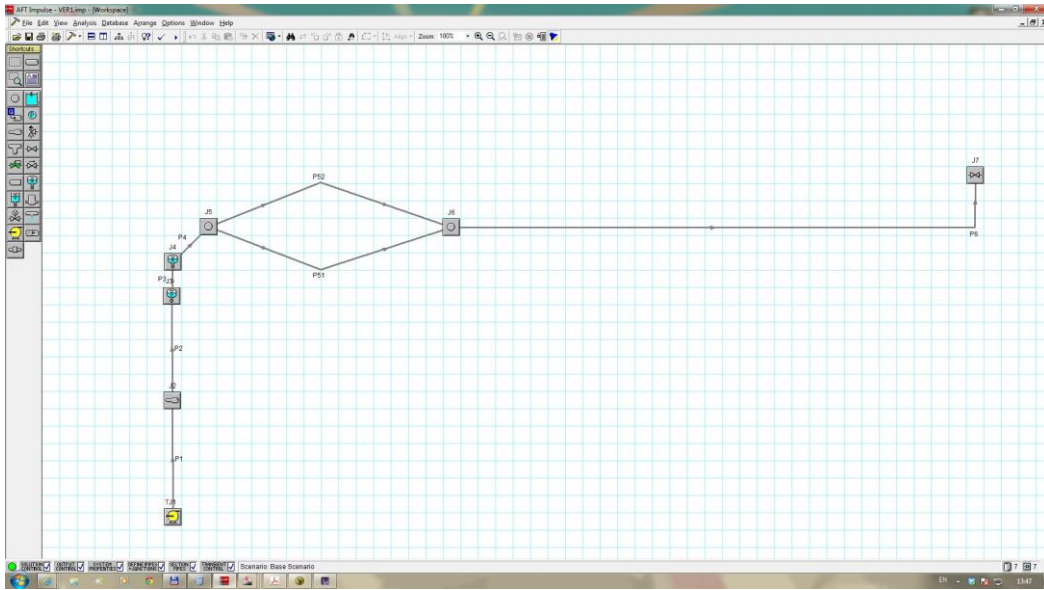
U sistemu je predviđen rad tri pumpe u paralelnoj vezi sa kotom nivoa u crpnom bazenu od $H_{baz} = 73.10$ m.n.m. (kota uključenja treće pumpe). U obe varijante prvo je sprovedena analiza za slučaj ispada pumpe iz pogona, a zatim i slučaj kada se predviđaju dva rezervoara za eliminisanje negativnih efekata udara.

Na slici 1. dat je šematski prikaz sistema sa karakteristikama cevovoda. Šematski prikaz kompletne situacije koja je korištena za simulaciju u softveru prikazana je na slici 2.



Slika 1. Šematski prikaz sistema sa karakteristikama cevovoda
Figure 1. Schematic view of a system with the characteristics of pipelines

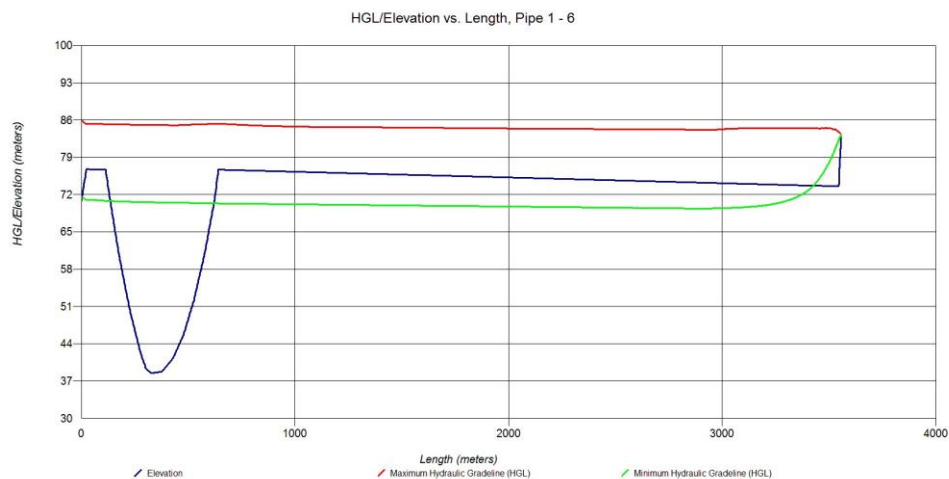
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2. Situacija razmatrane deonice u softveru AFT Impulse
Figure 2. The situation of observe section in software AFT Impulse

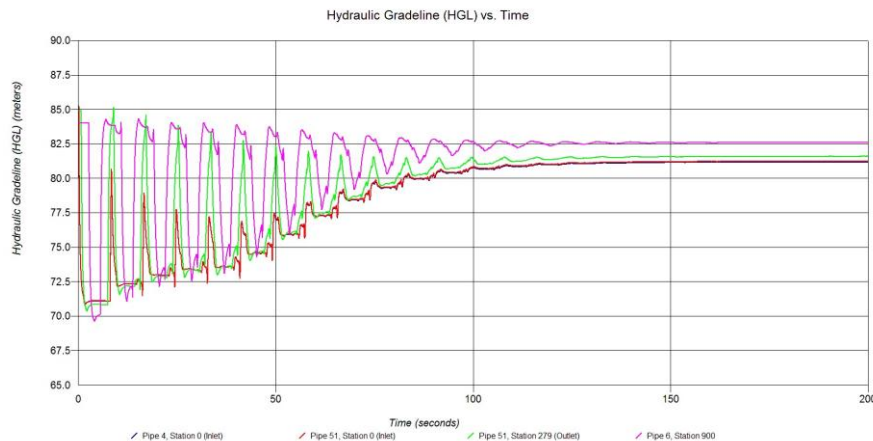
2.1 Varijanta br. 1 - Cevovod ispod Dunava

Za unete karakteristike cevovoda i pumpe, a pri radu 3 pumpe u paralelnoj vezi simulacija hidrauličkog udara u sistemu nastalog kao posledica ispada pumpe iz pogona dala je dijagram maksimalnih i minimalnih Π kota duž trase cevovoda (Slika 3), kao i vremenske serije promene Π kota (Slika 4).



Slika 3. Prikaz max. i min. Π kota duž trase cevovoda
Figure 3. Presentation of max. and min. piezometric head along the pipeline path

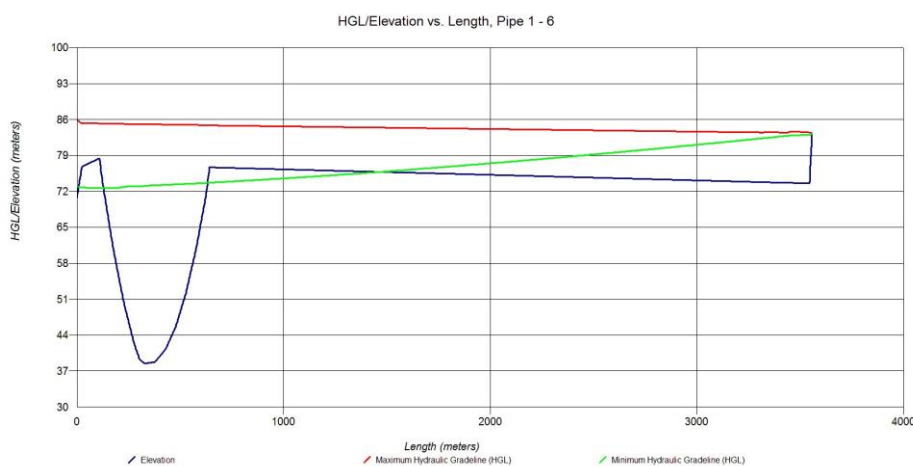
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 4. Vremenska promena Π kota u preseccima neposredno posle drugog rezervoara (Pipe 4 - inlet), zatim na ulazu (Pipe 51 - inlet) i izlazu (Pipe 51 - outlet) iz račve, kao i u računskom preseku 900 cevi 6 (presek na rastojanju 1649.00 m od ulaza u cev 6)

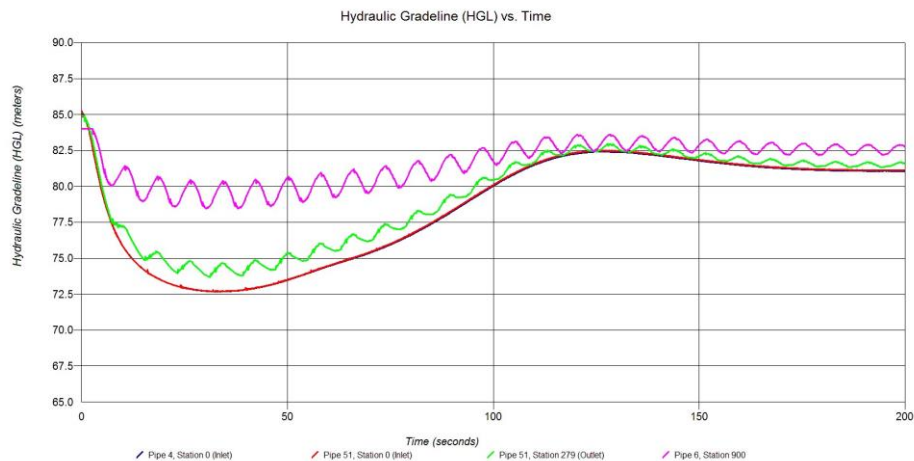
Figure 4. Time change of piezometric head in sections immediately after second reservoir (Pipe 4 - inlet), at the entrance (Pipe 51 - inlet) and at the exit (Pipe 51 - outlet) from junction, as it is presented in calculated section 900 of pipeline No.6 (section on distance of 1649.00 m from entrance to the pipeline No. 6).

U cilju eliminisanja negativnih efekata udara nastalih kao posledica ispada pumpe iz pogona, predviđene su dve komore pod pritiskom zapremine $V_{kom} = 30.0 \text{ m}^3$ po komori. Aktiviranjem ove dve komore sa početnim karakteristikama $V_{gas} = 8.65 \text{ m}^3$ i dubinom vode u rezervoaru od $H_{rez} = 1.7 \text{ m}$, a sa pretpostavkom max. kapaciteta rezervoara od $V_{max} = 30.0 \text{ m}^3$, dobijeni rezultati su prikazani na slikama 5, 6 i 7. U cilju sprečavanja uvlačenja vazduha iz komore u sistem nakon udara, predviđena je sigurnosna zapremina od $V_{sig} = 4.0 \text{ m}^3$, odnosno $H_{sig} = 0.32 \text{ m}$, što je i prikazano na slici 7.



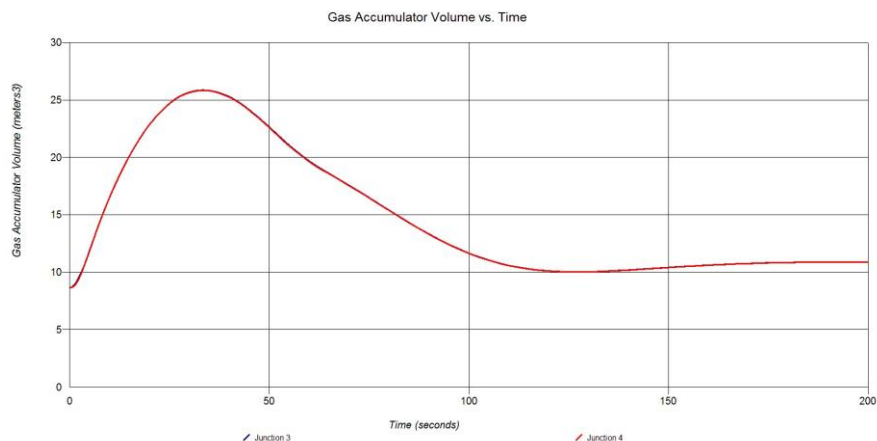
Slika 5. Prikaz max. i min. Π kota duž trase cevovoda - aktivni rezervoari
Figure 5. Presentation of max and min piezom. head along pipeline path – active reservoirs

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 6. Vremenska promena Π kota u presecima neposredno posle drugog rezervoara (Pipe 4 - inlet), zatim na ulazu (Pipe 51 - inlet) i izlazu (Pipe 51 - outlet) iz račve, kao i u računskom preseku 900 cevi 6 - aktivni rezervoari

Figure 6. Time change of piezometric head in sections immediately after second reservoir (Pipe 4 - inlet), at the entrance (Pipe 51 - inlet) and at the exit (Pipe 51 - outlet) from junction, as it is presented in calculated section 900 of pipeline No.6 – active reservoirs

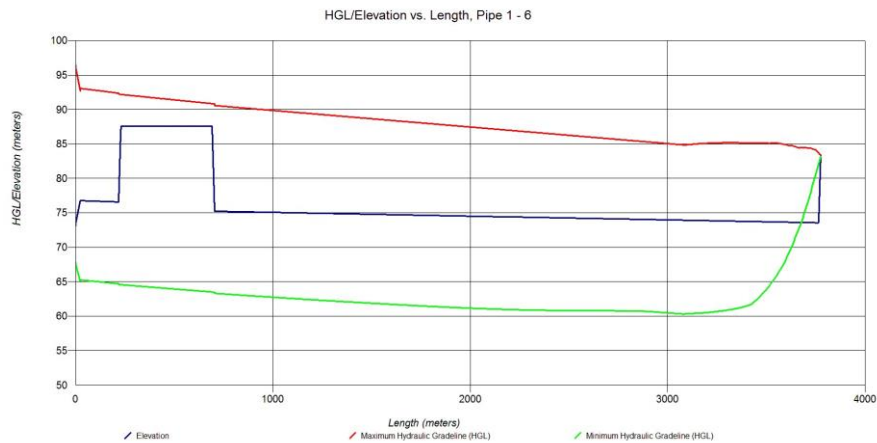


Slika 7. Vremenska promena aktivne zapremine rezervoara
Figure 7. Time change of active volume of the reservoir

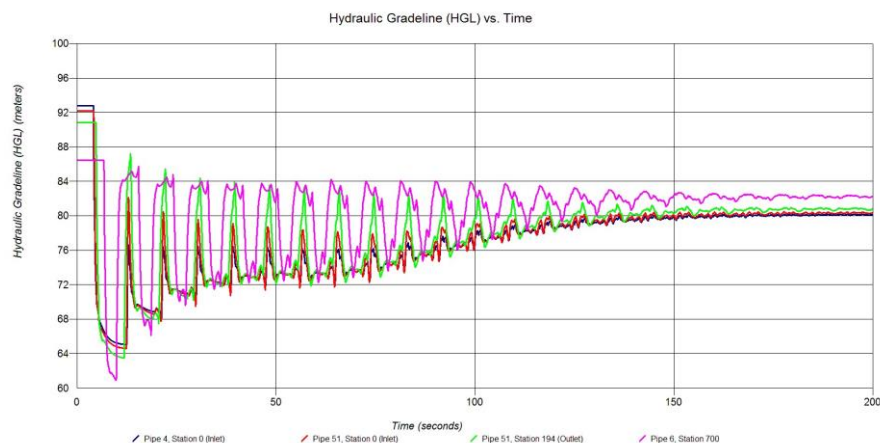
2.2 Varijanta br. 2 - Cevovod preko mosta

2.2.1 Ispad pumpi iz pogona

Za slučaj alternativne trase cevovoda preko mosta, sprovedena je identična analiza. Za slučaj ispada pumpi bez aktiviranja rezervoara, rezultati u vidu max. i min. Π kota duž trase cevovoda, kao i vremenske serije promene Π kota i apsolutnih pritisaka u karakterističnim tačkama dati su na 8 i 9.



Slika 8. Prikaz max. i min. Π kota duž trase cevovoda
 Figure 8. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path



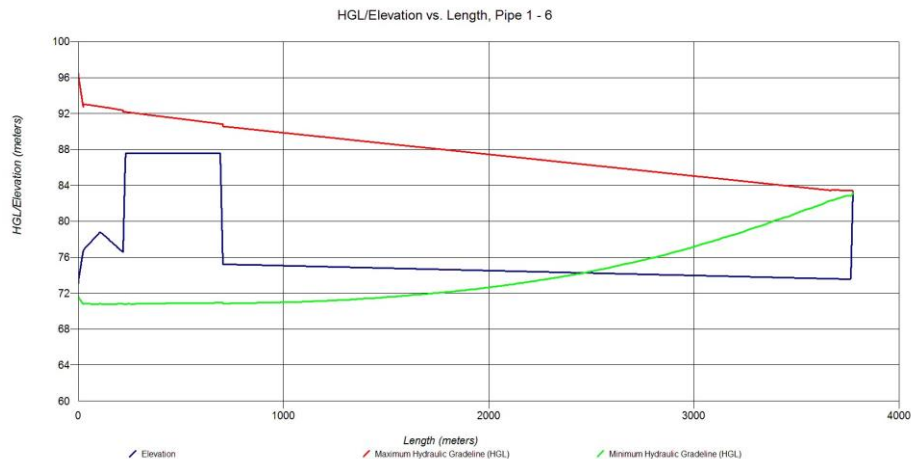
Slika 9. Vremenska promena Π kota u presecima neposredno posle drugog rezervoara (Pipe 4 - inlet), zatim na ulazu (Pipe 51 - inlet) i izlazu (Pipe 51 - outlet) iz račve, kao i u računskom preseku 700 cevi 6 (presek na rastojanju 1705.56 m od ulaza u cev 6)
 Figure 9. Time change of piezometric head in sections immediately after second reservoir (Pipe 4 - inlet), at the entrance (Pipe 51 - inlet) and at the exit (Pipe 51 - outlet) from junction, as it is presented in calculated section 700 of pipeline No.6 (section on distance of 1705.56 m from entrance to the pipeline No. 6).

2.2.2 Modeliranje sistema pri uslovima aktivnih rasteretnih komora

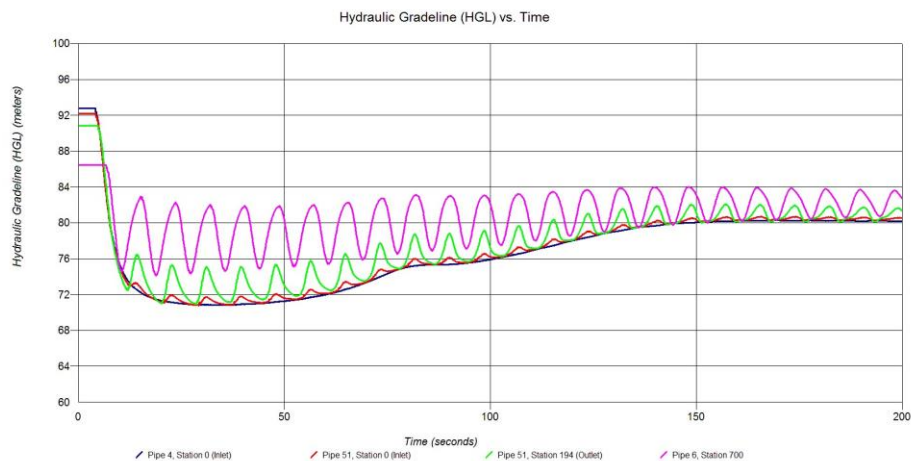
U cilju eliminacije efekata udara nastalog kao posledica ispada pumpi, i u ovom slučaju analizirana je mogućnost postavljanja dva rezervoara, max. kapaciteta $V_{\max} = 30.0 \text{ m}^3$. Zadavanjem karakteristika rezervoara u formi zapremine gasa $V_{\text{gas}} = 3.80 \text{ m}^3$ i dubina vode u rezervoaru od $H_{\text{rez}} = 2.09 \text{ m}$, dobijeni rezultati su u vidu dijagrama prikazani na slikama 10, 11 i 12. I ovde je predviđena sigurnosna zapremina od $V_{\text{sig}} = 4.0 \text{ m}^3$, odnosno $H_{\text{sig}} = 0.32 \text{ m}$.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

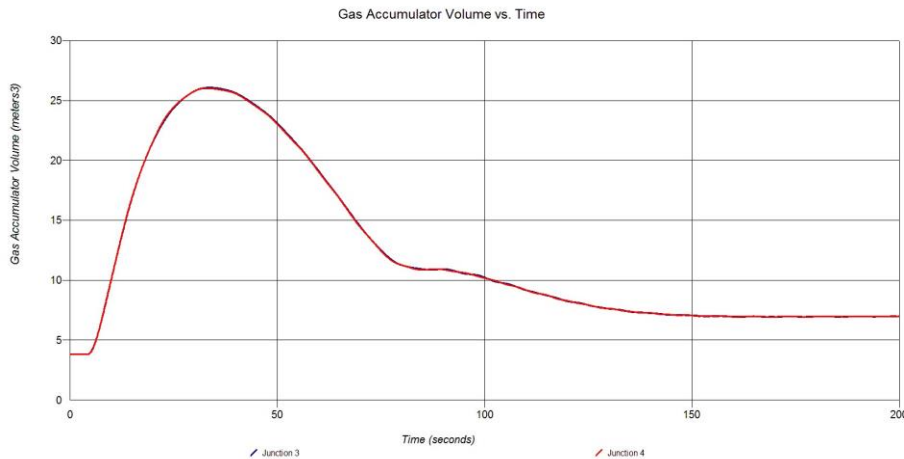
Nakon aktiviranja rasteretnih komora, dobijeni rezultati su pokazali da se na deonicama 51 i 52 u preseku 5 (preseku lociran na udaljenosti 10.0 m od ulaska u račvu) i dalje javljaju pritisci manji od pritiska zasićene vodene pare, što nedvosmisleno ukazuje na veoma kritičnu zonu sistema u pogledu opasnosti od pojave kavitacije. Ovo je evidentno na slici 13, gde je prikazana vremenska promena apsolutnog pritiska u preseku 5 deonice 51. Shodno tome, predložene mere podrazumevaju postavljanje vazдушnih ventila, koji imaju za cilj da rasterete sistem pri pojavi ekstremno niskih pritiska.



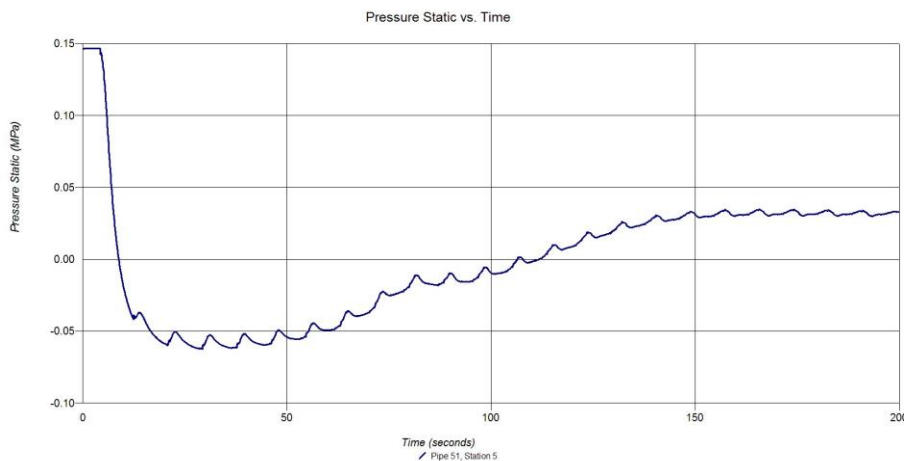
Slika 10. Prikaz max. i min. Π kota duž trase cevovoda - aktivni rezervoari
Figure 10. Presentation of max and min piezometric head along pipeline path – active reservoirs



Slika 11. Vremenska promena Π kota u presecima neposredno posle drugog rezervoara (Pipe 4 - inlet), zatim na ulazu (Pipe 51 - inlet) i izlazu (Pipe 51 - outlet) iz račve, kao i u računskom preseku 700 cevi 6 - aktivni rezervoari
Figure 11. Time change of piezometric head in sections immediately after second reservoir (Pipe 4 - inlet), at the entrance (Pipe 51 - inlet) and at the exit (Pipe 51 - outlet) from junction, as it is presented in calculated section 700 of pipeline No.6 – active reservoirs



Slika 12. Vremenska promena aktivne zapremine rezervoara
 Figure 12. Time change of active volume of the reservoir



Slika 13. Vremenska promena pritiska u preseku neposredno po ulasku u račvu deonice 51
 Figure 13. Time change of pressure in section immediatelly at the entrance into junction at the part 51

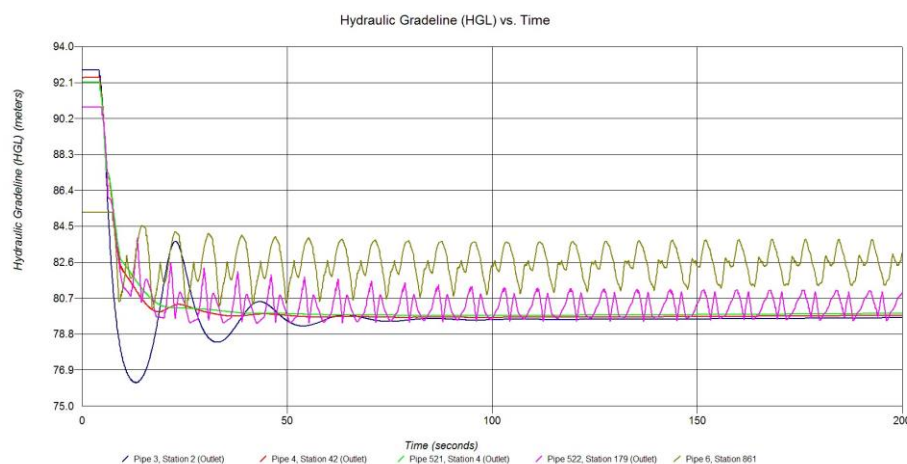
2.2.3 Aktiviranje vazdušnih ventila

Kako bi se eliminisale ekstremno niske vrednosti pritisaka nastale kao posledica hidrauličkog udara, sa posebnim akcentom na rešavanja pitanja kavitacije, predloženo je postavljanje vazdušnih (rasteretnih) ventila, koji imaju ulogu rasterećenja sistema, kako kod ekstremno niskih tako i kod izuzetno visokih vrednosti pritisaka. U ovom slučaju za lokaciju ventila izabrana su kritična mesta sa stanovišta pojave ekstremno niskih pritisaka (kaviatacije), tako da je po jedan ventil postavljen na preseke 5 (presek lociran na udaljenosti 10.0 m od ulaska u račvu) deonica 51 i 52. Ventili su modelirani prema dostupnim karakteristikama u pogledu protoka vazduha, sa dinamikom aktiviranja kada pritisak na datoj lokaciji opadne ispod

vrednosti atmosferskog pritiska. U cilju postizanja jasnije slike o ulozi vazdušnog ventila u sprečavanju posledica udara, simulirana su tri stanja:

1. Postavljanje ventila na postojeću konfiguraciju sistema - aktivne dve komore sa prethodno definisanim parametrima u pogledu zapremina gasa i vode (Slike 14, 15 i 16),
2. Uklanjanje komora i modeliranje sistema uz prisustvo samo vazdušnih ventila (Slika 17),
3. Kombinovano dejstvo ventila i komora, uz postizanje optimalnih parametara zapremine gasa i vode u rezervoarima (Slike 18 i 19).

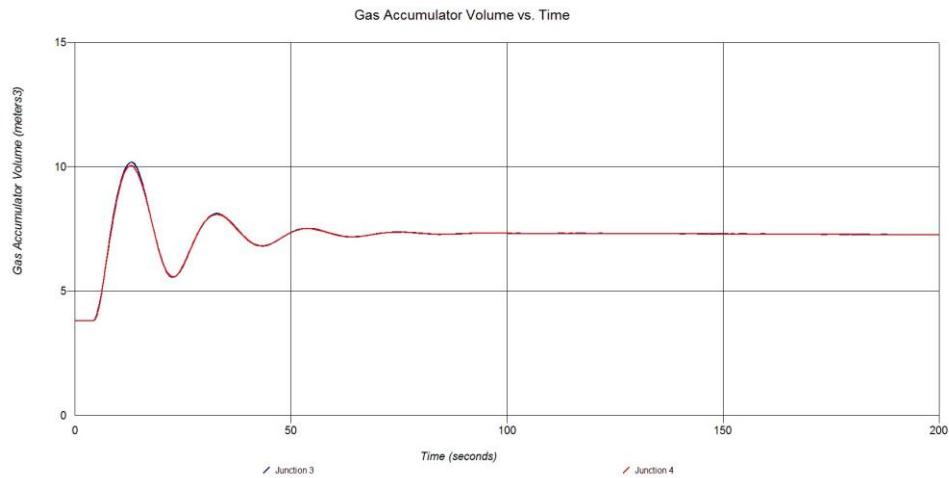
Poređenjem slika 14, 17 i 18 uviđa se da vazdušni ventil bez prisustva komora (Slika 17) znatno redukuje oscilacije pritiska nastale ispadom pumpi (Slika 9), ali ipak dozvoljava najveće oscilacije u poređenju sa slučajevima sa komorama (Slika 14 i 18). Uključivanjem komora pod pritiskom (Slika 14) sa parametrima usvojenim u prethodnom slučaju ($V_{\text{gas}} = 3.80 \text{ m}^3$ i dubina vode u rezervoaru od $H_{\text{rez}} = 2.09 \text{ m}$), oscilacije se delimično redukuju, što ukazuje na nedovoljnu iskorišćenost rasteretnih komora. Slika 15 ukazuje na to da potencijal rezervoara u pogledu raspoložive zapremine nije u potpunosti iskorišćen. Iz tog razloga modelirano je stanje po prethodno utvrđenim kriterijumima za komore ($V_{\text{sig}} = 4.0 \text{ m}^3$, odnosno $H_{\text{sig}} = 0.32 \text{ m}$), dok su rezultati prikazani na slikama 18 i 19. U ovom slučaju oscilacije su svedene na najmanju moguću meru, barem što se tiče teoretskog i računskog dela. Unos vazduha u sistem je konstantan i kreće se oko $0.27 \text{ kg/s} = 210.0 \text{ l/s}$, što je i prikazano na slici 16.



Slika 14. Vremenska promena Π kota u presecima na izlazu iz cevi 3 (cev između dva rezervoara), na izlazu iz cevi 4 (cev između drugog rezervoara i račve), neposredno pre ventila na deonici 52, neposredno pre izlaska iz cevi 52 kao i na sredini cevi 6 - ventil sa prethodno definisanim komorama

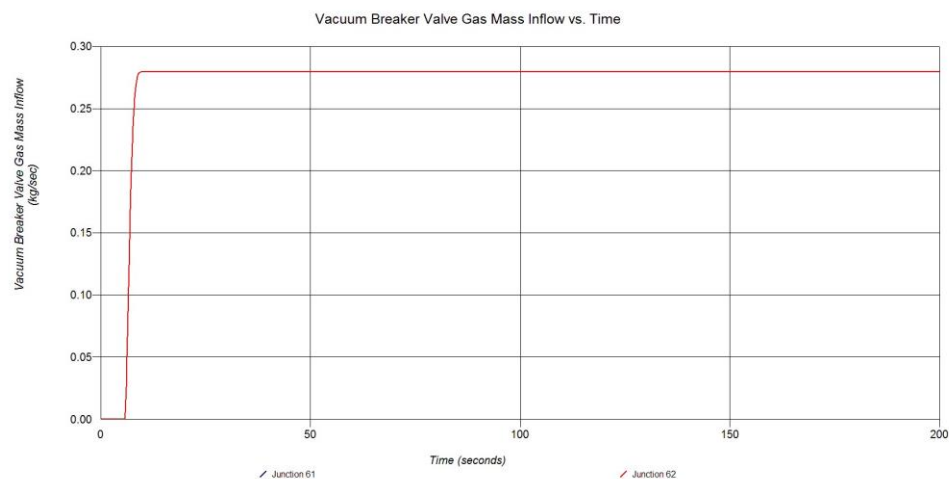
Figure 14. Time change of piezometric head in sections at the entrance (pipe between two reservoirs), at the exit of pipe 4 (pipe between reservoir and junction), immediately before valve in section 52, immediately at the exit of pipe 52 and on the middle of pipe 6 - valve with previously defined chambers

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 15. Vremenska promena aktivne zapremine komora - ventil sa predhodno definisanim komorama

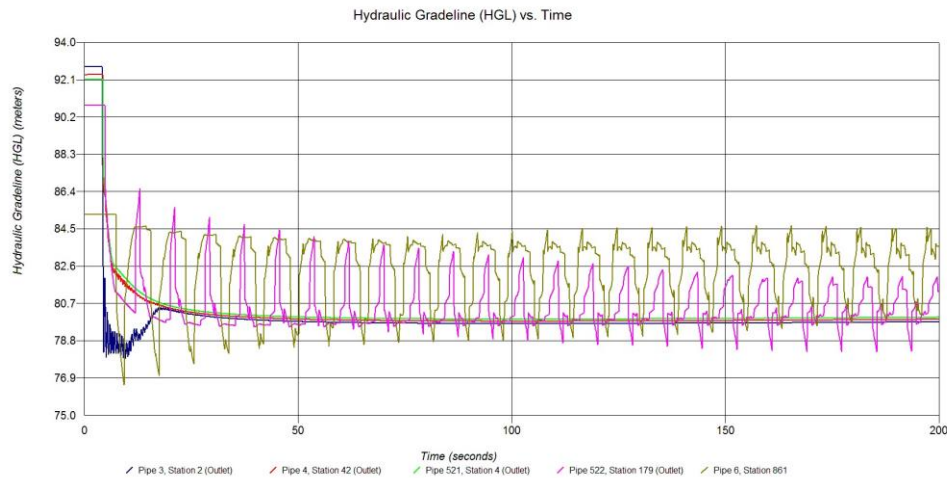
Figure 15. Time change of active volume of chambers – valve with previously defined chambers



Slika 16. Vremenska promena masenog protoka vazduha - ulaza vazduha u sistem

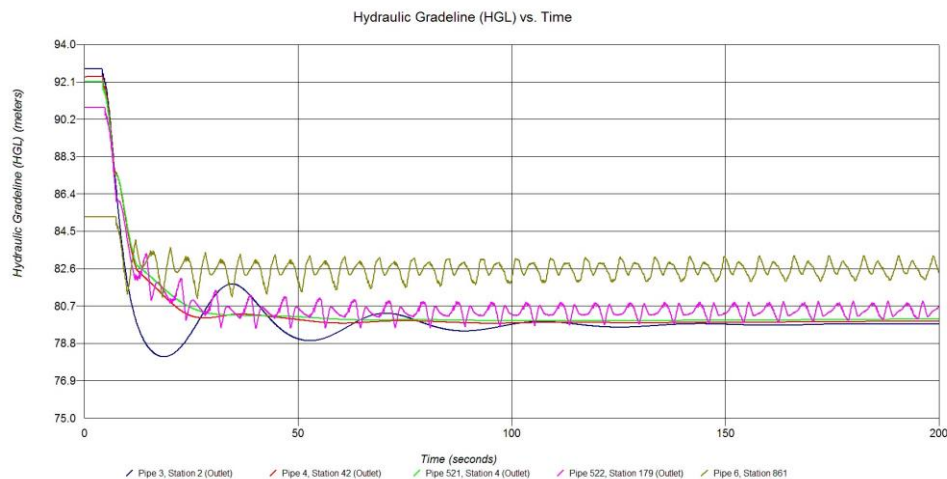
Figure 16. Time change of mass air flow – air entrance into the system

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



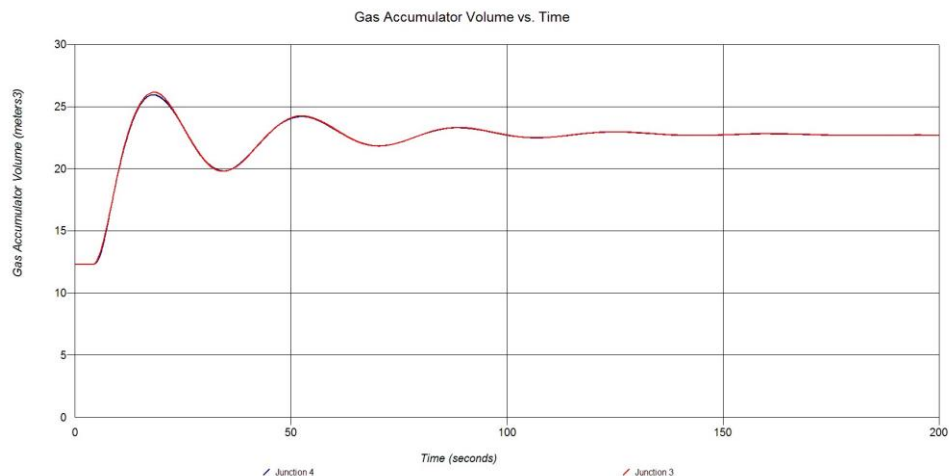
Slika 17. Vremenska promena Π kota u presecima na izlazu iz cevi 3 (cev između dva rezervoara), na izlazu iz cevi 4 (cev između drugog rezervoara i račve), neposredno pre ventila na deonici 52, neposredno pre izlaska iz cevi 52 kao i na sredini cevi 6 - ventil bez komora

Figure 17. Time change of piezometric head in sections at the exit of pipe 3 (pipe between two reservoirs), at the exit of pipe 4 (pipe between second reservoir and junction), immediately before valve in section 52, immediately at the exit of pipe 52 and on the middle of pipe 6 - valve without chambers



Slika 18. Vremenska promena Π kota u presecima na izlazu iz cevi 3 (cev između dva rezervoara), na izlazu iz cevi 4 (cev između drugog rezervoara i račve), neposredno pre ventila na deonici 52, neposredno pre izlaska iz cevi 52 kao i na sredini cevi 6 - ventil sa korigovanim parametrima komora

Figure 18. Time change of piezometric head in sections at the exit of pipe 3 (pipe between two reservoirs), at the exit of pipe 4 (pipe between second reservoir and junction), immediately before valve in section 52, immediately at the exit of pipe 52 and on the middle of pipe 6 - valve with adjusted parameters of chambers



Slika 19. Vremenska promena aktivne zapremine rezervoara
Figure 19. Time change of active volume of chambers

Literatura

1. http://www.aft.com/documents/AFT_datasheets_Impulse_5.pdf
2. <http://www.aft.com/aft-impulse-quickstart-1>
3. Idejni projekat: Južni kolektor – deonica GC1 – GC2 sa objektima, AD „Vojvodinaprojekt“, Novi Sad, 2012.
4. Ivetić M., Računska hidraulika – Tečenje u cevima, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996.

Analiza funkcionisanja kombinovane kanalizacije gradskog područja Novog Sada

Matija Stipić¹
Borislav Mašić²
Filip Stipić³
Andrea Salvai⁴

APSTRAKT: Rad obuhvata analizu funkcionisanja kombinovane kanalizacione mreže grada Novog Sada sa ciljem sagledavanja stanja odvođenja otpadnih i atmosferskih voda. Obuhvata analizu tečenja za kiše povratnog perioda jednom u 3 odnosno 5 godina na matematičkom modelu postojećeg stanja kanalizacione mreže. Na dogradjenom modelu mreže analizira se tečenje u uslovima konstantnog koeficijenta oticaja za ceo sliv, a zatim i promenljivog koeficijenta oticaja, sračunatom za pojedine kvartove grada. Hidraulički proračun kombinovanog kanalizacionog sistema grada Novog Sada je urađen primenom softverskog paketa EPA SWMM 5.0, koji je opšte prihvaćen za ovakvu vrstu proračuna. Rad prikazuje mogućnosti preopterećenja i plavljenja sistema.

Ključne reči: kombinovana kanalizacija, preopterećenost, plavljenje

The analysis of the combined sewer system operation in the city of Novi Sad

ABSTRACT: The analysis of the combined sewer system operation in the city of Novi Sad is discussed in the paper to provide deeper understanding of the current wastewater and stormwater management. The 3- and 5-year return period rainfall events runoff is analysed using the numerical modelling of the existing sewer network. The flow is analyzed for the extended network model with the constant runoff coefficient first and then with the variable runoff coefficient calculated for the individual city areas. The hydraulic calculation of the combined sewer system in the city of Novi Sad was obtained using the software package EPA SWMM 5.0, widely recognized for this type of calculations. The overloading and overflowing capacity of the system is presented in the paper.

Keywords: combined sewer system, overloading, overflowing

¹ Doc. dr Matija Stipić, dipl.inž.građ., AD "Vojvodinaprojekt", Novi Sad, matija@vojvodinaprojekt.rs

² Mast. Borislav Mašić, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, boramasic@gmail.com

³ Mast. Filip Stipić, dipl.inž.građ., AD "Vojvodinaprojekt", Novi Sad, filip@vojvodinaprojekt.rs

⁴ Mast. Andrea Salvai, dipl.inž.građ., JP "Zavod za izgradnju grada", Novi Sad, andrea.salvai@zigns.rs

1 Uvod

Analiza tečenja u kanalizacionoj mreži obuhvata tečenje u kolektorima kada nema preopterećenja u mreži (tečenje sa slobodnim vodenim ogledalom) i kada je tečenje pod pritiskom (prema srpskom standardu SRPS EN 752-4). Postojeći model kanalizacione mreže grada Novog Sada obuhvata model glavnih kolektora, sa profilima prečnika 600 mm i veći, uz planiranu nepropusnu površinu sa koeficijentom oticanja od 35%. Dopunjen model kanalizacionog sistema grada Novog Sada, koji je predmet ovog rada, dopunjen je i cevima prečnika manjeg od 600 mm, a većeg od 200 mm. Početna ravnomerna nepropusnost po celoj površini grada od 35% će se u dogradjenom modelu zameniti promenljivom, u skladu sa stvarnom izgrađenošću nepropusnih površina po pojedinim delovima (kvartovima) grada.

U cilju dobijanja stvarnih podataka o protoku otpadnih voda na delu gradskog sliva je instalirana oprema za merenje protoka (na izlivu sa severnog gradskog sliva kod crpne stanice GCII). Za merenje protoka se koristi oprema koju je instalirao Fakultet tehničkih nauka-Departman za zaštitu životne sredine.

Hidraulički model dopunjene kanalizacione mreže se formira korišćenjem postojećeg hidrauličkog modela, podataka iz geografskog informacionog sistema, korišćenjem podataka sa KAT-KOM podloga, postojećih projekata, kao i podataka dobijenih neposrednim merenjem na terenu. Podaci o učešću propusnih i nepropusnih površina pojedinih delova grada se određuju na bazi podataka GIS-a grada Novog Sada, google mape i urbanističkih podloga. Hidrauličkim proračunom kanalizacione mreže se analizira slučaj slobodnog izlivanja (gravitaciono tečenje), kada je nivo recipijenta–reke Dunava niži od dna izlivnog kolektora (kada je vodostaj Dunava niži od +240 cm) tj. kada je vodostaj Dunava manji od $71,73 \text{ mm} + 2,4 \text{ m} = 74.13 \text{ mm}$. Modeliranje kanalizacione mreže će se izvršiti primenom važećih domaćih direktiva kao i direktiva EU, za dimenzionisanje gradskih kanalizacionih sistema (povratni period kiše jednom u 3, odnosno jednom u 5 godina) kao i primenom domaćih standarda i preporuka.

2 Metodologija

2.1 Geografski položaj grada Novog Sada

Novi Sad je administrativni centar Autonomne Pokrajine Vojvodine. Grad se nalazi na granici Bačke i Srema u panonskoj ravnici i na severnim obroncima Fruške gore. Nadmorska kota uravnjenog dna Panonske nizije na kojoj leži grad Novi Sad kreće se u granicama od 76 mm do 82 mm Na desnoj obali Dunava teren je na kotama od 77 mm do 180 mm. Na području Rimskih Šančeva, u neposrednoj blizini grada novog Sada, koja predstavlja državnu hidrometeorološku stanicu, srednja godišnja količina padavina iznosi oko 609 mm.

2.2 Postojeći kanalizacioni sistem grada Novog Sada

Na području grada Novog Sada, kanalizacioni sistem je opšti (kombinovani) sa zajedničkom mrežom za upotrebljene vode (domaćinstvo, industrija) i atmosfere vode. Kanalizacioni sistem je dimenzionisan za prihvatanje oticaja od atmosferskih padavina za povratni period od dve, odnosno tri godine, zavisno od gradske zone u kojoj se sistem nalazi [2]. Sistem je

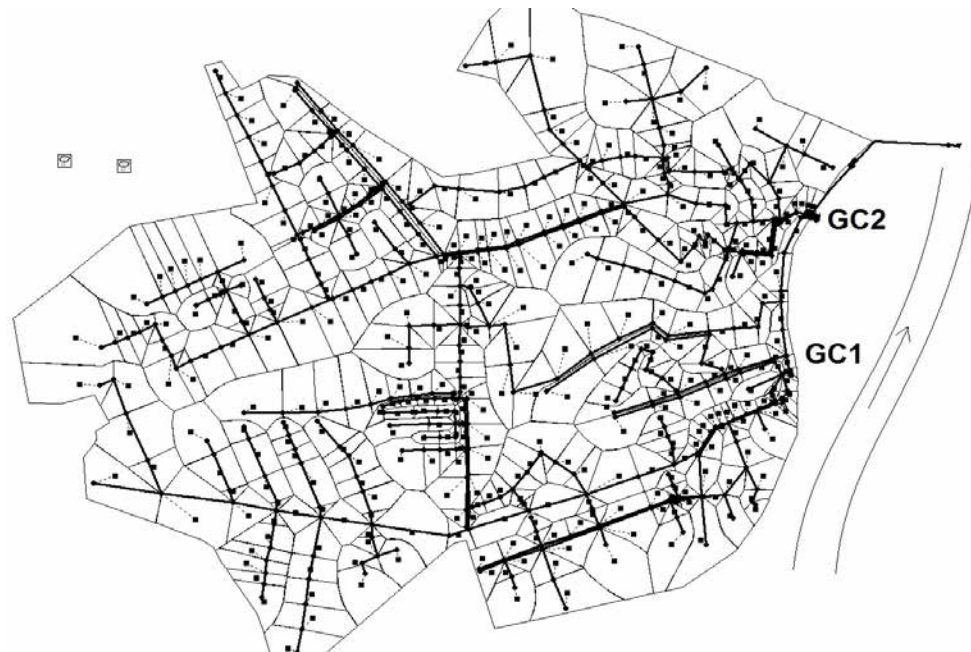
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

podeljen na dva sliva: južni i severni gradski kanalizacioni sliv, koji se završavaju sa glavnim crpnim stanicama GC1 i GC2.

Severni gradski kanalizacioni sliv je površine oko 930 ha i na ovaj sliv su orijentisane otpadne vode i atmosferske vode prostora severno od Futoške ulice, Jevrejske i Bulevara Mihajla Pupina i južno od kanala Dunav-Tisa-Dunav. Recipijent otpadnih voda severnog gradskog sliva je reka Dunav, neposredno nizvodno od crpne stanice GC2.

Južni gradski kanalizacioni sliv je površine oko 1060 ha i na ovaj sliv su orijentisane otpadne i atmosferske vode prostora južno od Futoške ulice, Jevrejske ulice, Bulevara Mihajla Pupina, do obale reke Dunav granično sa Veternikom na zapadu. Na zapadnom delu grada, priključene su na glavni kolektor južnog sliva otpadne vode naselja Veternik i Futog. Recipijent otpadnih voda južnog gradskog sliva je reka Dunav, neposredno nizvodno od crpne stanice GC1.

Atmosferske i otpadne vode na glavnim crpnim stanicama GC1 i GC2 se pri vodostajima Dunava nižim od +240cm gravitaciono ispuštaju u reku, dok se pri višim vodostajima vrši prepumpavanje vode u Dunav. Na slici 1, prikazan je postojeći sistem kanalizacione mreže grada Novog Sada, na kojoj se mogu uočiti podebljani glavni kolektori.



Slika 1. Postojeći model kanalizacione mreže grada Novog Sada (podebljani glavni kolektori)

Figure 1. The existing sewer network model in the city of Novi Sad (force mains in bold)

Na osnovu izvršene analize postojećeg stanja odvođenja otpadnih i atmosferskih voda grada Novog Sada može se zaključiti sledeće [7]:

- otpadne vode se ne prečišćavaju do zahtevanog kvaliteta, u odnosu na kvalitet koji zahteva recipijent;
- periferni sekundarni kolektori su dimenzionisani za kišu sa povratnim periodom od dve godine u trajanju od 20 minuta;

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- kanalizaciona mreža koja je izgrađena pre 1980. godine, projektovana je na osnovu kiše intenziteta od 100 L/s/ha sa trajanjem od 20 minuta;
- kanalizaciona mreža u novim blokovima grada zadovoljava projektovane kapacitete;
- stara kanalizaciona mreža u užem centru grada ne zadovoljava potrebe kako kapacitativno tako i funkcionalno, i treba se postepeno izvršiti njena zamena. Preopterećenost stare mreže izaziva poplave niskih terena i suterenskih prostorija;
- razlog plavljenja u novim stambenim blokovima treba tražiti u nedovoljnom broju slivnika;
- ispuštanje otpadne vode u Dunav predstavlja problem zaštite životne sredine, koji treba rešiti izgradnjom postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda i rekonstrukcijom kanizacionog sistema.

2.3 Utvrđivanje nepropusnih površina po delovima gradskog područja

Nepropusnost predstavlja procenat dela slivnog područja pokrivenog površinama, kao što su krovovi, putevi, trotoari, parkinzi, sa koga sve atmosferske padavine otiču u kanizacioni sistem. Ovaj parametar je obično najosetljiviji parametar u hidrološkoj karakterizaciji slivnog područja. Kreće se u rasponu od 5% za neizgrađeno zemljište, pa sve do 95% za gusto izgrađena zemljišta [5]. Za grad Novi Sad, procenat nepropusnosti računat je za svaki deo grada pojedinačno. Sračunate su nepropusne površine za delove grada kao što su: Liman, Telep, Novo Naselje, Detelinara, Banatić, Podbara, Salajka, Centar i Grbavica. U tabeli 1, dat je procentualni prikaz nepropusnih površina po delovima grada Novog Sada. Sa jedne strane kao nepropusne površine su izdvojene krovne površine, putevi, trotoari, dok su preostale površine zelene propusne površine sa kojih nema direktnog oticaja u kanizacioni sistem. Odnos nepropusne površine i ukupne površine jednog slivnog područja predstavlja koeficijent oticanja. Takođe, izdvojene su parkovske površine i groblja sa kojih nema oticaja. Na ovaj način dobijen je realniji model nepropusnih površina na teritoriji grada sa kanizacionim sistemom.

Tabela 1. Procentualni prikaz nepropusnih površina po delovima grada
Table 1. Percentage of impervious surfaces per the city areas

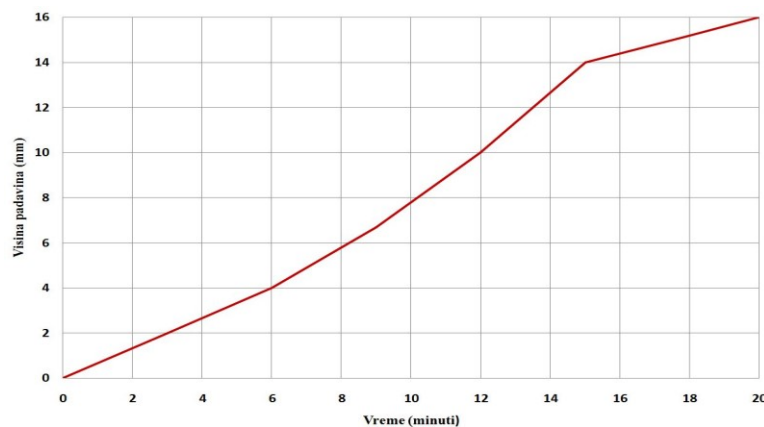
Deo grada	Procenat nepropusnih površina (%)
Banatić	30
Novo Naselje	35
Telep	30
Liman	30
Detelinara	31
Salajka	26
Podbara	39
Centar	60
Grbavica	50

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Za izračunavanje ukupnih nepropusnih površina po delovima grada korišćene su georeferencirane podloge-KAT-KOM podloge, koje su unete u Auto CAD, odakle su izdvojene nepropusne površine, kao i zelene površine. Sračunata srednja (prosečna) vrednost nepropusnih površina celog slivnog područja grada Novog Sada iznosi 35 %.

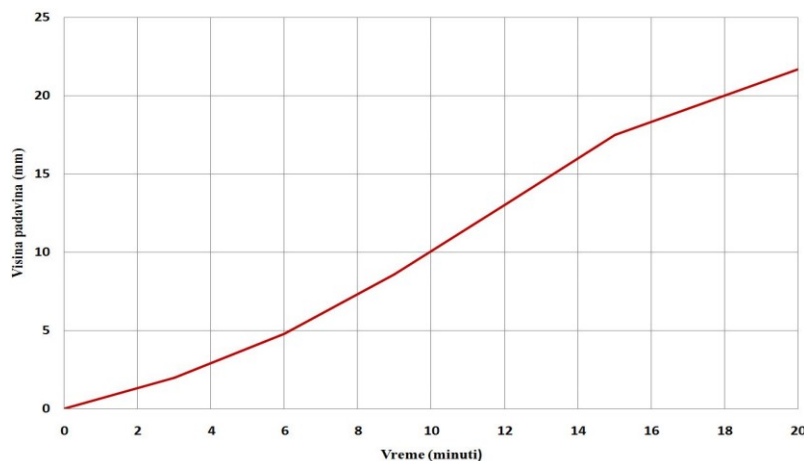
2.4 Određivanje merodavnih padavina

Dimenzionisanje atmosferske kanalizacije vrši se u skladu sa merodavnom kišom. Za određivanje merodavnih kiša napravljena je statistička analiza kiša na najbližoj meteorološkoj stanici Rimski Šančevi. Intenzitet kiše na ITP krivama predstavlja prosečne intenzitete kiše tokom njihovog trajanja. Na slikama 2 i 3 prikazani su kumulativni dijagrami visine padavina za kišu povratnog perioda od 3 i 5 godina u trajanju od 20 min.



Slika 2. Kumulativni dijagram visine padavina za kišu povratnog perioda 3 godina u trajanju od 20 minuta.

Figure 2. Cumulative diagram of rain depth for storm duration of 20 minutes and 3 years return period



Slika 3. Kumulativni dijagram visine padavina za kišu povratnog perioda 5 godina u trajanju od 20 minuta.

Figure 3. Cumulative diagram of rain depth for storm duration of 20 minutes and 5 years return period

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Prema srpskom standardu, SRPS EN 752-4, za kanalizacione sisteme izvan objekata, hidraulički proračun kanalizacione mreže se sprovodi tako da ne sme doći do preopterećenja mreže (prvi uslov) kao ni do pojave tečenja pod pritiskom u cevima (drugi uslov) kada se mreža dimenzioniše na kišu povratnog perioda jednom u 5 godina, za centralno gradsko područje, odnosno jednom u 3 godine za stambene oblasti [4]. Kanalizacioni sistem grada Novog Sada je dimenzionisan za prihvatanje oticaja od atmosferskih padavina za povratni period od tri i od pet godina (slika 4) [5,6]. Na kišu povratnog perioda od 5 godina dimenzionisano je centralno gradsko područje, a na kišu povratnog perioda od 3 godine dimenzionisano je stambeno gradsko područje (Telep, Novo Naselje, Detelinara).



Slika 4. Raspedela kiša povratnog perioda od 3 i 5 godina
Figure 4. Three- and five-year storms design for city area

2.5 Analiza merodavnih količina vode

Na osnovu dokumenta „Demografski razvoj grada Novog Sada, Centar za prostorne informacije Vojvodine, Novi Sad, 2009“ utvrđeno je da na delu grada koji gravitira južnom i severnom slivu živi 230 000 stanovnika [1]. U gradu studira 20 000 studenata, koji stalno žive u gradu, a nisu zavedeni u registru. Na kanalizacioni sistem grada Novog Sada priključene su i otpadne vode naselja Futog i Veternik sa 42 000 stanovnika. Prema tome, ukupan broj stanovnika koji pripada glavnom gradskom slivu je cca 290 000 stanovnika [1]. Na osnovu studije stanovanja, za Generalni plan grada Novog Sada, gde su dati podaci o broju stanovnika za kvartove grada, sračunato je da na severnom gradskom slivu živi 140 000 stanovnika.

Na osnovu analize potrošnje vode iz javnog vodovodnog sistema, utvrđena je prosečna specifična potrošnja vode po stanovniku od 250 L/stan.dan. Ova specifična potrošnja obuhvata i prosečnu potrošnju javnih ustanova, sportskih objekata, restorana, škola i zaposlenih u privredi i vanprivredi. Od ukupne potrošnje vode, na osnovu strukture potrošnje,

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

može se usvojiti da se 90% vode ispušta u kanalizaciju, u vidu upotrebljene vode od stanovništva i javnih ustanova.

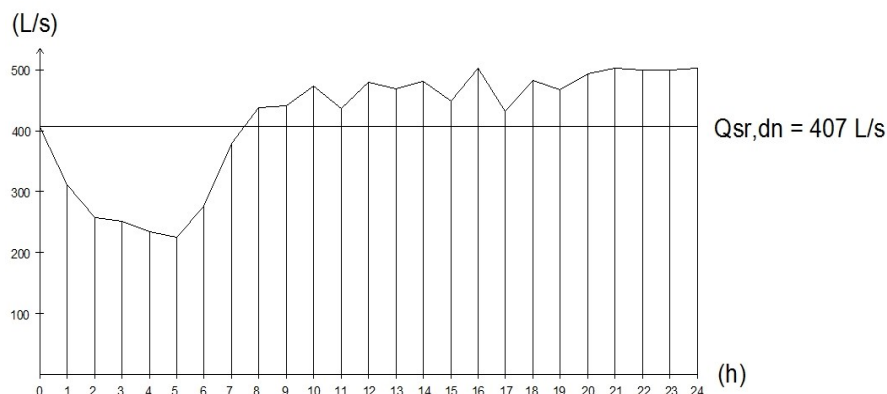
Na osnovu usvojenog procenta upotrebljene vode, dobija se ukupna srednja dnevna produkcija otpadnih voda stanovništva sa oba sliva:

$$Q_{sr.dn} = 290000st. \cdot 250L / st / dan \cdot 0.9 = 65250m^3 / dan \quad (1)$$

Ukupna srednja dnevna produkcija otpadnih voda severnog gradskog sliva, analogno sa (1), iznosi 31500 m³/dan. Ukupna dužina kanalizacione mreže severnog gradskog sliva iznosi približno 200 km. Ukoliko se usvoji infiltracija na nivou od 0.25 L/s/km' kanalizacionog kolektora, dobija se ukupna dnevna infiltracija na severnom gradskom slivu od:

$$Q_{inf.dn} = 200km \cdot 0.25L / s / km = 50L / s = 4320m^3 / dan \quad (2)$$

Ukupni sračunati srednji dnevni protok severnog gradskog sliva je 31500 m³/dan (stanovništvo i industrija) + 4320 m³/dan (infiltracija) = 35820 m³/dan, odnosno 414 L/s. Na slici 5 su prikazani rezultati merenja protoka otpadne vode u toku jednog dana na izlivu severnog gradskog sliva, kod crpne stanice GC 2. Na osnovu merenja se može ustanoviti da srednji dnevni protok upotrebljene vode sa severnog sliva iznosi oko 407 L/s, što je približno sa sračunatom vrednošću od oko 414 L/s.



Slika 5. Protok kod crpne stanice GC2 tokom jednog dana
Figure 5. Pump station GC 2 daily discharge rate.

Severni gradski sliv je analiziran zasebno, da bi se verifikovao izračunat srednji dnevni dotok otpadnih voda na GC 2, na osnovu izmerenih vrednosti. Ukupna srednja dnevna produkcija otpadnih voda stanovništva, dobijena računski za celokupno gradsko područje, je unošena u svaki čvor modela kanalizacione mreže grada Novog Sada kao protok otpadne vode prilikom beskišnih perioda (pri suvom vremenu).

2.6 Primena programskog paketa SWMM

EPA model odvođenja atmosferske vode (SWMM) predstavlja deterministički, distribuirani i dinamički model simulacije količine padavina-oticanja zasnovan na fizičkim procesima, za jednu epizodu ili dužu (neprekidnu) simulaciju količine atmosferske vode, prvenstveno iz urbanih sredina. Komponenta atmosferske vode u SWMM modelu funkcioniše na principu zbira slivnih područja, koja dobijaju padavine i iz kojih potiče atmosferska voda i taloženje polutanata. Prostorna varijabilnost u svim hidrološkim procesima u okviru SWMM-a postiže se podelom proučavanog područja (sliva) na skup manjih, homogenih slivnih područja (podslivova), od kojih svaki ima sopstvenu podelu na propusne i nepropusne površine [3]. Nadzemni tok može da se usmerava između tih oblasti, između slivnih područja ili između ulaznih tačaka atmosferske kanalizacije.

U okviru koncepta površinskog oticanja vode koji koristi SWMM, svako slivno područje tretira se kao nelinearni, veoma plitak rezervoar. Model odvođenja atmosferske vode SWMM pretpostavlja jednoliko površinsko tečenje vode na izlazu sa svakog podsliva, a površinski oticaj se dobija korišćenjem Manningove jednačine. U SWMM su na raspolaganju tri različite metode za izračunavanje gubitaka usled infiltracije na propusnim područjima slivnog područja: Hortonov model, model Grin-Ampt i model CN broja (krive) [3]. Tečenje vode je u sistemima atmosferske kanalizacije uglavnom neustaljeno, pa je od velikog značaja za rezultate obuhvatiti sve uticaje koji se u tom slučaju javljaju. Obračun protoka u kolektorima u SWMM se zasniva na jednačinama održanja mase i količine kretanja za neustaljeno, jednodimenzionalno (linijsko) tečenje u kanalima (Sent-Venantove jednačine protoka). Za rešavanje Sent-Venantovih jednačina program SWMM primenjuje tri modela proračuna, odnosno tri numerička metoda: model ustaljenog tečenja, model kinematskog talasa i model dinamičkog talasa [3]. Metodu obračuna proticaja u kolektorima u okviru programa SWMM, korisnik može da bira prema nivou osetljivosti samog sistema na promenu određenih fizičkih parametara modela i u zavisnosti od zahtevane tačnosti rezultata modela. U radu je korišćen model dinamičkog talasa.

3 Rezultati i diskusija

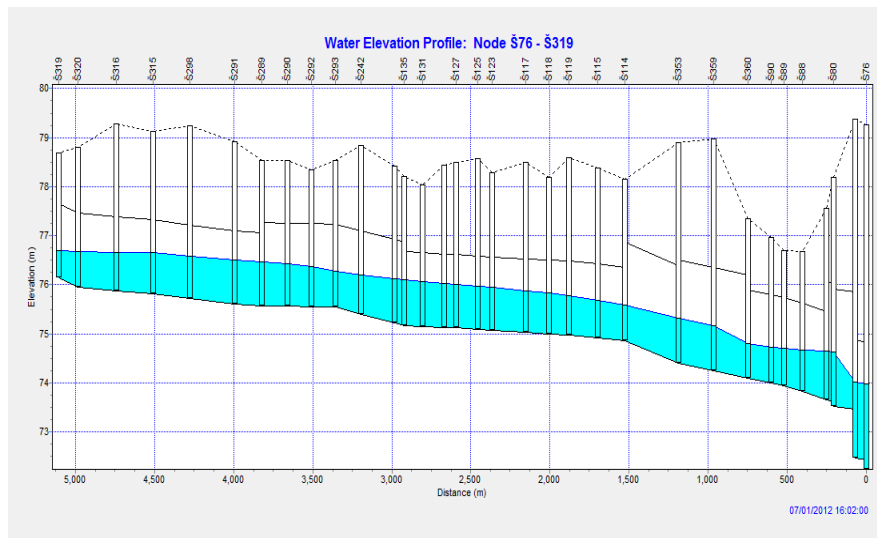
3.1 Analiza hidrauličkog proračuna prema postojećem modelu kanalizacione mreže

Postojeći model kanalizacione mreže grada Novog Sada obuhvata model glavnih kolektora sa prečnicima od \varnothing 600 mm pa naviše. Razmatrano slivno područje Novog Sada obuhvata površinu od 1985 ha, od čega zelene površina obuhvataju svega 73 ha U ovu površinu spadaju parkovske površine i površine groblja. Usvojeni ujednačeni planski procenat nepropusnih površina je 35%. Ukupna dužina kanalizacione mreže iznosi 71.3 km. Model se sastoji od 414 čvorova-šahtova i 418 deonica-kolektora (slika 1). U proračunu je usvojen Maninngov koeficijent hrapavosti za cevni materijal sa $0.014 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$. U ovoj simulaciji je primenjen Hortonov model proračuna infiltracije i metod dinamičkog talasa za proračun tečenja u cevima.

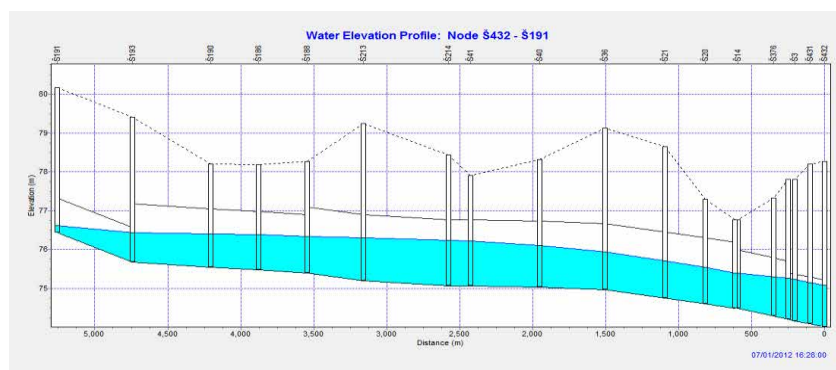
Na slikama 6 i 7 prikazani su uzdužni profili glavnih kolektora severnog i južnog gradskog sliva sa maksimalnom linijom nivoa vode, gde se zaključuje da na ovim kolektorima

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

ne dolazi do izlivanja vode iz šahtova, niti do pojave tečenja pod pritiskom. Maksimalna ispunjenost ovih kolektora je do 70% prečnika.



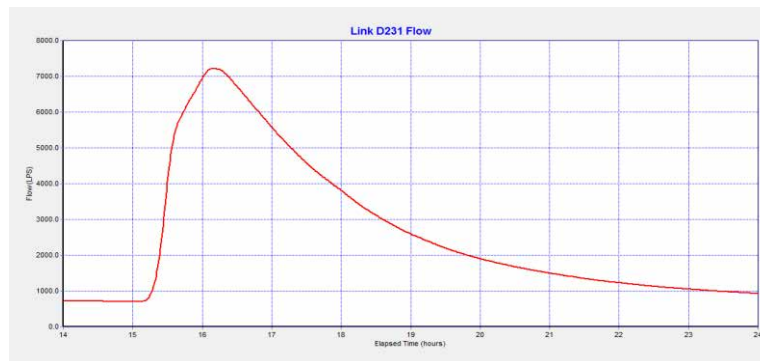
Slika 6. Uzdužni profil glavnog kolektora severnog sliva sa maksimalnom linijom nivoa vode
Figure 6. Longitudinal profile of the north city subcatchment force main with maximum water elevation



Slika 7. Uzdužni profil glavnog kolektora južnog sliva sa maksimalnom linijom nivoa vode
Figure 7. Longitudinal profile of the south city subcatchment force main with maximum water elevation

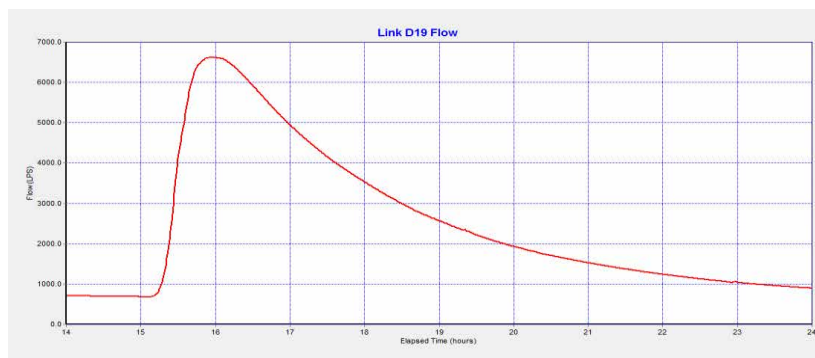
Na slikama 8 i 9 prikazani su hidrogrami dotoka otpadne vode na izlivu kod glavnih crpnih stanica GC2 i GC1 za kišu povratnog perioda jednom u 3, odnosno jednom u 5 godina.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 8. Hidrogram dotoka na izlivu kod crpne stanice GC2 za kišu povratnog perioda 3, odnosno 5 godina

Figure 8. Inflow hydrograph for the pump station GC2 outfall for 3- and 5-year storms



Slika 9. Hidrogram dotoka na izlivu kod crpne stanice GC1 za kišu povratnog perioda 3, odnosno 5 godina

Figure 9. Inflow hydrograph for the pump station GC1 outfall for 3- and 5-year storms

3.2 Analiza dograđenog modela kanalizacione mreže za kiše povratnog perioda jednom u 3 odnosno jednom u 5 godina i za nepropusnost površina od 35%

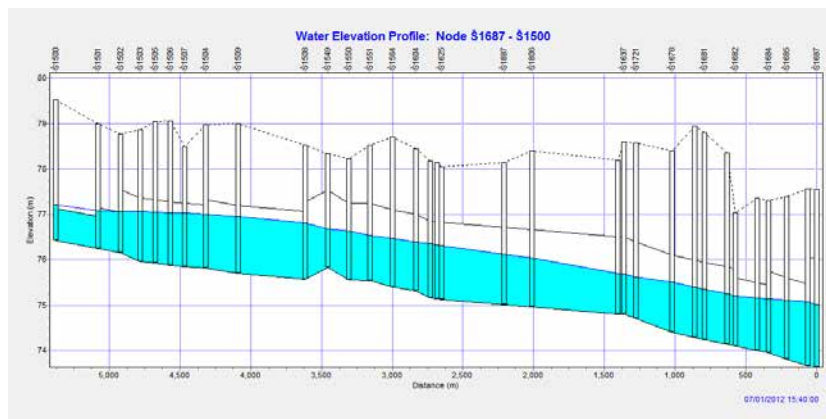
U dograđenom modelu je simulirana kanalizaciona mreža koja je dopunjena sa kolektorima prečnika od Ø 250 mm pa naviše [5]. Model je znatno složeniji i sadrži 1323 čvorova i 1325 deonica (slika 10). Severni gradski sliv ima 382, a južni 941 čvorova. Ukupna dužina unešene kanalizacione mreže je 155 km. Usvojeni Maninngov koeficijen hrapavosti za cevni materijal je $0.014 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$. Kao u prethodnoj, i u ovoj simulaciji je primenjen Hortonov model proračuna infiltracije i metodom punog dinamičkog talasa za proračun tečenja u cevima.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 10. Događeni model kanalizacione mreže grada Novog Sada
Figure 10. The upgraded model of Novi Sad sewer system

Na slikama 11 i 12 prikazani su uzdužni profili glavnih kolektora severnog i južnog gradskog sliva, sa maksimalnom linijom nivoa vode. Maksimalna ispunjenost ovih kolektora je oko 80 % prečnika.

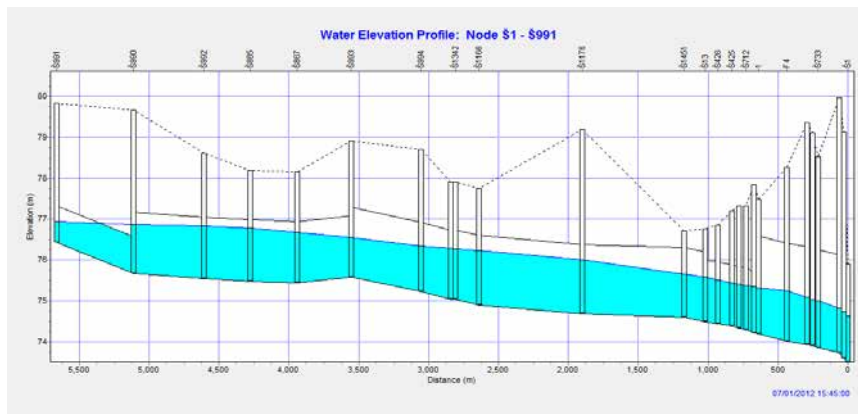


Slika 11. Uzdužni profil glavnog kolektora severnog sliva sa maksimalnom linijom nivoa vode

Figure 11. Longitudinal profile of the north city subcatchment force main with maximum water elevation

Na slikama 13 i 14 prikazani su hidrogrami dotoka na izlivu kod glavnih crpnih stanica GC2 i GC1 za kišu povratnog perioda jednom u 3, odnosno jednom u 5 godina. Maksimalni protok na izlivu kod crpne stanice GC2 iznosi 8380 L/s, dok na izlivu kod crpne stanice GC1 maksimalni protok iznosi 7155 L/s

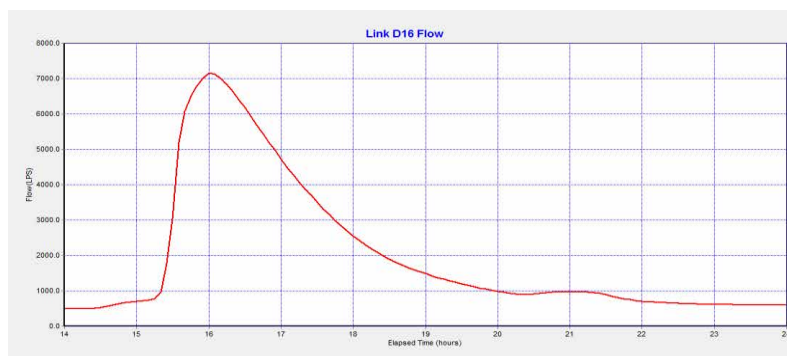
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 12. Uzdužni profil glavnog kolektora južnog sliva sa maksimalnom linijom nivoa vode
Figure 12. Longitudinal profile of the south city subcatchment force main with maximum water elevation



Slika 13. Hidrogram dotoka na izlivu kod crpne stanice GC2 za kišu povratnog perioda 3
odnosno 5 godina
Figure 13. Inflow hydrograph for the pump station GC2 outfall for 3- and 5-year storms



Slika 14. Hidrogram dotoka na izlivu kod crpne stanice GC1 za kišu povratnog perioda 3
odnosno 5 godina
Figure 14. Inflow hydrograph for the pump station GC1 outfall for 3- and 5-year storms

3.3 Analiza hidrauličkog proračuna dograđenog modela za računatu nepropusnost po reonima, za kiše povratnog perioda jednom u 3, odnosno jednom u 5 godina

U dograđenom modelu kanalizacione mreže grada Novog Sada, nepropusnost je unošena pojedinačno, za svaki reon grada, shodno tabeli 1. U slučaju modela 3, gde se unosi različita vrednost procenta nepropusnih površina po kvartovima grada, pri maksimalnom nivou vode u kolektorima, ne dolazi do izlivanja iz šahtova, ni do pojave tečenja pod pritiskom. Maksimalna ispunjenost glavnih kolektora severnog i južnog gradskog sliva iznosi oko 80%, što približno odgovara situaciji kada je u modelu usvojena konstanta vrednost nepropusnosti površina (model 2). Primenjene metode proračuna infiltracije i tečenja u mreži kolektora su iste kao i u prethodnom poglavlju. Maksimalni protok na izlivu kod crpne stanice GC 2 iznosi 9417 L/s, dok na izlivu kod crpne stanice GC 1 maksimalni protok iznosi 7190 L/s. Na osnovu dobijenih rezultata maksimalnih protoka na izlivu severnog i južnog gradskog sliva, uočavaju se nešto veće vrednosti dobijene u modelu za računatu nepropusnost po reonima, nego u slučaju konstantne nepropusnosti za ceo grad (razlika je izraženija na severnom gradskom slivu).

4 Zaključak

Na osnovu rezultata analize i proračuna može se zaključiti:

- 1) Izvršena je hidraulička analiza postojećeg modela kanalizacione mreže. Kombinovana kanalizaciona mreža dimenzionisana je na kišu povratnog perioda jednom u 5 godina (centralno gradsko područje), odnosno jednom u 3 godine (stambeno gradsko područje). Hidrauličkim proračunom, u softverskom paketu EPA SWMM 5.0, za kišu povratnog perioda od jednom u 3, odnosno jednom u 5 godina dobijeno je da u kanalizacionoj mreži nema izlivanja iz šahtova, kao ni pojave tečenja pod pritiskom [5,6]. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da je kanalizaciona mreža ispravno dimenzionisana, jer zadovoljava uslov da za kiše povratnog perioda jednom u 3 odnosno 5 godina nema izlivanja vode iz šahtova, ni pojave tečenja pod pritiskom.
- 2) Urađen je hidraulički proračun sa dopunjenim modelom kanalizacione mreže. Dopunjeni model kanalizacione mreže daje realniji i kompletniji prikaz kanalizacionog sistema grada Novog Sada, za razliku od postojećeg modela. Mreža je dimenzionisana na kišu povratnog perioda jednom u 3 odnosno jednom u 5 godina. Preuzeta je prosečna vrednost nepropusnosti površina od 35%, kao i u slučaju postojećeg modela. Hidrauličkom analizom dograđenog modela dobijeno je da u mreži nema izlivanja vode, kao ni pojave tečenja pod pritiskom. Zaključuje se da je kanalizaciona mreža ispravno dimenzionisana. Sa dijagrama hidrograma dotoka na izlivima za slučaj postojećeg modela i dograđenog modela uočava se da se maksimalni protoci razlikuju. Kod postojećeg modela protoci na izlivima su manji, ali je interval trajanja isticanja iz mreže duži. Razlog za tako nešto je taj što je mreža kod postojećeg stanja ređa i deonice su priključene na veće slivne površine, a kod dograđenog modela zbog većeg broja deonica, slivne površine su manje i voda brže dopeva u kolektore nego kod postojećeg modela. Maksimalni protoci na izlivu su veći kod dograđene mreže. Ukupna zapremina atmosfere vode koja se izlije iz mreže kod dograđenog modela, približno je jednaka količini vode koja se izlije kod postojećeg modela.

- 3) Urađena je hidraulička simulacija za slučaj kada je na dograđeni model umesto nepropusnosti od 35% primenjena sračunata nepropusnost za svaki deo grada pojedinačno. Srednja sračunata nepropusnost za ceo grad iznosi 35%, ali se po kvartovima nepropusnost razlikuje i kreće između 23%, za Salajku, do 60% za centar grada. Hidrauličkim proračunom dobijeno je da u mreži nema izlivanja iz šahtova, kao ni pojave tečenja pod pritiskom. Ispunjenost kolektora je oko 80 %, pa se zaključuje da je mreža ispravno dimenzionisana. Maksimalni dotok vode na crpnoj stanici GC 2, za slučaj modela sa računatom nepropusnošću veći je za oko 1 000 L/s od modela gde je nepropusnost na gradskom području 35%, dok je na crpnoj stanici GC 1 protok približno jednak. Razlog zbog čega je maksimalni protok veći za slučaj modela gde je računata nepropusnost je u tome što severnom slivu pripada centar grada, koji je na nizvodnom delu sliva, gde je nepropusnost znatno veća od postojećih 35% i iznosi 60%. Južni gradski sliv ima nepropusnost oko 35% i dotok na crpnoj stanici GC 1 približno je isti.

Zahvalnost

Rad je proistekao iz naučno-istraživačkog projekta Departmana za građevinarstvo i geodeziju, Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, pod nazivom: "Razvoj i primena savremenih postupaka za projektovanje, građenje i održavanje građevinskih objekata".

Literatura

1. Demografski razvoj grada Novog Sada, Centar za prostorne informacije Vojvodine, Novi Sad, 2009.
2. JP "Zavod za urbanizam", (2009), *Studije hidrotehničkih sistema*, Novi Sad.
3. Rossman A. L., *Model odvođenja atmosferske vode-korisnički priručnik, verzija 5.0*, Water supply and water resources division, National risk management research laboratory, Cincinnati, Ohajo, 2004-preveli i pripremili za korišćenje: prof. dr Kolaković Srđan i doc.dr Stipić Matija, Fakultet tehničkih nauka, Katedra za hidrotehniku i geodeziju, januar 2011.
4. Srpski standardi SRPS EN 752-4:2007., *Kanalizacioni sistem izvan objekata-deo 4: Hidraulički proračun i aspekti zaštite životne sredine*.
5. Stipić F. (2014), *Analiza oticaja atmosferskih voda i plavljenja sa gradskog područja Novog Sada*, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu-master rad, Novi Sad.
6. Stipić M. i saradnici, (2012), *Redesign of the Existing Combined Sewer System (CSS) od Novi Sad*, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling Belgrade, Građevinski fakultet Beograd, Srbija.
7. Stipić M. i saradnici, (2011), *Novi Sad sewerage system development programme revision*, Vojvodinaprojekt, Novi Sad, Srbija.

Hidraulička analiza kanalizacije pod pritiskom naselja Nadalj

Matija Stipić¹
Goran Jeftenić²
Slobodan Kolaković³
Svetlana Vujović⁴
Ljubomir Budinski⁵

APSTRAKT: Rad obuhvata analizu i izbor optimalnog rešenja za kanalisanje otpadnih voda naselja Nadalj. Predložena je varijanta koja će zadovoljiti sadašnje i buduće potrebe kanalisanja otpadnih voda u naselju. Izvršen je hidraulički proračun na osnovu kojeg se došlo do optimalnog prečnika razvodne mreže cevovoda. Na osnovu nemačkog standarda za projektovanje i izvođenje kanalizacionog sistema pod pritiskom prikazan je i primer dimenzionisanja sistema.

Ključne reči: kanalisanje naselja, kanalizacija pod pritiskom.

Hydraulic analysis of pressure sewerage system of the Nadalj settlement

ABSTRACT: This paper presents the methodology for the analysis and selection of optimal solutions of wastewater sewage system of Nadalj settlement. It is suggested the variant that will satisfy current and future needs for sewerage system of settlement. Determination of pipeline diameter is made by hydraulic calculations. It is suggested the variant that will satisfy current and future needs for sewerage system of settlement. Based on the German standard for design and construction of a pressure sewage system, it is shown an exaple of system design.

Keywords: sewerage system, pressure sewerage system.

¹ Doc. dr Matija Stipić, dipl.inž.građ.,AD“VOJVODINAPROJEKT”,Novi Sad, matija@vojvodinaprojekt.rs

² Mast. Goran Jeftenić, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, goran.jeftenic@yahoo.com

³ Mast. Slobodan Kolaković, dipl.inž.građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, cole86grb@gmail.com

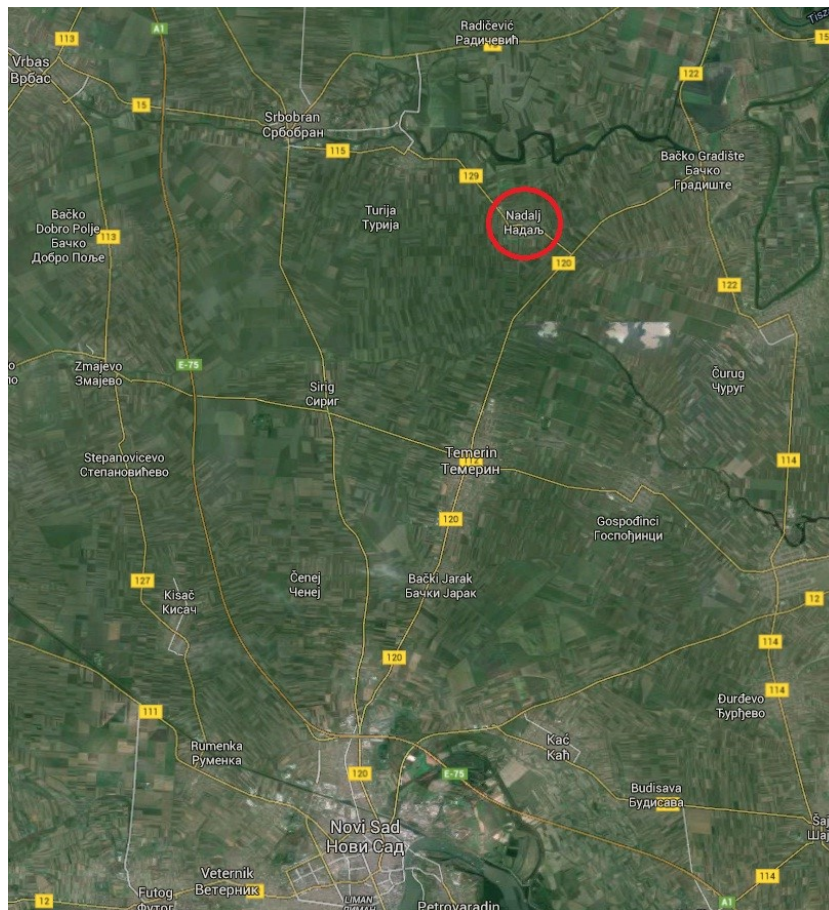
⁴ Doc. dr Svetlana Vujović, dipl. ekolog za zžs, Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, vujovics@uns.ac.rs

⁵ Doc. dr Ljubomir Budinski, dipl.inž.građ. Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, ljubabu@gmail.com

1 Uvod

Naselje Nadalj se nalazi u istočnom delu opštine Srbobran, na području srednje Bačke i pripada vodoprivrednom slivu kanala DTD, koji se nalazi severno od naselja (slika 1).

Naselje je tipično ravničarsko, ušorenog, seoskog tipa sa najzastupljenijom poljoprivrednom proizvodnjom – ratarstvom, dok industrijska proizvodnja nije zastupljena. Od vanprivrednih delatnosti u naselju postoji vaspitno obrazovna delatnost, delatnost kulture, zdravstva i ugostiteljstva u vidu manjih ugostiteljskih objekata. Na teritoriji opštine se nalazi kanal DTD, reka Krivaja i Beljanske bare. U sklopu poboljšanja uslova života pristupa se realizaciji izgradnje kanalizacionog sistema i postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV). Prostorno planskim dokumentima predviđen je separatan sistem kanalizanja, odnosno kanalizacija otpadnih voda se gradi nezavisno od kanalizacije atmosfernih voda. Površinske vode, prirodni i veštački vodotoci izloženi su permanentnoj degradaciji, upuštanjem otpadnih industrijskih i naseljskih voda. U naseljima opštine Srbobran razvijace se separacioni kanalizacioni sistemi, kojima će se posebno odvoditi upotrebljene otpadne vode, a posebno atmosfenske vode [2].



Slika 1. Geografski položaj naselja
Figure 1. The geographical location of the village

2 Metodologija

2.1 Analiza i izbor načina kanalisanja otpadnih voda

U osnovi postoje tri varijantna rešenja odvođenja otpadnih voda:

- odvođenje otpadnih voda sa slobodnim tečenjem u kanalizacionim kolektorima, kao i primena crpnih stanica za savlađivanje velikih dubina ukopavanja i “liftovanje” otpadne vode,
- odvođenje otpadnih voda sa periodičnim tečenjem, stvaranjem vakuuma (pritisk u cevovodu je manji od atmosferskog) pomoću vakum crpnih stanica,
- odvođenje otpadnih voda sa periodičnim tečenjem, pod pritiskom (pritisk u cevovodu je veći od atmosferskog) sa velikim brojem crpnih stanica i dugačkim potisnim vodovima.

Kanalisanje otpadnih voda sa slobodnim tečenjem (gravitaciona kanalizacija) je najčešći i najrasprostranjeniji način na našem području. Cevovod je potrebno postaviti pod nagibom po dužini cevovoda kako bi se obezbedila samočišćujuća brzina, kako se ne bi dogodila pojava taloženja suspendovanih materija. U ravničarskim mestima, kakvo je naselje Nadalj, dolazimo do velikih dubina ukopavanja cevi što direktno utiče na cenu i tehnologiju izvođenja. Cevovod mora da prolazi ispod svih postojećih instalacija, jer ne postoji mogućnost obilaska prepreke u vertikalnom pravcu. Kod primene gravitacione kanalizacije potrebna je veća širina i dubina iskopa, neophodno je obezbeđenje rova u širokom iskopu, veći broj kontrolnih objekata – revizioni šahtovi, te pojave mogućnosti infiltracije podzemnih voda koja dovodi do smanjenja efekta samočišćenja.

Vakumska kanalizacija je kod nas, kao i kanalizacija pod pritiskom, ređe zastupljena. Koriste se cevi manjih prečnika u odnosu na gravitacionu kanalizaciju, už i plići rovovi za polaganje cevovoda, manji su investicioni troškovi, postoji osetljivost na raspored izolacionih ventila, velika osetljivost na nečistoće iz fekalnih voda, složena tehnologija izgradnje, potrebno je precizno montirati cevovod i veća je cena vakumskih ventila [5].

Kod sistema pod pritiskom koriste se cevovodi prečnika od 32 mm do 160 mm, manja je dubina rovova, koriste se i už i plići rovovi tako da su i rad i oprema svedeni na minimum, nema potrebe za većim brojem revizionih šahtovima, nema uliva stranih voda što dovodi do manjeg hidrauličkog kapaciteta PPOV-a, održavanje je ekonomičnije (po urađenim analizama u SAD-u ukupni troškovi mogu da budu i do 50% manji nego kod gravitacionog sistema). Nedostatak ovog sistema je u povećanom servisu opreme (velik broj pumpi) i povećanim troškovima električne energije.

Na slici 2. prikazano je vođenje nivelete cevovoda. Potisni cevovod prati konfiguraciju terena dok gravitacioni mora da obezbedi potreban podužni pad.

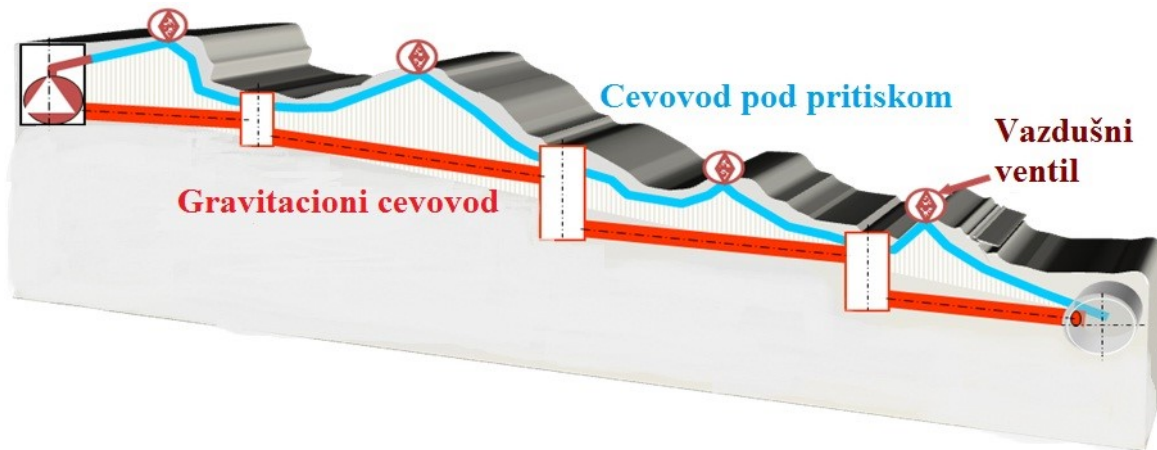
Na osnovu poređenja bitnih karakteristika sva tri tipa kanalisanja odlučeno je da se problem kanalisanja otpadnih voda u naselju Nadalj reši kanalizacionim sistemom pod pritiskom [5].

2.2 Nemački standard za projektovanje i izvođenje kanalizacionog sistema pod pritiskom DWA – A 116 – 2E

Nemačka asocijacija za vodu, otpadnu vodu i otpad (DWA) je zastupnik u Nemačkoj za sva pitanja o vodi i intenzivno se bavi pouzdanim razvojem i održivim upravljanjem vodama. U

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Evropi DWA je udruženje u ovoj oblasti sa najvećim brojem članova, a zbog svoje specijalne nadležnosti ima posebnu poziciju u vezi sa standardizacijom, stručnim usavršavanjem i informisanjem javnosti. Akcenat aktivnosti je stavljen na izradu elaborata i ažuriranje zajedničkih tehničkih pravila i standarda i stvaranje specifikacije tehničkih standarda na nacionalnom i međunarodnom nivou. Ovde se ne podrazumevaju samo tehničko-naučni predmeti već i ekonomski i pravni zahtevi za zaštitom životne sredine i zaštitom vodnih tela. Kanalizacioni sistem pod pritiskom se u Nemačkoj prvi put u većem obimu koristi u Hamburgu, počev od 1968. godine [4].



Slika 2. Prikaz nivelete cevovoda
Figure 2. Review vertical alignment pipeline

Sakupljenu otpadnu vodu, iz jedne ili više objekata, u kanalizacionom sistemu pod pritiskom pumpe transportuju kroz jedan ili više glavnih cevovoda (slika 3). Glavni cevovodi mogu biti formirani kao prstenasta ili granata mreža. Moguće je postaviti i jedan glavni cevovod. Kompresor za vazduh pruža podršku transportu otpadnih voda. On nije potreban u razvodnim mrežama gde je retenziono vreme kratko i gde su dovoljne protočne brzine (u sistemu gde je zadržavanje otpadne vode kraće od osam časova). Kanalizacioni sistem pod pritiskom generalno služi za sakupljanje i transportovanje otpadne vode u separatnom kanalizacionom sistemu [4].

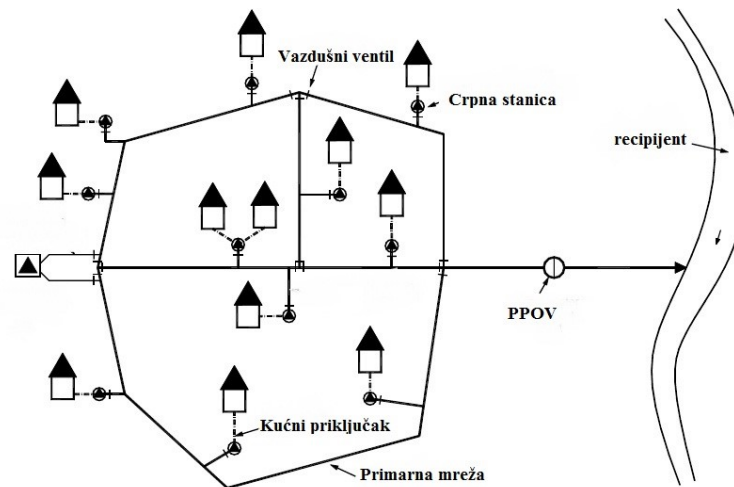
Kanalizacioni sistem pod pritiskom sastoji se od:

- mreže niskopritisne kanalizacije (cevovoda),
- pojedinačne kućne crpne stanice.

Celokupna mreža niskog pritiska mora biti usaglašena sa karakteristikama pumpnih agregata izabranih za postavljanje u kućne crpne stanice. Razvodna mreža cevovoda projektuju se kao prstenasta ili granata mreža. Nazivni prečnik razvodne mreže mora biti minimum 65 mm. U slučaju primene pumpi sa drobilicama nazivni prečnik mora biti minimum 32 mm.

Glavni cevovod mora biti otporan na:

- unutrašnje i spoljašnje hemijsko i biohemisko opterećenje,
- temperature do 35°C,
- mehanička opterećenja,
- unutrašnji i spoljašnji pritisak.

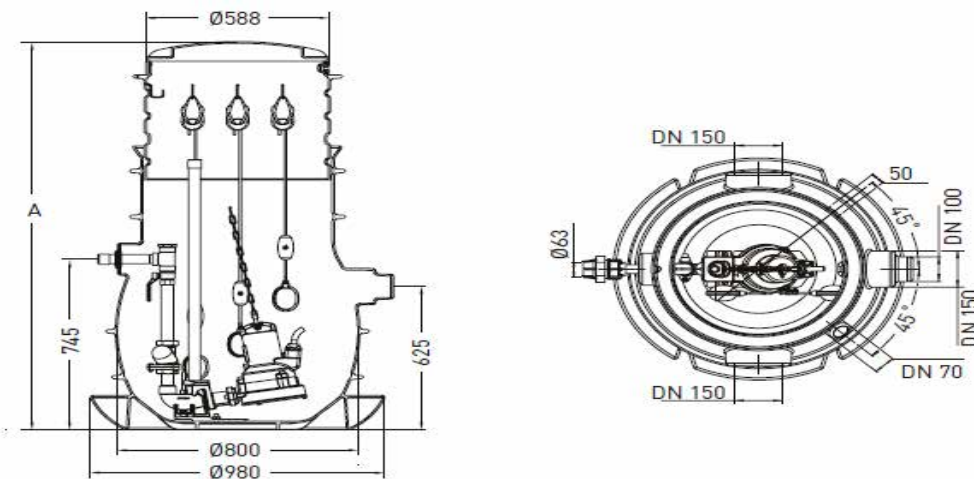


Slika 3. Šematski prikaz kanizacionog sistema pod pritiskom
 Figure 3. Schematic representation pressure sewerage system

Cevovodne instalacije urađene su od cevi PE 100 klase SDR 11 i PN 16 bar. Minimalni nagib razvodne cevi je 0,5‰, iz razloga da se izbegne preveliki broj vazdušnih ventila, za slučaj kada se prati linija terena. Na deonicama sa kontrapadom je obavezno postavljanje vazdušnih ventila. Minimalno ukopavanje cevi usvojeno je 1,15 m. Veoma čest ograničavajući faktor predstavlja i maksimalna dubina ukopavanja cevi. Ona uglavnom zavisi od karakteristika tla, nivoa podzemne vode, širine uličnog profila, itd. Imajući to u vidu maksimalna dubina ukopavanja cevi usvaja se 1,8 m.

Transport otpadne vode iz objekta se odvija gravitacionim putem do kućnog šabirnog šahta, dimenzija Ø800 i visine 1420 mm koji se nalazi izvan objekta (slika 4). Šaht ima predviđene prodore za dovodni i potisni cevovod, kao i ulaze za elektro kabal, kabal za sonde i ventilaciju. Šaht je otporan na koroziju, vodonepropusan, obezbeđen od uzgona i ima ventilaciju. Isporučuje se sa plastičnim poklopcem, postoljem, komplet potisnim cevovodom koji uključuje i nepovratni kuglasti ventil i zaporni ventil. Kapacitet šahta je 460 l, težina 65 kg (DN32) bez pumpe. Šaht se smešta unutar regulacione linije na odstojanju od 1 m od regulacione linije, a upravljački elektro motor na rastojanju 2 m od šahta. U slučaju da se šaht postavlja u trasi kolskog ulaza i da preko njega prelaze vozila, radi se betonska ploča u gornjoj zoni šahta koja će primiti opterećenje od saobraćaja.

U revizioni šaht – crpnu stanicu se ugrađuje pumpa. Pumpa se isporučuje u kompletu sa adekvatnim plastičnim šahtom. Pri protoku kroz nepovratni ventil kugla se pomera u komoru sa strane i tako obezbeđuje nesmetan prolaz kroz čitavu površinu poprečnog preseka ventila. Komora ima poklopac u slučaju servisa tako da nema potrebe da se ventil skida sa cevovoda. U slučaju horizontalnog postavljanja ventila komora mora biti okrenuta iznad horizontalne ose ventila [4].



A - минимална висина 1420 mm, максимална висина 2245 mm са продужетком

Slika 4. Šaht Synconta 801
 Figure 4. Manhole Synconta 801

Ovakav način kanalizacionog sistema mora biti izgrađen i funkcionisati prema državnim propisima. Kontrola emisije i imisije nema samo za cilj zaštitu voda i tla već i izbegavanje nepravilnosti od širenja neprijatnih mirisa i buke koje se emituju iz kanalizacionih sistema. Oprema, za pumpanje i ispiranje cevovoda, mora biti izolovana tako da ne emituje buku u svojoj blizini preko dozvoljenih granica. Izduvni ventili i izlazne tačke treba da se postave tako da širenje neprijatnih mirisa bude sprečeno u okolini. Na izlivnim tačkama sistema pod pritiskom moraju se obezbediti specijalni šahtovi. Takvi šahtovi moraju da garantuju izlivanje kanalizacije sa malo turbulencije, npr. tako što će pad dna biti u smeru toka. Takođe, mora se voditi i računa o koncentraciji sumporne kiseline. Ako retenciono vreme u kanalizaciji, vreme toka, prelazi dva časa, vodonik sulfid (H_2S) može biti generisan od strane anaerobne degradacije. Na mestima gde kanalizacija pod pritiskom vrši pražnjenje u gravitacione kolektore postoji opasnost od pojavljivanja biogene korozije sumporne kiseline [4].

3 Rezultati i diskusija

3.1 Hidraulički proračun kanalizacionog sistema naselja Nadalj

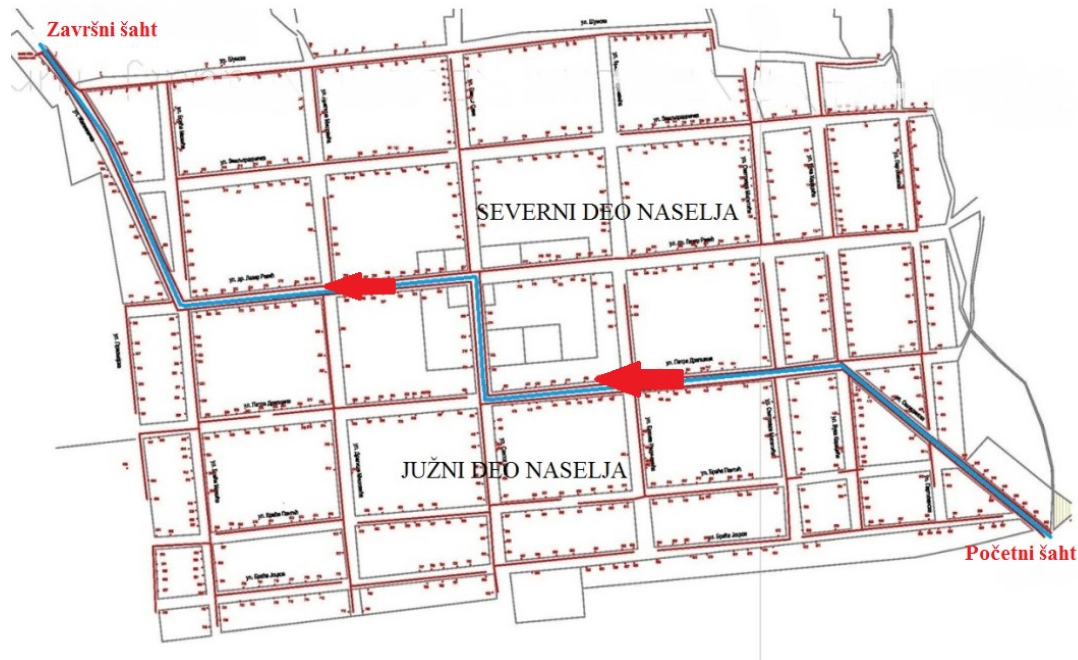
Hidraulički proračun započinje određivanjem merodavnog broja domaćinstava u naselju. Po poslednjem popisu stanovništva iz 2011.g. Nadalj ima 705 domaćinstava. Broj merodavnih domaćinstava je određena na osnovu podataka iz katastra, mesne zajednice i popisa stanovništva. U proračun se ulazi sa planiranim brojem domaćinstava koji iznosi 728. Prosečan broj stanovnika po domaćinstvu iznosi 2,8. Za proračun se uzima 3 osobe po domaćinstvu koje su povezane na revizioni šaht – crpnu stanicu [1].

Usvojena specifična količina otpadne vode od $Q_{sr,dn}=150$ L/st.dan.

Da ne bi došlo do predimenzionisanja cevovoda, cevovodna mreža u naselju je podeljena na dva nezavisna dela (slika 5).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Regionalni put prolazi kroz sredinu naselja i deli ga na dva dela, tako da je prema tome izvršena i podela naselja na dva dela, severni i južni. Severni deo ima 380 domaćinstava a južni deo 348 domaćinstava. Prema ovim podacima izvršiće se proračun dimenzionisanja mreže. Kanalizacione mreže severnog i južnog dela imaju zajedničku izlivnu tačku koja se nalazi izvan naselja, prema naselju Turija, sa leve strane regionalnog puta.



Slika 5. Podela naselja na dva zasebna sistema
Figure 5. The division of the village into two separate systems

Za proračun su uzeta određena pojednostavljena proračuna koja su dopuštena standardom:

- svi šahtovi su na istoj koti, tj. najniži nivo vode u šahtu je jednak za sve pumpe i iznosi 80,25 mm,
- svi kućni cevovodi su iste dužine, $L=10$ m,
- linijski gubici na kućnim cevovodima nisu uzeti u obzir,
- lokalni gubici na dugačkim cevovodima računaju se kao 10% od vrednosti linijskih gubitaka.

Gubici energije u cevovodu računati su prema formuli:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{L}{D} + \Sigma \xi \right)$$

$$\lambda = 0,115 \left(\frac{k}{D} + \frac{60}{Re} \right)^{1/4}$$

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

gde je:

H - izgubljena energetska visina (m)

D - prečnik cevi (m)

L - dužina cevi (m)

v - brzina u cevi (m/s)

g - gravitaciona konstanta (9,81 m/s²)

λ - koeficijent otpora

Re - Reynolds-ov broj

k - apsolutna rapavost (0,25 mm)

ν - kinematski koeficijent viskoznosti fluida (1,31 × 10⁻⁶ m²/s za temperaturu 10 ° C)

$\Sigma\xi$ - suma lokalnih gubitaka na cevovodu (po proizvođaču uzima se 4 za c.s.)

Nadmorska visina cevi na ispustu je 79,64 mm, tako da geodetska razlika nivoa između cevi na ispustu i nivoa vode u šahtu (80,25 mm) iznosi H= -0,61 m.

Pad energije od usisa u kućnim crpnim stanicama do uličnog cevovoda iznosi H= 0,72 m (bez linijskih gubitaka, L=10 m, $\Sigma\xi=4$).

Broj pumpi koje se istovremeno uključuju za posmatranu deonicu se računa po principima teorije verovatnoće:

$$P = \frac{N!}{r!(N-r)!} p^r (1-p)^{N-r}$$

gde je:

N - broj domaćinstava (kućnih crpnih stanica) na deonici (sopstveno+tranzit),

r - broj uključenih pumpi u radu,

p - verovatnoća rada jedne pumpe u toku dana.

3.1.1 Proračun razvodne mreže severnog dela naselja Nadalj

Proračun je sproveden tabelarno (tabela 1) na osnovu usvojenih merodavnih parametara. Prikazaće se proračun krajnje deonice na kojoj se uzvodno od nje povezano 380 domaćinstava, odnosno gde se nalazi 380 crpnih stanica.

Merodavni podaci:

- H_{geo}= -0,61 m,
- H_p= 0,72 m - gubitak energije u crpnoj stanici,
- Ukupan broj domaćinstava je 380,
- Q_{sr.dn.}=150 L/st. dan,
- Q_p=1,0 L/s (kapacitet jedne crpne stanice - pumpe).

Vreme pražnjenja radne zapremine jednog crpnog bazena iznosi:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{25}{1} = 25 \text{ s}$$

Vreme između dva uključivanja rada pumpi iznosi:

$$t' = \frac{Q * n}{V} = \frac{150 * 3}{25} * 24 * 3600 = 4800 \text{ s}$$

Verovatnoća rada jedne crpne stanice u toku dana iznosi:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$p = \frac{t}{t'} = \frac{25}{4800} = 0,0052$$

Verovatnoća rada broja pumpi (crpnih stanica) po deonici u odnosu na broj priključenih domaćinstava N , na istoj deonici, se dobija na sledeći način [3]:

$$P = \frac{N!}{r!(N-r)!} p^r (1-p)^{N-r}$$

Tabela 1. Prikaz verovatnoće rada broja pumpi po deonici
Table 1. Probability of the working pumping stations number

N	P(r,N)	$\Sigma P(r,N)$
0	0,1375	0,1375
1	0,2735	0,4110
2	0,2714	0,6823
3	0,1790	0,8613
4	0,0883	0,9497
5	0,0348	0,9845
6	0,0114	0,9958
7	0,0032	0,9990
8	0,0008	0,9999

Proračunom verovatnoće (tabela 1) se dobija da će sa verovatnoćom 99,99% istovremeno raditi 8 pumpi, odnosno merodavni protok je $8 \times 1 \text{ L/s} = 8 \text{ L/s}$. Na osnovu merodavnog protoka će se dimenzionisati cevovod. U tabeli 2 prikazano je dimenzionisanje svih deonica granate mreže severnog dela naselja [3].

Na identičan način sproveden je i hidraulički proračun južnog dela kanalizacione mreže naselja Nadalj.

4 Zaključak

Na osnovu analize načina kanalisanja otpadnih voda za naselje Nadalj izabran je kanalizacioni sistem pod pritiskom. Hidraulički proračun naselja urađen je prema Nemačkom standardu za projektovanje i izvođenje kanalizacionog sistema pod pritiskom DWA-A116-2E. Da bi se izbeglo predimenzionisanja cevovoda, naselje je podeljeno na dva nezavisna dela – severni i južni. Na osnovu usvojenog broja domaćinstava, specifične količine otpadne vode i pretpostavljenog protoka jedne crpne stanice, po teoriji verovatnoće izračunat je broj pumpi koje će se istovremeno uključiti za posmatranu deonicu. U ovako dimenzionisanom cevovodu ispunjeni su zahtevi za minimalne brzine u cevima, čime je obezbeđen ispravan rad sistema.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Hidraulički proračun severnog dela kanalizacione mreže
Table 2. Hydraulic analysis of the sewerage network nort part

deonica	Qmer. (l/s)	DN	D (mm)	L (m)	v (m/s)	λ (-)	Hlin (m)
1	1	63	51,4	296,8	0,48	0,03076	2,31
2	1	63	51,4	88,8	0,48	0,03076	0,69
3	1	63	51,4	118,9	0,48	0,03076	0,93
4	1	63	51,4	90	0,48	0,03076	0,7
5	1	63	51,4	188,5	0,48	0,03076	1,47
6	1	63	51,4	11,6	0,48	0,03076	0,09
7	1	63	51,4	36,8	0,48	0,03076	0,29
8	1	63	51,4	119,06	0,48	0,03076	0,93
9	1	63	51,4	281,2	0,48	0,03076	2,19
10	1	63	51,4	120,1	0,48	0,03076	0,94
11	2	75	61,4	151,9	0,68	0,028019	1,77
12	1	63	51,4	201,4	0,48	0,03076	1,57
13	1	63	51,4	30	0,48	0,03076	0,23
14	1	63	51,4	383,9	0,48	0,03076	2,99
15	3	90	73,6	280,3	0,71	0,026625	2,83
16	1	63	51,4	209,8	0,48	0,03076	1,63
17	1	63	51,4	264,5	0,48	0,03076	2,06
18	1	63	51,4	133,7	0,48	0,03076	1,04
19	4	110	90	308,5	0,63	0,025715	1,95
20	2	75	61,4	200,4	0,68	0,028019	2,34
21	1	63	51,4	264,1	0,48	0,03076	2,06
22	1	63	51,4	142,5	0,48	0,03076	1,11
23	1	63	51,4	106,7	0,48	0,03076	0,83
24	1	63	51,4	280,4	0,48	0,03076	2,19
25	1	63	51,4	51,6	0,48	0,03076	0,4
26	6	125	102,2	395,87	0,73	0,02441	2,84
27	6	125	102,2	142,63	0,73	0,02441	1,02
28	2	75	61,4	225,6	0,68	0,02802	2,63
29	1	63	51,4	120,5	0,48	0,03076	0,94
30	1	63	51,4	265,8	0,48	0,03076	2,07
31	2	75	61,4	220,3	0,68	0,02802	2,57
32	1	63	51,4	255,5	0,48	0,03076	1,99
33	1	63	51,4	131,3	0,48	0,03076	1,02
34	1	63	51,4	270,8	0,48	0,03076	2,11
35	1	63	51,4	51	0,48	0,03076	0,4
36	7	125	102,2	269,6	0,85	0,02395	2,58
37	2	75	61,4	224,2	0,68	0,02802	2,62
38	1	63	51,4	122,3	0,48	0,03076	0,95
39	1	63	51,4	249,9	0,48	0,03076	1,95
40	2	75	61,4	227,5	0,68	0,02802	2,66
41	1	63	51,4	246,32	0,48	0,03076	1,92
42	1	63	51,4	103,7	0,48	0,03076	0,81
43	1	63	51,4	253	0,48	0,03076	1,97
44	1	63	51,4	60,4	0,48	0,03076	0,47
45	8	140	114,6	42,2	0,78	0,02354	0,29
46	1	63	51,4	309,54	0,48	0,03076	2,41
47	8	160	130,8	571,3	0,6	0,0236	2,05

Literatura

1. Idejni projekat kanalizacione mreže upotrebljenih voda naselja Nadalj, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2009.
2. Prostorni plan opštine Srbobran, JP Zavod za urbanizam Vojvodine, Novi Sad, 2012.
3. Rafajlović P., Hidraulička analiza kanalizacije pod pritiskom sa primenom na naselje Nadalj, Master rad, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 2014.
4. Standard DWA-A 116-2E, specijalni kanalizacioni sistemi, 2. Deo kanalizacioni cistem pod pritiskom izvan objekta, grupa autora, DWA, 2007.
5. Vakumski sistem kanalisanja upotrebljenih voda, Čaba Šanta, Gergely Fabry, Subotica, 2006.

Hidrometeorološki uslovi koji su izazvali pojavu serije poplavnih talasa u Srbiji u periodu april–septembar 2014. godine

Nedeljko Todorović¹

Dragan Đukić²

Stevan Prohaska³

Vladislava Bartoš Divac⁴

APSTRAKT: U ovom radu daje se kratak prikaz karakteristika jakih kiša u maksimalnim kišnim epizodama, kao i dugotrajnih kiša koje su registrovane u periodu april–septembar 2014. godine. Najpre se daje prikaz sinoptičke situacije i razvoja vremena u Srbiji i na Balkanu koji su izazvali pojavu ekstremnih padavina i poplava na teritoriji Srbije. Za sve mesece unutar razmatranog perioda daje se prikaz prostornog rasporeda ostvarenih maksimalnih intenziteta jakih kiša, kao i suma mesečnih padavina u vidu karti izohijeta. Osnova za formiranje ovih karti su podaci osmatranja padavina kraćih trajanja (sa pluviografa) na glavnim meteorološkim stanicama (GMS), kao i podaci o dnevnim sumama padavina na kišomernim stanicama (KS) Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije.

Ključne reči: jake kiše, kišne epizode, intenziteti kiša, mesečne i sezonske sume padavina, statistička značajnost, statistički izuzeci, sinoptička situacija, razvoj vremena, povratni periodi

Hydrometeorological conditions that caused the occurrence of flood series in Serbia in the period April–September 2014

ABSTRACT: This paper provides a brief overview of heavy rainfall characteristics in maximum storm events, as well as the overview of long-lasting rainfall registered in the period April–September 2014. First of all, it provides an overview of the synoptic situation and weather development in Serbia and the Balkans that caused the occurrence of extreme rainfall and flooding in Serbia. An overview of spatial distribution of achieved maximum rainfall intensities is given for all months within the considered period, as well as the monthly precipitation sums in the form of isohyet maps. These maps are formed on the basis of the observed data on shorter duration rainfall (from pluviograph) on major meteorological stations (MMSs), as well as data on daily precipitation sums on pluviograph stations (PS) of the Republic Hydrometeorological Service of Serbia.

Key words: heavy rainfall, rainy episodes, rainfall intensities, monthly and seasonal precipitation sums, statistical significance, statistical exceptions, synoptic situation, weather development, return periods

¹ Dipl. met, Republički hidrometeorološki zavod Srbije

² Dipl. met, Republički hidrometeorološki zavod Srbije

³ Prof. dr, dipl. inž. građ, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

⁴ Dipl. inž. građ, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

1 Uzroci pojave poplava u periodu april–septembar 2014. godine u Srbiji

Generalno, glavni uzroci pojave poplava u periodu april–septembar 2014. godine na teritoriji Republike Srbije bile su povremene pojave kiša jakog intenziteta, kao i kiša umerenog intenziteta, koje su trajale neuobičajeno dugo za to godišnje doba. Osnovna karakteristika ovih kiša je da su one, s manjim prekidima, trajale veoma dugo i da je bila zastupljena povremena pojava izuzetno jakih intenziteta u kraćim vremenskim razmacima. Broj kišnih dana u ovom periodu prevazilazi do sada zabeležene ekstreme na većini glavnih meteoroloških stanica (GMS).

U prvom tromesečju 2014. godine nad teritorijom Srbije vladalo je relativno stabilno vreme bez značajnijih padavina. Sredinom aprila došlo je do prodora hladnog vazduha koji je prouzrokovao pojavu veoma dugotrajne kiše umerenog intenziteta sve po početka maja. Ta kiša trajala je (s kraćim prekidima) skoro neprekidno dvadesetak dana, od 14. aprila do 5. maja 2014. godine. U toku tog perioda registrovane su značajne ukupne sume padavina na celoj teritoriji Republike Srbije. Najviše padavina palo je u slivu Zapadne Morave i Kolubare, zatim u slivovima Južne Morave, Mlave, Peka i Timoka, a najmanje je palo na severu Bačke i Banata. Tada je u većem delu Republike Srbije palo između 120 l/m^2 i 170 l/m^2 , a u jugozapadnim delovima zemlje i preko 250 l/m^2 . U analiziranom periodu u Srbiji bilo je kiše, pljuskova i grmljavine, lokalno sa velikom količinom padavina, naročito u periodu od 16. do 20. aprila. Karakteristično je da je ova kišna epizoda trajala skoro neprekidno 21 dan, što je registrovano na GMS Kuršumlja, Leskovac i Požega, odnosno samo po jedan dan bez kiše zabeležen je na GMS Dimitrovgrad, Kruševac, Niš, Sjenica, Vranje i Zlatibor. U proseku, na svim razmatranim GMS (28) broj beskišnih dana u ovoj kišnoj epizodi bio je manji od 4 dana.

Najveća katastrofalna kiša, sa najtežim posledicama, pala je u periodu od 12. do 19. maja 2014. godine i obuhvatila je: sliv Kolubare, donji deo sliva reke Drine, sliv Zapadne Morave, donji deo sliva Južne Morave, slivove neposrednih pritoka Velike Morave, sliv Mlave, kao i neposredni sliv reke Save, od državne granice do ušća u reku Dunav kod Beograda. Obilne kiše koje su uticale na formiranje poplavnog talasa Save i njenih pritoka padale su i na teritorijama Republike Hrvatske i Bosne i Hercegovine, ali one nisu obuhvaćene ovom analizom. Posledica prodora hladnog vazduha preko Alpa u oblast Sredozemlja, kada je došlo do formiranja prostornog ciklona, razvijenog po svim visinama, koji se preko Jadrana premeštao na Balkan. Ciklon se 13. maja premeštao iz oblasti Jadrana ka zapadnim i centralnim delovima Balkana, od 14. do 16. maja se pojačao (produbio) po svim visinama, a ujedno i stacionirao (bio je slabo pokretan). Centar ciklona u prizemlju kretao se od Đenovskog zaliva preko Apenina, južnog Jadrana, juga Republike Srbije, Bugarske i Rumunije, a zatim je pravio putanju u obliku elipsaste „petlje“ iznad jugoistočnih delova Panonske nizije (područje severne Srbije, istočne i jugoistočne Mađarske i severozapadne Rumunije). Tom prilikom ciklon je odstupio od najčešće putanje koju imaju đenovski cikloni, a to je pravac Crnog mora, gde se konačno gasi. Glavna oblačna i kišna zona bila je iznad većeg dela Srbije, pre svega zapadne Srbije, Republike Srpske i Slavonije, bila je slabo pokretna, kao i sam ciklon, i na istom području je u periodu od 14. do 18. maja 2014. godine uslovlila, prema podacima RHMZ Srbije, ekstremnu količinu padavina, u većini mesta preko 200 l/m^2 , lokalno i preko 300 l/m^2 . Kao što je već rečeno, ovom događaju prethodile su obilne padavine u periodu od 14. aprila do 5. maja, kada je u većem delu Republike Srbije palo između 120 l/m^2 i 170 l/m^2 , a u jugozapadnim delovima zemlje i preko 250 l/m^2 . Sve to uzrokovalo je katastrofalne poplave, pojavu bujica, erozije i aktiviranje

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

klizišta, prvo na malim vodotocima (potoci i rečice), a zatim na srednjim (Kolubara), što je na kraju uslovalo porast vodostaja na većim rekama, a najviše na Savi.

U periodu od 12. do 20. juna 2014. godine, registrovana je, takođe, jedna kišna epizoda sa lokalno značajnijim padavinama na teritoriji Srbije u slivovima Zapadne Morave, Nišave i Timoka. Na većem delu Vojvodine i Južne Morave zabeležene su manje padavine, što se može reći i za neposredan sliv Velike Morave. Po ukupnim količinama padavine su retko prelazile granicu od 100 mm/m^2 u toku ove kišne epizode. Sa gledišta hidrologije, posledice nisu bile značajne jer su registrovani manji i umereni porasti vodostaja početkom druge dekade juna na Velikoj Moravi sa pritokama i krajem meseca na Kolubari i na banatskim vodotocima.

Krajem jula, od 25. jula do 1. avgusta, kao posledica prolaza dva hladna fronta zabeležene su značajne padavine u neposrednom slivu donjeg Dunava na teritoriji Srbije, sa centrom kiše u južnom delu Banata i drugim centrom kiše u gornjem delu sliva Kolubare. U južnim i zapadnim delovima Republike Srbije padavine su bile beznačajne. U nastavku ovog perioda došlo je do prolaza dva nova hladna fronta koji su u periodu od 2. do 7. avgusta 2014. godine izazvali značajnije padavine u slivovima Kolubare i Jadra, kao i na severu Bačke. Za ovu kišnu epizodu je karakteristično da su se pojavila tri centra kiše, najveći po zahvaćenom prostoru na području ograničenim sa GMS Valjevo i Loznica, zatim u na severu Bačke u okolini GMS Palić i na užem području Zlatibora. Sa hidrološkog stanovišta nije došlo do upozoravajućih nivoa vode ni na jednom vodotoku u Srbiji.

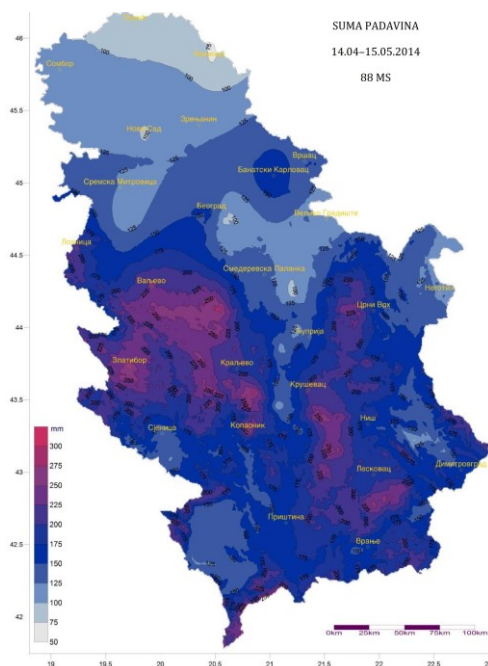
Druga po značajnosti posledica koja je izazvala gubitak ljudskih života i materijalne štete bila je kišna epizoda koja se pojavila u periodu od 11. do 17. septembra 2014. godine. Posledica je vremenske situacije koja se karakteriše time da se do 10. septembra područje Srbije nalazilo pod uticajem slabogradijentne ciklonske cirkluacije i nestabilne vazdušne mase sa čestom pojavom kiše, pljuskova i grmljavine. Od 12. do 14. septembra preko Srbije prolazi serija hladnih frontova iz oblasti Sredozemlja od kojih je najizraženiji u pogledu padavina bio poslednji koji je područje Srbije prošao u noći između 14. i 15. septembra. U odnosu na razmatrane prethodne kišne epizode, ova kiša obuhvatila je mnogo manju teritoriju. Po količini pale kiše i posledicama najznačajniji je centar kiše koji je registrovan na istoku zemlje, na području Kladovo–Negotin, gde su vrednosti suma padavina u kišnoj epizodi dostizale i do 200 mm/m^2 . Druga dva manja centra kiše, od 100 mm/m^2 registrovana su u okolini GMS Palić i na ušću Velike Morave. Usled ekstremnih velikih padavina na području istočne Srbije došlo je do velikih porasta vodostaja i izlivanja bujičnih vodotokova, posebno u regionu Tekije, Gornjeg Milanovca, Grabovice i Negotina, a umereni porasti vodostaja registrovani su na Peku, Crnom i Belom Timoku.

Generalno, može se reći da su sve ove kišne epizode imale za posledicu veoma čestu pojavu značajnih poplava na različitim prostorima na teritoriji Republike Srbije. Neke od ovih poplava bile su katastrofalne, a za posledicu su imale brojne gubitke ljudskih života i ogromne materijalne štete, do sada nezabeležene na našim prostorima. Generalno, može se reći da sve registrovane navedene poplave predstavljaju kombinaciju od izrazito bujičnih poplava u brdsko-planinskim predelima (karakteriše ih talas sa strmim čelom koji ima veliku brzinu prostiranja i razornu moć), preko njihovih koincidencija duž sliva do poplava širokih razmera sa intenzivnim plavljenjem rečnih dolina i dugim trajanjem, što je karakteristično za ravničarske reke. Merodavne padavine koje su mogle izazvati takvu konstelaciju poplava su maksimalni intenziteti kiša različitog trajanja.

2 Prikaz karakteristika kiša u periodu april–septembar 2014. godine u Srbiji

2.1 Kvantitativne karakteristike maksimalnih kišnih epizoda koje su izazvale pojavu poplava

Za potrebe analize karakteristika jakih kiša koje su prouzrokovale poplave na teritoriji Republike Srbije u navedenom šestomesečnom periodu na raspolaganju su bili podaci o časovnim vrednostima padavina na 28 glavnih meteoroloških stanica, kao i podaci o dnevnim sumama padavina na 450 padavinskih stanica. Prostorni položaj glavnih meteoroloških stanica sa kojih su korišćeni podaci prikazan je na priloženim kartama (slike br. 1–6), na kojima su, takođe, prikazane izolnije (izohijete) visina padavina registrovanih za vreme pojave razmatranih kišnih epizoda. Na kartama urađenim na osnovu svih raspoloživih podataka, vide se oblasti sa najvećim registrovanim padavinama na teritoriji Republike Srbije.

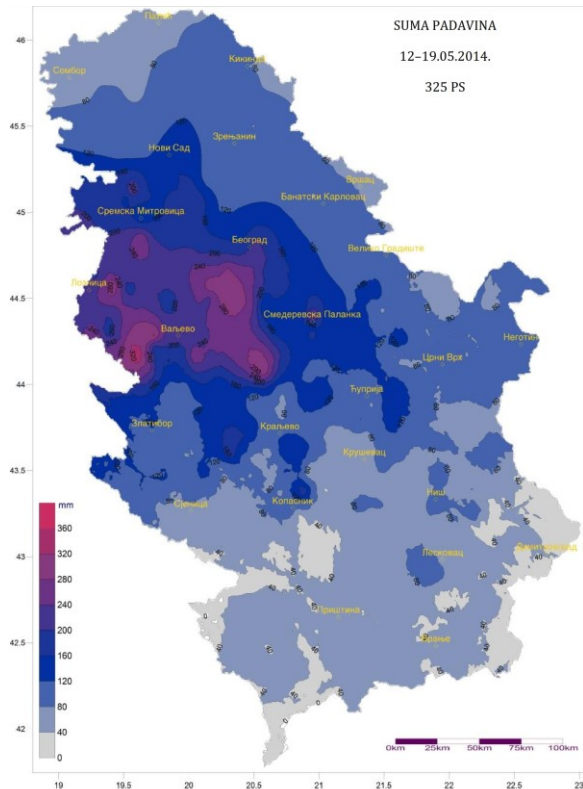


Slika 1. Suma padavina 88 MS, 14.04–15.05.2014.
 Figure 1. Precipitation sum, 88 MSs, 14 April–15 May 2014.

Karta izohijeta ukupnih suma padavina za maksimalnu kišnu epizodu koja se pojavila u periodu od 14. aprila do 5. maja 2014. godine prikazana je na slici 1. Kao što se vidi na slici, kiša je zahvatila čitav prostor Republike Srbije. Značajne količine ukupne pale kiše, koje prevazilaze granicu od 150 mm, zahvatile su više od polovine teritorije Srbije, a padavine veće od 100 mm, što je više od višegodišnjeg proseka za april na svim GMS, zahvatile su skoro celu njenu teritoriju, sa izuzetkom severne Bačke i severnog Banata. Najveće zabeležene padavine bile su u planinskim regionima Srbije, a od GMS najviše registrovane padavine u razmatranoj kišnoj epizodi bile su na Zlatiboru (239,6 mm), u Valjevu (214,2 mm), Loznici (207,6 mm), Kruševcu (200,6 mm), Kraljevu (195,5 mm), Požegi (187,9 mm)

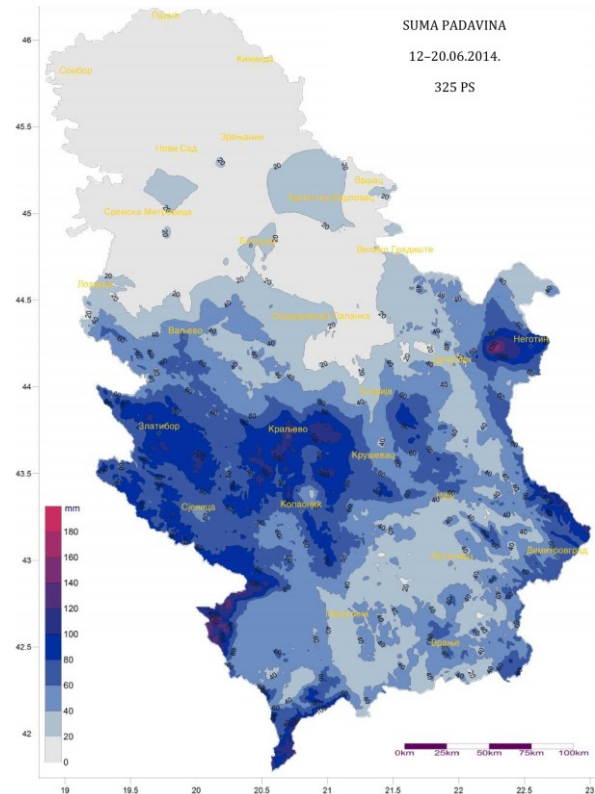
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

itd. Zahvaljujući činjenici da je period koji je prethodio ovoj značajnoj kišnoj epizodi bio relativno suv, bez značajnijih padavina, ova kišna epizoda, iako značajna, nije izazvala značajnije hidrološke probleme na rekama u Srbiji.



Slika 2. Suma padavina 325 PS,
12–19.05.2014.

Figure 2. Precipitation sum, 325 PSs,
12–19 May 2014.



Slika 3. Suma padavina 325 PS,
12–20.06.2014.

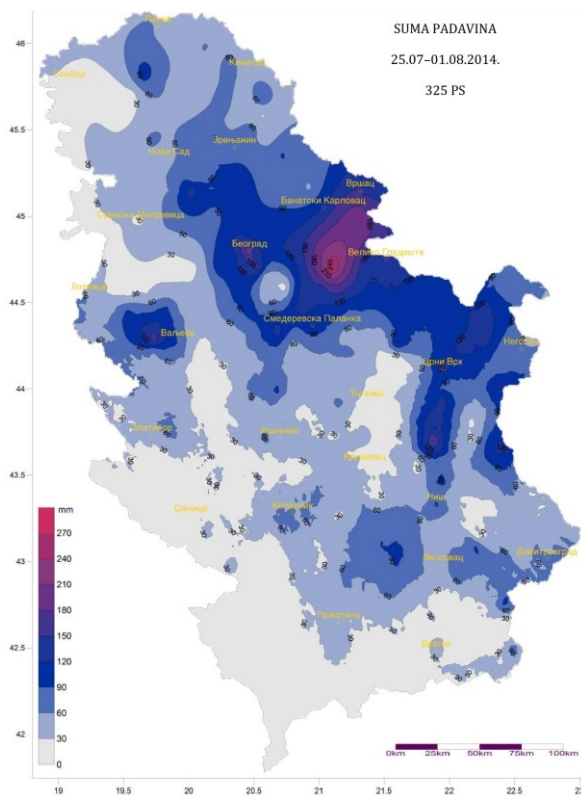
Figure 3. Precipitation sum, 325 PSs,
12–20 June 2014.

Na slici 2 prikazana je karta izohijeta ukupnih suma padavina za maksimalnu kišnu epizodu iz maja 2014. godine. Na osnovu nje može se konstatovati da su na prostoru Republike Srbije u maju najintenzivnije kiše zahvatile slivove Jadra i Kolubare. Najveće registrovane visine padavina u tom periodu zabeležene su na glavnim meteorološkim stanicama u Loznici (188,3 mm), zatim na Opsevatoriji Beograd (179,1 mm), u Valjevu (179,0 mm), Rimskim Šančevima (133,8 mm), Smederevskoj Palanci (130,8 mm) itd. Položaj izohijeta ukazuje na to da su najveće količine padavina izlučene u centru sliva Trešnjice (pritoke Drine) oko 320 mm, zatim u zoni Krupnja i u slivu Ljiga oko 280 mm. Padavine više od 200 mm zahvatile su veći deo Šumadije i neposredan sliv reke Drine od Rogačice do ušća.

Prostorni položaj izohijeta za maksimalnu kišnu epizodu iz juna 2014. godine, prikazan na slici 3, ukazuje na to da su padavine veće od 100 mm zahvatile uglavnom sve planinske regione na teritoriji Republike Srbije. Podaci osmatranja na GMS pokazuju da su najveće sume padavina zabeležene u Kraljevu (113,3 mm), zatim u Vranju (80,3 mm), Zaječaru (73,6 mm) itd.

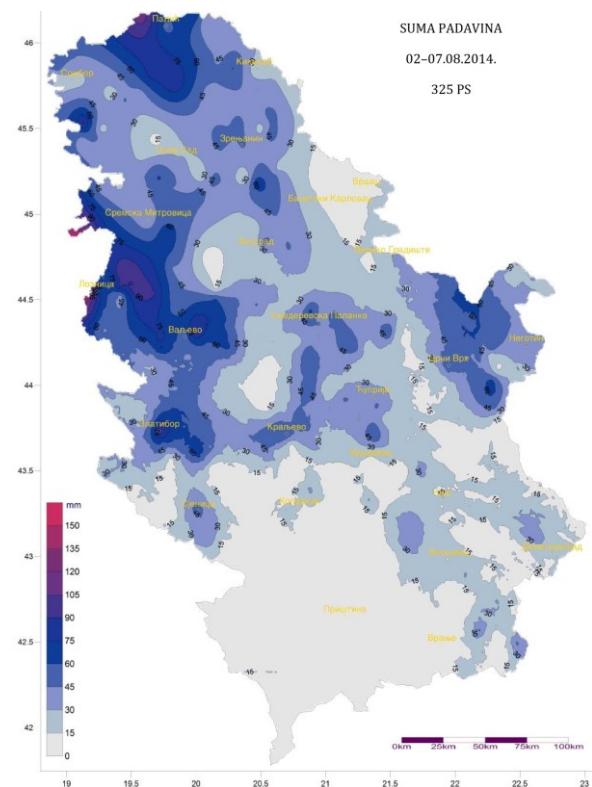
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Za maksimalnu kišnu epizodu u julu 2014. godine, za koju je karta izohijeta ukupnih suma padavina data na slici 4 može se reći da je zahvatila teritoriju neposrednog sliva Dunava, od Novog Sada do Kladova, sa tri manja lokaliteta centra kiše kod Valjeva, Boljevca i na Crnoj planini. Maksimalno registrovane sume padavina na GMS bile su u Beogradu (149,9 mm), na Crnom Vrhu (129,4 mm) i Smederevskoj Palanci (106,5 mm). Karta izohijeta ukazuje na to da su najveće količine padavina zabeležene u regionu ušća Velike Morave oko 240 mm, a u okolini Beograda preko 150 mm, dok se ceo naznačeni prostor neposrednog dela sliva Dunava karakteriše pojavom kiše veće od 100 mm. Ostali navedeni centri kiša su reda veličine suma padavina 100–120 mm.



Slika 4. Suma padavina 325 PS,
25.07–01.08.2014.

Figure 4. Precipitation sum, 325 PSs,
25 July–1 August 2014.



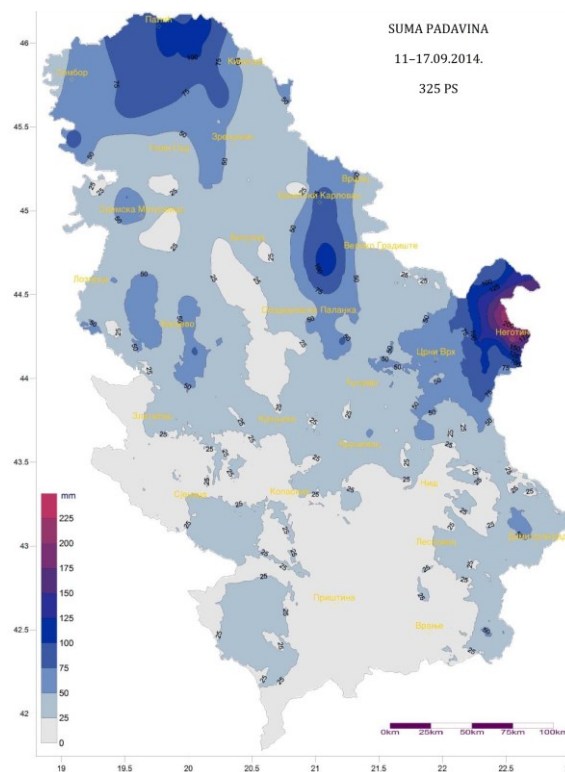
Slika 5. Suma padavina 325 PS,
02–07.08.2014.

Figure 5. Precipitation sum, 325 PSs,
2–7 August 2014.

Maksimalna kišna epizoda koja se pojavila početkom avgusta 2014. godine zahvatila je znatno manji prostor i bila je manjeg obima, što se može videti na slici 5. Centri kiše nalazili su se u slivovima Jadra i gornjeg dela sliva Kolubare, zatim na severu Bačke u okolini Subotice i na Zlatiboru. Najveća količina padavina zabeležena je na GMS Loznica (85,2 mm), naznačeni centri kiše karakterišu se pojavom kiše veće od 60 mm, dok su u slivu Jadra u centru kiše sume padavina bile veće od 90 mm.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Karta izohijeta ukupnih suma padavina za kišnu epizodu iz septembra 2014. godine prikazana je na slici 6. Sa gledišta zahvaćenog prostora, ova kišna epizoda bila je skromnih razmera i pojavila su se samo tri centra kiše. Najintenzivnije kiše bile su na području Negotinske nizije od 100 mm do 200 mm, dok su ostala dva centra kiše bila reda veličine suma padavina od oko 100 mm. Najveće sume padavina na GMS zabeležene su u Negotinu (157,7 mm), zatim na Paliću (85,6 mm) i u Banatskom Karlovcu (79,4 mm).



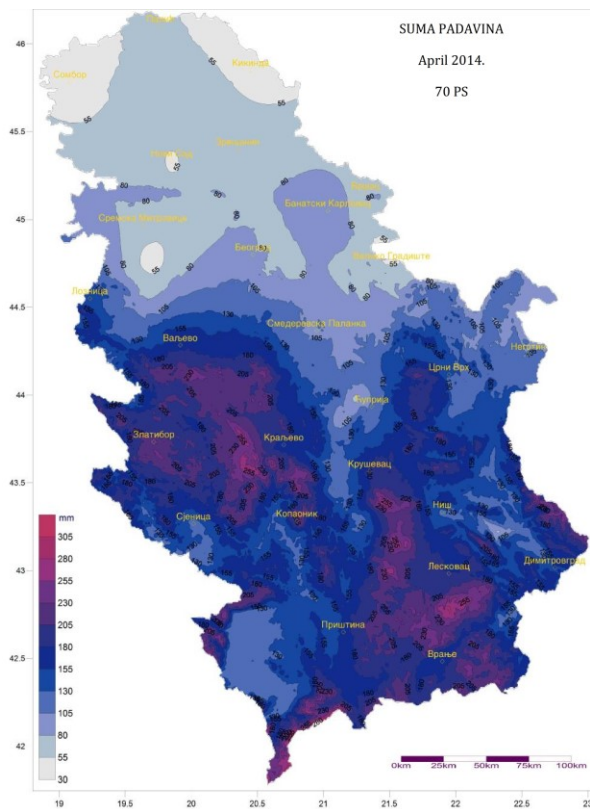
Slika 6. Suma padavina 325 PS, 11–17.09.2014.
Figure 6. Precipitation sum, 325 PSs, 11–17 September 2014.

2.2 Kvantitativne karakteristike mesečnih suma padavina

Analogno prethodnom slučaju, kvantitativne karakteristike mesečnih suma padavina u navedenom periodu prikazane su na isti način preko odgovarajućih intenziteta i numeričkih vrednosti registrovanih mesečnih suma padavina.

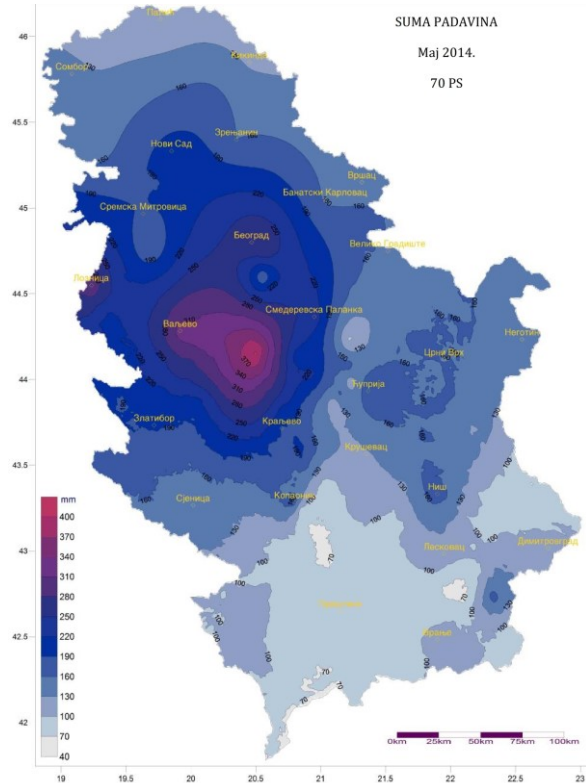
Karta izohijeta mesečne sume padavina za april 2014. godine prikazana je na slici 7. Kao što se vidi, kiša u aprilu zahvatila je čitav prostor Republike Srbije. Više od polovine teritorije Srbije bilo je zahvaćeno kišom čija je ukupna količina bila veća od 150 mm. Preostala teritorija, osim Vojvodine, zahvaćena je nešto slabijom kišom, čija je ukupna količina bila veća od 100 mm, što je više od višegodišnjeg proseka za april na bilo kojoj od GMS. Najveće zabeležene padavine u aprilu bile su u planinskim regionima Srbije, a GMS na kojima je registrovano najviše padavina su: Zlatibor (201,8 mm), Kruševac (177,1 mm), Kraljevo (173,5 mm), Vranje (170,0 mm), Valjevo (167,8 mm), Požega (165,7 mm) itd.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 7. Mesečne sume padavina u aprilu 2014. godine

Figure 7. Monthly precipitation sums in April 2014.



Slika 8. Mesečne sume padavina u maju 2014. godine

Figure 8. Monthly precipitation sums in May 2014.

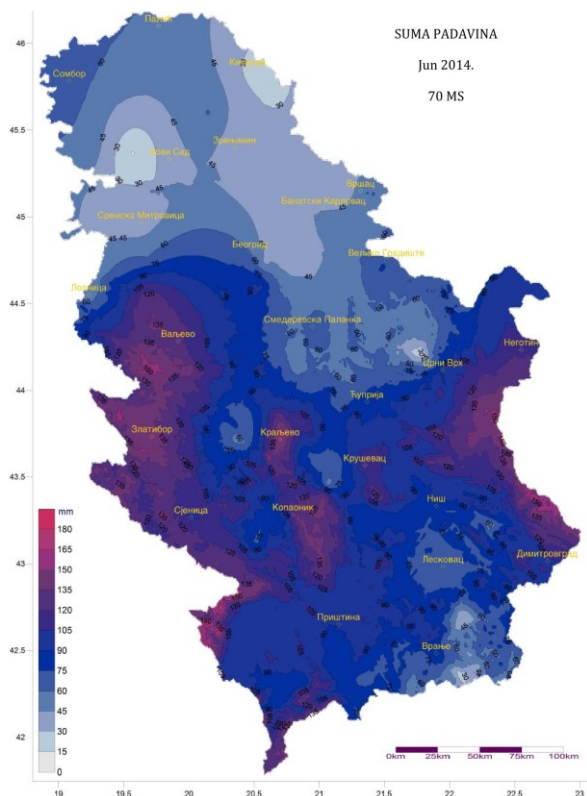
Na slici 8 prikazana je karta izohijeta mesečnih suma padavina za maj 2014. godine. Na osnovu nje može se konstatovati da su na prostoru Republike Srbije u maju najintenzivnije kiše zahvatile slivove Kolubare, neposredan sliv donje Drine, zatim leve pritoke Velike Morave i područje Srema i okoline Beograda. Najveće registrovane visine padavina u periodu pojave ove kiše zabeležene su na GMS: Valjevo (285,5 mm), Loznica (271,3 mm), Beograd (248,5 mm), Kragujevac (231,6 mm), Smederevska Palanka (199,6 mm) itd. Položaj izohijeta ukazuje na to da su najveće količine padavina izlučene u trouglu Valjevo, Smederevska Palanka i Kraljevo.

Prostorni položaj izohijeta mesečne sume padavina iz juna 2014. godine, prikazan na slici 9, ukazuje na to da su padavine veće od 100 mm zahvatile uglavnom sve planinske regione na teritoriji Republike Srbije. Podaci osmatranja na GMS pokazuju da su najveće sume padavina zabeležene u Kraljevu (152,2 mm), zatim u Zaječaru (146,4 mm), na Zlatiboru (129,5 mm), u Valjevu (116,4 mm), u Požegi (114,3 mm) itd.

Karta izohijeta ukupnih suma padavina za jul 2014. godine, koja je data na slici 10, ukazuje na to da su najveće padavine zahvatile slivove Kolubare, levih pritoka Velike Morave, sliv reke Tise i teritoriju neposrednog sliva Dunava od Novog Sada do Kladova. Centri najvećih padavina bili su u južnom Banatu i u okolini Beograda. Najveće registrovane sume padavina u julu zabeležene su na GMS: Beograd (244,5 mm), Valjevo (183,9 mm),

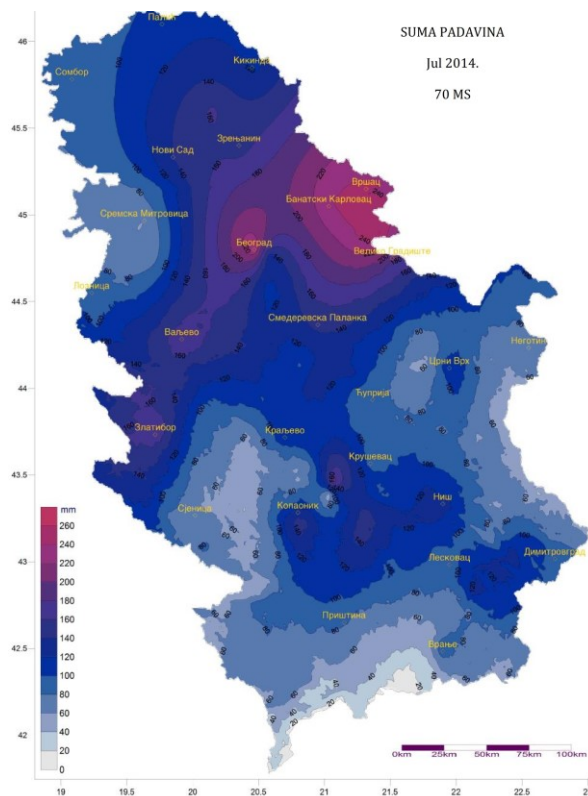
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Veliko Gradište (167,2 mm), Crni Vrh (166,0 mm), Smederevska Palanka (164,1 mm) i Banatska Palanka (153,8 mm).



Slika 9. Mesečne sume padavina u junu 2014. godine

Figure 9. Monthly precipitation sums in June 2014.



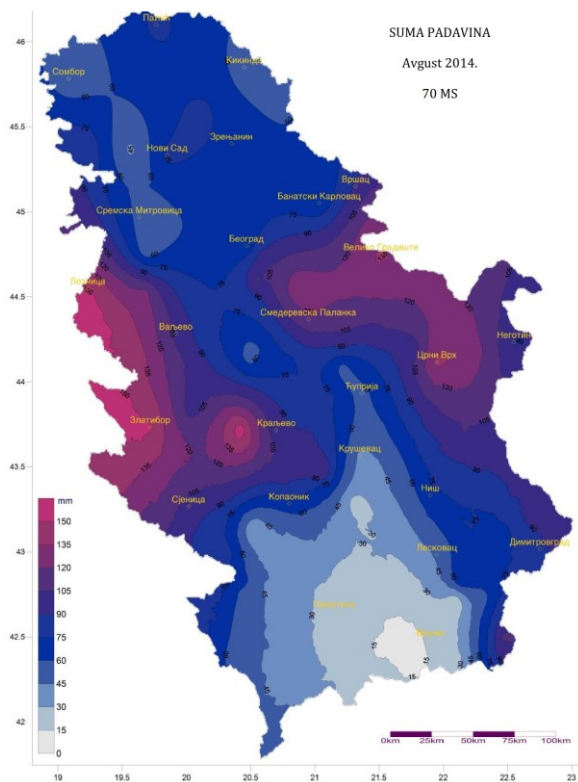
Slika 10. Mesečne sume padavina u julu 2014. godine

Figure 10. Monthly precipitation sums in July 2014.

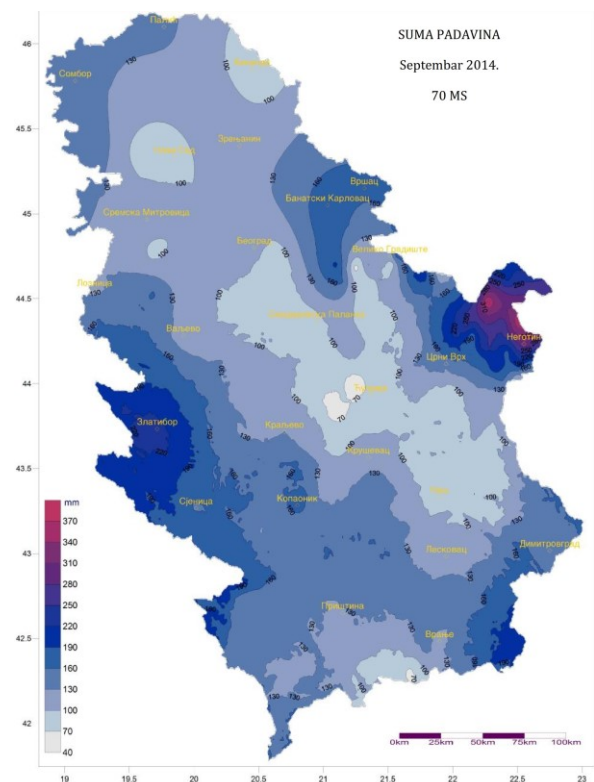
Značajne padavine u avgustu 2014. godine zahvatile su znatno manji prostor i bile su manjeg obima, što se može videti na karti izohijeta ostvarenih suma padavina za mesec avgust na slici 11. Centri kiše nalazili su se u neposrednom slivu Drine od Jadrta do Zaltibora, zatim u okolini Kraljeva i u donjim delovima slivova Mlave, Peka i Porečke reke. Najviše padavina zabeleženo je na GMS Loznica (114,9 mm), iako se na karti vide i područja sa značajnijim padavinama zabeleženim na običnim kišomerima.

Karta izohijeta mesečnih suma padavina za septembar 2014. godine prikazana je na slici 12. Sa gledišta zahvaćenog prostora, padavine u septembru bile su skromnih razmera i pojavila su se samo tri centra kiše: u Negotinskoj niziji, na Zlatiboru i u južnom Banatu. Najintenzivnije kiše bile su na području Negotinske nizije od 200 mm pa do preko 300 mm, dok su na Zlatiboru padavine bile reda veličine oko 150 do 250 mm, a u južnom Banatu oko 150 mm.. Najveće sume padavina zabeležene su na GMS: Negotin (250,7 mm), Požega (174,8 mm), Kuršumlija (143,1 mm) i Sjenica (140,0 mm).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 11. Mesečne sume padavina u avgustu 2014. godine
Figure 11. Monthly precipitation sums in August 2014.



Slika 12. Mesečne sume padavina u septembru 2014. godine
Figure 12. Monthly precipitation sums in September 2014.

3 Zaključak

Na osnovu navedenih konstatacija može se zaključiti da je u periodu april–septembar 2014. godine teritoriju Republike Srbije zahvatilo nekoliko prodora hladnog vazduha sa Atlantika, koji su u dužem ili kraćem periodu, izazvali pojavu serije ciklona iznad našeg prostora. S obzirom na to da je broj kišnih dana u ovom periodu na većini meteoroloških stanica u Srbiji prevazišao broj beskišnih dana, može se zaključiti da je ovaj navedeni period ceo bio kišni. Zabeleženo je nekoliko značajnih kišnih epizoda, čije su kvantitativne karakteristike detaljno prikazane u ovom radu. Interesantno je da se u svakom mesecu, unutar razmatranog perioda, pojavila barem jedna značajnija kišna epizoda, za koju su dati osnovni podaci o meteorološkim uslovima koji su je izazvali, zatim karakteristike ostvarenih kiša, kako sa gledišta maksimalnih intenziteta za različita trajanja kiše, tako i sa stanovišta ukupno ostvarenih količina padavina. Za svaku kišnu epizodu, a na osnovu ukupno ostvarenih suma kiša, dati su prikazi prostorne raspodele kiše u vidu karata izolinija suma padavina. Ove karte omogućuju sagledavanje prostornog položaja ostvarenih centara kiše, kao i njihove kvantitativne karakteristike iskazane u mm pale kiše u samom centru i užoj i široj okolini.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Kvantitativne karakteristike kišnih epizoda prikazane su samo na osnovu raspoloživih podataka na GMS (glavnim meteorološkim stanicama) i to u vidu ostvarenih maksimalnih visina (intenziteta) kiše za različita trajanja kiše, kao i u pogledu ukupnih suma kiše zabeleženih u razmatranim kišnim epizodama. Karte izolacija ukupnih suma padavina urađene su na osnovu podataka sa GMS, kao i raspoloživih podataka o dnevnim sumama padavina na ostalim oficijelnim meteorološkim i padavinskim stanicama RHMZ Srbije. Evidentno je da se u skoro svim kišnim epizodama centri kiše ne poklapaju sa položajima GMS, što ima nepovoljne posledice u oceni statističke značajnosti ostvarenih kišnih epizoda.

Zaključeno je da su glavni uzroci čestih pojava poplava u periodu april–septembar 2014. godine na teritoriji Republike Srbije učestali prodori hladnog vazduha s Atlantika i formiranje moćnih ciklona nad našom teritorijom. Posledica toga je permanentno smenjivanje dugotrajnih kišnih epizoda, što se veoma retko dešava pri pojavi katastrofalnih poplava, koje su u više navrata zahvatile teritoriju Srbije. Sve ove kišne epizode ne karakterišu se pojavom statistički značajnih intenziteta jakih kiša kraćih trajanja koje obično izazivaju pojavu bujičnih poplava. Ukupna trajanja ostvarenih kišnih epizoda znatno prevazilaze uobičajena trajanja maksimalnih intenziteta jakih kiša koje izazivaju poplave. Maksimalni intenziteti kiša trajanja do 5–6 sati, koje izazivaju bujične poplave, skoro u svim razmatranim kišnim epizodama bile su ispod višegodišnjeg proseka, sa izuzetkom nekoliko sučajeva u okolini Niša, Negotina i Smederevske Palanke.

Zahvalnica

Predstavljeno istraživanje sprovedeno je za potrebe naučnih projekata TR 37005 „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ i III 43007 „Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu: praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u periodu 2011–2015. godine.

Literatura

1. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., (2014), *Osnovne karakteristike jake kiše na teritoriji Srbije koja je prouzrokovala poplavu u maju 2014. godine*, Beogradska škola meteorologije, Sveska 7, str. 189-201, ISBN 978-86-904985-9-8, COBISS. RS – ID 208242444.
2. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., Todorović N., Božović N., (2014), *Karakteristike jakih kiša koje su prouzrokovale čestu pojavu poplava na teritoriji Srbije u periodu april–septembar 2014. godine*, Vodoprivreda 0350-0519, 46 (2014) 267-272, p. 15-26.
3. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., Todorović N., Božović N., Anđelković O., (2014), *Statistička značajnost mesečnih i maksimalnih dvomesečnih, tromesečnih i šestomesečnih suma padavina iz perioda april–septembar 2014. godine*, Vodoprivreda 0350-0519, 46 (2014) 267-272, p. 27-37.
4. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., Todorović N., (2015), *Ocena povratnog perioda jake kiše koja je prouzrokovala pojavu katastrofalne poplave u maju 2014. godine na*

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

teritoriji Republike Srbije, XI Međunarodni naučni skup „Savremena teorija i praksa u graditeljstvu“, Banja Luka, p. 101-112.

5. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., Todorović N., (2015), *Statistička značajnost padavina koje su prouzrokovale pojavu majske poplave 2014. godine na delu teritorije Srbije*, 6. Hrvatska konferencija o vodama s međunarodnim sudjelovanjem „Hrvatske vode na investicionom valu“, Zbornik radova, Opatija, 20–23. svibnja 2015, p. 101-108.

Statistička ocena značajnosti jakih kiša koje su izazvale pojavu poplavnih talasa u Srbiji u periodu april–septembar 2014. godine

Stevan Prohaska¹

Dragan Đukić²

Vladislava Bartoš Divac³

Nedeljko Todorović⁴

APSTRAKT: Veoma jake i dugotrajne kiše koje su registrovane na većem delu Republike Srbije i koje su prouzrokovale pojavu serija katastrofalnih poplava u periodu april–maj 2014. godine u mnogim elementima prevazišle su sve do sada registrovane karakteristike jakih kiša na ovom prostoru. Ova činjenica ukazuje na neophodnost sagledavanja statističke značajnosti ovih kiša, kako ostvarenih maksimalnih kišnih epizoda, tako i dugotrajnih kiša registrovanih preko maksimalnih mesečnih i sezonskih suma padavina. Kvantitativni pokazatelji jakih kiša u ostvarenim kišnim epizodama, zatim suma maksimalnih mesečnih i sezonskih padavina, kao i njihova statistička značajnost biće dati samo na glavnim meteorološkim stanicama (GMS) Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije.

Ključne reči: statistička značajnost kiša, maksimalna kišna epizoda, intenziteti kiša, mesečne sume padavina, sezonske padavine

Statistical significance of heavy rainfall that caused the flood occurrence in Serbia in April–September 2014

ABSTRACT: Very strong and long-lasting rainfall caused the occurrence of the series of catastrophic floods in April-May 2014 in most part of the Republic of Serbia. This rainfall exceeded up to now registered characteristics of heavy rainfall in this area. This fact indicates the necessity of exploring the statistical significance of these rains, of achieved maximum rainfall events, and long-lasting rainfall registered over the maximum monthly precipitation sums and seasonal precipitation sums. Quantitative indicators of heavy rainfall in realized rainy episodes, the sum of the maximum monthly and seasonal rainfall, as well as their statistical significance will be given only for the main meteorological stations (GMS) of the Republic Hydrometeorological Service of Serbia.

Key words: rainfall statistical significance, maximum rainfall episode, rainfall intensity, monthly precipitation sums, seasonal precipitation

¹ Prof. dr, dipl. inž. građ, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Stevan.Prohaska@jcerni.co.rs

² Dipl. met, Republički hidrometeorološki zavod Srbije

³ Dipl. inž. građ, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

⁴ Dipl. met, Republički hidrometeorološki zavod Srbije

1 Ocena statističke značajnosti registrovanih kiša

1.1 Ekstremnih kišnih epizoda

Za sagledavanje strukture registrovanih ekstremnih kišnih epizoda, jednog od glavnih uzročnika pojave poplava u rečnim slivovima, kao i za ocenu njihove statističke značajnosti, neophodni su podaci dugogodišnjih osmatranja tzv. kiša jakog intenziteta, za čije sagledavanje su potrebni intenziteti kiša kraćih trajanja iskazani u mm/min. Ocena statističke značajnosti ostvarenih maksimalnih intenziteta razmatranih kišnih epizoda na celom prostoru izvršena je pomoću postojećih najnovijih statističko-probabilističkih obrada prezentiranih u Monografiji *Intenziteti jakih kiša u Srbiji*, autora S. Prohaska, V. Bartoš Divac, sa saradnicima, Beograd, 2014. U ovoj dokumentaciji su na bazi odgovarajuće statističko-probabilističke analize formirane zavisnosti maksimalnih visina kiše u funkciji trajanja kiše i verovatnoće pojave, tzv. HTP krive za svih 30 navedenih pluviografskih stanica. Te zavisnosti predstavljaju osnovnu podlogu za ocenu statističke značajnosti registrovanih maksimalnih kišnih epizoda u navedenom šestomesečnom periodu u 2014. godini.

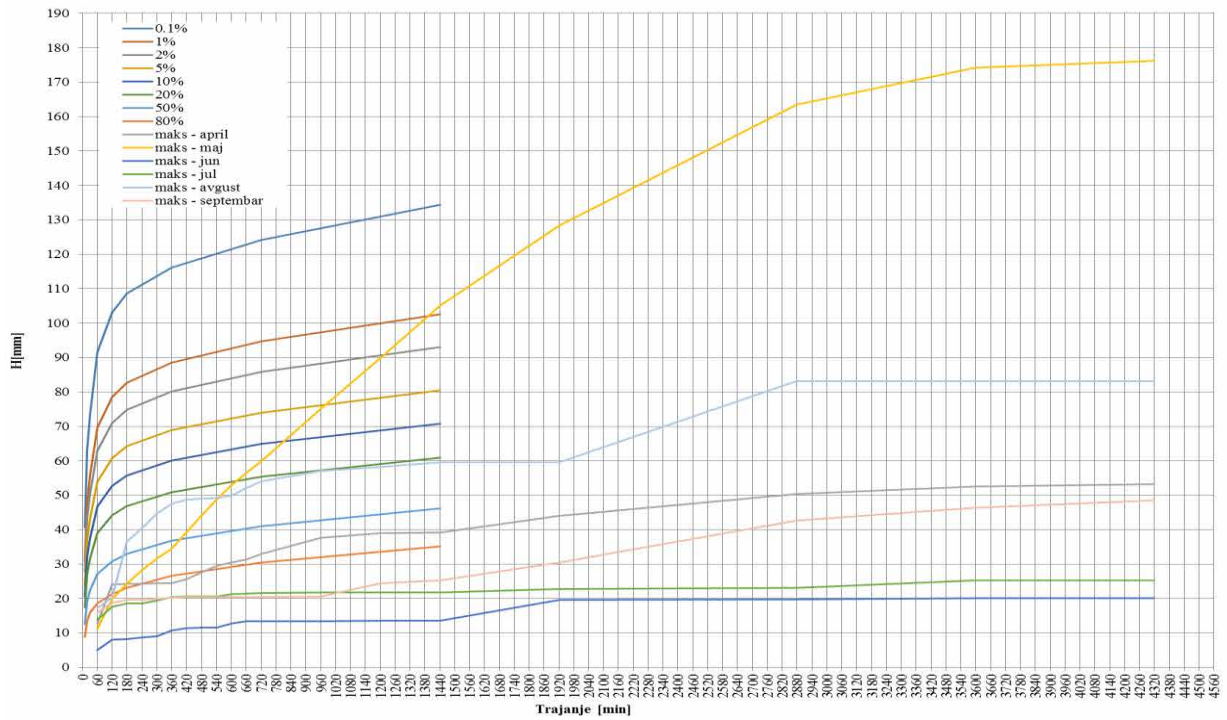
U konkretnom slučaju, ocena statističkih značajnosti osmotrenih maksimalnih kišnih epizoda u 2014. godini izvršena je na svim glavnim meteorološkim stanicama. Pri grafičkom prikazu rezultata analize vođeno je računa da se prikažu rezultati samo na glavnim meteorološkim stanicama koje su bile najbliže centru registrovanih maksimalnih kišnih epizoda, a koje su izazvale poplave na određenom području ili samo značajniji porast vodostaja na manjim vodotocima u razmatranom vremenskom periodu april–septembar 2014. godine. Saglasno navedenom, rezultati ove analize prikazani su, primera radi, za tri pluviografske stanice na slikama br. 1–3 u vidu uporednog dijagrama ostvarenih maksimalnih intenziteta (visina) kiša za navedene kišne epizode i odgovarajućih statističko-probabilističkih zavisnosti maksimalnih visina kiše u funkciji trajanja kiše i verovatnoće pojave i to za sledeće glavne meteorološke stanice: Loznica – LOZ, Beograd – BEG i Valjevo – VAL.

Numerički pokazatelji rezultata uporedne analize ostvarenih i probabilističkih maksimalnih visina kiša za različita trajanja kiše dati su u tabeli br. 1, i to za sledeće glavne meteorološke stanice: Loznica – LOZ, Beograd – BEG, Valjevo – VAL., Niš – NIŠ, Negotin – NEG, Rimski Šančevi – RŠN, Kraljevo – KRA, Kruševac – KRU i Banatski Karlovac – BK. Odabrane su samo one GMS (najbliže centrima kiše) sa registrovanim najznačajnijim kišama u toku razmatrane epizode. Rezultati su prikazani hronološkim redom, saglasno gore navedenom prikazu pojava jakih kišnih epizoda, sa odabranom GMS gde su ostvarene kiše bile statistički značajnije. U tabeli su dati i iznosi visina registrovanih kiša u periodu trajanja razmatrane kišne epizode – P_{ep} , zatim prosečne višegodišnje vrednosti visina kiše u mesecu kada se ta kišna epizoda prioritetno pojavila – \bar{P} , kao i njihov odnos Θ . U istoj tabeli su prikazane, takođe, maksimalne visine ostvarenih kiša u mm i odgovarajući povratni periodi u godinama – $T(g)$ za različita trajanja kiše od 1, 3, 6, 12, 24, 48 i 72 časa.

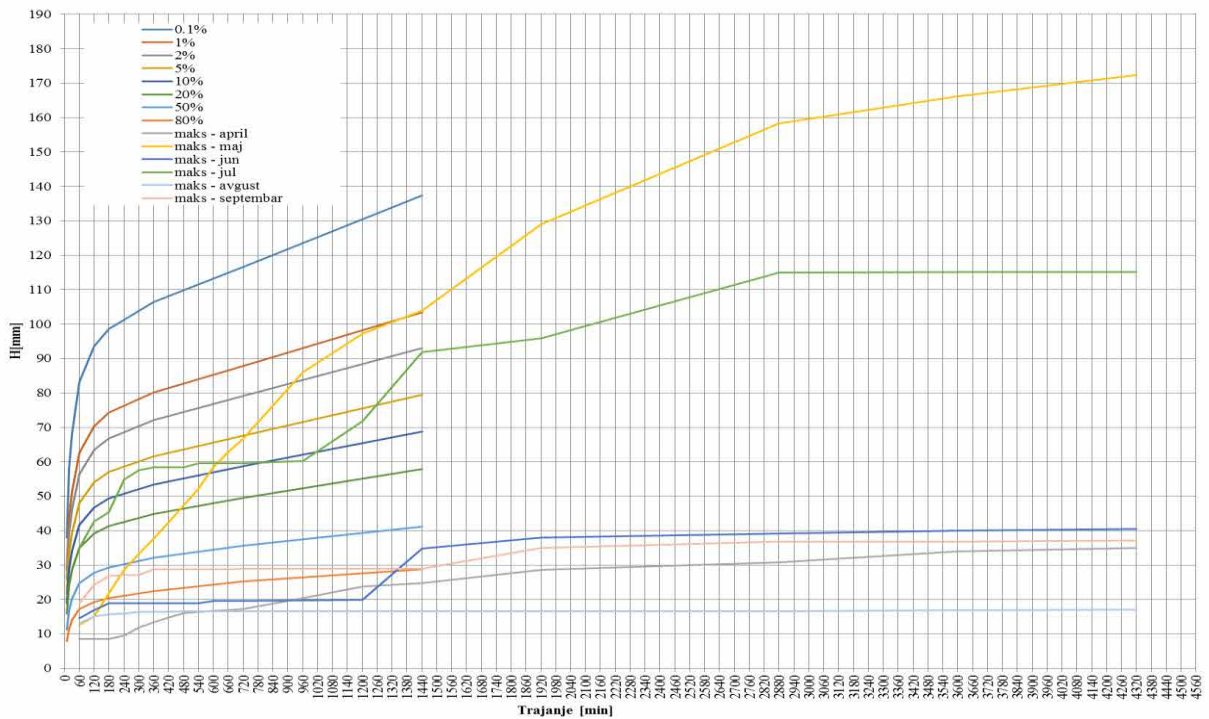
Na osnovu prikazanih grafika i numeričkih podataka u tabeli 1 može se doći do sledećih zaključaka o statističkoj značajnosti registrovanih kišnih epizoda u periodu od aprila do septembra 2014. godine.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



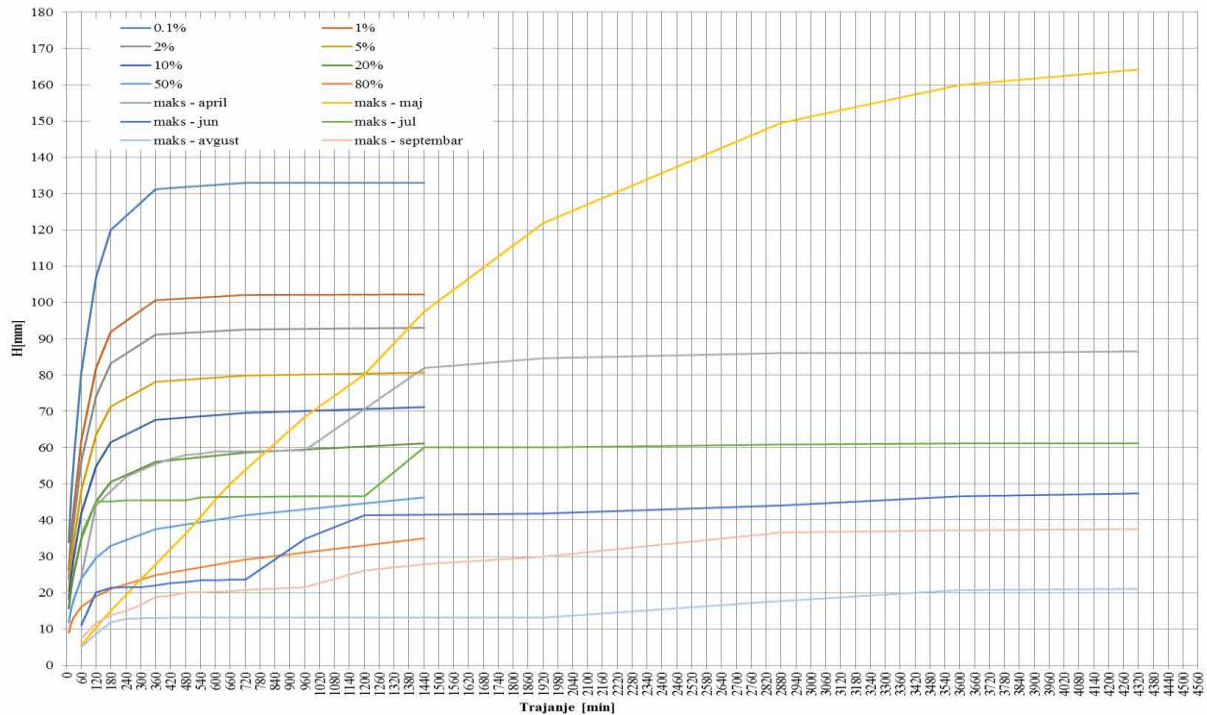
Slika 1. HTP kriva za Loznicu
Figure 1. DTP curve for Loznica



Slika 2. HTP kriva za Beograd
Figure 2. DTP curve for Belgrade

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 3. HTP kriva za Valjevo
Figure 3. DTP curve for Valjevo

Tabela 1. Prikaz statističke ocene značajnosti ostvarenih maksimalnih kiša na teritoriji Srbije u 2014. godini.

Table 1. Statistical significance assessment of achieved maximum rainfall on the territory of Serbia in 2014.

GMS				1h		3h		6h		12h		24h		48h		72h	
	\bar{P}	P_{ep}	Θ	mm	T(g)	mm	T(g)	mm	T(g)	mm	T(g)	mm	T(g)	mm	T(g)	mm	T(g)
15.04 -05.05.2014.																	
KRA	61,4	195,5	3,18	12,7	1	25,5	<2	27,2	<2	30,9	<2	56,1	5	79,0	7	96,6	12
KRU	56,4	200,6	3,56	9,5	1	11,8	1	17,0	1	28,1	<2	44,8	5	76,9	14	99,8	40
VAL	62,8	214,2	3,41	24,6	2	48,0	5	55,4	5	59,0	5	82,0	25	86,0	10	86,6	7
12-19.05.2014.																	
LOZ	79,2	188,3	2,38	11,1	1	24,2	<2	34,5	<2	59,8	7	105,0	125	163,4	1000	176,1	450
BEG	67,8	179,1	2,64	12,5	1	21,8	1	37,3	2	66,8	20	103,9	100	158,2	400	172,3	625
NIŠ	64,7	106,2	1,64	13,1	1	30,3	3	43,3	10	67,3	100	84,0	50	96,8	80	100,1	80
RŠN	57,8	133,8	2,31	7,5	1	18,4	<2	33,5	2	60,9	8	81,1	20	107,5	50	131,3	110
VAL	80,7	179,0	2,12	5,5	1	15,0	1	27,7	<2	53,8	3	97,4	60	149,4	400	164,2	650
12-20.06.2014.																	
KRA	88,9	113,3	1,27	28,6	3	37,7	3	38,4	3	41,1	3	50,1	3	68,7	5	87,0	10
ZAJ	66,5	73,6	1,11	36,0	20	37,3	7	37,9	7	38,0	5	40,4	4	54,7	3	58,9	3
25.07-01.08.2014.																	
BEG	68,1	149,9	2,20	34,9	5	45,4	7	58,3	15	59,6	10	91,9	50	115,0	45	115,1	30
NIŠ	44,3	94,4	2,13	41,2	20	56,7	50	66,8	120	69,8	150	70,4	80	73,8	25	73,8	18
02.08-06.08.2014.																	
LOZ	74,1	85,2	1,15	17,2	1	36,4	2	47,5	4	54,0	5	59,5	5	83,2	9	83,2	5
11-17.09.2014.																	
BK	56,2	79,4	1,41	23,0	2	41,7	7	46,4	7	47,2	7	71,5	25	77,8	5	79,2	3
NEG	43,0	157,7	3,67	46,1	20	75,7	70	85,1	90	124,4	670	136,9	300	152,4	250	154,5	80

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

- Kišna epizoda iz aprila trajala je bez većih prekida nerelativno dugo (21 dan), a ukupne sume registrovanih padavina na većim GMS znatno prevazilaze prosečne višegodišnje vrednosti za april. Na navedene tri GMS ukupne pale količine u kišnoj epizodi su za preko 200% više od višegodišnjeg proseka, a na GMS Kruševac za više od 250%. Međutim, maksimalni intenziteti kiše u toj kišnoj epizodi bili su statistički beznačajni, sa povratnim periodom od 1 do 5 godina, a najveći maksimalni intenzitet registrovan je za trodnevnu kišu na GMS Kruševac, koja odgovara 40-godišnjem povratnom periodu. Statistička značajnost ukupne pale kiše je znatno veća, što se može videti iz vrednosti povratnih perioda registrovane kiše na navedene tri GMS, koje se pod pretpostavkom da su pale u aprilu, kreću od 1000 do 5000 godina.
- U maju je registrovana jaka kišna epizoda sa ekstremnim sumama padavina u relativno kraćem periodu vremena. Ova kišna epizoda trajala je neprekidno do 7 dana. Karakteristična je po tome što su maksimalni intenziteti za kiše kraćeg trajanja do 5–6 sati bili statistički beznačajni, sa izuzetkom kiše u Nišu i Smederevskoj Palanci koji su bili ispod višegodišnjeg proseka. Na GMS Niš 12-časovni maksimalni intenziteti odgovarali su povratnom periodu od 100 godina. Statistički značajnije sume padavina realizovane su za trajanje kiša dužih od 24 časa. Tako, na primer, maksimalne 24-časovne kiše realizovane u Beogradu i Loznici prevazilaze stogodišnje povratne periode, u Valjevu 70-godišnji, u Nišu 50-godišnji, a u Rimskim Šančevima 30-godišnji povratni period. Maksimalne visine padavina za 48 časova realizovane su u Loznici, gde izmerena vrednost prevazilazi 1000-godišnju kišu, zatim slede Beograd i Valjevo sa 400-godišnjom kišom, te Niš sa kišom 80-godišnjeg povratnog perioda. Za trodnevnu kišu registrovanu u Beogradu i Valjevu povratni period ocenjen je na 700 godina. Povratni period realizovane trodnevne kiše u Loznici ocenjen je na 400 godina, a kod Rimskih Šančeva na 100 godina. Sa gledišta poređenja ukupnih palih kiša u razmatranoj kišnoj epizodi i prosečnih višegodišnjih vrednosti kiše u maju može se reći da ukupne sume u kišnoj epizodi, takođe, značajno prevazilaze višegodišnje proseke. Na navedenim GMS taj odnos kreće se od 1,64 do 2,64, odnosno padavine u kišnoj epizodi su veće za 64%–164%. Sa stanovišta statističke značajnosti registrovanih kiša u maju, one odgovaraju povratnim periodima mesečnih suma od 70 (Niš) do 800 godina.
- U kišnoj epizodi u junu, koja je, sa većim ili manjim prekidima trajala oko 9 dana, ukupne sume padavina uglavnom su manje od odgovarajućeg višegodišnjeg proseka, sa izuzetkom GMS navedenim u tabeli br. 1, gde je na GMS Kraljevo ona veća za 27%, a na GMS Zaječar za 11%. U toku cele kišne epizode, za razmatrana trajanja kiše maksimalni intenziteti nisu bili statistički značajni. Najznačajniji je registrovani jednočasovni intenzitet na GMS Zaječar koji odgovara 20-godišnjem povratnom periodu. U poređenju sa mesečnim kišama, povratni period ostvarenih suma padavina u kišnoj epizodi u odnosu na junske mesečne sume je reda veličine uglavnom manjeg od 10 godina.
- Jake kiše u julu, koje su trajale 8 dana, zahvatile su nekoliko manjih područja, a najznačajniji maksimalni intenziteti registrovani su na GMS Beograd i GMS Niš. Maksimalni intenzitet 12-časovne kiše u Nišu odgovara 150-godišnjem povratnom periodu, a ostvarena maksimalna 24-časovna kiša u Beogradu ima 50-godišnji povratni period. U poređenju sa prosečnim višegodišnjim vrednostima mesečnih suma padavina, ostvarene visine kiše u ovoj epizodi prevazilaze ekstremne za više od 100%, a njihovi povratni periodi, u odnosu na mesečne sume, iznose 16 godina za Beograd i 12 godina za Niš.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Kišna epizoda registrovana u avgustu u trajanju od 5 dana, sa gledišta maksimalnih intenziteta, nije bila statistički značajna, sa maksimalnim povratnim periodom od 9 godina za dvodnevnu kišu registrovanu na GMS Loznica. Ukupna registrovana suma na ovoj stanici je reda veličine višegodišnjeg mesečnog proseka.
- Druga po statističkoj značajnosti jakih kiša u 2014. godini zahvatila je znatno uži prostor, na nekoliko lokaliteta, od kojih je najznačajniji bio u Negotinskoj niziji. Tako je na GMS Negotin u ovoj kišnoj epizodi, koja je sa manjim prekidima trajala 7 dana, ukupno palo 270% više kiše nego što iznosi prosečna višegodišnja vrednost sume padavina za septembar. Za drugi centar kiše u okolini GMS Banatski Karlovac ovaj odnos iznosi 1,41, tj. palo je za 41% više od višegodišnjeg proseka. Najznačajniji maksimalni intenziteti na GMS Negotin registrovani su za 12-časovno trajanje kiše, gde povratni period ostvarene kiše iznosi oko 670 godina, za 24-časovnu kišu 300 godina, a za 48-časovnu kišu 250 godina. Na GMS Banatski Karlovac najveći ostvareni maksimalni intenzitet je za 24-časovno trajanje, a povratni period ove kiše iznosi 25 godina. Povratni periodi ostvarenih ukupnih suma padavina u razmatranoj kišnoj epizodi u odnosu na ukupne mesečne sume padavina u septembru iznose za GMS Negotin 30 godina, a za GMS Banatski Karlovac 7 godina.

1.2 Mesečnih i sezonskih suma padavina

Za razmatrani kišni period april–septembar 2014. godine, uporedo sa analizom statističke značajnosti visina kiša maksimalnih kišnih epizoda, rađena je i analiza statističke značajnosti mesečnih suma padavina, zatim dvomesečnih, tromesečnih, pa sve do šestomesečnih suma padavina. U vezi s tim, korišćeni su podaci RHMZ Srbije sa GMS i to vremenske serije mesečnih suma padavina registrovanih u periodu 1946–2014. godine.

Preliminarnom analizom prikupljenih vremenskih serija mesečnih suma padavina uočeno je da na velikom broju GMS registrovane mesečne sume padavina u 2014. godini znatno prevazilaze dosadašnje ekstreme u postojećim vremenskim serijama iz perioda 1946–2013. godine. Zbog toga je prvo urađena statistička provera da li se ti registrovani ekstremi u 2014. godini mogu svrstati u kategoriju statističkih izuzetaka. Pri tome je korišćen statistički test Grubsa i Beka (Bobee i Ashkar, 1991). Rezultati te analize prikazani su u tabeli broj 2.

Na osnovu prikazanih rezultata iz tabele 2 može se zaključiti da se u mesečnim sumama padavina u periodu april–septembar 2014. godine na razmatranih 27 GMS statistički značajan izuzetak pojavio 17 puta. Do 2014. godine u serijama mesečnih suma padavina u periodu april–septembar statistički značajni izuzeci su se pojavili samo dva puta i to u aprilu 2001. godine na GMS Leskovac i u julu 1999. godine na GMS Beograd, kada je izuzetak bio za 7% veći od odgovarajućeg izuzetka iz 2014. godine. Ostvareni statistički izuzeci u 2014. godini su u proseku preko 30% veći od do sada registrovanih maksimuma, a najveće povećanje zabeleženo je na GMS Beograd u maju i na GMS Negotin u septembru.

Ovako značajna povećanja ekstremnih maksimalnih vrednosti u serijama mesečnih suma padavina imaju nepovoljan uticaj pri oceni statističke značajnosti prilikom primene klasične procedure određivanja povratnog perioda preko teorijskih krivih raspodele verovatnoća. Naime, skoro po pravilu, izuzeci znatno povećavaju koeficijent asimetrije istorijske serije podataka, što ima za posledicu smanjene vrednosti povratnog perioda ostvarenog izuzetka. Osim toga, može se postaviti realno pitanje da li ima smisla ocenjivati povratne periode

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

statističkih izuzetaka primenom klasične procedure sa teorijskim krivama raspodele verovatnoće, kada izuzeci prevazilaze do tada zabeležene ekstremne vrednosti i do 50%. U tom slučaju mogu se dobiti povratni periodi u godinama koji prevazilaze dužinu perioda osmatranja istorijskih serija i za više od 20 puta. Činjenica je da su ove dileme prisutne, ali s obzirom na to da autorima ovoga rada nije poznata neka druga pouzdanija procedura za ocenu povratnih perioda ostvarenih statističkih izuzetaka, uz sve moguće kritike, autori prihvataju klasičnu proceduru ocene povratnih perioda primenom teorijskih funkcija raspodele verovatnoća. Svakako da prihvatanje i korišćenje konačnih rezultata za identifikovane izuzetke treba uzeti uz veliki oprez.

Tabela 2. Prikaz ostvarenih statističkih izuzetaka u periodu od aprila do septembra 2014. godine i dosadašnjih maksimuma u razmatranim serijama mesečnih suma padavina.

Table 2. Overview of the achieved statistical exceptions in the period from April to September 2014 and the previous maximums in the considered series of monthly precipitation sums.

Mesec	GMS	Dosadašnji maksimumi		P ₂₀₁₄ (mm)	Θ	\bar{P} (mm)	σ	K _G	P _G (mm)	Izuzeci	
		P _{max} (mm)	God,							Prvi	Drugi
April	DIM	106,4	1962	142,5	1,34	53,2	26,0	2,9839	133,9	2014	
	KRA	141,4	2001	173,5	1,23	62,3	31,1	2,9839	158,9	2014	
	KRU	132,6	2001	177,1	1,34	57,3	30,6	2,9839	152,3	2014	
	LES	159,1	2001	185,1	1,16	56,0	31,1	2,9839	152,6	2014	2001
	LOZ	123,7	1973	155,9	1,26	64,1	28,6	2,9839	152,9	2014	
	VAL	129,0	1958	167,8	1,30	62,1	27,9	2,9839	148,3	2014	
	VRA	129,7	2001	170,0	1,31	52,3	26,9	2,9839	135,8	2014	
	ZAJ	121,3	1958	139,4	1,15	54,3	27,2	2,9839	138,8	2014	
Maj	ZLA	161,3	1994	201,8	1,25	74,6	35,3	2,9839	184,2	2014	
	KRG	169,7	1970	231,6	1,36	70,8	41,7	2,9839	200,3	2014	
	LOZ	207,3	1961	271,3	1,31	84,2	48,1	2,9839	233,6	2014	
	BEG	169,0	1987	248,5	1,47	71,6	44,9	2,9839	211,0	2014	
	RŠN	133,8	1957	178,9	1,34	61,4	35,7	2,9839	172,3	2014	
	SMP	155,9	1987	199,6	1,28	65,7	37,6	2,9839	182,5	2014	
Jul	VAL	213,2	1957	285,5	1,34	86,6	49,3	2,9839	239,7	2014	
	BEG	262,5	1999	244,5	0,93	68,5	50,4	2,9839	225,0	1999	2014
Septembar	NEG	174,0	1972	250,7	1,44	45,6	43,2	2,9839	179,8	2014	

U konkretnom slučaju, za ocenu statističke značajnosti navedenih registrovanih suma padavina u 2014. godini, pa s tim u vezi i identifikovanih ostvarenih statističkih izuzetaka, korišćenjem raspoloživih istorijskih serija sa uključenjem podataka iz 2014. godine, sračunate su teorijske vrednosti suma padavina primenom Pirson III i Log Pirson III zakona raspodele verovatnoća. Na osnovu tih rezultata određeni su povratni periodi svih ostvarenih mesečnih suma padavina u periodu april–septembar 2014. godine, pa i identifikovanih statističkih izuzetaka. Rezultati proračuna statističke značajnosti ostvarenih mesečnih suma padavina iskazani su u vidu odgovarajućih povratnih perioda u tabeli 3.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 3. Prikaz rezultata proračuna statističke značajnosti ostvarenih mesečnih suma padavina u periodu april–septembar 2014. godine.

Table 3. Calculation results of the statistical significance of achieved monthly precipitation sums in the period April–September 2014.

GMS	IV		V		VI		VII		VIII		IX	
	mm	T(god)	mm	T(god)	mm	T(god)	mm	T(god)	mm	T(god)	mm	T(god)
KRG	129,5	50	231,6	250	91,3	3	79,4	3	57,4	3	75,5	5
BK	98,0	25	131,8	13	59,5	<2	153,8	12	42,7	2	127,2	40
CRV	62,5	2	71,8	2	86,0	2	166,0	15	69,3	3	55,8	2
ĆUP	96,3	10	172,6	30	83,3	3	104,7	7	33,7	<2	-	-
DIM	142,4	300	99,5	4	97,1	3	107,3	10	45,5	<2	114,2	18
KIK	35,8	<2	123,3	50	34,5	<2	116,6	13	37,7	<2	68,9	6
KRA	173,5	170	184,3	30	152,2	12	137,7	10	98,1	5	127,9	17
KRU	177,1	300	84,9	3	111,2	5	87,8	5	33,7	<2	35,3	2
KUR	118,5	50	84,9	3	79,2	3	82,9	5	32,8	<2	143,1	50
LES	185,1	250	98,0	7	77,0	3	79,4	8	25,0	<2	115,0	17
LOZ	155,9	300	271,3	150	56,2	<2	89,7	3	114,9	5	115,8	10
NEG	95,3	7	128,8	20	92,4	5	68,5	4	51,8	3	250,7	300
BEG	90,2	10	248,5	250	63,4	<2	244,5	110	48,3	2	117,6	17
NIŠ	120,3	80	168,4	70	78,8	3	147,3	90	53,5	3	81,4	6
RŠN	47,9	2	178,9	125	44,3	<2	111,6	7	28,5	<2	81,1	10
PAL	65,9	7	102,0	17	13,6	1	-	-	70,5	5	112,6	40
POŽ	165,7	200	183,5	70	114,3	5	97,8	3	80,8	5	174,8	100
SJE	103,0	25	129,7	20	70,0	2	48,3	<2	63,9	2	140,0	15
SMP	83,9	10	199,6	300	63,3	<2	164,1	40	53,7	2	79,8	5
SOM	44,0	2	136,8	30	67,5	2	76,5	3	48,2	2	132,5	60
SRM	71,9	6	164,7	70	27,9	1	74,5	3	48,7	2	129,7	25
VAL	167,8	300	285,5	250	116,8	3	183,9	30	64,9	2	103,5	8
VGR	50,5	2	141,1	20	85,1	3	167,2	25	36,3	<2	108,5	15
VRA	170,0	300	122,4	25	109,1	6	72,7	4	16,7	1	122,9	20
ZAJ	139,4	250	124,8	15	146,4	125	68,7	3	68,0	5	115,8	20
ZLA	201,8	250	185,7	70	129,5	4	37,1	1	-	-	-	-
ZRE	74,2	12	147,9	50	43,9	<2	144,0	25	67,1	5	121,1	30

Na osnovu prikazanih rezultata ocene statističke značajnosti razmatranih mesečnih suma padavina, prezentiranih u tabeli 3, može se zaključiti da su u mesecu aprilu 2014. godine registrovane najznačajnije padavine. Statistički veoma značajne mesečne sume padavina, sa povratnim periodom od 300 godina zabeležene su na GMS: Loznica, Dimitrovgrad, Kruševac, Valjevo i Vranje. Mesečne sume padavina sa povratnim periodom od 250 godina registrovane su na GMS: Leskovac, Zaječar i Zlatibor, zatim sledi Požega sa 200-godišnjim i Kraljevo sa 170-godišnjim povratnim periodom.

Drugi mesec sa obimnim padavinama, prema statističkoj značajnosti je mesec maj, kada su registrovane mesečne sume sa najvećim povratnim periodom od 300 godina na GMS Smederevska Palanka. Nešto manje značajnosti, sa povratnim periodom od 250 godina, imaju mesečne sume padavina registrovane na GMS: Beograd, Kragujevac i Valjevo. Zatim slede: GMS Loznica sa 150-godišnjim povratnim periodom, pa Rimski Šančevi sa 125-godišnjim, Niš, Požega, Sremska Mitrovica i Zlatibor sa 70-godišnjim povratnim periodom itd. Sledeći mesec po značajnosti ukupnih suma padavina je septembar i to na ograničenom delu teritorije u okolini Negotina (reda veličine 300-godišnjeg povratnog perioda).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Analogne analize urađene i za sezonske vremenske serije – dvomesečne, tromesečne i šestomesečne, sprovedene su po istom postupku. Prvo je u svim navedenim serijama, sa uključivanjem podataka iz 2014. godine, izvršena identifikacija pojave statističkih izuzetaka korišćenjem istog testa Grubsa i Beka. Rezultati ove analize prikazani su u tabeli br. 4. U istoj tabeli dati su prikazi ostvarenih ekstrema razmatranih sezonskih padavina u 2014. godini, kao i dosadašnjih registrovanih ekstrema sa naznakom godine njihovog pojavljivanja. Dati su, takođe, i odnosi između registrovanih ekstrema u 2014. godini i odgovarajućih dosadašnjih ekstrema.

Tabela 4. Prikaz ostvarenih statističkih izuzetaka u periodu od aprila do septembra 2014. godine i dosadašnjih maksimuma u razmatranim serijama sezonskih suma padavina.

Table 4. Achieved statistical exceptions in the period from April to September 2014 and the previous maximums in the considered series of seasonal precipitation sums.

Sezona	GMS	Dosadašnji maksimumi		$\Sigma P_{2014/\text{period}}$ (mm)	θ	$\bar{\Sigma P}$ (mm)	σ	K_G	ΣP_G (mm)	Izuzeci	
		ΣP_{\max} (mm)	God,							Prvi	Drugi
Dvomesečna	KRG	225,4	1970	361,1/IV-V	1,60	124,2	51,6	2,9839	278,1	2014	
	KRA	276,7	1957	357,8/IV-V	1,29	147,2	53,4	2,9839	306,5	2014	
	KRU	280,2	1957	297,4/IV-V	1,06	131,8	54,9	2,9839	295,6	2014	
	LES	200,1	1970	283,1/IV-V	1,41	119,9	45,3	2,9839	255,1	2014	
	LOZ	283,1	2012	427,2/IV-V	1,51	148,4	63,6	2,9839	338,2	2014	
	NEG	237,4	2005	302,6/VIII-IX	1,27	83,1	56,3	2,9839	251,1	2014	
	BEG	226,2	1987	338,7/IV-V	1,50	126,2	52,1	2,9839	281,6	2014	
	NIŠ	246,6	2012	288,7/IV-V	1,17	120,2	44,0	2,9839	251,5	2014	
	POŽ	225,0	1980	349,2/IV-V	1,55	137,4	48,1	2,9839	280,9	2014	
	SMP	210,3	1987	283,5/IV-V	1,35	116,3	46,7	2,9839	255,6	2014	
	VAL	266,0	1970	453,3/IV-V	1,70	148,5	57,7	2,9839	320,7	2014	
	VRA	209,5	1961	282,4/IV-V	1,35	117,1	44,0	2,9839	248,4	2014	
ZLA	258,4	1994	387,5/IV-V	1,50	177,6	49,2	2,9839	324,4	2014		
Tromesečna	KRG	401,7	1970	452,4/IV-VI	1,13	203,2	65,7	2,9839	399,2	2014	1970
	KRA	363,4	1970	510,0/IV-VI	1,40	236,9	68,5	2,9839	441,3	2014	
	LOZ	386,3	1956	483,4/IV-VI	1,25	249,2	72,2	2,9839	464,6	2014	
	NEG	352,1	2005	371,1/VII-IX	1,05	131,8	73,1	2,9839	349,9	2014	2005
	BEG	465,8	1999	556,4/V-VII	1,19	234,7	86,8	2,9839	494,7	2014	
	NIŠ	298,8	1969	394,5/V-VII	1,32	176,1	59,8	2,9839	354,5	2014	
	POŽ	330,2	1982	463,5/IV-VI	1,40	222,4	60,6	2,9839	403,2	2014	
	VAL	455,6	2010	586,2/V-VII	1,29	264,5	83,7	2,9839	514,3	2014	
	VRA	397,5	1948	385,5/IV-VI	0,97	184,3	64,6	2,9839	377,1	1948	2014
	ZAJ	324,8	1980	410,6/IV-VI	1,26	187,0	61,8	2,9839	371,4	2014	
ZLA	433,5	1989	517,0/IV-VI	1,19	282,5	69,6	2,9839	490,2	2014		
Šestomesečna IV-IX	KRA	705,5	1957	873,7	1,24	429,8	121,1	2,9839	791,2	2014	
	NEG	541,7	1957	687,5	1,27	317,7	99,5	2,9839	614,6	2014	
	BEG	651,0	2001	812,5	1,25	393,6	113,3	2,9839	731,7	2014	
	NIŠ	493,2	2001	649,7	1,32	318,0	85,7	2,9839	573,7	2014	
	POŽ	622,4	2001	816,9	1,31	418,0	107,1	2,9839	737,5	2014	
	VAL	695,5	1975	921,7	1,33	454,5	117,8	2,9839	806,0	2014	
	ZAJ	683,1	1957	663,1	0,97	325,2	98,5	2,9839	619,1	1957	2014

Na prvi pogled na tabelu 4 može se videti da su razmatrane sezonske padavine zastupljene sa mnogo većim brojem pojave statističkih izuzetaka u 2014. godini u odnosu na mesečne sume padavina. Na svim GMS za tri razmatrane sezone statistički izuzeci u 2014.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

godini identifikovani su u 39 slučajeva, što je za 2,2 puta više nego kod šest mesečnih serija. Ova konstatacija samo ukazuje na veću statističku značajnost padavina dužih vremenskih perioda u 2014. godini, u odnosu na mesečne sume. Kod dvomesečnih padavina ukupno je identifikovano 12 izuzetaka, a odnosi između ostvarenih ekstrema i dosadašnjih

$$\Theta = (\sum P_{2014/\text{period}}) / \sum P_{\text{max}} \quad (1)$$

dostizali su vrednosti i do 1.70 (GMS Valjevo), što znači da je ekstrem iz 2014. godine bio veći za 70% od do sada registrovanog ekstrema u odgovarajućoj seriji dvomesečnih suma padavina.

Kod serija tromesečnih suma padavina registrovano je ukupno 11 izuzetaka u 2014. godini, s tim što je na GMS Vranje ovaj izuzetak drugi po značajnosti. U tromesečnim serijama suma padavina na GMS Kragujevac i Negotin, osim izuzetka u 2014. godini, registrovan je još po jedan izuzetak, ali drugi po značajnosti. Odnos ostvarenih i dosadašnjih ekstrema kretao se do vrednosti 1,40 (za GMS Kraljevo i Požega). Kod šestomesečnih serija identifikovano je ukupno šest izuzetaka u 2014. godini. U vremenskoj seriji na GMS Zaječar postoje dva izuzetka, od kojih je izuzetak iz 2014. godine drugi po značajnosti. Odnos ostvarenih i dosadašnjih ekstrema je manje-više konstantan i kretao u rasponu od 124 do 1,33, sa izuzetkom GMS Zaječar.

Statistička značajnost registrovanih ekstrema iz 2014. godine u navedenim sezonskim serijama suma padavina izvršena je takođe po istoj proceduri koja je korišćena i kod mesečnih suma padavina. Rezultati tih proračuna prikazani su u tabeli br. 5. Za najdužu šestomesečnu sezonu sračunat je odnos tih suma i prosečnih višegodišnjih vrednosti padavina na istoj GMS, a izvršena je i procena povratnog perioda ostvarenih šestomesečnih padavina u odnosu na verovatnoću pojave vremenskih serija godišnjih suma padavina – P(IV/IX/Sr.g).

Iz tabele br. 5 je evidentno da je značajnost ostvarenih sezonskih padavina u 2014. godini bila veća u odnosu na odgovarajuće značajnosti ostvarenih mesečnih suma padavina. Najveću značajnost imale su dvomesečne padavine, gde na razmatranim GMS ostvarene sume padavina imaju povratne periode od 1 do 1000 godina (GMS Valjevo). Sledeće po statističkoj značajnosti su ostvarene dvomesečne padavine na GMS Zlatibor sa 750-godišnjim povratnim periodom, a zatim slede GMS: Beograd, Požega i Vranje sa 500-godišnjim povratnim periodom, pa GMS Kruševac i Leskovac sa 400-godišnjim povratnim periodom. Ostvarene dvomesečne sume padavina u 2014. godini na GMS: Kraljevo, Niš, Sjenica i Smederevska Palanka odgovaraju 300-godišnjem povratnom periodu, na GMS Loznica 250-godišnjem i na GMS Negotin 200-godišnjem povratnom periodu. Na ostalim GMS ostvarene padavine nisu bile statistički značajne.

Što se tiče tromesečnih suma padavina u 2014. godini njihovi povratni periodi kreću se od 5 do 500 godina (na GMS Kraljevo, Loznica i Zlatibor). Na GMS Požega povratni period ostvarenih suma padavina iznosi 400 godina, a na GMS: Kragujevac, Beograd, Niš, Valjevo i Zaječar povratni periodi iznose 300 godina. Nešto manji povratni periodi registrovani su na GMS Negotin (170 godina) i na GMS: Smederevska Palanka, Kruševac i Vranje (150 godina). Povratni periodi na ostalim GMS su znatno manji od 100 godina.

Kod ostvarenih šestomesečnih suma padavina u 2014. godini najveći povratni period zabeležen je na GMS Beograd (620 godina), zatim sledi GMS Loznica (600 godina), pa GMS Niš, Požega i Valjevo (500 godina), GMS Kraljevo (400 godina), GMS Negotin (300 godina), GMS Vranje (150 godina), GMS Leskovac (125 godina), kao i GMS: Kragujevac, Dimitrograd, Smederevska Palanka i Zaječar (100 godina). Na ostalim stanicama povratni periodi ostvarenih suma padavina u 2014. godini bili su nižeg reda veličine od 100 godina.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 5. Prikaz statističke značajnosti ostvarenih sezonskih suma padavina u 2014. godini.
Table 5. Statistical significance of achieved seasonal precipitation sums in 2014.

GMS	Dvomesečne			Tromesečne			IV-IX		Sr. god.		
	mm	T(god)	Period	mm	T(god)	Period	mm	T(god)	mm	IV-IX/Sr.g	P(IV/IX/Sr.g)
KRG	361,1	300	IV-V	452,4	300	IV-VI	664,7	100	626,3	1,06	3,0
BK	229,8	20	IV-V	345,1	12	V-VII	613	25	628,1	0,98	
CRV	252,0	20	VI-VII	323,8	5	V-VII	511,4	3	775,2	0,66	
ČUP	268,9	70	IV-V	360,9	25	V-VII	490,6	7	646,2	0,76	
DIM	241,9	55	IV-V	339	20	IV-VI	606	100	631,0	0,96	
KIK	159,1	20	IV-V	274,4	10	V-VII	416,8	7	548,6	0,76	
KRA	357,8	300	IV-V	510,0	500	IV-VI	873,7	400	743,0	1,18	5,5
KRU	297,4	400	IV-V	408,6	150	IV-VI	565,4	25	638,3	0,88	
KUR	203,4	25	IV-V	282,6	17	IV-VI	541,4	30	642,0	0,84	
LES	283,1	400	IV-V	360,1	70	IV-VI	579,5	125	616,3	0,94	
LOZ	427,2	250	IV-V	483,4	500	IV-VI	803,8	600	827,6	0,97	
NEG	302,6	200	VIII-IX	371,1	170	VII-IX	687,5	300	640,2	1,07	2,5
BEG	338,7	500	IV-V	556,4	300	V-VII	812,5	620	688,5	1,18	7,0
NIŠ	288,7	300	IV-V	394,5	300	V-VII	649,7	500	582,8	1,11	3,0
RŠN	226,8	70	IV-V	334,8	15	V-VII	492,3	10	606,6	0,81	
PAL	167,9	25	IV-V	181,5	2,5	IV-VI	364,6	3	544,4	0,67	
POŽ	349,2	500	IV-V	463,5	400	IV-VI	816,9	500	729,0	1,12	4,3
SJE	232,7	300	IV-V	302,7	25	IV-VI	556,9	15	719,3	0,74	
SMP	283,5	300	IV-V	427,0	150	V-VII	644,4	100	632,1	1,02	2,5
SOM	204,3	30	V-VI	280,8	30	V-VII	505,5	25	586,0	0,86	
SRM	236,6	3	IV-V	267,1	5	V-VII	516,4	15	623,0	0,83	
VAL	453,3	1000	IV-V	586,2	300	V-VII	921,7	500	776,7	1,19	7,7
VGR	252,3	1	VI-VII	393,4	30	V-VII	588,7	20	664,7	0,88	
VRA	282,4	500	IV-V	385,5	150	IV-VI	597,8	150	606,3	0,99	
ZAJ	271,2	70	V-VI	410,6	300	IV-V	663,1	100	601,9	1,1	2,5
ZLA	387,5	750	IV-V	517	500	IV-VI	554,1	25	954,6	0,58	
ZRE	222,1	5	IV-V	335,8	50	V-VII	598,2	70	564,7	1,06	2,0

Što se tiče verovatnoća pojave ostvarenih šestomesečnih padavina u odnosu na verovatnoću godišnjih suma padavina najznačajnije su padavine registrovane na GMS Valjevo i Beograd, gde sume ostvarenih padavina u naznačenim šestomesečnim periodima odgovaraju 7%-noj verovatnoći godišnjih suma padavina, što znači da je u šestomesečnom periodu u 2014. godini palo znatno više padavina nego što je višegodišnji prosek za godišnje sume padavina.

2 Zaključak

Ocena statističke značajnosti razmatranih ostvarenih kišnih epizoda u periodu april-septembar 2014. godine izvršena je samo na osnovu podataka sa GMS. Za sve kišne epizode izvršena je procena povratnih perioda maksimalnih ostvarenih intenziteta za različita trajanja kiše, kao i za ukupnu sumu kiše u epizodi. Izvršen je, takođe, pokušaj da se ostvarene ukupne sume kiše uporede sa prosečnim višegodišnjim vrednostima suma padavina u mesecu u kojem se kišna epizoda pretežno ostvarila. Taj princip zadržan je i kada je izvršena ocena povratnih perioda ostvarenih suma padavina u razmatranim kišnim epizodama u odnosu na odgovarajuće raspoložive vremenske serije mesečnih suma padavina. Činjenica je da su u toku 2014. godine na nekim GMS mnogi maksimalni intenziteti ostvarenih kiša prevazišli do sada registrovane istorijske podatke, pa su autori ovoga rada bili primorani da izvrše korekciju teorijskih krivih

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

raspodele korišćenih u navedenoj monografiji. Imajući u vidu činjenicu da su ekstremne registrovane kiše, koje odgovaraju retkim verovatnoćama pojave zabeležene za duža trajanja kiše, tamo gde je bilo potrebno, korekcije su izvršene samo za jednodnevne, dvodnevne i trodnevne kiše.

Opšti zaključak je da su glavni uzroci čestih pojava poplava u periodu april–septembar 2014. godine, na teritoriji Republike Srbije učestali prodori hladnog vazduha s Atlantika i formiranje moćnih ciklona nad našom teritorijom. Posledica toga je permanentno smanjivanje dugotrajnih kišnih epizoda, što se veoma retko dešava pri pojavi katastrofalnih poplava, koje su u više navrata zahvatile teritoriju Srbije. Sve ove kišne epizode ne karakterišu se pojavom statistički značajnih intenziteta jakih kiša kraćih trajanja koje obično izazivaju pojavu bujičnih poplava. Ukupna trajanja ostvarenih kišnih epizoda znatno prevazilaze uobičajena trajanja maksimalnih intenziteta jakih kiša koje izazivaju poplave. Maksimalni intenziteti kiša trajanja do 5–6 sati, koje izazivaju bujične poplave, skoro u svim razmatranim kišnim epizodama bile su ispod višegodišnjeg proseka, sa izuzetnom nekoliko sučajeva u okolini Niša, Negotina i Smederevske Palanke.

Ocena statističke značajnosti izvršena je samo na GMS RHMZ Srbije i to za serije mesečnih, kao i maksimalnih dvomesečnih i tromesečnih suma i na kraju ukupnog razmatranog perioda april–septembar. Statistička značajnost ostvarenih suma padavina u 2014. godina ocenjena je na dva načina: preko identifikacije pojave statističkih izuzetaka, kao i preko ocene povratnih perioda ostvarenih suma u navedenim periodima.

Sa gledišta pojave statističkih izuzetaka konstatovano je da se kod razmatranih ostvarenih mesečnih suma padavina u periodu april–septembar 2014. godine na razmatranim 27 GMS statistički izuzetak pojavio 17 puta. Kod maksimalnih dvomesečnih suma statistički izuzetak pojavio se u 13 slučajeva, a kod maksimalnih tromesečnih suma 11 puta. U sumama padavina ostvarenim u ukupnom periodu april–septembar statistički izuzetak pojavio se 7 puta. Generalno se može izvesti zaključak da su na svim GMS, za tri razmatrane sezone, statistički izuzeci identifikovani u 31 slučaju, što je za 1,8 puta više nego u šest serija razmatranih mesečnih suma padavina. Ova konstatacija samo ukazuje na veću statističku značajnost ostvarenih padavina u dužem vremenskom periodu u 2014. godini u odnosu na mesečne sume padavina.

Ocena statističke značajnosti ostvarenih mesečnih suma padavina pokazala je da su statistički najznačajnije padavine registrovane u mesecu aprilu, kada je na pet GMS procenjeno da ostvarene sume odgovaraju teorijskim sumama padavina 300-godišnjeg povratnog perioda. Za majske sume padavina 300-godišnji povratni period ocenjen je samo na GMS Smederevska Palanka, a za septembarske sume padavina na GMS Negotin. Padavine u junu bile su znatno manjeg obima kada se samo na GMS Zaječar pojavila mesečna suma padavina koja odgovara 125-godišnjem povratnom periodu. Analogni rezultati dobijeni su i za mesec juli kada se najznačajnija suma padavina pojavila na GMS Beograd, reda veličine 110-godišnjeg povratnog perioda. Mesečne sume padavina u avgustu uglavnom su reda veličine oko višegodišnjeg proseka.

Kod sezonskih suma padavina najveću statističku značajnost ima maksimalna dvomesečna suma padavina registrovana na GMS Valjevo u periodu april–maj 2014. godine, koja odgovara 1000-godišnjem povratnom periodu. Sledeće po statističkoj značajnosti su maksimalne dvomesečne sume padavina ostvarene u istom periodu na GMS Zlatibor sa 750-godišnjim povratnim periodom, a zatim slede GMS: Beograd, Požega i Vranje sa 500-godišnjim povratnim periodom, pa GMS Kruševac i Leskovac sa 400-godišnjim povratnim

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

periodom itd. Što se tiče ostvarenih maksimalnih tromesečnih suma padavina najznačajnije su registrovane na GMS Kraljevo (IV–VI), Loznica (IV–VI) i Zlatibor (IV–VI) sa 500 godišnjim povratnim periodom. Na GMS: Kragujevac (IV–VI), Beograd (V–VII), Niš (V–VII), Valjevo (V–VII) i Zaječar (IV–VI) povratni periodi iznose 300 godina.

U periodu april–septembar najznačajnije padavine u 2014. godini zabeležene su na GMS Beograd (620-godišnji povratni period), zatim sledi GMS Loznica (600 godina), pa GMS Niš, Požega i Valjevo (500 godina), GMS Kraljevo (400 godina), GMS Negotin (300 godina), GMS Vranje (150 godina), GMS Leskovac (125 godina) itd. Povratni periodi ostvarenih šestomesečnih padavina ocenjeni pomoću krivih raspodele godišnjih suma padavina pokazali su da su najznačajnije registrovane padavine na GMS Valjevo i Beograd, gde sume ostvarenih šestomesečnih padavina odgovaraju 7%-noj verovatnoći pojave godišnjih suma padavina. To praktično znači da su na ovim GMS u naznačenom šestomesečnom periodu u 2014. godini pale znatno veće količine padavina nego što padne u toku cele godine u višegodišnjem proseku.

Zahvalnost

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2015. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

Literatura

1. Prohaska S., Bartoš Divac V., sa saradnicima, (2014), *Intenziteti jakih kiša u Srbiji*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, ISBN 978-86-82565-40-6.
2. Prohaska S., Kapor B., Ilić A., Čatović S., Marjanović S., Bartoš Divac V., Koprivica A., (2011), *Kompleksna analiza pluviometrijskog režima jakih kiša kraćih trajanja na teritoriji Republike Srbije, Voda i sanitarna tehnika*, godina XLI, maj–juni, broj 3–4/2011, ISSN 0350-5049, str. 5-14.
3. Prohaska S., Ilić A., Bartoš Divac V., Koprivica A., Čatović S., Kapor B., Đukić D., Marjanović S., (2011), *Spatial interpolation of selected characteristics of high intensity rainfall in Serbia using GIS technology*, XXVth Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, 16–17 June 2011, Budapest, Hungary, rad na USB-u, 8 str, Conference Abstracts – pp. 65, 2011.
4. Prohaska S., Kapor B., Ilić A., Čatović S., Marjanović S., Bartoš Divac V., Koprivica A., (2011), *Kompleksna analiza pluviometrijskog režima jakih kiša kraćih trajanja na teritoriji Republike Srbije*, Časopis *Voda i sanitarna tehnika*, ISSN 0350-5049, Vol. 41, No. 3-4, str. 5-14, 2011.
5. Prohaska S., Đukić D., Bartoš Divac V., (2014), *Osnovne karakteristike jake kiše na teritoriji Srbije koja je prouzrokovala poplavu u maju 2014. godine*, Beogradska škola meteorologije, Sveska 7, str. 189-201, ISBN 978-86-904985-9-8, COBISS. RS – ID 208242444.

Analiza formiranja, prostiranja i transformacije poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare

Nikola Zlatanović¹
Stevan Prohaska²

APSTRAKT: Katastrofalna poplava koja se u slivu reke Kolubare desila sredinom maja 2014. godine prouzrokovala je značajno rušenje postojećeg odbrambenog sistema, nekontrolisane prodore postojećih nasipa i plavljenje otvorenih rudnih kopova, poljoprivrednih površina, gradova i naselja, a što je imalo za posledicu gubitke ljudskih života i ogromne materijalne štete. Imajući u vidu tu činjenicu, autori ovog rada preuzeli su na sebe obavezu da izvrše hidrološku rekonstrukciju ove poplave sa ciljem da se utvrdi stvarno stanje prostiranja ove poplave duž toka reke Kolubare i sagleda stvarnu razmeru poplave iz maja 2014. godine. Rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine duž glavnog toka reke Kolubare i njenih glavnih pritoka izvršena je pomoću razvoja hidrološkog modela primenom programskog paketa HEC-HMS. Suština primene modela je da se ceo sliv reke Kolubare izdela na podslivove, gde postojeće hidrološke stanice predstavljaju kontrolne profile, dok je izlazni profil iz modela položaj hidrološke stanice Draževac na reci Kolubari. Rad je ilustrovan odgovarajućim numeričkim i grafičkim pokazateljima hidrograma poplave iz maja 2014. godine na ključnim profilima vodomernih stanica za ostvareno stanje i hipotetičko stanje uspešne odbrane od poplava.

Ključne reči: rekonstrukcija poplave, hidrološko modeliranje, HEC-HMS

Analysis of the formation, propagation and transformation of the 2014 Kolubara flood wave

ABSTRACT: The disastrous flood that affected the Kolubara River basin in May 2014 caused significant damage of existing embankments, flooding of open mine pits, agricultural land, towns and villages, which resulted in the loss of human lives and material damage. The authors of this paper have developed a hydrological model whose task was to simulate the flood and determine the spatial and temporal distribution of the flood throughout the basin. The software package HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) was used to develop the hydrological model. The Kolubara River basin was divided into multiple sub-basins, with one official hydrological station at the basin outlet. The existing hydrological stations along these streams represent control profiles, while the output profile from the model is defined by the position of the hydrological station Draževac on the Kolubara River. Provided in the paper are appropriate numerical and graphical indicators of characteristic hydrographs in the Kolubara River basin during the flood of May 2014.

key words: flood reconstruction, hydrological modelling, HEC-HMS

¹ Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, nikola.zlatanovic@jcerni.co.rs

² Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

1 Uvodne napomene

Sredinom maja 2014. godine, ceo sliv reke Kolubare je bio zahvaćen obilnim kišama. Ekstremni oticaji sa padina doveli su do koincidencije talasa velikih voda na levim i desnim pritokama Kolubare, koje su se praktično istovremeno slile u reku Kolubaru. Na deonicama sa zaštitnim objektima, a to su uglavnom naselja i donji delovi toka, došlo je do preliivanja i proboja nasipa na više mesta u relativno kratkom vremenskom periodu od 1-2 dana [1]. Najteže posledice tih proboja doživeo je grad Obrenovac. Istovremeno je došlo do izlivanja vode iz postojećih korita reka Kolubare, Peštana i Vraničine na području lignitskog basena i poplavljeni su površinski kopovi "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni". Do izlivanja je došlo uzvodno od južne granice otvorenog kopa "Tamnava-Istočno polje", kao posledica preliivanja i rušenja zaštitnih nasipa Kolubare i pritoka Vraničine i Peštana. Kao rezultat došlo je do promene toka reke Kolubare, kada je Kolubara presekla novo poplavno korito kroz postojeće korito reke Vraničine, od ušća do otvorenog kopa "Tamnava-Istočno polje". Na svom putu ka kopu, reka je presekla i uništila postojeći odbrambeni nasip koji je štitio tamnavske kopove od velikih voda Kolubare, Vraničine i potoka Skobalj. Formiranjem poplavnog korita Kolubare uništeno je ušće Vraničine u Kolubaru te se ovaj vodotok direktno ulivao u površinski kop. Do izlivanja vode u površinski kop "Tamnava-Zapadno polje" je došlo i usled proloma retenzione brane "Kladnica".

Tokom poplave iz maja 2014. godine dogodile su se, takođe, značajne havarije na pojedinim zvaničnim mernim stanicama Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. Sa jedne strane došlo je do potapanja i rušenja mernih uređaja (limnigrafa) ili proloma nasipa neposredno uzvodno od objekata tako da su strujne slike znatno izmenjene, pa nizvodni limnigrafi (hidrološke stanice) nisu mogle registrovati stvarno stanje proticaja za vreme vršnih delova hidrograma. Sa druge strane, na nekim profilima došlo je do "zaglavljivanja pera limnigrafa" što je imalo za posledicu "odsecanje" vrha poplavnog talasa, što može imati nepovoljne posledici pri kasnijim obrada istih.

Imajući sve ovo u vidu, pojavila se potreba da se, pomoću hidrološkog modela, izvrši rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine na reci Kolubari i njenim pritokama. U vezi sa ovim, autori ovoga rada su razradili jedan matematički model čiji je zadatak da utvrdi stvarnu genezu ove poplave duž toka reke. Za razvoj hidrološkog modela korišćen je programski paket HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), a preliminarni rezultati njegove primene za poplavni talas iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare prikazani su tekstu koji sledi.

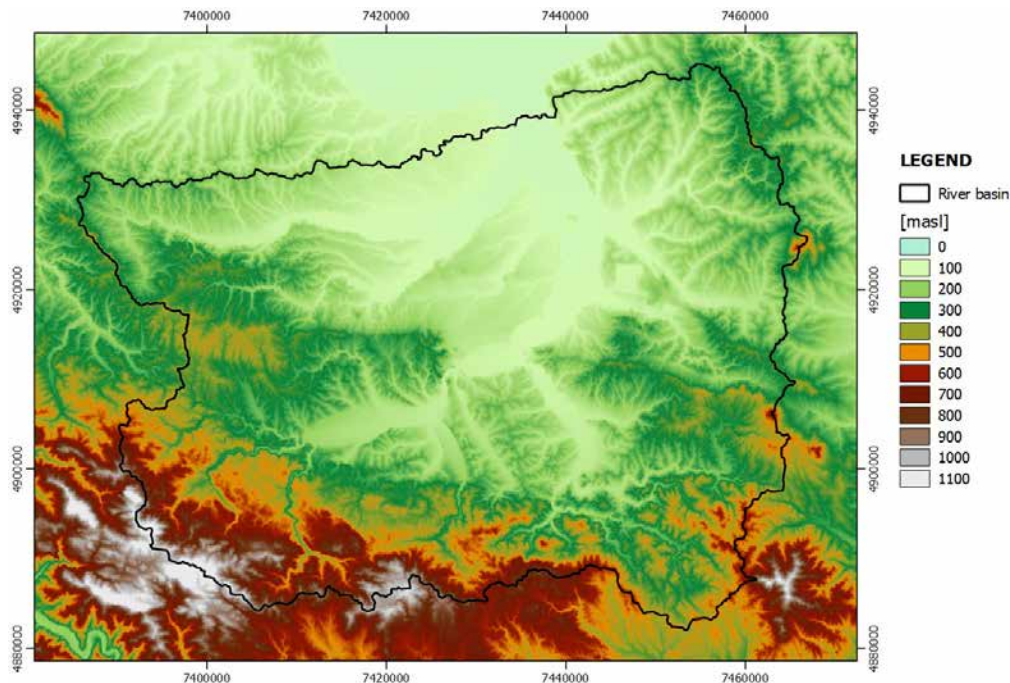
2 Raspoloživi podaci za analizu katastrofalne poplave u slivu reke Kolubare u maju 2014. godine

U osnovi najbitniji podaci i podloge za potrebe rekonstrukcije poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare su:

- Digitalni model terena
- Hidrometeorološki podaci
- Podaci o poplavljenim objektima
- Podaci o stanju i funkcionisanju postojećih objekata za zaštitu od poplava,
- Podaci o poplavljenim naseljima i rušenjima infrastrukturnih objekata.

Korišćen je SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) digitalni model terena (DEM) [8] kao podloga za dalje analize. Rezolucija digitalnog modela terena je 3 lučne sekunde u geografskoj projekciji (WGS84 datum), što iznosi okvirno 90x60 m reprojektovano u Gaus Krigerovu pravougaonu Merkatorovu projekciju koja se najčešće koristi u Srbiji. Ovakav raster je dalje interpolacionim metodama doveden do rezolucije od 70x70 m da bi se obezbedio kvadratni oblik ćelija sa minimalnim gubitkom nivoa detaljnosti.

Kako je izvorni SRTM DEM (bez dodatnih korekcija) veoma ograničen za korišćenje u hidrološkim analizama, niz koraka za predprocesiranje terena je primenjen [12] da bi se obezbedio "hidrološki korektan" model terena. Nakon tretiranja depresija i ravnih površina, sračunati su rasteri pravaca tečenja (flow directions) i površina sliva (flow accumulations) primenom metode "Deterministic 8" [6]. Ovako tretiran digitalni model (slika 1) je korišćen za delineaciju slivova i podslivova, kao i za određivanje geomorfoloških parametara podslivova.



Slika 1. SRTM digitalni model terena za sliv reke Kolubare
Figure 1. SRTM Digital Elevation Model for the Kolubara River basin

Hidrometeorološki podaci koji su korišćeni pri formiranju hidrološkog modela sliva reke Kolubare su zvanični podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. To su pre svega podaci o padavinama i proticajima na zvaničnim mernim stanicama registrovanim u periodu poplave od 12. do 24. maja 2014. godine.

U konkretnom slučaju korišćeni su podaci o padavinama i to:

- Dnevne sume padavina na sledećim kišomernim stanicama u slivu reke Kolubare: Bogatić, Brežće, Donje Crniljevo, Donje Leskovice, Jagodići, Kaona, Koceljeva, Koštunići, Liplje, Ljig, Lukavac, Mionica, Mratišić, Osečenica, Pambukovac, Parcani, Počuta, Radarski centar Valjevo, Rogačica, Rudovci, Šarbane, Sibnica, Sopot, Stepojevac, Struganik, Stubline, Ub, Velika Ivanča i Valjevska Kamenica.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Časovne vrednosti padavina na glavnim meteorološkim i automatsko-izveštajnim stanicama u slivu reke Kolubare: Valjevo, Majinovići i Štavica.
- Časovne vrednosti padavina na glavnim meteorološkim stanicama u neposrednoj okolini sliva reke Kolubare: Loznica, Beograd-Vračar, Sremska Mitrovica, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega.
- Časovne vrednosti proticaja na zvaničnim vodomernim stanicama u slivu reke Kolubare: Belo Polje (Obnica), Sedlare (Jablanica), Valjevo (Kolubara), Degurić (Gradac), Mionica (Ribnica), Slovac (Kolubara), Bogovađa (Ljig), Beli Brod (Kolubara), Zeoke (Peštan), Koceljeva (Tamnava), Čemanov most (Tamnava), Ub (Ub), Draževac (Kolubara).

Raspoloživi podaci o plavljenim objektima prikupljeni su za sledeće objekte: otvorene rudne kopove "Tamnava - Zapadno polje", "Tamnava - Istočno polje" i "Veliki Crljeni".

Raspoloživi podaci o stanju i funkcionisanju objekata za zaštitu od poplava prikupljeni su za sledeće objekte: akumulacije "Stubo-Rovni", "Paljuvi Viš" i "Kladnica".

Podaci o poplavljenim naseljima i rušenju infrastrukturnih objekata sagledani su provizorno: gradovi Obrenovac (preko ukupne zavremine izlivena voda) i Valjevo (preko veličine prostora zahvaćenog poplavom), naselja Koceljeva, Ub, Vreoci, Bogovođa i dr. (preko veličine prostora zahvaćenog poplavom), rušenja nasipa i pruga (preko lokacija i dužina porušenih objekata).

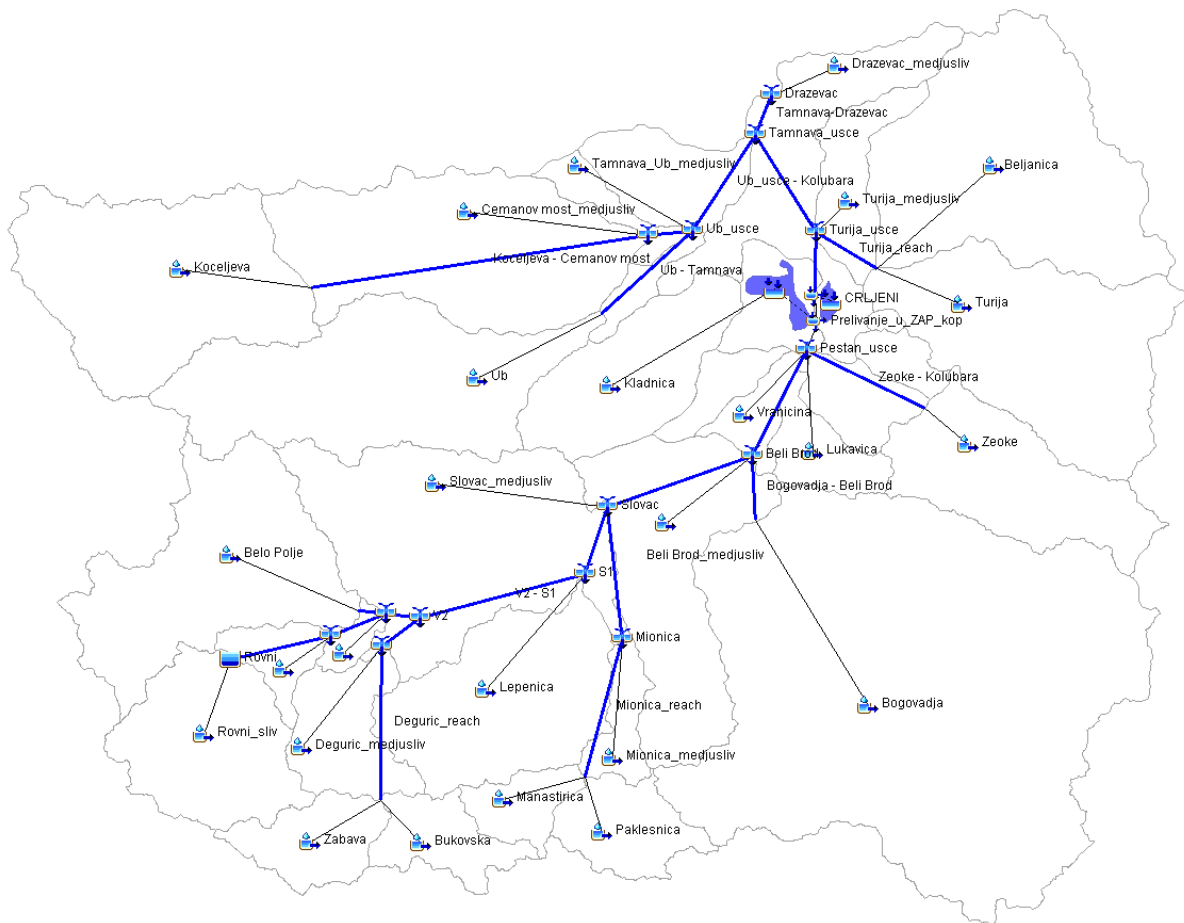
3 Dekompozicija sliva reke Kolubare u cilju formiranja hidrološkog modela

Za potrebe razvoja hidrološkog modela sliva reke Kolubare ceo sliv je izdvojen na podslivove korišćenjem digitalnog modela terena, vodeći računa o prostornoj konfiguraciji i hidrografiji sliva, zatim o položajima postojećih hidroloških stanica i lokacijama objekata koji mogu imati uticaja na režim velikih voda, kao i položajima objekata koji su nekontrolisano plavljeni za vreme poplave iz maja 2014. godine, i na kraju o karakterističnim profilima vodotokova relevantnim sa aspekta zaštite od poplava. Na taj način ceo koncept dekompozicije sliva sastoji se u definisanju ključnih profila u slivu i to: ulaznih, kontrolnih i izlaznog profila.

Ulazne profile hidrološkog modela čine: Akumulacija "Stubo-Rovni" na reci Jablanici, hidrološka stanica (hs) "Belo Polje" na reci Obnici, hs "Degurić" na reci Gradac, hs "Mionica" na reci Ribnici, hs "Bogovađa" na reci Ljig, hs "Zeoke" na reci Peštan, hs "Koceljeva" na reci Tamnavi i hs "Ub" na reci Ub.

Kontrolni profili hidrološkog modela su: hs "Sedlare" na reci Jablanici, hs "Valjevo" na reci Kolubari, hs "Beli Brod" na reci Kolubari, hs "Čemanov most" na reci Tamnavi, ušće reka Lepenice, Toplice, Vraničine, Lukavice, Turije i Beljanice u Kolubaru, lokacije proboja nasipa otvorenih rudnih kopova "Tamnava - Zapadno polje", "Tamnava - Istočno polje" i "Veliki Crljeni" i levoobalni nasipi Kolubare kod Obrenovca.

Izlazni profil hidrološkog modela je hidrološka stanica "Draževac". Između računskih profila modela (ulazni i kontrolni profili, ušća, mesta proboja nasipa itd), formirane su rečne deonice duž kojih je modelirana propagacija poplavnog talasa. Na ovaj način ceo sliv reke Kolubare, do profila hidrološke stanice "Draževac" je podeljen na 26 podslivova, 24 rečnih deonica, 3 akumulaciona prostora i 2 ponora (Slika 2).



Slika 2. Šema elemenata hidrološkog modela sliva reke Kolubare
 Figure 2. Layout of the hydrologic model of the Kolubara River basin

4 Teorijske postavke hidrološkog modela za rekonstrukciju poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare

4.1 Modeliranje efektivnih padavina

Proračun gubitaka, odnosno efektivnih padavina, vršen je SCS (sada NRCS) metodom. Ovu metoda je razvio SCS (Soil Conservation Service, danas NRCS - National Resources Conservation Service) kao proceduru za računanje oticaja u malim neizučnim poljoprivrednim slivovima [5] [10], ali je od tada postala jedna od najpopularnijih metoda za proračun površinskog oticaja za male i srednje slivove [4].

Osnova metode je jednačina oticaja:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

gde su: Q - ukupan direktan oticaj, P - ukupne padavine, I_a - početni gubici, S - kapacitet zemljišta odnosno maksimalni potencijal za retenziranje i infiltraciju. Početni gubitak, definisan kao količina padavina nakon koje počinje oticanje, se pretpostavlja da zavisi od kapaciteta zemljišta S u sledećem obliku:

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Kapacitet zemljišta odnosno maksimalni potencijal retenziranja S se određuje preko broja krive oticaja CN prema sledećem izrazu:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

gde je S u milimetrima.

U ovoj studiji, broj CN je posebno kalibrisan za svaki podsliv prema osmotrenim hidrogramima, obraćajući posebnu pažnju na hidrološku grupu zemljišta, zemljišni pokrivač, način obrade zemljišta i hidrološke uslove u slivu.

4.2 Modeliranje direktnog oticaja

Za simuliranje procesa direktnog oticaja u slivu, odnosno formiranje hidrograma od efektivnih padavina, korišćen je Klarkov jedinični hidrogram [2]. Klarkov model računa jedinični hidrogram sliva tako što eksplicitno predstavlja dva ključna procesa pri transformaciji efektivnih padavina u oticaj: translaciju efektivnih padavina od izvora, kroz rečnu mrežu, do izlaznog profila, i retenziranje te zapremine na ukupnoj površini sliva. Klarkov jedinični hidrogram se definiše sa dva parametra: vremenom koncentracije T_c i koeficijentom linearnog rezervoara R .

Kod metode Klarkovog jediničnog hidrograma, vreme koncentracije je definisano vremenom od završetka efektivnih padavina do prevojne tačke opadajuće grane hidrograma. Prevojna tačka na hidrogramu predstavlja trenutak završetka površinskog doticaja u rečnu mrežu i nakon toga se smatra da je proticaj rezultat transformisane zapremine vode koja se zadržala u slivu.

Transformacija oticaja se može predstaviti prostim linearnim rezervoarom kod kojeg je odnos zapremine i oticaja definisan kao:

$$S = RO \quad (4)$$

gde su: S - ukupna zapremina za retenziranje vode u slivu, R - koeficijent linearnog rezervoara za sliv, i O - oticaj sa sliva.

Parametri Klarkovog jediničnog hidrograma su kalibrisani prema osmotrenim hidrogramima na kontrolnim profilima. Početne vrednosti vremena koncentracija su procenjene na osnovu dužine i uravnatog pada najdužih tokova, koji su dobijeni pomoću digitalnog modela terena, primenom modifikovane Kirpihove formule [11]. Početne vrednosti koeficijenta linearnog rezervoara R su procenjene na osnovu linearne zavisnosti od vremena koncentracije [9].

4.3 Model propagacije talasa

Model propagacije talasa duž toka koristi jednačinu kinematskog talasa, koja se rešava primenom Muskingum-Cunge metode, uzimajući u obzir geometriju toka (dužinu i pad toka, oblik i dimenzije poprečnog profila) kao i otpore u koritu i/ili inundaciji. Muskingum-Cunge model se bazira na rešavanju jednačine kontinuiteta

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (5)$$

i difuznog oblika dinamičke jednačine

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6)$$

Primenom linearne aproksimacije dobija se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \quad (7)$$

gde su: c - brzina prostiranja talasa, a μ - viskoznost [2]. Kako se c i μ menjaju kroz vreme, računaju se za svaki vremenski korak i prostornu diskretizaciju, Δt i Δx [7].

Korišćen je algoritam za Muskingum-Cunge model koji je sastavni deo softera HEC-HMS, gde se za svaku rečnu deonicu kao ulazni parametri zadaju geometrija korita, hrapavost (u vidu Maningovog koeficijenta), pad linije energije i dužina deonice. Dužina rečnih deonica je procenjena korišćenjem rečne mreže dobijene na osnovu digitalnog modela terena, hrapavost korita i inundacionog područja usvajana je na osnovu terenskih osmatranja i aerofoto snimaka, a pad linije energije je aproksimiran podužnim padom rečnog korita, koji je takođe računat na osnovu digitalnog modela terena.

4.4 Primenjena procedura prostorne interpolacije dnevnih padavina u časovne

Za vreme poplave u maju 2014. godine u slivu reke Kolubare postojala su osmatranja časovnih vrednosti padavina samo na GMS Valjevo i na dve automatske padavinske stanice Majinovići i Štavica. Kako su ovi podaci nedovoljni za pouzdanije sagledavanje prostornog rasporeda časovnih padavina na celom slivu reke Kolubare za vreme predmetne poplave razrađena je procedura prostorne interpolacije časovnih padavina korišćenjem podataka sa navedene GMS Valjevo i spomenute dve automatske padavinske stanice, kao i raspoloživih časovnih padavina na širem obodu sliva i to GMS: Loznica, Sremska Mitrovica, Beograd, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega. Pored toga korišćeni su svi raspoloživi podaci o dnevnim sumama padavina na navedenim padavinskim stanicama u slivu reke Kolubare.

Sušтина primenjenog postupka sastoji se u proračunu procentualnog učešća časovnih suma padavina u ukupnoj 24-časovnoj sumi padavina na navedenoj pluviografskoj stanici (GMS ili automatskoj) i da se zatim taj procentualni raspored, pomoću Tisenovih poligona,

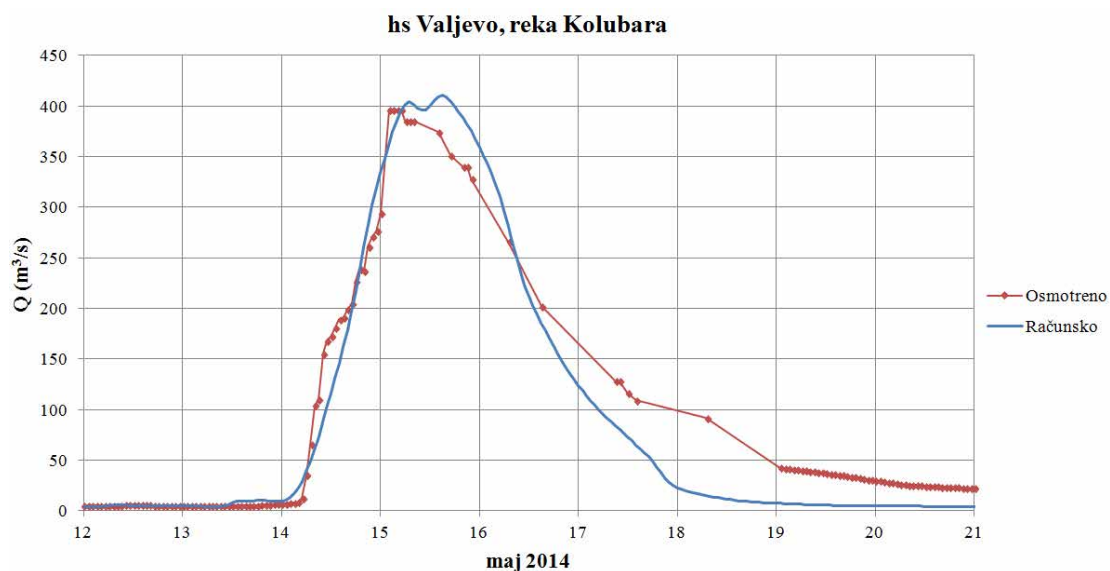
"prenese" na sve ostale padavinske stanice u slivu reke Kolubare - množenjem dnevnih suma padavina na razmatranom kišomeru sa pripadajućim procentualnim učešćima na odgovarajućim pliviografskim stanicama.

5 Prikaz rezultata proračuna rekonstrukcije poplavnog talasa iz maja 2014. godine

Rezultati proračuna prikazani su grafički u vidu uporednog dijagrama osmotrenog hidrograma (zvanični podaci RHMZ Srbije) i računskog hidrograma po hidrološkom modelu. Ovi rezultati su prikazani na tri kontrolna profila vodomernih stanica na reci Kolubari: Valjevo, Slovac i Beli Brod, kao i na izlaznom profilu iz modela na vodomernoj stanici Draževac na reci Kolubari. Generalno se može uočiti da postoje značajne razlike između osmotrenih i sračunatih vrednosti protoka, što se moglo očekivati iz dva osnovna razloga:

1. Proticaji osmotrenih hidrograma obuhvataju samo onu količinu vode koja je prošla kroz zvanični profil vodomerne stanice. Međutim, na svim ovim profilima vodomernih stanica voda je proticala na znatno širem inundacionom prostoru, ili je porušila uzvodne nasipe, pa je tekla nekontrolisano van branjenog područja.
2. Na svim ovim vodomernim stanicama voda je dostigla ili potopila limnigrafske aparate, dok je u profilu hs Valjevo došlo do potpunog rušenja limnigrafske stanice. Srećna okolnost je da se to desilo nakon pojave špica poplavnog talasa i da je opadajuća grana rekonstruisana na osnovu naknadno uspostavljenih vanrednih osmatranja.

U takvim okolnostima evidentno je da je za vreme poplave iz maja 2014. godine na razmatranom sektoru reke Kolubare protekla znatno veća količina vode nego što su hidrološke stanice RHMZ registrovale.

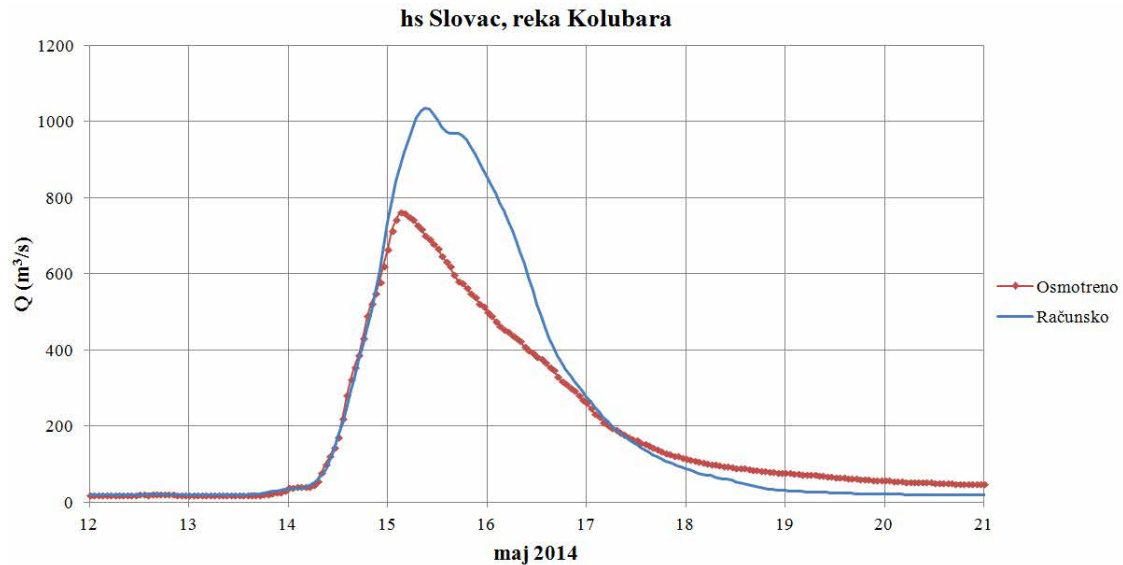


Slika 3. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Valjevo (Kolubara)
Figure 3. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Valjevo (Kolubara)

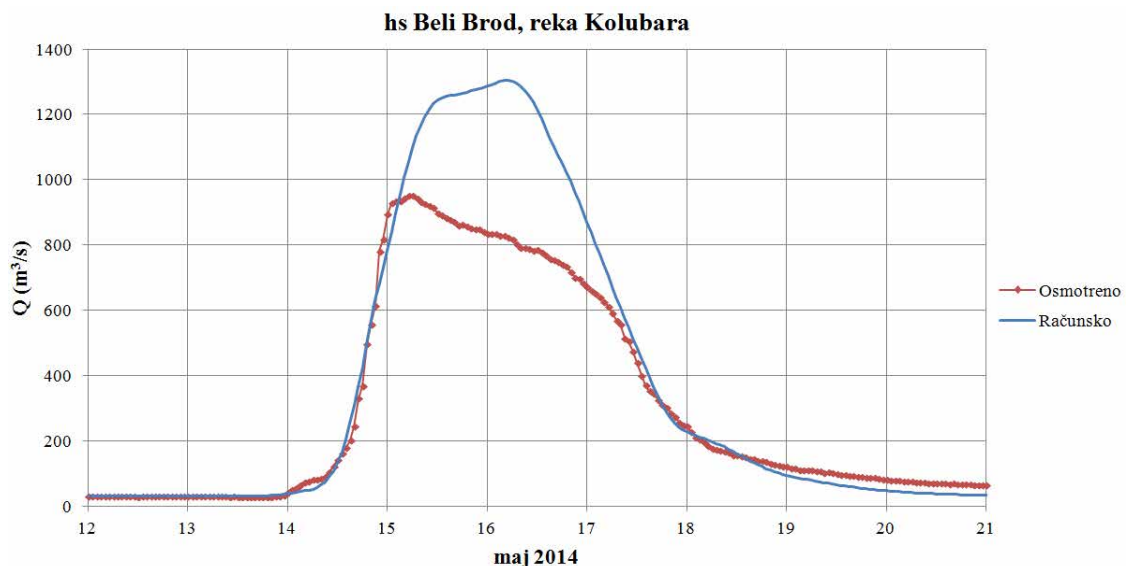
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Na slici 3 prikazani su uporedni grafici osmotrenog i računskog hidrograma reke Kolubare u profilu hs Valjevo. Evidentno je da je u fazi porasta hidrograma postignuta značajna saglasnost, dok su u fazi opadanja registrovana određena odstupanja, što je posledica uzvodnog prodora obaloutvrde i plavljenja u užem gradskom jezgru Valjeva.

Na slici 4 prikazani su uporedni grafici osmotrenog i računskog hidrograma reke Kolubare u profilu hs Slovac. Faza porasta hidrograma je veoma dobro rekonstruisana hidrološkim modelom, dok u vršnom delu hidrograma "nedostaje" ona voda koje je nekontrolisano oticala veoma širokim inundacionim prostorom.



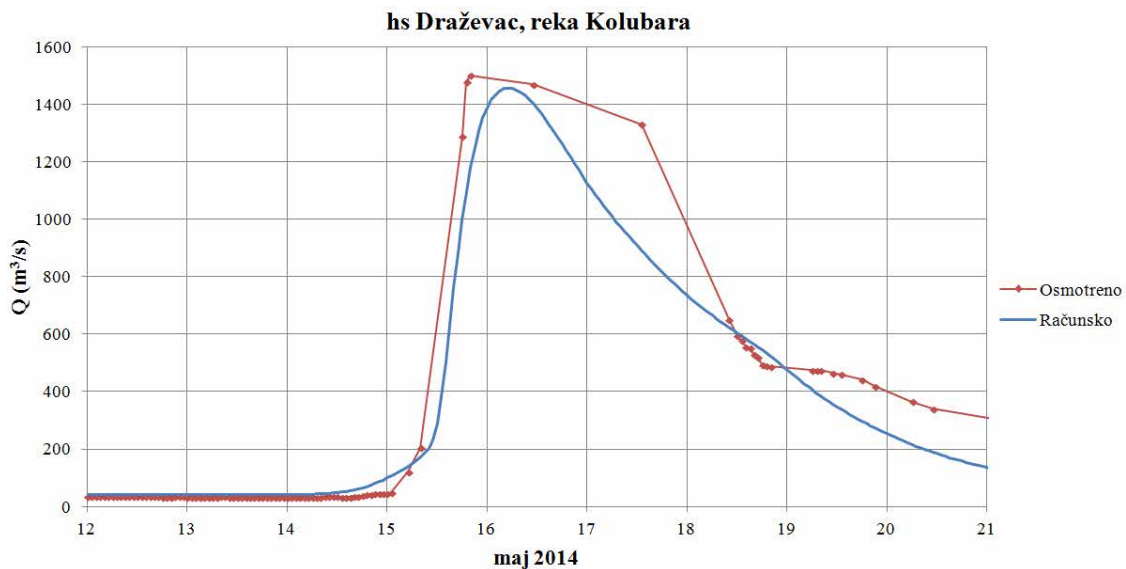
Slika 4. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Slovac (Kolubara)
Figure 4. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Slovac (Kolubara)



Slika 5. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Beli Brod (Kolubara)
Figure 5. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Beli Brod (Kolubara)

Veoma slični rezultati su postignuti i za profil hs Beli Brod na reci Kolubari (slika 5). U ovom profilu, pored vode koja je prošla ispod mosta, što je zvanično registrovano u RHMZ, značajan deo vode je protekao kroz dva proboja nasipa na desnoj obali Kolubare i kroz inundacioni prostor na levoj obali, gde se formirao tok paralelno sa rekam Kolubarom.

Najveća "neslaganja" zabeležena su za profil hs Draževac na Kolubari (slika 6). Jedan od razloga je što je u toku poplave ceo nizvodni tok reke Kolubare bio pod usporom velikih voda na reci Savi. Kao prvo, osmotreni podaci RHMZ Srbije o proticajima reke Kolubare u tom proflu obrađeni su na klasičan način korišćenjem ekstrapolovane krive proticajaja, koja nije formirana za uslove pojave uspora. Kao drugo, limnigrafski aparat je bio pod vodom i nije registrovao kontinualno sve promene vodostaja, što se može videti "tačkasto" predstavljenim podacima na slici. Evidentno je da računski hidrogram pokazuje da je znatno manja količina vode protekla kroz ovaj profil u toku poplave, što je razumljivo, jer je hidrološki model "isključio" sve količine voda koje su prodrle u postojeće površinske kopove "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni".



Slika 6. Računski i osmotreni hidrografi za hidrološku stanicu Draževac (Kolubara)
 Figure 6. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Draževac (Kolubara)

U cilju kvantitativne ocene rezultata primenjenog hidrološkog modela za rekonstrukciju katastrofalne poplave iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare u tabeli 1 su dati uporedni rezultati parametara hidrograma računskih "osmotrenih" hidrograma razmatranog poplavnog talasa. Zbog sveobuhvatnosti sagledavanja kvaliteta osmotrenih i sračunatih vrednosti na celom slivu reke Kolubare u tabeli su dati podaci za sve ulazne, kontrolne i izlazni profil hidrološkog modela. Prikazani su osnovni parametri hidrograma velikih voda, kao što su: maksimalna ordinata hidrograma - Q_{max} (m^3/s), ukupne padavine - P (u mm i $10^6 m^3$), zapremina poplavnog talasa - V (u mm i $10^6 m^3$) i koeficijenta n .

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da su na slivu reke Kolubare u kraćem vremenskom periodu (neposredno pre i za vreme pojave katastrofalne poplave) pale znatne količine padavina, relativno ravnomerno raspoređene po slivu. Po izdrljenim podslivovima najmanje padavina je palo u gornjem delu sliva Tamnave do hs Koceljeva

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

(195,6 mm) a najviše u susjednom podslivu reke Obnice do hs Belo Polje (294,6 mm). Ove padavine prouzrokovale su pojavu poplavnih talasa na svim razmatranim ulaznim kontrolnim i izlaznom profilu. Uporednom analizom navedenih parametara poplavnog talasa, osmotrenih i računatih, može se konstatovati da se oni u osnovi znatno razlikuju.

Tabela 1. Karakteristične veličine slivova, modeliranih i osmotrenih hidrograma
Table 1. Characteristics of computed and observed hydrographs

Profil	MODELIRANO							OSMOTRENO			
	A (km ²)	P (mm)	P (10 ⁶ m ³)	Q _{max} (m ³ /s)	V (mm)	V (10 ⁶ m ³)	n	Q _{max} (m ³ /s)	V (mm)	V (10 ⁶ m ³)	n
Belo Polje	185	294.6	54.5	292	252.1	46.6	0.86	247	300.0	55.5	1.019
Sedlare	140	249.4	34.9	111	183.8	25.7	0.74	138	174.3	24.4	0.699
Valjevo	340	271.2	92.2	411	220.5	75.0	0.81	396	246.4	83.8	0.909
Degurić	159	215.9	34.3	167	146.4	23.3	0.68	164	165.0	26.2	0.764
Mionica	108	257.4	27.8	179	217.0	23.4	0.84	188	372.3	40.2	1.446
Slovac	995	241.1	239.9	1036	193.8	192.9	0.80	761	165.0	164.2	0.684
Bogovođa	679	196.7	133.5	429	128.4	87.2	0.65	195	87.1	59.1	0.443
Beli Brod	1896	224.1	424.8	1305	164.5	311.9	0.73	951	135.7	257.2	0.606
Zeoke	125	275.9	34.5	158	219.4	27.4	0.80	116	160.7	20.1	0.583
Koceljeva	208	195.6	40.7	180	153.2	31.9	0.78	178	136.4	28.4	0.697
Ćemanov most	386	199.2	76.9	177	125.0	48.2	0.63	147	101.8	39.3	0.511
Ub	214	228.8	49.0	183	135.4	29.0	0.59	146	123.0	26.3	0.537
Draževac	3588	239.7	860.2	1456	105.9	379.9	0.44	1500	130.5	468.4	0.545

Generalno, ako se posmatra bezdimenzionalni parametar – koeficijent oticaja n , može se reći da je on znatno ujednačeniji po slivu za računске vrednosti hidrograma dobijenih primenjenim hidrološkim modelom i kreće se u granicama od 0,44 (profil Draževac) do 0,86 (profil Belo Polje), s tim što se sve ostale vrednosti parametra n kreću u granicama od 0,59 do 0,84. Ista analiza koeficijenta n na osnovu osmotrenih hidrograma ukazuje da isti u slivu reke Kolubare varira od 0,44 (profil Bogovođa) do 1,02 (profil Belo Polje) i 1,45 (profil Mionica), što se nije moglo dogoditi, jer u mesecu maju 2014. godine nije bilo snega u slivu. Sve ostale vrednosti koeficijenta n za osmotrene talase se kreću u rasponu od 0,51 do 0,91. Veoma niska vrednost koeficijenta n za računski poplavni talas Kolubare u profilu hs Draževac se objašnjava činjenicom da je u hidrološkom modelu "isključeno" preko 200 miliona kubika vode koja je poplavila površinske kopove "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni".

Sa gledišta zapremine poplavnih talasa u osmotrenim hidrogramima postoji značajan disbalans voda, u iznosu od + 164,6 10⁶ m³ na sektoru od hs Beli Brod, hs Zeoke, hs Ub i hs Ćemanov most do hs Draževac. Kod računskih hidrograma dobijenih pomoću hidrološkog modela taj debalans je minimalan, reda veličine -7.5 10⁶ m³, što predstavlja grešku manju od 2%.

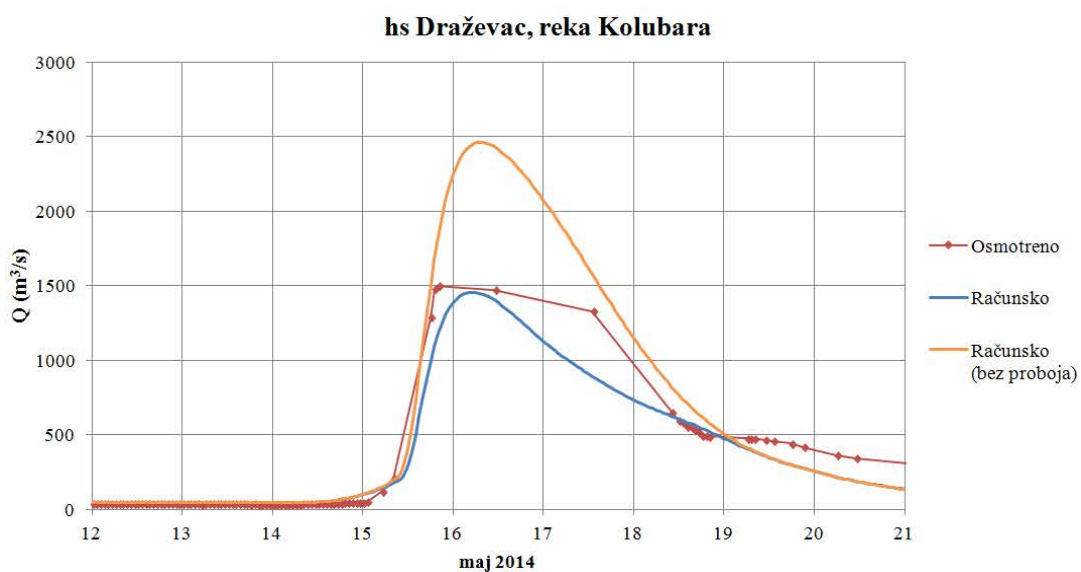
6 Analiza hipotetičkih stanja zaštite od poplave iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare

Razrađeni hidrološki model primenjen je i za uslove hipotetičkog stanja zaštite od poplava u donjem toku sliva reke Kolubare. Pretpostavljeno je da je sistem zaštite od plavljenja površinskih kopova "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni" bio uspešan, tj. da nije dozvolio direktno ulivanje voda iz vodotoka Kolubare, odnosno iz sliva Peštana. Pretpostavljeno je, takođe, da se plavljenje iz sliva reke Kladnice nije moglo sprečiti. U tim uslovima pretpostavljena su dva hipotetička stanja hidrometeoroloških uslova koji su izazvali poplavu:

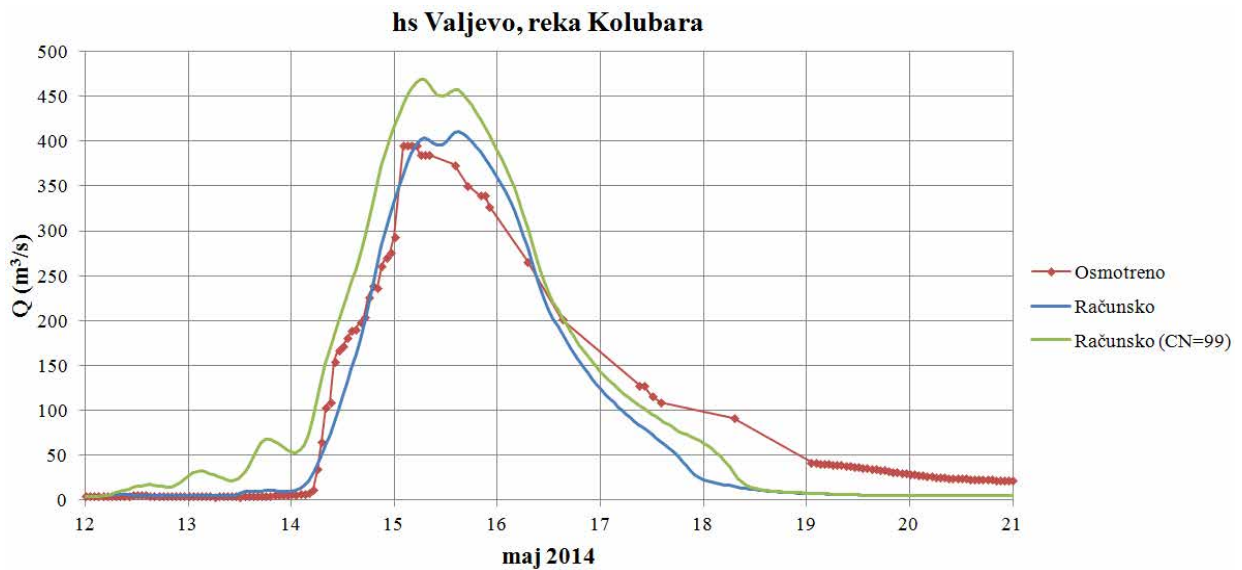
- isti uslovi iz maja 2014. godine, i
- da je sliv bio potpuno natopljen i da je sva voda sa sliva otekla površinski u reku Savu.

Za prvi slučaj rezultati proračuna prikazani su samo za izlazni profil iz hidrološkog modela, tj za profil hs Draževac na reci Kolubari. Rezultati proračuna prikazani su grafički na slici 7 zajedno za rezultatima prethodnih proračuna (rekonstruisanog talasa) i osmotrenim podacima RHMZ.

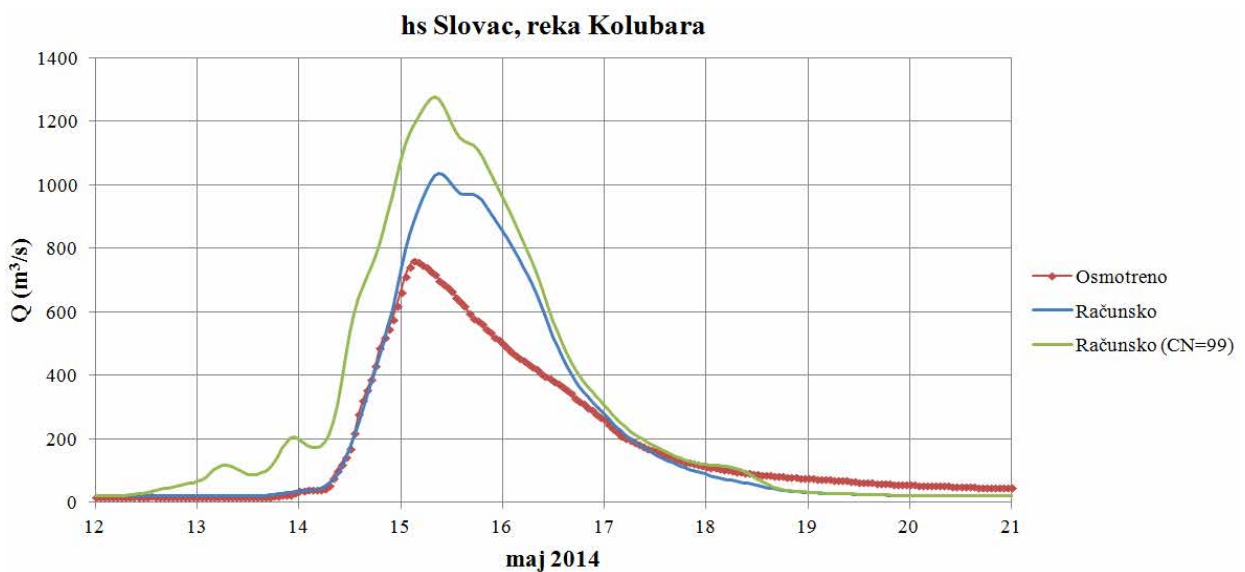
Za drugi pretpostavljeni hipotetički slučaj, rezultati su prikazani na svim profilima vodomernih stanica duž toka reke Kolubare i to: za hs Valjevo (slika 8), za hs Slovac (slika 9), za hs Beli Brod (slika 10) i za hs Draževac (slika 11).



Slika 7. Računski i osmotreni hidrografi za hidrološku stanicu Draževac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom bez proboja kolubarskih nasipa u otvorene kopove
 Figure 7. Computed and observed hydrographs for hydrologic station Draževac (Kolubara), with hypothetical hydrograph without embankment breach at opet pit mines

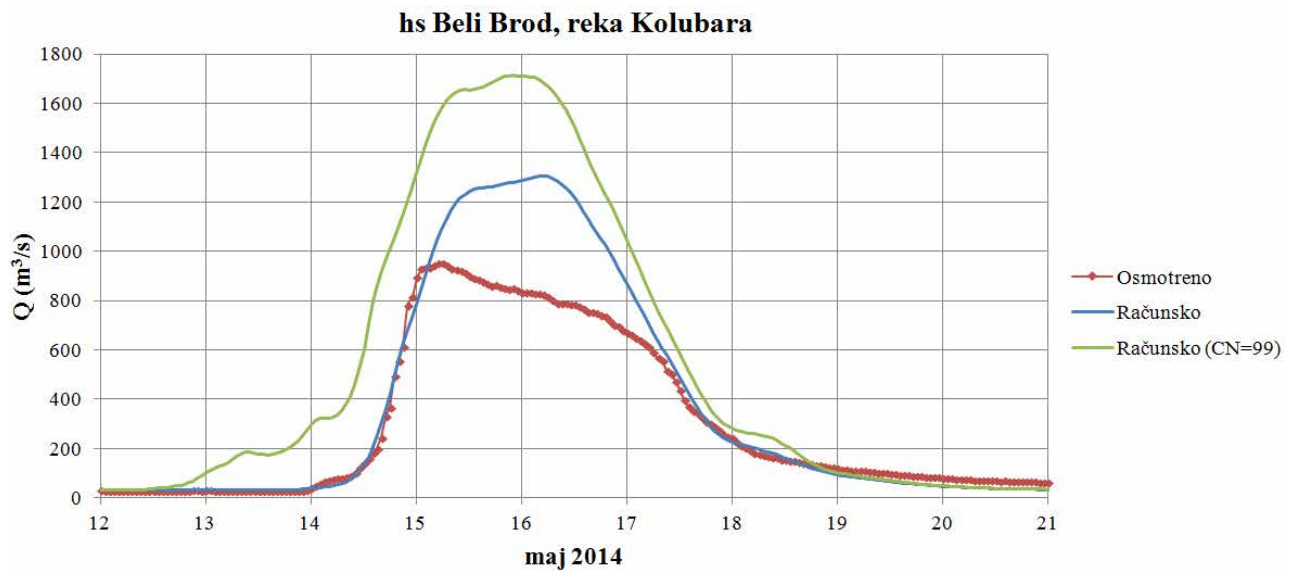


Slika 8. Računski i osmotreni hidrografi za hidrološku stanicu Valjevo (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja $n=1$)
 Figure 8. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Valjevo (Kolubara), with hypothetical hydrograph for the case of complete soil saturation (runoff coefficient $n=1$)

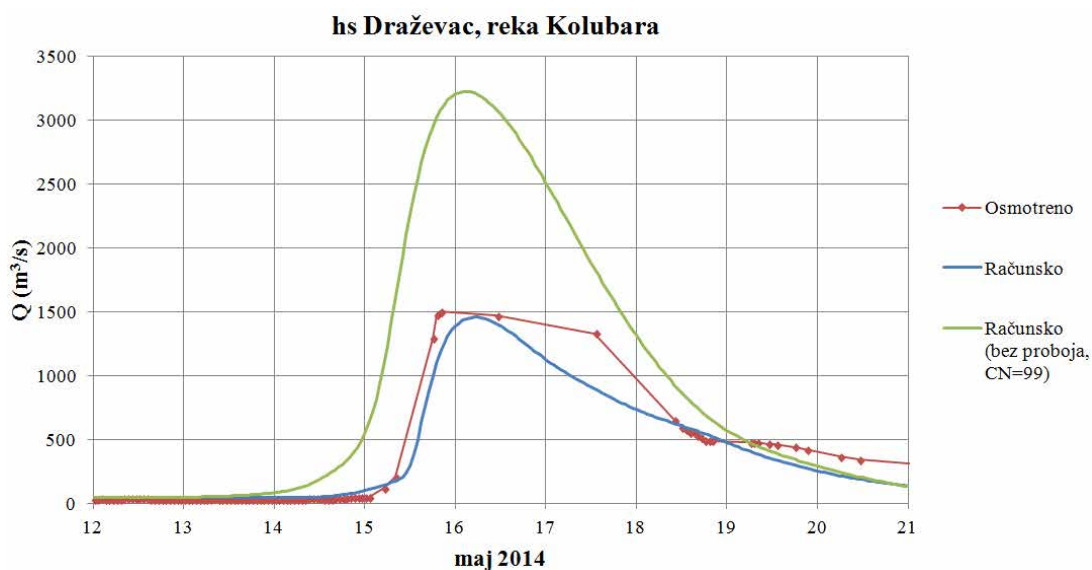


Slika 9. Računski i osmotreni hidrografi za hidrološku stanicu Slovac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja $n=1$)
 Figure 9. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Slovac (Kolubara), with hypothetical hydrograph for the case of complete soil saturation (runoff coefficient $n=1$)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 10. Računski i osmotreni hidrografi za hs Beli Brod (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja $n=1$)
Figure 10. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Beli Brod (Kolubara), with hypothetical hydrograph for the case of complete soil saturation (runoff coefficient $n=1$)



Slika 11. Računski i osmotreni hidrografi za hs Draževac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja $n=1$) bez proboja kolubarskih nasipa u kopove "Tamnava - Zapadno polje" i "Veliki Crljeni"
Figure 11. Computed and observed hydrograph for hydrologic station Draževac (Kolubara), with hypothetical hydrograph for the case of complete soil saturation (runoff coefficient $n=1$) and no embankment breaches at mines "Tamnava - Zapadno polje" and "Veliki Crljeni"

7 Zaključak

Izvršena rekonstrukcija formiranja i prostiranja poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare daje zadovoljavajuće bilansne rezultate, imajući u vidu sve probleme evakuacije i zaštite od poplava koji su se desili u vidu preliva i prodora odbrambenih nasipa, retenzija "Kladnica" i prodora vode u površinske kopove akumulacije "Tamnava - Zapadno polje" i "Veliki Crljeni". Zbog toga su maksimalni proticaji na većini profila vodomernih stanica u slivu reke Kolubare za 2014. godinu, sračunati pomoću primenjenog hidrološkog modela, prihvatljiviji u odnosu na zvanične maksimalne proticaje službeno objavljene u Godišnjacima RHMZ Srbije.

Zahvalnost

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2015. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

Literatura

1. Babić Mladenović M., Kolarov V. (2015). *May 2014 Floods in Serbia*, Water Research and Management, Vol. 5, No.1, pp. 3-8, Serbian Water Pollution Control Society, Belgrade, Serbia
2. Clark, C.O. (1945). *Storage and the unit hydrograph* Transactions, ASCE, 110, 1419-1446.
3. Miller, W.A., and Cunge, J.A. (1975). *Simplified equations of unsteady flow*.
4. Mishra S.K., Singh V.P., 1999: *Another Look at SCS-CN Method*. Journal of Hydrologic Engineering, 3, p257-265.
5. NRCS, 2002: *National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology*. USDA, Washington, D.C.
6. O’Callaghan, J.F., and Mark, D.M., 1984, *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28, 3, p323-344.
7. Ponce, V.M. (1986). *Diffusion wave modelling of catchment dynamics*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 112(8), 716-727.
8. Rodriguez E. et al, 2005, *An assessment of the SRTM topographic products (Technical Report JPL D-31639)*. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
9. Russell S., B. Kenning and G. Sunnell (1979) *Estimating Design Flows for Urban Drainage*, Journal Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105(1), pp 43-52.
10. Soil Conservation Service, 1985: *National engineering handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapter 10*. US Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C.
11. Zelenhasić, E. (1970). *Theoretical probability distributions for flood peaks*. Hydrol. Paper 42, Colorado State University, Fort Collins, CO.
12. Zlatanović N., Gavrić S. (2013). *Comparison of an automated and manual method for calculating storm runoff response in ungauged catchments in Serbia*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 61 (3). pp. 195-201. ISSN 0042-790X

Одбрана од поплава на Сави 2014 – искуства и планови за унапређење система заштите

Марина Бабић Младеновић¹
Васиљка Коларов²
Владислава Бартош Дивац³

АПСТРАКТ: Иако није било штета, у мају 2014. године најопаснија ситуација била је на Сави. Због концентрације изузетно великих вода десних притока Саве у Босни и Херцеговини (нарочито реке Босне на којој је забележена незапамћена поплава), нивои воде код Сремске Митровице и Шапца су веома брзо достигли историјске максимуме, око 70 cm више од претходних екстрема из 1974. и 1981. године. На великој дужини одбрамбене линије морале су да буду у кратком року организоване и примењене мере оперативне одбране од поплава, тамо где је било потребно, како би се спречило плављење великих приобалних површина и градова. У овом раду је дат осврт на генезу велике воде Саве и идентификовани проблеми у спровођењу одбране од поплава. Такође, дат је предлог даљег развоја система заштите од поплава на Сави, који осим реконструисаних насипа, мора обухватити нужне ретензије и битно побољшање заштите великих градова.

Кључне речи: Сава, велика вода 2014, одбрана од поплава

The 2014 flood defence on the Sava River – experiences and plans for system upgrade

ABSTRACT: Even if there were no damages, the most critical situation in May 2014 was on the Sava River. Due to concentration of extremely high flows of the right Sava tributaries in Bosnia and Herzegovina (especially of the Bosna River, which caused unprecedented floods), water levels at Sremska Mitrovica and Šabac had rapidly reached historical maximums, about 70 cm higher than previous extremes in 1974 and 1981. In a short time active flood defence measures had to be organised and implemented at long stretch of flood defence line, where necessary, to prevent flooding of large areas and cities by the river. This paper gives an overview of the genesis of the Sava high water and identifies problems in flood defence. Also, it suggests further development of flood protection on the Sava River, which, besides the reconstruction of levees, has to encompass retention measures and a significant improvement of the large cities protection.

Keywords: the Sava River, 2014 floods, flood defence

¹ Др Марина Бабић Младеновић, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Јарослава Черног 80, 11226 Београд, marina.babic-mladenovic@jcerni.co.rs

² Мр Васиљка Коларов, дипл. инж. пољ., Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд

³ Владислава Бартош Дивац, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд

1 Увод

Сава је десна притока Дунава, најзначајнија по водности и друга по величини слива (96.000 km²). Србија је најнизводнија држава у сливу Саве који дели са Словенијом, Хрватском, Босном и Херцеговином, Црном Гором и Албанијом. Територији Србије припада око 17% укупне површине слива.

На средњем току кроз Хрватску и Босну и Херцеговину, у Саву се на десној обали улива више река бујичног карактера - Уна, Врбас, Укрина, Босна и Тиња. Свака од њих такође има по неколико планинских притока. Лево притоке на средњем делу слива потичу са брдовитих и равничарских предела Панонске низије. Ове реке обухватају много мањи део слива од десних притока Саве, услед чега слив има асиметричан облик.

На десној обали, на граници између Босне и Херцеговине и Србије, у Саву се улива Дрина, и одатле почиње доњи ток Саве. На дужини од 210 km кроз Србију, Сава има одлике типичне равничарске реке која се пружа кроз широку долину.

Историјат изградње система за заштиту од поплава дуж Саве врло је дуг и повезан са подизањем многих насеља и развојем пољопривреде. Реконструкцију насипа на тзв. „савски профил“, иницирале су тек веома тешке и скупе одбране из 1974. и 1981. године. Реконструисани насипи у зони успора акумулације ХЕ „Ђердап 1“ имају и баласт на брањеној страни. Међутим, реконструкција одбрамбене линије дуж Саве и притока у зони ушћа, ни до данас није завршена.

Систем за заштиту од поплава дуж српског сектора Саве није континуалан. Још увек постоје природне плавне зоне на потезу између Сремске Митровице и Купинова на левој обали, које могу прихватити и трансформисати део поплавног таласа. Такође, летњи насип на потезу Прово - Орлача, мора бити преливен при великим водама.

Насипи на левој обали Саве штите равничарско подручје Срема. Одбрамбена линија није континуална, а има три сектора. **Од ушћа Саве у Дунав до села Купиново** одбрамбена линија дужине 56 km је континуална и штити подручје Доњег Срема, односно око 13.000 ha пољопривредног земљишта, 1.300 ha урбаног подручја града Београда, као и више села. Густо насељено подручје Новог Београда штите кејски зидови и, на једној краћој деоници, насип. Ови објекти су делом нижи од планираног нивоа заштите, због урбанистичких захтева. Насип од Новог Београда до Прогара је углавном реконструисан (осим на 3,5 km код Прогара). На њему је лоцирано 7 црпних станица. Приобалне површине између **Купинова и Сремске Митровице** нису заштићене, осим два кратка потеза. Терен је низак, па велике воде плаве око 12.000 ha. На овом подручју се налази Специјални резерват природе „Обедска бара“ (код Купинова). **Од Сремске Митровице до границе са Хрватском** насипска линија дужине 70 km штити подручје Горњег Срема, односно око 48.000 ha плодног пољопривредног земљишта и шума, Сремску Митровицу и бројна мања насеља, саобраћајну инфраструктуру и индустријске објекте. Унутрашње воде из густе мреже одводних канала се одводе у Саву, гравитационо или преко црпних станица. Најзначајнији објекти су црпна станица и устава Босут, на ушћу ове реке. Сви насипи су реконструисани и обезбеђују задовољавајући степен сигурности.

Насипска линија на десној обали реке Саве такође има три специфичне деонице: **од ушћа Саве до Скеле** на km 55, одбрамбену линију прекидају бројне мање и веће притоке. Брањено подручје је стога подељено у неколико касета које штите савски насипи и успорни насипи дуж притока. Низводно од ушћа Колубаре штите се урбани и

приградски делови Београда, индустрија и друго. Кејски зидови и насипи у централној зони Београда не обезбеђују адекватан степен заштите јер су коте круне ниже од потребних, због урбанистичких разлога. Насипи узводно од ушћа Колубаре штите 12.000 ha пољопривредног земљишта, бројна насеља и део Обреновца, индустријске објекте и инфраструктуру, укључујући и виталне енергетске објекте ТЕНТ А. **Између Скеле и Шапца** изграђени су само кратки насипи ради заштите пољопривредног земљишта и мањих насеља. **Између Шапца и ушћа Дрине**, 70 km дуга и континуална одбрамбена линија штити подручје Мачве. Насип се наставља уз десну обалу Дрине до Бадовинаца. У заштићеном подручју је град Шабац и бројна мања насеља, 30.000 ha пољопривредног земљишта, индустријски и инфраструктурни објекти, као и системи за одводњавање. На овом потезу реконструисани су насипи под управом ЈВП „Воде Војводине“ (на водном подручју Срем, око 50% дужине насипа) док су радови у источној и западној зони Мачве (водно подручје Сава, у надлежности ЈВП „Србијаводе“) планирани или започети.

2 Хидролошки услови на Сави током априла и маја 2014. године

Велике падавине на подручју западне, централне и источне Босне и Херцеговине средином маја 2014. године довеле су до наглог пораста протока десних притока (Уне, Сане, Врбаса, Босне и Дрине), што је утицало на велике порасте Саве на делу тока кроз Босну и Херцеговину, Хрватску и Србију.

У периоду од 14. до 18. маја 2014. године на хидролошким станицама у Хрватској пораст водостаја Саве био је интензиван. За један дан, између 16. и 17. маја водостај је у Славонском Броду порастао за 2,60 m, а у Жупањи чак за 4 m, што није карактеристично за овај сектор Саве.

Од 17. до 20. маја 2014. године регистровани су највиши нивои у историји мерења на хидролошким станицама на средњем току (Славонски Кобаш, Славонски Брод, Славонски Шамац, Гребнице, Жупања и Јамена) и доњем току Саве (Сремска Митровица, Шабац). Апсолутни максимуми на овим станицама били су директна последица изузетно великог прилива од река Босне (4.200 m³/s), Врбаса (1.700 m³/s) и Дрине (4.000 m³/s).

Мерења која су изведена током таласа велике воде Саве у Хрватској и Србији су показала да су нивои, брзине тока и протоци били виши него икада раније. На хидролошкој станици Славонски Шамац у Хрватској, при водостају од 889 cm измерен је проток од 6.008 m³/s [1], што одговара 1000-годишњем протоку велике воде. Низводно од ушћа Дрине, врх таласа је забележен 17. маја, када је код Сремске Митровице измерен проток од 6.600 m³/s, што одговара 100-годишњем протоку. Притом је врх таласа велике воде већ био смањен услед пробоја насипа и изливања воде на делу тока Саве у Босни и Херцеговини и Хрватској.

Услови на доњем току Саве су били под утицајем нивоа Дунава, који није био висок. Наиме, 15. маја су отворена три преливна поља на ХЕ „Бердап 1“, те је наредних дана вршено пражњење воде из акумулације, како би се смањио ниво Дунава низводно од Београда. Од 19. маја је ниво на брани оборен на коту 63 m н. в., при протоку од 12.400 m³/s. Захваљујући овој мери, нивои Дунава и Саве у зони ушћа били су знатно нижи него у пролеће 2006. године.

3 Проблеми у Хрватској и Босни и Херцеговини током проласка поплавног таласа

Низијске ретензије у Хрватској, које иначе имају веома битну улогу у систему одбране од поплава на Средњој Сави, биле су активирание и примиле око $600 \times 10^6 \text{ m}^3$, што је око трећина њиховог капацитета. Њихов већи ангажман није био могућ јер се поплавни талас формирао низводно од њих.

У Хрватској је 17. маја, готово истовремено дошло до продора насипа код Рајевог Села и код Рачиновца [7], уз изливање савских вода у лево приобаље. На деоници код продора Рајево Село насип је реконструисан током 2010. и 2011. године, надвишењем постојећег трупа насипа. Насип у Рачиновцима је био стар, али је задовољавао висинске критеријуме, па није реконструисан. Место продора у Рајевом Селу налази се у кривини Саве, док је онај у Рачиновцима на правцу. На обе локације није било преливања насипа, иако се водостај приближио круни. Водостај при којем је дошло до пробоја био је 1 m виши од меродавног водостаја за пројектовање насипа.

Вода је продрла великом силином у приобално подручје и ширила се према северу и истоку, према спачванском шумском базену. Пробијена је друга линија обране, пут Жупања - Рајево Село - Гуња - Рачиновци. Вода је продирала кроз бројне пропусте и мостове на путу. У Спачванском базену било је акумулирано око $80 \times 10^6 \text{ m}^3$ воде, искључиво као последица дотока савских вода.

Притисак велике воде Саве нису издржали ни деснообални насипи у Босни и Херцеговини па су због тога 17. и 18. маја поплавлена подручја Одачке Посавине, Средње Посавине и Семберије. Процењено је да је поплавлено 26.630 ha (Федерација БиХ 17.950 ha, Република Српска 7.205 ha и Брчко дистрикт 1.475 ha). Уколико се претпостави да је дубина воде у поплавленим подручјима била 1 m, запремина изливене воде је износила $266 \times 10^6 \text{ m}^3$ [2].

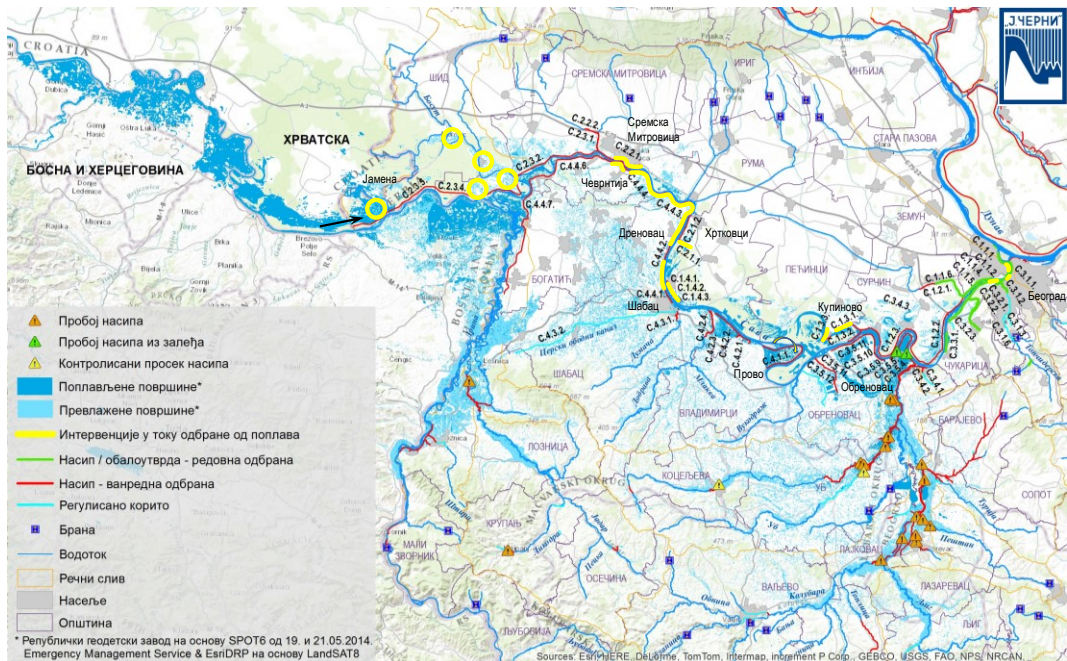
4 Одбрана од поплава на српском сектору Саве

Нагли пораст нивоа средином маја, довео је до проглашења мера ванредне одбране од поплава на свим објектима уз Саву, осим на најнизовнијим деоницама, где су на снази биле мере редовне одбране од поплава. Мере одбране су остале на снази и након проласка таласа великих вода, у циљу извођења радова на санацији објеката.

Нивои воде код Сремске Митровице и Шапца су веома брзо достигли историјске максимуме, око 70 cm више од претходних екстрема из 1974. и 1981. године. На великој дужини одбрамбене линије морале су да буду у кратком року организоване и примењене мере оперативне одбране од поплава, тамо где је било потребно, како би се спречило плавање великих приобалних површина и градова.

У тој тешкој ситуацији су постојале две олакшавајуће околности. Насипи дуж десне обале Саве у Босни, као и хрватски насип на левој обали, непосредно узводно од границе Србије су попустили. Изливањем вода у приобаље, снижен је пик поплавног таласа, а самим тим и нивои воде на српском сектору Саве. Такође, горњи део слива реке Дрине и слив Лима нису захватиле изузетне кише, тако да допринос овог слива великим водама Саве није био драматичан.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 1. Локације на којима су вршене интервенције током одбране од поплава, поплављене и превлажене површине у сливу Саве [5]
Figure 1. Location of flood defence measures implementation, flooded and wet areas in the Sava River Basin [5]

На насипима на левој обали, који су углавном реконструисани и обезбеђују заштиту од 100-годишње велике воде ($6.500 \text{ m}^3/\text{s}$) нису забележени значајнији проблеми. Активности су, међутим, све до 29. маја биле усмерене на локализацију воде која је долазила из залеђа, после пробоја насипа у Хрватској, и врло брзо поплавила село Јамена. Изграђени су ободни насипи око неколико насеља (Босут, Сремска Рача, Вишњићево и Моровић) и рађено је на ојачању пута Босут - Кузмин који је друга линија одбране пре Сремске Митровице. Када је ниво Саве на ушћу Босута довољно опао, започело је испуштање поплавних вода преко устава и црпне станице Босут. Тек 11. јуна доток воде из Хрватске је престао.



Слика 2. Плавлeње западног Срема из залеђа (извор: Танјуг, airworx.rs)
Figure 2. Flooding of the west Srem area from hinterland (source: Tanjug, airworx.rs)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Како насипи на Сави нису континуални, већ су на потезу Купиново - Сремска Митровица задржане природне плавне зоне ради прихватања и делимичне трансформације поплавног таласа, села и пољопривредно земљиште на овом потезу били су поплавлени.

Реконструкција одбрамбене линије на десној обали није завршена, иако је започета још 1974. године [4]. Зато је у мају 2014. године само изузетним напорима спречено преливање или рушење на неколико деоница старог насипа у Мачви - непосредно узводно од Шапца и у зони ушћа Дрине. Одбрана од поплава је трајала 15 дана и у њој су учествовали, поред надлежних институција, војска и грађани.

На потезима са недовољном висином круне (на пример, од Чеврртије до ц. с. „Каленића Ревеница“ ниво Саве је од 16.05. на већој дужини био око 0,7 m изнад коте круне насипа), преливање је спречено извођењем надвишења на круни насипа, висине 1 m, машинским путем, од материјала из брањене зоне [6]. Приликом извођења радова дошло је до деформације оштећених брањених косина и појаве локалних извора, те је затим рађено на заштити од процедних вода - локалним каптирањем већих извора „бунарима“. На појединим деоницама надвишење насипа је формирано у виду вишередне депоније слојених џакова са песком. Због најављених киша, џакови су покривени фолијом. Када је уочено прогресивно проквашење и течење материјала по брањеној косини (што је указивало на опасност од клизања косине, деформације насипа или формирања привилегованих праваца и отвора на насипу), ради заштите насипа од деформације и лома извршено је ојачање ножице. Изведен је дренажни тепих (због већег броја расутих извора) висине и до 1 m, полагањем водопропусног геотекстила, разастирањем ситног шљунка у слоју до 30 cm и након тога камене ситнежи до 70 cm.



Слика 3. Надвишење насипа и каптирање извора (извор: ЈВП „Србијаводе“)
Figure 3. Levee heightening and underseepage relief well (source: PVMC “Srbijavode”)



Слика 4. Заштита ножице насипа (извор: ЈВП „Србијаводе“)
Figure 4. Levee foot protection (source: PVMC “Srbijavode”)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Посебно критично је било на деоници насипа између Дреновца и Шапца (дужине 1,7 km), где радови на реконструкцији насипа нису били завршени. Формиран је само екран насипа, тако да је насип био недовољне ширине у круни, без хумусног заштитног слоја, без баласта, са ископаним подужним ровом за рефулисани песак, без приступних путева на свакој касети за рефулисање, а нису били затворени делови насипа коришћени за рефулерни цевовод и одводњавање касета [6]. Претходно рефулисани материјал није био адекватно распоређен ни по висини ни по дужини насипа. На овом делу насипа постојала је веома велика опасност од продора воде кроз тело насипа, појаве процедних вода на брањеној страни, ерозије небрањене косине и продора кроз отворе који су санирани непосредно пре појаве великих вода.

Велика вода на Сави 2014. године је поново указала на проблем заштите градских центара, где кејски зидови због урбанистичких захтева обезбеђују нижи степен заштите него насипи који штите околна пољопривредна подручја. Такав случај се може наћи још само у Србији.



Слика 5. Заштита градова
Figure 5. Protection of cities

Треба истаћи да кејски зидови и насипи у централној зони Београда, која се планира за даљи урбани развој, не обезбеђују адекватан степен заштите. Београд у мају 2014. године није био угрожен, јер је велика вода на Сави наишла на релативно ниске нивое Дунава.

Витални електроенергетски објекти ТЕНТ А су били угрожени у мају 2014. године. У зони одбрамбеног зида уз Саву код ТЕНТ-а вода је продрла у црпну станицу али није дошло до преливања одбрамбене линије (слика 6, лево). Међутим, водама Колубаре поплавлена је трафо станица Обреновац, која је лоцирана на нижем терену у залеђу термоелектране, па је њен рад обустављен.



Слика 6. Локација оштећења објеката у зони ТЕНТ и код Забрeжја (извор: UNITAR)
Figure 6. Location of structures damage near TENT and Zatrezje (source: UNITAR)

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Вода која се брањеним подручјем слила са слива Колубаре је 17. маја пробила одбрамбену линију на десној обали Саве код Забрежја на два локалитета (слика 6, десно). Први локалитет је одбрамбени зид Саве у Забрежју, где је дошло до испирања материјала испод армирано-бетонског зида и његовог слегања (слика 7, лево) на дужини од 60 m. Такође, на деоници Вић бара - Забрешке ливаде тело насипа, комплетно изграђено од песка (!), пробијено је на дужини од 200 m (слика 7, десно).



Слика 7. Слегао АБ зид и пробој насипа
Figure 7. Collapsed reinforced concrete wall and levee breach

5 Предлог развоја система заштите од поплава на Сави

Река Сава има велики слив, који се простире на територијама више држава, а поплавни таласи се претежно формирају ван наших граница. Веома је важно да се развија сарадња са земљама у сливовима прекограничних водотока, на билатералном и мултилатералном нивоу, како би се заједно планирале мере и радови за превенцију поплава.

Равничарска подручја дуж доњег тока Саве озбиљно може угрозити истовремена појава великих вода на Сави и Дунаву, што може довести до катастрофалних последица.

Све велике поплаве у прошлости су покретале нови циклус улагања у унапређење система заштите од поплава. На Сави је реконструкција иницирана изузетним великим водама, које су 1974. године угрозиле Мачву, а 1981. године сектор реке низводно од Шапца. Реконструкција је трајала годинама, зависно од могућности државе да средства усмери у овом правцу и још није завршена. Трошкови који су настали током одбране од поплаве у мају 2014. године, посебно на нереконструисаној деоници од Чевртије до Дреновца, оправдавају коначни завршетак ових радова.

Иако су насипи дуж Саве на подручју Србије у мају 2014. године успешно одолели таласу великих вода (чији је врх био нижи од очекиваног услед пробоја насипа у Хрватској и Босни и Херцеговини), током одбране су уложени велики напори на надвишењу и ојачању насипа. На основу искустава из ове поплаве могу се дефинисати приоритети за наредни период.

На слици 8 приказане су грубо процењене потенцијално плавне зоне у приобаљу Саве, за услове 1000 годишње велике воде. Да није смањен пик поплавног таласа узводно од Србије (мерени проток у Хрватској, непосредно пре пробоја насипа, имао је 1000-годишњи повратни период), нивои на српском сектору Саве би били знатно виши

и вероватно би дошло до преливања и рушења одбрамбене линије. Чињеница је да су током прошле и ове године оштећени насипи у Хрватској и БиХ знатно надвишени и ојачани, тако да би вероватно издржали сличан поплавни талас. То активности на територији Србије чини још ургентнијим.



Слика 8. Потенцијално поплавно подручје у приобаљу Саве [3]
Figure 8. Potentially flooded area by the Sava River [3]

Заштита савског приобаља и даље се мора ослањати на хидрограђевинске објекте, од чијег ће стања и функционалности зависити ефикасност заштите. Степен заштите који обезбеђују грађевински објекти једнак је повратном периоду велике воде, која је меродавна за димензионисање објекта. На Сави је као меродавна усвојена 100-годишња велика вода, уз надвишење, тако да насипи могу да прихвате и веће воде.

Међутим, у условима климатских промена и антропогених утицаја мењају се и услови настанка и карактеристике великих вода, па меродавни проток више није непроменљива категорија. Стога су за обезбеђење одговарајућег степена заштите потребне и допунске мере и радови (мобилни системи у градовима, реконструкција објеката).

Поред тога, треба формирати нужне ретензије на мање вредним подручјима (шумским и пољопривредним), ради редукације врхова поплавних таласа који се формирају на територијама узводних земаља. Погодно подручје за нужну ретензију на Сави је Горњи Срем (поплављен у мају 2014. године) са претежно шумским и пољопривредним земљиштем и неколико села, која би се заштитила локалним насипима.

Препоручује се да се градови преко 20.000 становника и значајне индустријске зоне штите сталним објектима до нивоа 100-годишње велике воде, али да се допунском (мобилном) заштитом обезбеде и од 500-годишње или 1000-годишње воде (за велике

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

градове као што су Сремска Митровица, Шабац и Београд). Такође, степен заштите електроенергетских постројења се мора подићи на ниво 500-годишње велике воде.

Постоје идеје да се успостави континуална насипска линија на левој обали Саве, изградњом насипа од Купинова до Сремске Митровице. То би могло битно да погорша режим великих вода и узводно и низводно и компромитује постојећи систем заштите, посебно и сада недовољно заштићених градова (Београд, Сремска Митровица и Шабац). Зато овоме треба приступити веома пажљиво, израдом претходне студије оправданости и уз веома пажљиву оцену базирану на хидрауличком моделирању и квалитетним подлогама.

Изградња насипа и других објеката није довољан услов за успешну заштиту људи и добара. У складу са концептом одрживог развоја у области заштите од вода, у Србији се у будућности заштита поплавних подручја може постићи само адекватном комбинацијом инвестиционих (хидрограђевинских) радова и неинвестиционих радова и мера.

Може се закључити да је у нашим условима потребно 30 до 40 година да би се унапредио систем заштите од поплава. У међувремену може да дође до битних промена у њиховим сливовима, а очекује се да климатске промене доведу до погоршања режима великих вода. Стога је битно да све планиране мере и радови буду флексибилни и омогуће прилагођавање будућим условима, који се за сада тешко могу у потпуности сагледати.

Литература

1. Абдулај Р., Миковић Н., Оскоруш Д., Вујновић Т., (2014.), Велике воде доњег тока ријеке Саве тијekom свибња 2014, *Хрватска водопривреда*, Загреб, 207, 14-16.
2. ICPDR and ISRBC (2014), *Floods in May 2014 in the Sava River Basin, Brief overview of key events and lessons learned*, Ed. M. Babić Mladenović, International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna, International Sava River Basin Commission, Zagreb.
3. ИЈЧ, (2006.), *Картирање плавних зона водотока у Србији*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд.
4. ИЈЧ, (2014.), *Експертиза поплавног догађаја у 2014. години са концепцијом техничког решења хитних радова на заштити Мачве од великих вода Дрине*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд.
5. ИЈЧ, (2015.), *Експертиза поплавног догађаја на подручју Србије у 2014. години*, Институт за водопривреду "Јарослав Черни" АД, Београд.
6. ЈВП СВ, (2014.), Извештај о спроведеним мерама у одбрани од поплава за подручје у надлежности ЈВП „Србијаводе“ на подручју Мачве, ЈВП „Србијаводе“, Београд.
7. Кратофил Л., (2014.), Свибањска поплава Жупањске посаvine, *Хрватска водопривреда*, Загреб, 207, 17-28.

Поплаве 2014. године на реци Јадар

Вања Дамјановић¹
Милан Малешев²

АПСТРАКТ: Интензивне падавине у току априла и маја месеца 2014. године, које су захватиле централно и западно подручје Србије, проузроковале су екстремно велике воде на више водотока у сливу Саве, Дрине, Велике Мораве и Дунава, што је резултирало катастрофалним поплавама и великим штетама. Током маја 2014. године поплавама је тешко било погођено и подручје дуж тока Јадра (општине Лозница и Осечина). Поплавни догађај на Јадру разматран је у посебној Експертизи, која је обухватила анализу хидрометеоролошких услова, као и анализу мера, радова и негативних појава које су се десиле дуж регулисаних сектора и дуж сектора који немају изграђен систем заштите. Разматрана су техничка решења, меродавни критеријуми и степен заштите од великих вода, а дат је и предлог нових решења заштите од великих вода Јадра.

Кључне речи: поплава 2014, Јадар, заштита од поплава, реконструкција поплавног таласа

The 2014 Floods on the Jadar River

ABSTRACT: Intense rainfall in April and May 2014, which affected the central and western regions of Serbia, caused extremely high water levels in the Sava, Drina, Morava and Danube river basins, which resulted in catastrophic floods and damage. Riparian land along the Jadar River was also severely affected by the May 2014 flood (municipalities of Loznica and Osečina). Flooding event on the Jadar River was discussed in a special Expertise, which included analysis of hydro-meteorological conditions, as well as an analysis of measures, works and negative phenomena that have occurred along trained river sections, and along river sections without flood protection system. The discussion focused on technical solutions, design criteria and the flood protection levels, and new solutions for the protection from the Jadar floods were proposed.

Key words: 2014 flood, the Jadar River, flood protection, hydraulic reconstruction of the floodwave

¹ Вања Дамјановић, дипл.грађ.инж, Институт за водопривреду „Јарослав Черни”, Београд,
vanja.damjanovic@jcerni.co.rs

² Милан Малешев, дипл.грађ.инж, Институт за водопривреду „Јарослав Черни”, Београд,
milan.malesev@jcerni.co.rs

1 Увод

Река Јадар настаје спајањем Мочионика и Вишке реке. Слив реке Јадар заузима површину од око 959 km². Дужина тока до састава две реке износи 65 km, са денивелацијом врха слива и ушћа од око 200 m. Хидрографска мрежа читавог сливног подручја је врло развијена. Јадар има све карактеристике бујичног водотока, брз надолазак великих вода и њихово кратко трајање.

Са аспекта хидротехничке уређености, ток Јадра може се поделити на три сектора (слика 1):

- Низводни сектор, од ушћа у Дрину до моста у Горњем Добрићу (km 0 – km 11) је на највећем делу регулисан.
- Средњи сектор, од моста у Горњем Добрићу (km 11) до ушћа реке Пецке (km 55) није регулисан и налази се у превасходно пољопривредном подручју.
- Узводни сектор, од ушћа Пецке (km 55) до споја Вишке реке и Мочионика (km 65), регулисан је само на врло кратком потезу кроз Осечину - од моста у центру Осечине (km 57) до ушћа Ловачке реке (km 58).



Слика 1. Подела главног тока реке Јадар на секторе

Figure 1. Sections of the Jadar River

Интензивне падавине у току априла и маја месеца 2014. године, које су захватиле централно и западно подручје Србије, проузроковале су екстремно велике воде на више водотока у сливу Саве, Дрине, Велике Мораве и Дунава, што је резултирало катастрофалним поплавама и великим штетама. Током маја 2014. године је поплавама тешко било погођено и подручје дуж тока Јадра (општине Лозница и Осечина).

Циљ овог рада је реконструкција поплавног догађаја на Јадру, која укључује систематизацију и критичку анализу свих расположивих метеоролошких и хидролошких података, дефинисање хидрауличких и морфолошких подлога који се односе на овај поплавни талас, као и предлог техничког решења заштите угрожених деоница [10].

У циљу егзактније хидрауличке реконструкције поплавног таласа дуж тока Јадра у мају 2014. године, геодетски су забележени трагови велике воде у карактеристичним профилима водотока и другим местима на поплављеном подручју [8]. У том оквиру, обављена су геодетска снимања долињских попречних профила и профила основног корита водотока уз геодетска снимања мостовских отвора и оштећења на обалама и објектима.

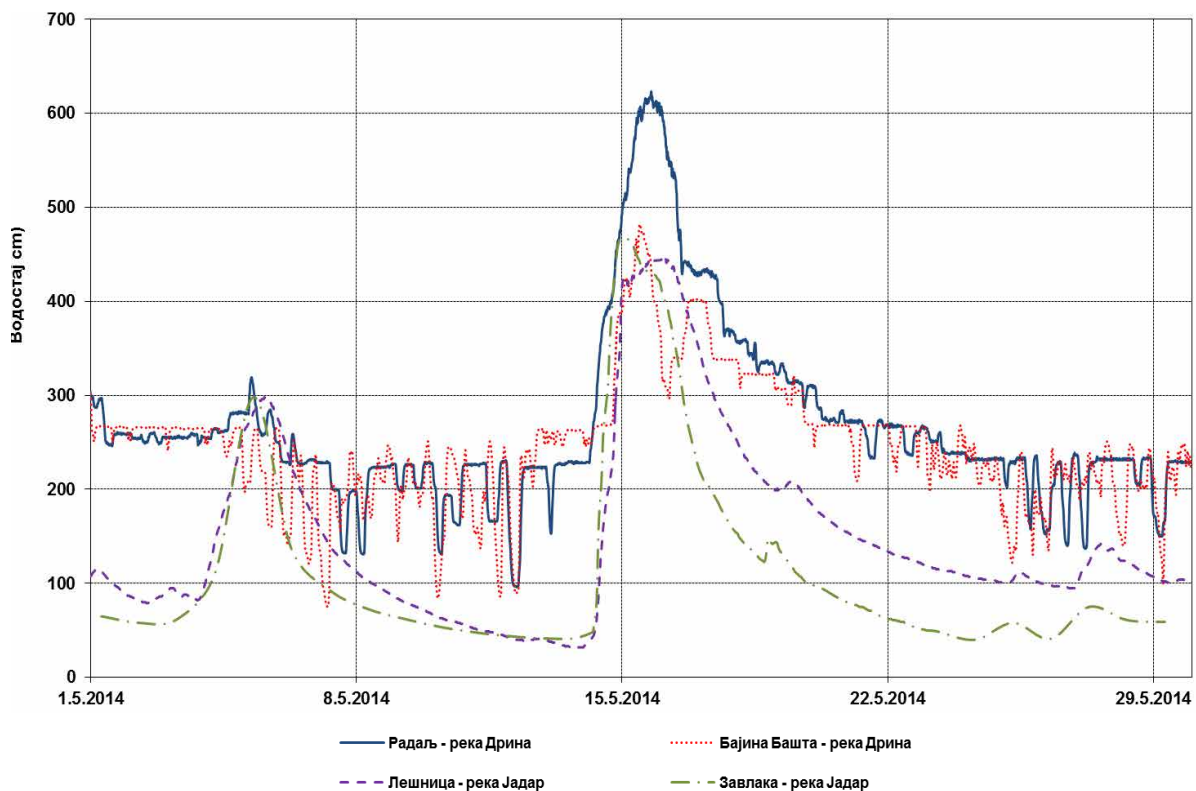
Хидролошко - хидрауличка реконструкција поплавног таласа Јадра из маја 2014. године састоји се у детерминисању максималног протока у таласу и утврђивању његовог пробабилистичког ранга. У том циљу, примењен је сложени поступак анализе, који је обухватио следеће сегменте:

- анализа трагова великих вода дуж посматраног сектора,
- итеративни прорачун линије нивоа водотока по карактеристичним деоницама у циљу детерминисања протока Јадра на тим деоницама,
- оцена пробабилистичког ранга максималног протока Јадра у поплавном таласу.

2 Приказ хидролошких услова у мају 2014. године

Река Јадар је водоток првог реда, на коме према члану 53. Закона о водама одбрану од поплава организује и спроводи ЈВП „Србијаводе“ (сектори С.6.2, С.6.3, С.6.4 и С.6.5).

На Јадру постоје два мерна места за осматрање водостаја и мерење протока, хидролошка станица Лешница (2,6 km) и Завлака (43,1 km). Током априла и маја 2014. године јавила су се три поплавна таласа у сливу Јадра, као последица дотока великих количина воде са брдског подручја Западне Србије (слика 2).



Слика 2. Упоредни нивограм – река Дрина и Јадар током маја 2014. године [9]

Figure 2. Parallel hydrographs of the Drina and Jadar Rivers in May 2014 [9]

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Овде ће се укратко навести само неке значајније информације везане за трећи поплазни талас од 14-16 маја, који је проузроковао највише штете дуж водотока:

- 14.05.2014. у 07⁰⁰ проглашена је ванредна одбрана од поплава у Осечини а у 15⁰⁰ на територији Јелава (општина Лозница). Поплављен је велики део стамбених и пословних објеката у Осечини, дошло је до великих оштећења регулисаних деоница Јадра и притока, преливени су насипи на доњем сектору Јадра. На хидролошкој станици Завлака регистрован је врх поплавног таласа $H_{\max} = 467$ cm ($Z_{\max} = 158,32$ mm).
- 15.05.2014. проглашено је ванредно стање на територији Општине Лозница. Поплављене су пољопривредне површине, оштећени су мостови као и прилазне рампе, насипи и обале. Дошло је до преливања одбрамбених насипа на доњем сектору Јадра.
- 16.05.2014. године водостаји Јадра на територији Осечине и Лознице су имали тенденцију опадања. На хидролошкој станици Лешница регистрован је врх поплавног таласа $H = 447$ cm ($Z_{\max} = 107,94$ mm).
- 21.05.2014. године вода се повукла са поплављеног подручја осим из депресија.

3 Стање после проласка поплава

На деоници од ушћа Јадра у Дрину до Горњег Добрића (km 11 регулисан сектор) дошло је до највећих оштећења на објектима дуж тока Јадра. Сектор водотока од Горњег Добрића (km 11) до Осечине (km 56) унајвећем делу није регулисан (изузев 700 m у урбаној зони Осечине). Значајније оштећење претпео је мост у Драгинцу (km 30), који више није у функцији. У наставку су приказане карактеристичне фотографије снимљене после проласка поплавног таласа 15. маја 2015. године (слике 3 и 4).



Слика 3. Оштећена обала и косина насипа на km 3

Figure 3. Bank and levee slope erosion at km 3



Слика 4. Оштећене обала и срушене навозне рампе друмског моста у Горњем Добрићу на km 11

Figure 4. Bank erosion and damaged approach to the road bridge in Gornji Dobrić at km 11

4 Штете од поплава током априла и маја 2014. године

Током поплаве из априла и маја 2014. године нарочито је тешко било погођено подручје дуж тока реке Јадар у општинама Лозница и Осечина. У Извештају *Комисије за утврђивање штете од елементарних непогода* од 03.07.2014. године процењено је да су укупне штете од поплава износиле 1.593,4 милиона динара у општини Лозница, односно 445,7 милиона динара у општини Осечина.

5 Хидрауличка реконструкција таласа велике воде из маја 2014

5.1 Метод хидрауличке анализе

Прорачун линија нивоа воде вршен је применом програма HEC-RAS (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center).

За хидрауличку реконструкцију поплавног таласа дуж тока Јадра од 15.маја 2014. године, формиран је линијски модел устаљеног неједноликог течења са 62 долињских профила у коме је интегрисано 15 мостовских конструкција. За стање минор и мајор корита усвојен је дијапазон варијације вредности Манинговог коефицијента рапавости (n): у минор кориту између 0,035 и 0,06 $m^{-1/3}s$, а у мајор кориту између 0,04 и 0,1 $m^{-1/3}s$.

Хидраулички прорачун по карактеристичним деоницама посматраног сектора Јадра извршен је поступком итерације, при чему је за познати максимални ниво велике воде детерминисан кореспондентни проток. При одређивању кореспондентних протока на изабраним деоницама Јадра коришћени су снимљени трагови поплавног таласа, подаци са хидролошке станице. Завлака, сателитски снимци поплављеног подручја који се налазе на интернет порталу ГеоСрбија (<http://www.geosrbija.rs>).

5.2 Резултати прорачуна

5.2.1 Узводни и средњи сектор Јадра

На узводном сектору веће притоке које гравитирају ка кориту Јадра су Ловачка река, Остружанска, Тушта и Пецка а на средњем сектору највеће су Ликодра, Церница и Коренита. Ове притоке дају свој допринос у формирању протока Јадра, али таласи великих вода притока и Јадра не коинцидирају.

На хидролошкој станици Завлака (km 43), 14.05.2014 године забележен је максимални ниво воде од 158,22 mm. Екстарполована је крива протока и одређен је проток који одговара максималном забележеном нивоу и износи око 270 m^3/s . Описаним поступком хидрауличког прорачуна дефинисана је варијација максималног протока Јадра на потезу од „гвозденог моста“ (km 61) у Осечини до моста у Горњем Добрићу (km 11), по карактеристичним деоницама.

Добијени су следећи резултати:

- На профилу „Крстића“ моста (km 60,3), узводно од Осечине, максимални проток је износио око 200 m^3/s , а мост је том приликом био преливен.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- У профилу моста у Осечини km 57 (низводно од ушћа Ловачке реке) максимални проток Јадра износио је око $Q = 205 \text{ m}^3/\text{s}$. Центар Осечине је био поплављен. Овај мост може максимално да пропусти $70 \text{ m}^3/\text{s}$ без изливања [3].
- Низводно од ушћа Пецке на стационажи km 55, максимални проток Јадра износио је $260 \text{ m}^3/\text{s}$.
- На профилу хидролошке станице Завлака (km 43,1), непосредно узводно од ушћа Ликодре у Јадар, проток при максималном нивоу 14.05.2014. године био је око $270 \text{ m}^3/\text{s}$. Водомер Завлака се налази непосредно узводно од моста у Завлаци.
- низводно од ушћа Ликодре (km 42,8), максимални остварени проток Јадра износио је $480 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Река Коренита у долини Јадра тече паралелно са њим на међусобном растојању које је мање од 1000 m, на дужини од око 5 km. На km 26 процењено је да долази до раста протока Јадра на око $520 \text{ m}^3/\text{s}$.
- У зони моста у Горњем Добрићу (km 11), остварен је максимални проток од око $530 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2.2 Низводни сектор Јадра

На низводном сектору, од моста у Јелаву (km 2,6) до моста у Горњем Добрићу (km 11), постоји систем заштите који је до једног временског тренутка функционисао, све док није дошло до првих преливања насипа, њиховог пробоја, као и рушења леве и десне навозне рампе на мосту у Горњем Добрићу.

Хидрауличка реконструкција на овом сектору Јадра је изванредно сложена због чињенице да пропагација овог таласа није била концентрисана на речно корито, већ је обухватила много већи простор у речној долини. Оваква ситуација у време поплава условљена је чињеницом да је на овом сектору водотока дошло до преливања или продора насипа на више места и изливања воде у приобаље, што је знатно допринело размерама поплаве. С обзиром на претходно изнето, може се закључити да се пропагација поплавног таласа одвијала једним делом кроз регулисано корито, а другим делом кроз речну долину (брањено подручје).

На km 8,7 овог сектора, налази се ушће везног канала Јадар - Лешница чији су обострани насипи били преливени и порушени на више места током поплаве. Чињеница да је везни канал учествовао у плавлјењу десног (брањеног) приобаља Јадра чини ову анализу још комплекснијом.

Из свега претходно наведеног, проток који се остварио на овом сектору, може се уз помоћ расположивих подлога са извесном тачношћу само проценити и то:

- У зони моста у Горњем Добрићу, остварен је максимални проток који износи око $530 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Из везног канала је вода преливала преко насипа у узводном делу тако да се део протока разлио по десној брањеној долини Јадра. Међутим, одређеним анализама процењен је капацитет корита везног канала у условима великих вода Јадра и он износи око $35 \text{ m}^3/\text{s}$. На најнизводнијем сектору Јадра је текло/разливано око $565 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2.3 Мостови

У оквиру ове хидрауличке анализе посебно су разматрани утицаји мостовских конструкција у условима појаве великих вода Јадра из маја 2014. године. Већина мостова нема довољну пропусну моћ у условима појаве стогодишње велике воде и они представљају “уско грло”, поготову на регулисаним деоницама водотока.

5.2.4 Дефинисање плавне зоне

Дефинисане су површине водног огледала у условима проласка врха таласа. На слици 5 приказана је само средњи сектор Јадра. Површина плавне зоне Јадра од моста у Јелаву (km 2,6) до „гвозденог моста“ узводно од Осечине (km 61,3) износи око 5.500 ha. Највећа ширина плавне зоне се јавља на доњем сектору Јадра и износи око 4.000 m и покрива зону између магистралног пута Шабац-Лозница на левој обали Јадра, потез од Горњег Добрића и Страже до високог терена на десној обали Јадра. Најмање плавне зоне су на горњем сектору Јадра, у зони Осечине, и имају ширину од 100 до 300 m.



Слика 5. Плавна зона Јадра – средњи сектор
Figure 5. Flooded area along the middle section of the Jadar River

5.3 Оцена пробабилистичког ранга максималних протока

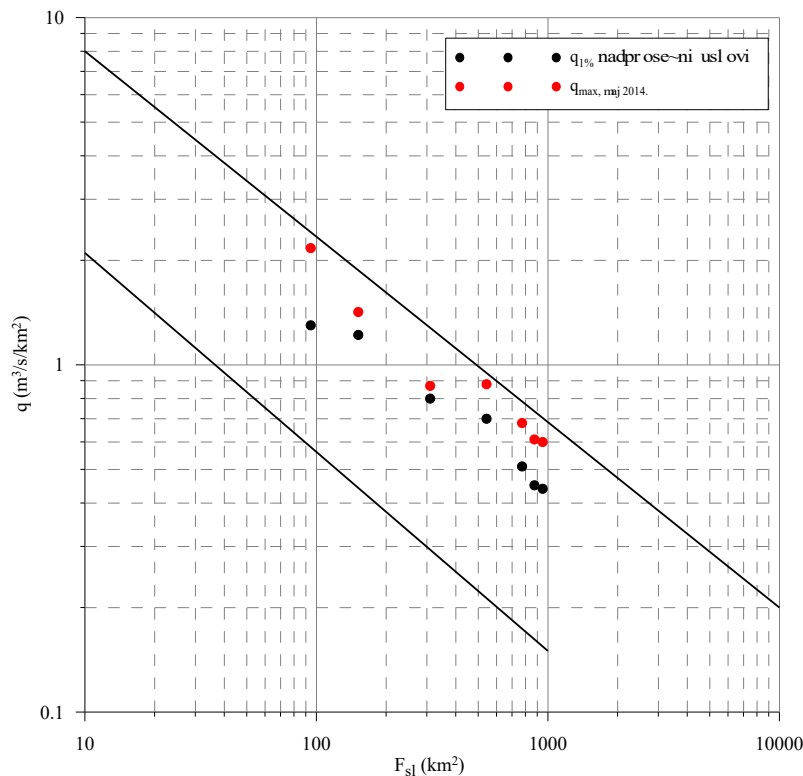
Класичан приступ заштите од поплава подразумева дефинисање степена заштите приобаља преко вероватноће појаве великих вода. Отуда је од посебног интереса оцена пробабилистичког ранга максималних протока у поплавном таласу Јадра у мају 2014. године.

Максимални протоци дуж тока Јадра детерминисани су хидрауличком реконструкцијом. За познате вредности површине слива карактеристичних деоница дуж Јадра (F_{sl}) и максималних протока (Q_{max}) на тим деоницама, одређени су модули специфичног отицаја великих вода $q_{max} = Q_{max}/F_{sl}$, изражени у јединицама ($m^3/s/km^2$) које варирају од $0,60 m^3/s/km^2$ до $2,17 m^3/s/km^2$.

На слици 6 приказана је зависност специфичног отицаја велике воде у мају 2014. године q_{max} од површине слива дуж тока Јадра. Упоредо су приказане и вредности $q_{1\%}$ за Јадар (према прорачуну из [5] за надпросечне услове).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Све вредности q_{\max} за талас велике воде дуж тока Јадра из маја 2014. године се налазе у горњој зони (слика 6), те се може оценити да је повратни период овог догађаја био дужи од 100 година.



Слика 6. Зависност $q_{1\%}$ (надпросечни услови) и q_{\max} таласа велике воде у мају 2014. године од површине слива дуж тока реке Јадар

Figure 6. The $q_{1\%}$ (above average conditions) and q_{\max} of the May 2014 floodwave in function of the catchment size along the Jadar River

6 Предлог техничких решења уређења карактеристичних сектора

Потребно је нагласити да постоји обимна Техничка документација која се односи на проблематику уређења тока Јадра. Генерално нека решења треба иновирати и прилагодити новим хидролошким условима на сливу. Овде ће се дати кратак преглед предложених техничких решења заштите од великих вода Јадра.

6.1 Низводни сектор Јадра, од ушћа у Дрину (km 0) до Горњег Добрића (km 11)

На деоници Јадра од ушћа у Дрину (km 0) до моста у Јелаву (km 2,6) постоје делимично изграђени насипи. Узводна деоници од моста у Јелаву (km 2,6) до железничког моста (km 8,4) је регулисана 1988. према [1] и санирана током 2009. године према [6].

Деоница од железничког моста (km 8,4) до моста у Горњем Добрићу (km 11) је регулисана током 2008. године према [1] и санирана 2011. године, али не у потпуности према Главном пројекту [8]. Трасу одликују врло оштре кривине, које доводе до неповољног режима течења при великим водама које изазива преливање и оштећење заштитних објеката. Из тог разлога неопходно је извршити просецање оштре кривине Јадра од km 9+750 до km 10+500. Просек дужине око 370 m, ширине у дну 15 m и нагибом косина 1:2 и обостраним насипима до нивоа $Q_{1\%}$ Јадра. На тај начин би се остварио много повољнији хидраулички режим, чиме би се битно смањио интензитет флувијалне ерозије и повећала пропусна моћ за велике воде. Потребно је и заштитити корита Јадра и навозне рампе у зони моста код Горњег Добрића (km 11) крупним каменом/каменом у бетону које су однешене у току мајских поплава 2014. године.

Насипи везног канала Јадар – Лешница немају довољну висину, што је видело током поплаве 2001. и 2014. године, када је дошло до њиховог преливања. У време поплаве из 2014. године евидентирано је преливања велике воде Лешнице на средишњем делу деснообалног насипа везног канала на два локалитета (km 0,8 и km 1,2). Према томе, у оквиру радова на формирању јединственог система заштите дуж тока Јадра, потребно је успоставити континуалну одбрамбену линију одговарајућих карактеристика дуж везног канала Јадар-Лешница, као и узводно од везног канала до високог терена.

6.2 Средњи сектор Јадра, од Горњег Добрића (km 11) до ушћа Пецке (km 54)

Средњи део тока Јадра дужине око km 44 (узводно од моста у Горњем Добрићу km 11, до Осечине ~ km 55) са пољопривредним земљиштем у приобаљу, нема објекте заштите од поплава. Имајући у виду да се на средњем сектору Јадра, у широкој речној долини, налазе паралелни токови Јадра и притоке Корените, логично је да се техничка решења регулације ових водотока третирају интегрално. То значи да решења уређења Јадра и Корените морају бити међусобно повезана, тако да се реализује једна техничка целина заштите подручја између ова два водотока. [5] и [7]. На овом сектору треба сачувати ретензиону функцију јечне долине за екстремно велике воде да не би били погоршани услови заштите од поплава на низводном сектору.

Интегрално решење регулације Јадра и Корените укратко подразумева следеће:

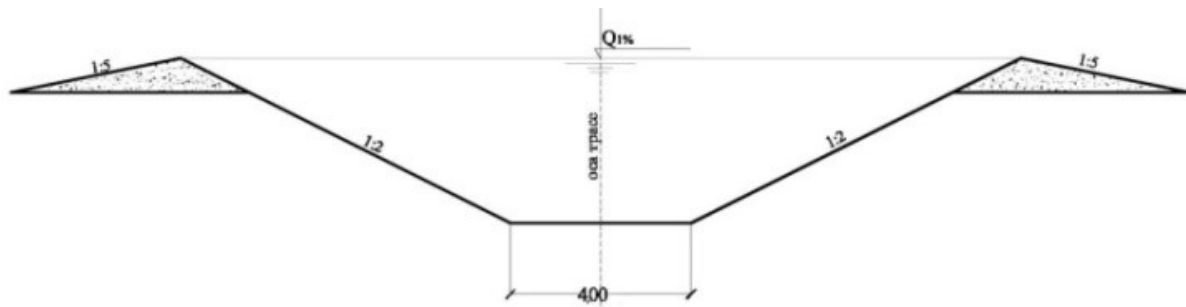
- Радови на Јадру [5]
 - Изградњу левообалног насипа-депоније дуж Јадра, са круном на коти $Q_{5\%}$. Насип је троугаоног облика са небрађеном косином нагиба 1:2 и брађеном косином нагиба 1:10, дужине око 6 km. Насип прати минор корито Јадра на минималном растојању 50 m.
 - Уклањање 5 постојећих мостова и изградња нових на местима где су неопходни.
- Радови на Коренити [5]
 - Изградња растеретног канала од Корените до Јадра дужине 1,2 km са успорним левообалним насипом до Јадра и пратећим објектима. Изградњом растеретног канала, део протока великих вода Корените би се усмеравао директно према Јадру, док би други део ишао регулисаним коритом Корените, до садашњег ушћа у Јадар.

- Изградња деснообалног насипа у зони ушћа Корените у Јадар, дужине 1,4 km.
- Уређење Корените од km 0 до локалног моста на km 9. Радови се састоје од регулације корита Корените са навишењем обала до $Q_{2\%}$ Корените до ушћа у Јадар, у условима расподеле протока на растеретни канал и корито.
- Изградња деснообалног насипа Корените у зони ушћану Јадар.
- Регулација корита Корените и надвишење обала од km 9 до km 10.

6.3 Узводни сектор Јадра, од ушћа Пецке (km 54) до „гвозденог моста“ (km 61)

На најузводнијем потезу реке, у насељу Осечина, делимично је изведена регулација водотока у функцији заштите од поплава. Предлог решења комплетне регулације овог сектора се мора заснивати на обједињавању и усаглашавању техничких решења регулације из пројектне документације за потез узводно од Осечине и потез низводно до ушћа Пецке, са постојећом регулацијом кроз Осечину.

На деоници Јадра одушћа Пецке km 54 до ушћа Остружањске реке km 57 треба применити принцип „пољске“ регулације са једногубим трапезним коритом и обостраним насипима-депонијама до коте $Q_{1\%}$ Јадра [2], што се види на слици 7.

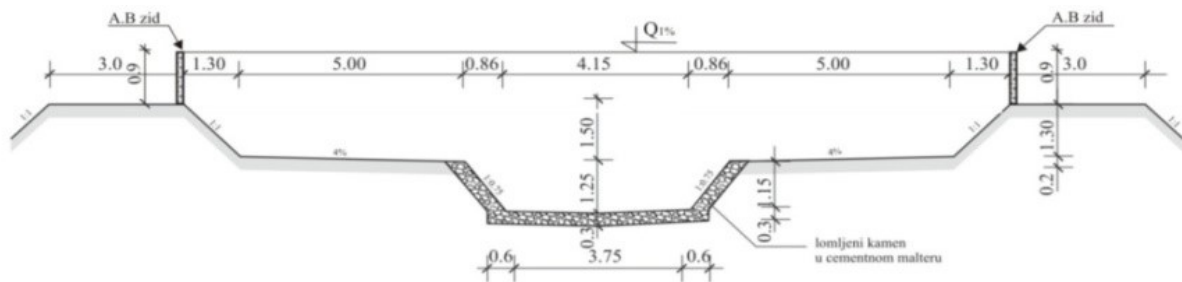


Слика 7. Типски профил „пољске“ регулације на потезу од ушћа Пецке (km 54) до ушћа Остружањске (km 57)

Figure 7. Typical cross-section of the "natural" type of channelized river section from the Pecka (km 54) to the Ostružanjska River mouth (km 57)

На потезу планираном за извођење „градске“ регулације водотока од ушћа Остружањске реке (km 56,9) до моста у центру Осечине до (km 57,3), потребно је усклађивање хидротехничке и урбанистичке функције регулисаног корита. Стога је пројектовано двогубо трапезно корито са обостраним насипима до коте $Q_{1\%}$. Минор корита треба обложити каменом у бетону, док се мајор корито и насипи затрављују.

На деоници од моста у центру Осечине (km 57,3) до ушћа Ловачке реке (km 58) изведена је регулација минор корита са обостраним насипима је (типски профил на слици 8). У Генералном пројекту [5] добијени су знатно већи протоци меродавних великих вода па ову деоницу треба реконструисати надвишењем заштитних објеката тј. АБ зидом због недостатка простора. Минор корито заштитити каменом утиснутим у бетон а форланде затравити.



Слика 8. Типски попречни профил регулисаног корита Јадра кроз Осечину - од моста у центру Осечине (km 57,3) до ушћа Ловачке реке (km 58)
 Figure 8. Typical cross-section of the channelized river section of the Jadar through Osečina - from the bridge in Osečina city centre (km 57,3) to the Lovačka River mouth (km 58)

Регулација ове деонице од Ловачке реке km 58 до гвозденог моста km 61,3 није изведена. Ова деоница Јадра има хетерогене карактеристике, са потезима кроз град и кроз пољопривредно подручје. Сагласно томе, пројектована су два различита типа регулације – на низводном потезу (km 58 - km 59,6) „градски“ тип регулације, а на узводном (km 59,6 - km 61,3) „пољски“ тип регулације, као на низводним деоницама [4].

Литература

1. Главни пројекат регулације водотока Јадар и Лешница од ушћа до пута Јадранска Лешница - Козјак, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 1988.
2. Главни пројекат регулације реке Јадар у Осечини, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 1999.
3. Измене главног пројекта регулације реке Јадар у Осечини за потребе извођења хитних радова на повећању пропусне моћи речног корита у зони моста у центру Осечине, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2002.
4. Главни пројекат регулације реке Јадар у Осечини од ушћа Ловачке реке до гвозденог моста на путу за Ваљево, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2003.
5. Генерални пројекат радова и мера за заштиту од вода у сливу реке Јадар, Књига 1: Подлоге, Књига 2: Генерални пројекат, Књига 3: Претходна студија оправданости, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2009.
6. Главни пројекат рехабилитације система за заштиту насеља и пољопривредног комплекса од великих вода реке Јадар (Дрина-Горњи Добрић), Санација регулисаног корита и заштитних насипа реке Јадар, Прва фаза - од km 2+610 (мост у Јелаву) до km 8+393 (железнички мост), Свеске 1, 2 и Анекс, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2009.
7. Главни пројекат изградње система Јадар-Коренита-растеретни канал, Регулација реке Корените на сектору од ушћа (km 0+000) до моста на путу Лозница-Ваљево (km 10+100) са растеретним каналом, Свеске 1, 2 и 3, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2009.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

8. Теренски хитни истражни радови, Геодетски истражни радови у сливу Јадра, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2014.
9. Анализа хидролошких и метеоролошких услова на сливовима Колубаре, Дрине, Саве, Велике Мораве и Млаве у мају 2014. године, РХМЗ, Београд јун 2015. година
10. Експертиза поплавног догађаја из 2014. Године са концепцијом техничког решења хитних радова на заштити од великих вода Јадра и Корените, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2015.

Шта после поплаве 2014?

Марина Бабић Младеновић¹
Васиљка Коларов²

АПСТРАКТ: Поплаве су природне катастрофе које су се дешавале у прошлости и дешаваће се у будућности, са различитим последицама по друштво, економију и природу. Поплава каква се догодила у мају 2014. године, која је захватила велики део региона (Босну и Херцеговину, Хрватску и Србију) није забележена у новијој историји на овом подручју. Поплавама су захваћени мањи, бујични токови, водотоци средње величине слива, али и велика, међународна река, Сава. Ове поплаве су указале на бројне проблеме као што су слаба места на заштитним објектима и непостојање друге одбрамбене линије за локализацију поплава, али и на неопходност унапређења управљања ризицима од поплава (на националном и међународном нивоу) и активне одбране од поплава. У овом раду се разматрају могући видови унапређења система заштите и одбране од поплава у оквиру сектора вода.

Кључне речи: поплава 2014, управљање ризицима од поплава

What after the 2014 flood?

ABSTRACT: Floods are natural phenomena that have occurred in the past and will continue to occur in the future, with various consequences for the society, economy and nature. Flood in May 2014, which affected a large part of the region (Bosnia and Herzegovina, Croatia and Serbia) was not recorded in recent history in this area. Floods have affected smaller, torrential streams, watercourses with medium-sized basins, but also a major, international Sava River. These floods have pointed to numerous problems such as critical spots on the flood protection structures and the absence of second lines of defence for localization of floods, but also the need to improve flood risk management (on the national and international levels) and active flood defence. This paper discusses the possible forms of improvement of the flood protection system and of the flood defence, within the water sector.

Key words: 2014 flood, flood risk management

¹ Др Марина Бабић Младеновић, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд, marina.babic-mladenovic@jcerni.co.rs

² Мр Васиљка Коларов, дипл. инж. пољ., Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд

1 Увод

Сезонске осцилације нивоа и протока вода, као и плављење приобаља, природне су одлике водотока. Међутим, поплаве су ситуације екстремног отицаја вода, када долази до привремене покривености водом земљишта које обично није покривено водом те бивају угрожени људски животи, материјална добра, привреда, инфраструктура и ресурси.

Приликом израде Прелиминарне процене ризика од поплава на територији Републике Србије, анализиран је период 1965-2011. и идентификоване су 72 поплаве спољним водама које су имале значајне штетне последице [3]. У маловодном периоду од 1987. до 1998. није било значајних поплава, али су после тога учестале појаве великих вода на бројним водотоцима.

Поплаве су се у последњих 50 година најчешће јављале услед изливања воде из корита мањих водотока у сливу Мораве, Колубаре, Дрине, Млаве, Пека, Тимока, као и на банатским водотоцима. Дешавале су се претежно на деоницама без изграђених система заштите од поплава, али понегде и услед преливања и рушења ових објеката.

Озбиљне ситуације биле су 2006. и 2013. године на Дунаву, 2006. на Тиси, док су се 2010. године велике воде јавиле на већем броју сливова (Тимок, Јужна Морава, Дрина, Колубара). Међутим, постојећим заштитним објектима обезбеђена је успешна одбрана од поплава [1].

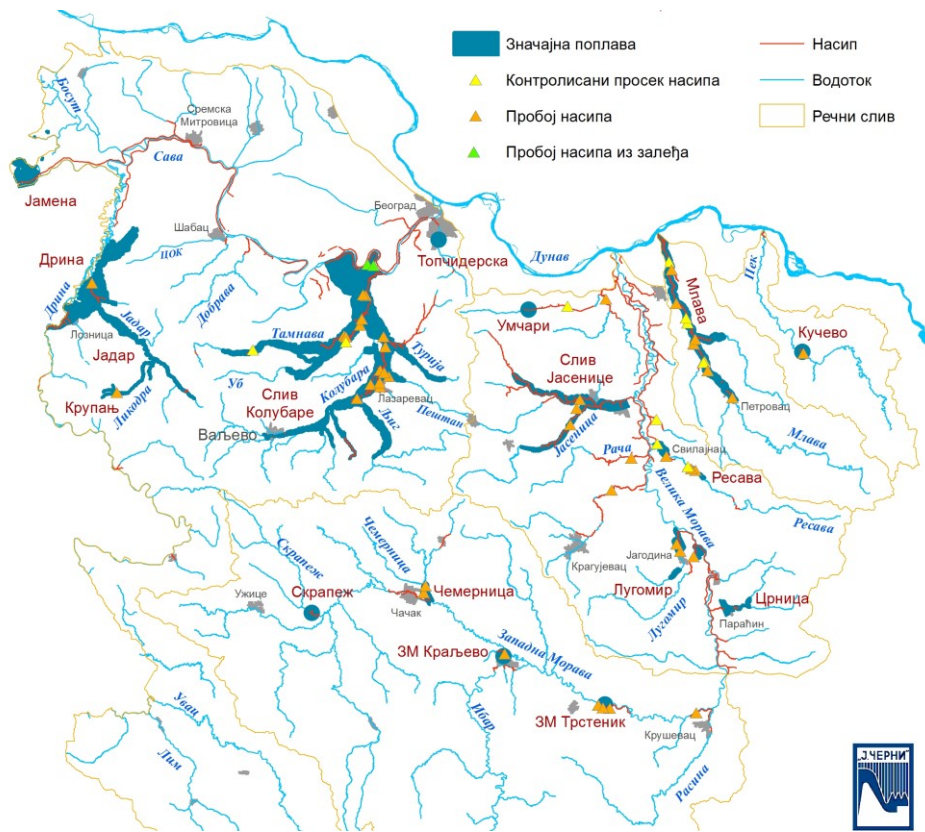
Ово није био случај у мају 2014. године, када су, као последица екстремних метеоролошких услова, превазиђени меродавни протоци за димензионисање заштитних објеката на водотоцима у сливовима Саве (нарочито Колубаре и Дрине), Велике Мораве и Млаве, истовремено.

2 Последице поплава

2.1 Поплава у мају 2014. године

Србију су се у другој половини априла, почетком маја и средином маја 2015. године десиле значајне кишне епизоде, чији је комбиновани ефекат била појава екстремно великих вода. На великом броју водотока су повратни периоди пикова поплавних таласа били изузетни [7]. На горњем току Колубаре повратни период максималних протока је био око 125, а на средњем и доњем делу тока (Словац и Дражевац) више од 800-1000 година. На притокама Колубаре су такође екстреми повратних периода од 80 година (Градац) до 250 година (УБ). У сливу Дрине, која је у доњем току (х.ст. Радаљ) имала талас велике воде повратног периода 20 година, екстремне велике воде су забележене на притокама, посебно на Јадру са таласом чије је повратни период био нешто изнад 100 година. На Западној Морави је пик таласа био изнад 100-годишњег, док на Великој Морави није био тако значајан.

Изузетно велика вода се јавила на току Саве узводно од Србије, што се процењује као догађај 1000-годишњег повратног периода. На српском сектору је повратни период максималног протока у поплавном таласу био 100 година, јер су се велике количине воде ретензирале у поплавленим подручјима у Хрватској и Бих. Уз велике напоре избегнута је катастрофа у Мачви и Срему, иако је део Срема био поплавлjen из залеђа услед продора насипа непосредно узводно од границе.



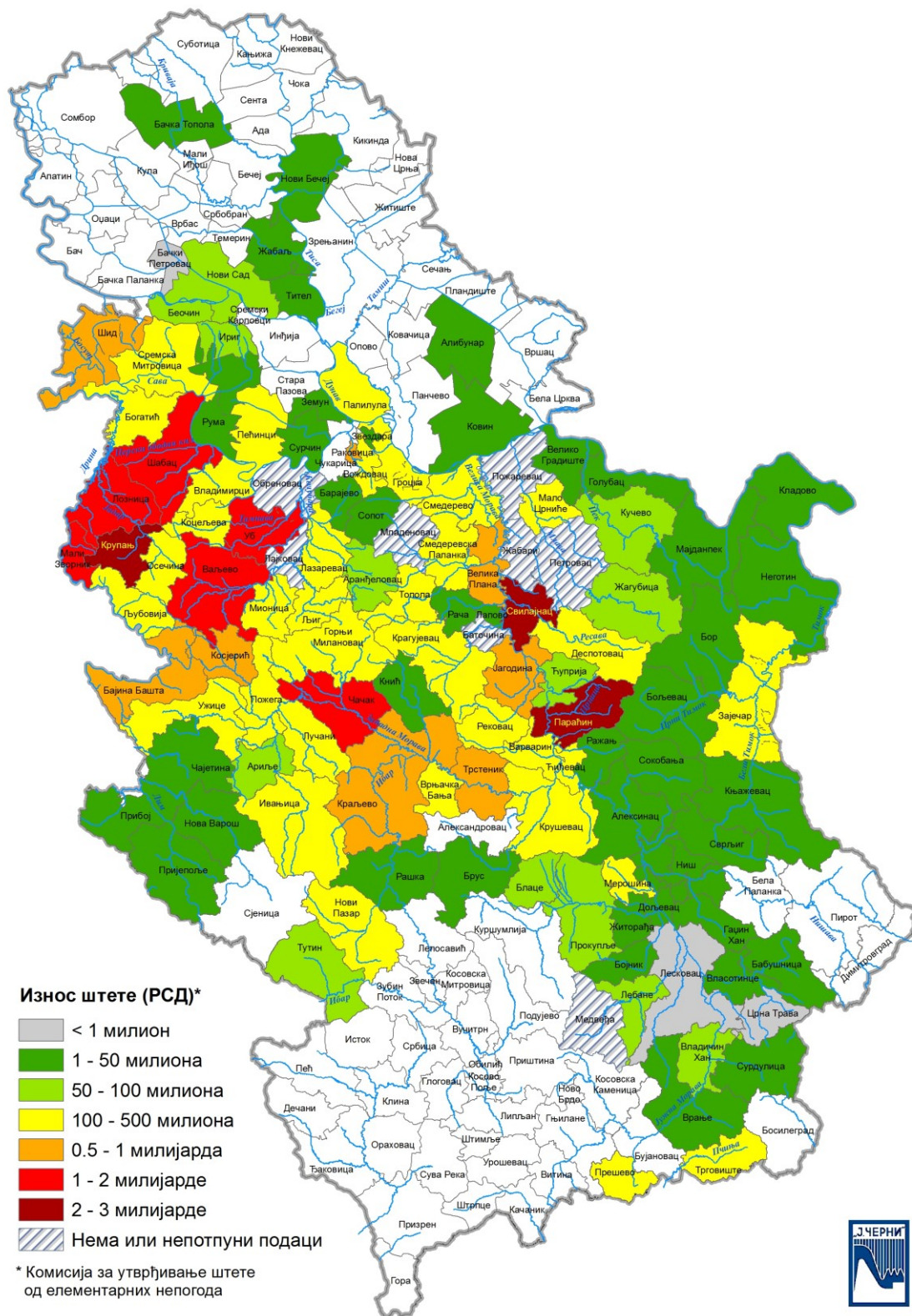
Слика 1. Значајне поплаве у мају 2014. [4]
 Figure 1. Significant floods in may 2014 [4]

Како су у мају 2014. године протоци меродавни за димензионисање објеката за заштиту од поплава превазиђени, дошло је до отказа постојећег система заштите на великом броју локалитета. Услед изливања на брањеним и небрањеним деоницама поплављено је око 800 km² територије (слика 1). Штета услед поплава и клизишта износила је према проценама јединица локалних самоуправа око 31,7 милијарди динара (слика 2), уз сличне штете које су претрпела јавна предузећа [6]. На територији Републике Србије су са угрожених подручја евакуисана 31.879 лица, од тога око 25.000 са подручја најтеже погођене општине Обреновац [2]. Према саопштењу МУП-а, за време поплава умрло је 57 људи, а од тога 23 особе су се утопиле.

2.2 Могуће будуће поплаве

Поплаве у мају 2014. године су биле екстремне и са катастрофалним последицама, иако нису погодиле приобаља великих река (осим Саве, где је плављење приобаља избегнуто уз велике напоре, али првенствено због смањења пика после изливања воде на подручју Хрватске и Босне и Херцеговине).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 2. Штета од поплава и клизишта у априлу и мају 2014. [4]
Figure 2. Floods and landslides damage in April and May 2014 [4]

Треба стално имати у виду да велике реке, Дунав, Тиса и Сава, имају највећи потенцијал штета, до којих би дошло у случају преливања или пробоја насипа. У долинама ових река смештени су највећи градови и привредни објекти, те је и највећи ризик од поплава. По величини потенцијално плавних зона се истичу и приобаља банатских водотока, Дрине, Велике, Јужне и Западне Мораве, Колубаре и Млаве. Са друге стране, мање реке представљају велику опасност због свог бујичног карактера, који ограничава време најаве и ванредног деловања.

Честе и велике штете у прошлости најчешће су биле последица непланске урбанизације, са променом услова у приобаљу, као и незаокружених одбрамбених система и/или превазиђеног степена заштите. Такво стање се мора превазићи, да се штете не би понављале и у будућности.

Брањена подручја су често пространа, без локализационих насипа, који би омогућили ефикасну локализацију евентуалног пробоја насипа. Објекти за локализацију поплава посебно недостају у зонама неких већих градова, који би могли да буду угрожени продорима насипа на узводним секторима водотока (пример је поплава Обреновца, 2014. године).

Грубо је процењено да потенцијално поплавна подручја дуж највећих река у Србији покривају скоро 12.000 km². Приближно 1,5 милиона становника је потенцијално директно или индиректно поплавама. Сва већа насељена места су заштићена, углавном од 100-годишњих великих вода.

Карте угрожености и карте ризика од поплава, које представљају подлогу за валоризацију стварних или потенцијалних штета и израду планова управљања ризицима од поплава, урађене су за сада само за значајна поплавна подручја дуж Дунава и у сливу Велике Мораве, док ће у наредном периоду овакве карте бити урађене и за остала значајна поплавна подручја.

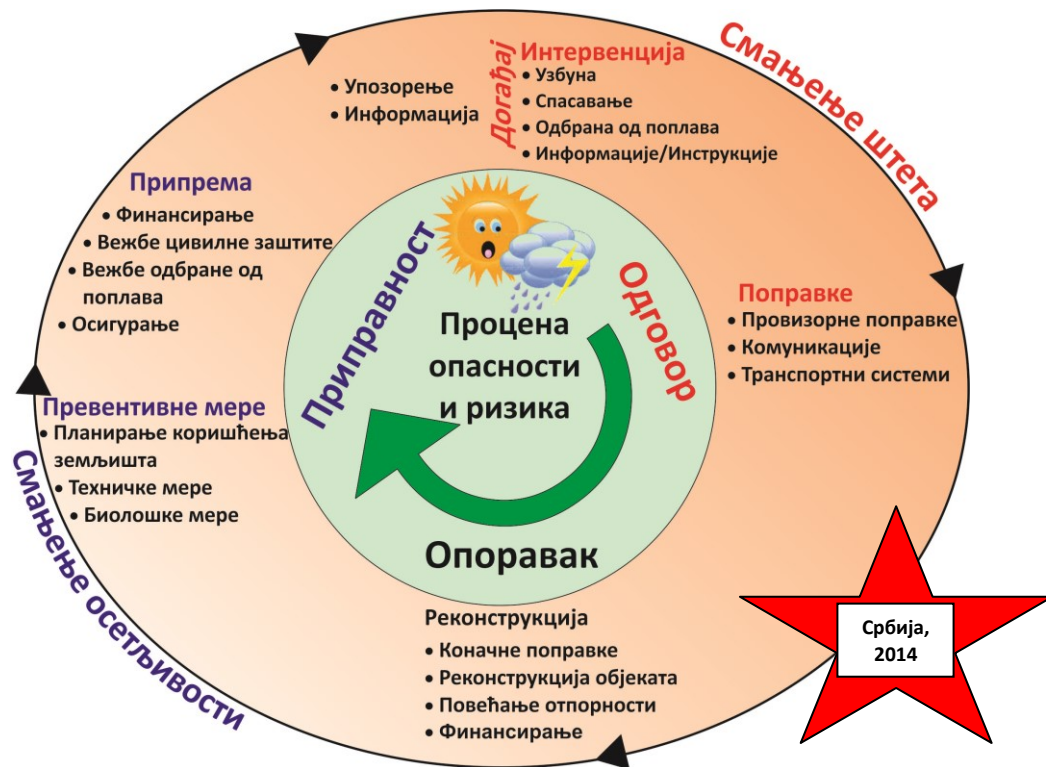
3 Унапређење заштите од поплава

Ризик од штетног дејства вода у Србији не може се у потпуности елиминисати, али се мора смањити на друштвено и економски прихватљиву меру. Економски оправдана заштита од штетног дејства вода представља обавезу Републике Србије, аутономне покрајине и локалне самоуправе, јер се њоме штите људи, природна и друга материјална добра и ресурси и обезбеђују услови за бољи друштвени и привредни развој.

После катастрофалне поплаве 2014. године имамо прилику да се, након неопходних поправки на постојећим објектима заштите, дефинише адекватан комплекс превентивних мера за сваки слив и реализује у планском периоду.

Генерални циљ нашег друштва мора бити смањење ризика од штетног дејства вода. Овај стратешки циљ се може постићи адекватним управљањем ризиком од поплава, у коме поред сектора вода, учествују и други субјекти друштва (министарства, локалне самоуправе, становништво).

Управљање ризиком од поплава је цикличан процес, који се састоји од 3 фазе: одговор на поплавни догађај, опоравак и приправност заследећи догађај. После катастрофалне поплаве 2014. године имамо прилику да се, након неопходних поправки на постојећим објектима заштите, дефинише адекватан комплекс превентивних мера за сваки слив и реализује у планском периоду.



Слика 3. Циклус управљања ризиком од поплава [5]
 Figure 3. Flood risk management cycle [5]

Планови управљања ризицима од поплава треба да буду донети до 2017. године за територију Републике Србије и за водна подручја. Планове ће припремати надлежни државни органи и јавна водопривредна предузећа, у складу са својом територијалном надлажношћу. Притом је водопривреда преваходно надлежна за планирање и реализацију превентивних мера, које укључују уређење водотока, изградњу система за заштиту од спољних и унутрашњих вода, као и уређење ерозионих подручја и бујица. Решења заштите од поплава треба засновати на савременим светским трендовима и актуелном стању система, а динамика реализације ће зависити од економске снаге друштва.

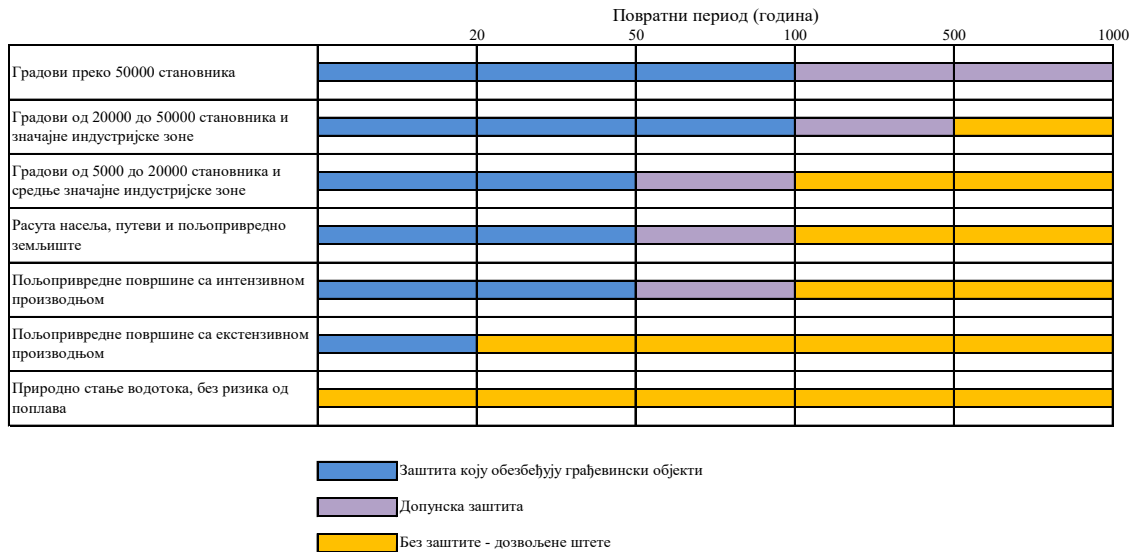
Заштита приобаља великих и средњих река, односно вода 1. реда, и даље се мора ослањати на хидрограђевинске објекте, од чијег ће стања и функционалности зависити ефикасност заштите.

Степен заштите од поплава које треба да обезбеде ови објекти зависи од техничко-економских, еколошких, социјалних и других критеријума, услова и ограничења. Дефинише се за сваки систем или касету (брањени простор), на основу броја становника и висине потенцијалних штета од поплава. Степен заштите који обезбеђују грађевински објекти једнак је повратном периоду велике воде, која је меродавна за димензионисање објекта. Међутим, у условима климатских промена и антропогених утицаја мењају се и услови настанка и карактеристике великих вода, па меродавни протицај више није непроменљива категорија. Стога су за обезбеђење одговарајућег степена заштите потребне и допунске мере и радови (мобилни системи у градовима, реконструкција објеката).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Препоручује се да се градови преко 20000 становника и значајне индустријске зоне штите сталним објектима до нивоа 100-годишње велике воде, али да се допунском (мобилном) заштитом обезбеде и од 500-годишње или 1000-годишње воде (за велике градове као што су Сремска Митровица, Шабац и Београд).

Мања насеља и квалитетне пољопривредне површине такође треба обезбедити од плавлјења, али са нижим степеном заштите. Друге пољопривредне површине треба заштити само од мањих поплавних таласа, а што веће просторе оставити у природном стању да би могли да прихвате део великих вода.



Слика 4. Препоручени степен заштите од поплава [5]
Figure 4. Recommended level of flood protection [5]

На међународним транзитним водотоцима (Сава и Дунав) треба формирати нужне ретензије на мање вредним подручјима (шумским и пољопривредним), ради редукације врхова поплавних таласа који се формирају на територијама узводних земаља. Погодно подручје за нужну ретензију на Сави је Горњи Срем (поплављен у мају 2014. године) са претежно шумским и пољопривредним земљиштем и неколико села, која би се заштитила локалним насипима.

Заштита од поплава приобаља мањих водотока мора се у наредном периоду значајно побољшати, имајући у виду и могуће погоршање режима великих вода услед климатских промена. У том контексту, што више треба промовисати активне мере заштите од поплава, односно, коришћење акумулација и ретензија, растеретних и ободних канала за редукацију поплавних таласа. Поред овога, благовремено обавештавање и евакуација људи и добара остају и даље битне активности у заштити од поплава.

Неадекватно коришћење водног земљишта (корито за велику воду односно „реална“ плавна зона) и потенцијално плавних зона (заштићених насипима) је узрок великих штета на нашим просторима. Стога је потребно урадити карте угрожености и карте ризика од поплава, разграничити водно земљиште, извршити његово укњижење у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

земљишне књиге и унос у просторне планове, а затим контролисати његов начин коришћења.

Ризик од поплава се битно разликује у појединим деловима речне долине, што треба имати у виду при планирању изградње стамбених и инфраструктурних објеката. У долинама водотока без изграђених заштитних система постоје „реалне“ плавне зоне које се могу поделити на два битно различита дела: зону проточне инундације и зону непроточне (ретензионе) инундације. Велике воде у проточном делу инундације имају динамички утицај, јер се ту при великим водама одвија течење са великим брзинама, уз масовно кретање речног и површинског наноса (пример Крупањ 2014. године – слика 1). Ради заштите људских живота и имовине, регулативом треба забранити изградњу нових објеката у проточном делу инундације, а било би пожељно да се постепено изместе постојећи објекти. У делу реално плавне зоне који није проточан већ има ретензиону функцију, градња се може дозволити под условом да власник објекта обезбеди противпоплавну заштиту или други вид обезбеђења од штета. Најосетљивије објекте, постројења и инсталације, који су од посебног значаја за сигурност становништва, одбрану или одржавање јавног реда, или чија би деструкција угрозила становништво, треба постављати ван зона ризика. Законом ограничити, кроз посебне услове и дозволе, даље повећање ризика од поплава у потенцијално плавним зонама (заштићени подручјима). У реално и потенцијално плавним зонама примењивати нове принципе и методе грађења којима се смањује ризик односно штета од поплава, а постојеће изворе загађења постепено санирати.

У поплави 2014. године велике штете су нанете инфраструктурним објектима, посебно мостовима. У наредном периоду је нове мостове неопходно пројектовати и изводити тако да не буду препрека течењу великих вода и извршити реконструкцију мостовских прелаза недовољних габарита.

Изградња насипа и других објеката није довољан услов за успешну заштиту људи и добара. У складу са концептом одрживог развоја у области заштите од вода, у Србији се у будућности заштита плавних површина може постићи само адекватном комбинацијом инвестиционих (хидрограђевинских) радова и неинвестиционих радова и мера. Неинвестиционим мерама заштите од поплава утиче се на смањење штета било превентивним деловањем, било добром организацијом спровођења одбране од поплава.

Основни постулат је да се интегрално решење заштите од поплава мора дефинисати на нивоу слива, а не да се заштита обезбеђује парцијалним решењима, са локалним ефектима и у функцији политике, што је до сада била честа пракса код нас. Само на тај начин моћи ће да се дефинише технички изводљиво, економски и еколошки оправдано и одрживо решење заштите од поплава.

Да би се обезбедио адекватан правни оквир за имплементацију предложених мера и активности у области заштите од поплава, неопходно је што пре законску и другу регулативу прилагодити принципима одрживог развоја. Такође, потребно је започети или интензивирати и друге активности које су предуслов за ефикаснију заштиту од поплава (едукација, информисање, побољшање прогнозе, мониторинга и др.).

Увођење неинвестиционих мера заштите од поплава на територији Србије мора се одвијати постепено: (а) У почетној фази се ради на припреми подлога (мапа ризика, планова, регулативе, итд.); (б) Фаза имплементације неинвестиционих мера у заштиту од поплава (постављање система за узбуњивање, увежбавање служби и становништва

за понашање у ванредном стању, итд.); (в) Фаза примене неинвестиционих мера, која подразумева стално критичко преиспитивање, дораду и унапређење.

За спровођење бројних неинвестиционих мера, поред сектора вода, од посебног значаја је учешће и других институција (службе за заштиту и спасавање, хидрометеоролошке службе, здравствене службе, просторни планери, заштита природе, јединице локалне самоуправе), затим корисника и управљача вишенаменских акумулација, као и грађана, невладиних организација, привредних друштава и предузетника на потенцијално угроженим подручјима.

Истовремено је неопходно јачање свести јавности о "капацитетима" заштитног система, односно, његовим ограничењима. Сектор вода је одговоран само за оне штете од поплава које изазивају поплавни таласи повратног периода мањег од оног који је био меродаван за димензионисање објеката и система заштите од спољних вода, уз обезбеђен услов њиховог доброг одржавања. Преостале ризике носе власници и корисници имовине у потенцијално плавним зонама.

4 Приоритети у наредном периоду

Због вишедеценијског тренда смањења улагања у водопривреду, радови на редовном одржавању, доградњи или изградњи нових објеката извршавани су у смањеном обиму, а постојећи систем за заштиту од поплава је смањене функционалности и подложен отказу. Стога у наредном периоду приоритети треба да буду:

- хитна реконструкција одбрамбене линије на десној обали Саве на подручју Мачве, у сливу Колубаре и на другим значајним поплавним подручјима погођеним поплавом 2014. године,
- доградња постојећих и изградња нових заштитних објеката на значајним поплавним подручјима погођеним поплавом 2014. године,
- комплетирање, доградња и реконструкција објеката и система за заштиту од поплава центара штете у приобаљу великих река (Дунав, Сава, Морава) и река средње величине,
- повећање ефикасности службе за одбрану од поплава (људство и опрема),
- модернизација постојећег система за праћење и прогнозу хидрометеоролошких појава, а на сливовима без објеката заштите од поплава унапређење система за прогнозу поплава и рано упозоравање,
- израда карата угрожености, карата ризика од поплава и планова управљања ризицима од поплава,
- одређивање ерозионих подручја и противерозионо уређење сливова.

5 Закључци

У мају 2014. године Србију и регион (Босну и Херцеговину и Хрватску) су захватили екстремни метеоролошки услови, који су довели до истовремене појаве поплава на великом броју водотока. Значајне поплаве са великим штетама су регистроване на малим и средњим рекама, на нештићеним као и на штићеним

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

деоницама, услед превазилажења меродавног нивоа заштите. Ситуација на Сави је била веома критична, а веће штете су избегнуте услед изливања ове реке на подручју Хрватске и Босне и Херцеговине.

Поплава у мају 2014. године је показала да је неопходно унапређење система заштите од поплава у Србији. Констатовано је да примена првенствено пасивних мера заштите (насипа) није довољна, као и да су насељена места, укључујући и веће градове, недовољно заштићена. Зато је неопходно да се у наредном периоду, поред редовног одржавања и надоградње постојећих објеката где је потребно, већа пажња посвети активним мерама заштите, неинвестиционим мерама и укључивању свих угрожених субјеката у заштиту од поплава.

Литература

1. Бабић Младеновић М., Коларов В., (2014.), *Поуке поплаве 2014. године*, Вода и санитарна техника, ISSN 0350-5049, 44, 5-6, 35-45.
2. Влада РС (2014.), *Извештај о елементарној непогоди – поплави која је задесила Републику Србију и мерама које су предузете ради спасавања становништва и одбране угрожених места од поплава*, Влада Републике Србије, 2. јул 2014.
3. ИЈЧ, (2011.), *Прелиминарна процена ризика од поплава на територији Републике Србије*, Институт за водопривреду "Јарослав Черни" АД, Београд.
4. ИЈЧ, (2015.), *Експертиза поплавног догађаја на подручју Србије у 2014. години*, Институт за водопривреду "Јарослав Черни" АД, Београд.
5. ИЈЧ, (2015.), *Стратегија управљања водама на територији Републике Србије - нацрт*, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Београд.
6. КУШЕН, (2015.), *Извештај о процени штете од поплава у 126 локалних самоуправа*, Комисија за утврђивање штете од елементарних непогода.
7. РХМЗ, (2015.), *Анализа хидролошких и метеоролошких услова на сливовима Колубаре, Дрине, Саве, Велике Мораве и Млаве у мају 2014. године*, Републички хидрометеоролошки завод Србије, Београд.

Bujične poplave u Tekiji septembra 2014. godine i radovi na sanaciji

Irina Milovanović¹
Nikola Zlatanović²
Jelena Čotrić³
Renata Puzović⁴

APSTRAKT: Područje istočne Srbije je u septembru 2014. godine zahvatio ciklon iz Centralne Evrope, donoseći nezapamćene količine padavina i prouzrokujući razorne bujične poplave. Najveću štetu od klizišta i bujičnih poplava nastalih zbog velikih količina kiše, koja je pala za samo nekoliko sati 15. septembra, pretrpelo je naselje Tekija. Pričinjena materijalna šteta je procenjena na nekoliko miliona evra. Tekija je bila potpuno odsečena i stanovništvo je evakuisano helikopterima i brodovima. U ovom radu su opisani projektovani i većim delom već izvedeni radovi na zaštiti naselja Tekija od bujičnih voda. Projektovano je rešenje koje uključuje tehničke radove (bujične pregrade, regulacije korita, zatvorene kolektore i propuste), biotehničke (jednostruki i dvostruki pleteri) i biološke radove (pošumljavanje i popunjavanje sastojina). Posledice ovakvih prirodnih katastrofa ukazuju na veliki uticaj koji klizišta i bujične poplave imaju na ljudske živote i imovinu, kao i na značaj preventivnih radova na uređenju celokupnog slivnog područja.

Ključne reči: bujične poplave, uređenje bujica

Devastating flooding in Tekija in September 2014 and mitigation measures

ABSTRACT: In September 2014, much of eastern Serbia was hit by a cyclone arriving from central Europe, releasing unprecedented amounts of rainfall and causing devastating torrential flooding. Tekija suffered the most extensive damage from landslides and torrential flooding caused by an exceptional amount of rain that fell over only a few hours on September 15th. The disaster resulted damages estimated at several million Euros to public and private property. Tekija was completely inaccessible, while people were evacuated by helicopters and boats. This paper focuses on the protection and mitigation measures that have been designed and are under construction, to reduce and minimise damages should a similar hazard reoccur. The designed measures include technical measures (check dams, channel works, culverts, etc.), biotechnical (wattleworks), and biological measures (afforestation and reforestation). The destruction caused by this event emphasizes the high cost imposed on life and property by landslides and torrential flooding, and the importance of preparing for such occurrences.

Keywords: torrential flood, flood protection measures

¹ Irina Milovanović, dipl.inž. šum, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, irina.milovanovic@jcerni.co.rs

² Nikola Zlatanović, dipl.inž. građ, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, nikola.zlatanovic@jcerni.co.rs

³ Jelena Čotrić, dipl.inž. šum, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, jelenacotric@gmail.com

⁴ Renata Puzović dipl.inž. šum, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Ul. Jaroslava Černog 80, Beograd, puzovicrenata@gmail.com

1 Uvod

Tekija je naselje u opštini Kladovo u istočnoj Srbiji sa skoro 1000 stanovnika. Smeštena u srcu Nacionalnog parka Đerdap, u klisuri brane Đerdap 1, u podnožju planine Miroč nasuprot rumunskog grada Oršova, predstavlja važnu stratešku i turističku tačku na obali Dunava. Prilikom izgradnje hidroelektrane Stara Tekija je potopljena i preseljena na sadašnju lokaciju. Naselje Tekija, kao i veći deo istočne Srbije, je u septembru 2014. godine zahvatio ciklon iz Centralne Evrope, donoseći nezapamćene količine padavina i prouzrokujući razorne bujične poplave. Tekija je pretrpela najveću štetu od klizišta i bujičnih poplava nastalih zbog velikih količina kiše, koja je pala za samo nekoliko sati 15. septembra. Jedna osoba je nastradala, tri su nestale a pričinjena materijalna šteta je procenjena na nekoliko miliona evra. Zbog oštećenih mostova svi putevi su bili u prekidu, tako da je Tekija bila potpuno odsečena i preko 500 ljudi je evakuisano helikopterima i brodovima.

U ovom radu su opisani događaji koji su prouzrokovali bujice i klizišta i radovi na zaštiti naselja Tekija od bujičnih voda koji su projektovani nakon poplava i koji su već izvedeni.

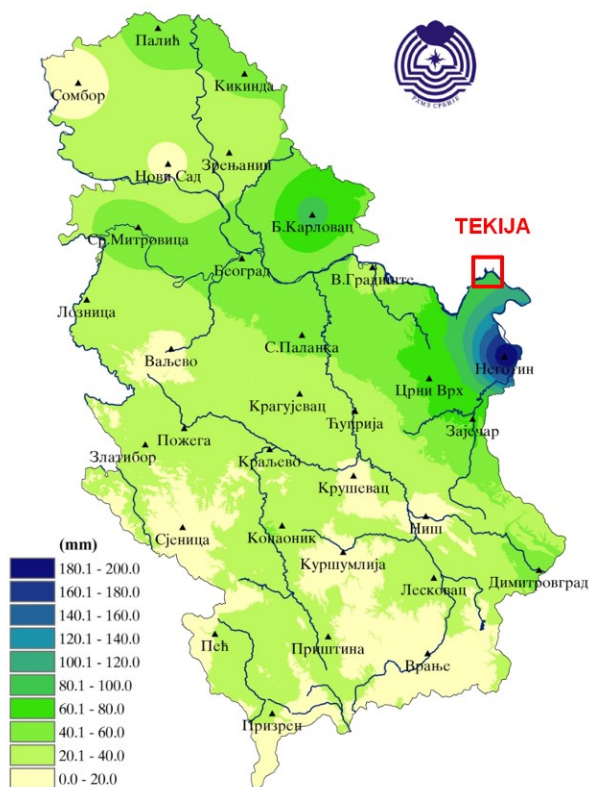


Slika 1. Bujični potoci koji gravitiraju ka naselju Tekija
Figure 1. Torrential streams that flow towards Tekija

2 Klimatološka situacija

Merene količine padavina u celoj 2014. godini (dnevni podaci RHMZ, Operativni bilteni) su značajno više od prosečnih na najvećem delu teritorije Srbije, pri čemu je njihov intenzitet u severnom, centralnom i zapadnom delu bio izražen tokom maja, a u istočnoj Srbiji tokom septembra. Raspored padavina na teritoriji Republike Srbije registrovan tokom perioda 15.09-21.09.2014. godine (preuzet iz biltena Hidrometeorološkog zavoda Srbije), na kome se jasno vidi koliko su u kratkom periodu ekstremne padavine zahvatile područje Negotinske krajine, prikazan je na slici 2. Treba imati u vidu da je ovakav raspored padavina dobijen interpolacijom podataka sa glavnih klimatoloških stanica (crni trouglovi). Na ovaj način dobijena količina padavina u Tekiji je mnogo manja nego na najbližoj stanici Negotin, dok su

prema svedočenju iz Tekije intenzitet i količina u stvarnosti bili mnogo veći. Nažalost, u blizini Tekije ne postoji adekvatna mreža kišomernih stanica, a najbliža je u Negotinu.



Slika 2. Raspored padavina na području Srbije u periodu 15-21.09.2014. godine (izvor: RHMZ Srbije)

Figure 2. Total precipitation over Serbia from 15th to 21st September 2014 (source: RHMSS)

3 Bujične poplave u Tekiji

Bujična kiša koja je 15.09.2014. godine pala u ataru sela Tekija izazvala je bujice i odrone zemljišta, stenske mase i drvene mase, koja je nošena bujicom načinila velike štete selu. Na slici 3 je prikazan primer oštećenja na kućama. Padine brda Bačija koje se nalazi neposredno u zaleđu naselja Tekija, su veoma strmog nagiba i predstavljaju eroziono područje. Veliki nagibi terena sa pretežno plitkim slojem zemljišta i veoma erodibilnom geološkom podlogom koju pretežno čine škriljci, objašnjavaju ogromne količine materijala kojim je zatrpana Tekija. Lokacije istaloženog mulja i nanosa se jasno vide na snimcima iz vazduha (slika 4).

Jedna osoba je nastradala, tri su nestale a pričinjena materijalna šteta je procenjena na nekoliko miliona evra. Zbog oštećenih mostova svi putevi su bili u prekidu, tako da je Tekija bila potpuno odsečena a preko 500 ljudi je evakuisano helikopterima i brodovima. Pokrenuti nanos je prouzrokovao dubinsku i bočnu eroziju u bujičnim jarugama i drastično ugrozio stabilnost strmih padina.

Veličini stihije koja je pogodila Tekiju, ključni negativan doprinos predstavlja nečinjenje u prošlosti u domenu protiverozionih radova i mera i zaštiti od bujica. Očigledno je

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

da se prilikom formiranja novog naselja Tekija strahovalo od plavljenja od strane Dunava, pri čemu su zanemarene opasnosti od bujica i erozije. Crkva i osnovna škola su izgrađene neposredno nizvodno od bujičnih jaruga. Tako je i bujični potok koji je u prošlosti proticao kroz novi centar sela Tekija pretvoren u stepenište a potencijalna velika voda usmerena ka bočnim strmim ulicama. Kao jedina zaštita izgrađen je obodni kanal neprimereno malih dimenzija koji je služio za prikupljanje vode koja se slivala sa okolnih brda posle kiše. Uz to kanal je bio i veoma zapušten i neodržavan.



Slika 3. Uništene kuće i crkva od bujičnog naleta
Figure 3. Destroyed homes and damaged church



Slika 4. Aerofoto snimak naselja Tekija pre (levo) i nakon bujične poplave (desno)
Figure 4. Aero-photo imagery of Tekija before (left) and after (right) the torrential flood

4 Radovi na sanaciji i uređenju bujica

Nakon katastrofalnih poplava započeti su hitni radovi na sanaciji i uređenju bujica u cilju sprečavanja šteta u budućnosti. Projektovane mere i radovi za zaštitu naselja Tekija od bujičnih voda (Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Zavod za zaštitu od bujica i erozije, 2014) kao preventivni radovi za smanjenje štete u slučaju ponovnih poplava su izvedeni kao hitni radovi. Projektovano je rešenje čiji je cilj stabilizacija padina, smanjenje erozije, zadržavanje nanosa u gornjim delovima sliva i uključuje tehničke radove (bujične pregrade, regulacije korita, zatvorene kolektore i propuste), biotehničke radove (jednostruki i dvostruki pleteri) i biološke radove (pošumljavanje i popunjavanje sastojina). Tehnički radovi u toku izgradnje su prikazani na slikama 5 i 6.



Slika 5. Ulivni objekat u cevovod u izgradnji u Tekiji, mart 2015.
Figure 5. Culvert inlet under construction in Tekija, March 2015.



Slika 6. Izgradnja glavnog kanala kroz stepenice u Tekiji, mart 2015.
Figure 6. Construction of the main flood channel in Tekija, March 2015



Slika 7. Izrada pletera, mart 2015.

Figure 7. Wattleworks under construction, March 2015

Radovima su obuhvaćena 3 bujična toka, na dve lokacije. Na prvoj lokaciji predviđeno je uređenje jednog bujičnog toka, pritoke potoka Oduš kao i izgradnja dve bujične pregrade za zaustavljanje nanosa. Nova regulacija potoka je do postojećih kaskada koje predstavljaju ulivni objekat u potok Oduš koji dalje vodi do Đerdapske akumulacije. Na drugoj lokaciji predviđeno je uređenje korita dva bujična toka uzvodno od naselja i uvođenje ovih tokova u glavni tok čije korito se formira kroz naselje, na mestu postojećih centralnih stepenica na trasi. U koritu oba bujična toka je predviđena po jedna bujična pregrada za zaustavljanje nanosa.

Izradom pletera u jarugama iznad naselja deluje se na zaustavljanje erozionog materijala, odnosno, formiranje zaplava koji ima manji pad od prvobitnog nagiba dna jaruge (ili povremenog vodotoka). Zaustavljeni materijal, u kome ima dosta hranljivih materija (erozioni produkti), veoma brzo obrasta autohtonom vegetacijom, čime započinje proces trajne stabilizacije. Svaki podignuti pleter svojim zaplavom deluje stabilizujuće na kosine. Izgradnja pletera na jednoj od 5 lokacija je prikazana na slici 7.

Projektom zaštite naselja Tekija od bujičnih voda predviđeno je protiveroziono pošumljavanje na ukupno 13 ha degradiranih površina iznad naselja Tekija, na području opštine Kladovo, na zemljištu koje je u zoni nacionalnog parka Đerdap.

Gornji delovi sliva će biti pošumljeni bukvom (3,98 ha) i hrastom (3,98 ha), dok je u donjem delu na kupiranim padinama predviđeno pošumljavanje crnim borom (4,64 ha), kao i bagremom (0,43 ha).

Zaštitna uloga vegetacije se ogleda u formiranju zaštitnog pokrivača koji štiti zemljište od udara kišnih kapi, početne faze pluvijalne erozije. Sprečavanjem erozije kišnim kapima, sprečava se i pluvijalna erozija. Najznačajnije je što su erozioni procesi zaustavljeni u početnoj fazi, ne dozvoljavajući napredovanje erozionih procesa koji destruktivno deluju na zemljište [3].

5 Zaključak

Posledice ovakvih prirodnih katastrofa ukazuju na veliki uticaj koji klizišta i bujične poplave imaju na ljudske živote i imovinu, kao i na značaj preventivnih radova na uređenju celokupnog slivnog područja. Projektovani tehnički, biotehnički i biološki radovi su neophodni kao prvi korak ka kompletnoj zaštiti stanovništava od bujičnih poplava i svih pratećih nepogoda. Po završetku radova, sledeći korak za nadležne institucije (u ovom slučaju opština) je podizanje svesti javnosti o poplavama kao i razvoj sistema rane najave.

Napomena

Istraživanje predstavljeno ovim radom je deo naučnog projekta “Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije” - TR37005 (2011-2015) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

Literatura

1. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Zavod za zaštitu od bujica i erozije, (2014), Glavni projekat zaštite naselja Tekija u opštini Kladovo od bujičnih voda
2. Republički hidrometeorološki zavod Srbije, (septembar 2014), Nedeljni klimatološki bilten
3. Stevanović, I., Lazaroski, D., Milojević, M., Živanović, M., Petrić, A., Drobnjak, A., Milovanović, I., Stefanović, M., Maksimović, D., (2015), Correlation between landslides, floods and erosions caused by catastrophic rainfall in Tekija, Srbija

План управљања ризицима од поплава на сливу Дунава

Марина Бабић Младеновић¹
Васиљка Коларов²

АПСТРАКТ: Међународна комисија за заштиту реке Дунав (ICPDR), у чијем раду учествује 14 земаља, припремила је први План управљања ризицима од поплава, у складу са Директивом ЕУ о поплавама. План је током лета 2015. прошао јавну расправу, а биће објављен крајем 2015. године. У овом раду приказане су најважније компоненте плана, односно циљеви и мере за достизање постављених циљева, са примерима добре праксе из других земаља и Србије. До 2017. године Србија треба да припреми свој План управљања ризицима од поплава, који ће бити у великој мери колинеаран са дунавским, али и знатно детаљнији јер се мора фокусирати на специфичности наше територије и хидрографске мреже.

Кључне речи: Дунав, план управљања ризицима од поплава

Flood risk management plan for the Danube River basin district

ABSTRACT: The International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR), consisting of 14 participating countries, prepared the first Flood Risk Management Plan, in line with the EU Floods Directive. In summer 2015 the Plan passed the public debate, and it will be released in late 2015. This paper presents the most important components of the Plan, which are the objectives and measures for achieving the set objectives, with examples of good practices from other countries and from Serbia. By 2017, Serbia should prepare its Flood Risk Management Plan, which will be largely collinear with the Danube Plan, but also much more detailed because the focus needs to be on the specifics of our territory and of the river network.

Key words: Danube, Flood Risk Management Plan

¹ Др Марина Бабић Младеновић, дипл. инж. грађ., Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, marina.babic-mladenovic@jcerni.co.rs

² Мр Васиљка Коларов, дипл. инж. пољ., Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд

1 Увод

Међународна комисија за заштиту реке Дунав (ICPDR) је припремила први План управљања ризицима од поплава на сливу Дунава (у даљем тексту План), за плански период 2015-2021. План је припремљен у складу са чланом 8(3) Директиве ЕУ о поплавама (у даљем тексту Директива), према којем је за међународне сливове потребно израдити јединствени план управљања ризицима од поплава или скуп планова усклађених на нивоу међународног водног подручја [2].

План се заснива на Прелиминарној процени ризика од поплава на сливу Дунава у оквиру које су дефинисана значајна поплавна подручја на којима постоје или се могу јавити значајни ризици од поплава, као и картама угрожености и ризика од поплава и националним информацијама о мерама за постизање заједничких циљева управљања ризицима од поплава на сливу.

Овај План треба да допринесе усклађивању мера за смањење ризика од поплава на територијама земаља у сливу Дунава и тиме смањењу евентуалних негативних прекограничних утицаја, у складу са принципом солидарности. У припреми плана су учествовале Немачка, Аустрија, Чешка, Словачка, Мађарска, Словенија, Хрватска, Србија, Босна и Херцеговина, Бугарска, Румунија и Молдавија, док се очекује да ће Црна Гора и Украјина учествовати у следећем циклусу управљања.

Србија је активно учествовала у припреми Плана, као и ранијих фаза спровођења Директиве ЕУ о поплавама на сливу Дунава. Дефинисане су и ICPDR-у достављене националне мере за остваривање заједничких циљева. Исте мере ће бити коришћене и у изради Плана управљања ризицима од поплава на територији Републике Србије, као и при изради планова за подсливове Дунава као што је Сава и евентуално Тиса.

Према Закону о водама, План управљања ризицима од поплава на територији Републике Србије и планови за водна подручја треба да буду припремљени до 2017. године. Уз овакав приступ („са врха наниже“), национални план ће водити рачуна о мерама са могућим прекограничним утицајима, како оним на подручју Србије, тако и у узводним и низводним земљама.

2 Циљеви управљања ризицима од поплава на сливу Дунава

Државе чланице ICPDR-а су договориле пет заједничких циљева управљања ризицима од поплава на нивоу међународног слива Дунава:

1. **Избећи нове ризике.** У просторном планирању, као и при планирању урбаног, руралног и индустријског развоја и изградње треба узети у обзир ризик од поплава. Нове активности у области пољопривреде, управљања шумама, енергетике, транспорта и урбаног развоја морају се планирати и реализовати без повећања ризика од поплава на узводним или низводним подручјима. Треба спречити повећање грађевинског земљишта у подручјима која су угрожена поплавама, да би се избегло повећање ризика.
2. **Смањити постојеће ризике.** Сврха Директиве ЕУ о поплавама је да успостави оквир за процену и управљање ризицима од поплава, са циљем смањења штетних последица по здравље људи, животну средину, културно наслеђе и привредне активности. Сви кораци у спровођењу Директиве о поплавама на сливу Дунава

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

(Прелиминарна процена ризика од поплава, израда карата плавних зона и припрема Плана) заснивали су се на овом начелу.

3. **Повећати отпорност.** Друштво мора адекватно да реагује током и непосредно након поплаве да би се ублажиле штетне последице и након поплавног догађаја вратио животни стандард на претходни ниво.
4. **Подигнути свест.** Повећањем свести свих који живе или раде уз реку, у потенцијално поплавном подручју, повећава се њихова спремност на деловање у случају поплаве. Чињеница је да угроженост од поплава често није позната јавности. Зато је потребно да држава обезбеди транспарентне и лако доступне планове за превенцију и заштиту од поплава. Сви угрожени субјекти треба да буду упознати са ризицима, да снесу одговорност и прилагоде своје активности заштити од поплава. Поред тога, потребно је обезбедити учешће јавности у доношењу одлука, као основ за успешно спровођење интегралних и свеобухватних оперативних планова.
5. **Применити начело солидарности.** У интересу солидарности, национални Планови управљања ризицима од поплава неће садржати мере које својим обимом и утицајем значајно повећавају ризике од поплава у узводним или низводним државама у истом речном сливу или подсливу, осим ако су оне усклађене и представљају договорено решење тих држава.

3 Мере за постизање заједничких циљева

Радна група ЕУ за поплаве је 2011. године за све елементе управљања ризицима од поплава (табела 1) предложила групе мера (табела 2) на основу којих је формирана шема за извештавање.

Табела 1. Елементи циклуса управљања ризицима од поплава [4]
Table 1. Elements of flood risk management cycle [4]

Аспекти управљања ризицима од поплава	Опис
Нема активности	Није предложена ни једна мера за смањење ризика од поплава у значајном поплавном подручју.
Превенција	Превенција штете изазване поплавама: <ul style="list-style-type: none">- избегавањем градње кућа и индустрије у садашњим или будућим поплавним подручјима;- прилагођавањем постојећих рецептора (људи, објекти, подручја и активности који би могли претрпети штету у случају поплаве) на ризик од поплава и обезбеђивањем да будуће активности узму у обзир ризике од поплава;- промовисањем адекватног коришћења земљишта.
Заштита	Примена инвестиционих и неинвестиционих мера за смањење вероватноће појаве поплаве на одређеном подручју.
Приправност	Информисање јавности о ризицима од поплава и начинима деловања у случају поплаве, укључујући и ванредне ситуације: израда планова за реаговање у ванредним ситуацијама изазваним поплавама.
Опоравак и анализа догађаја	Повратак нормалним условима што је пре могуће и отклањање друштвених и економских последица по погођено становништво.
Друго	Друге врсте мера.

Табела 2. Врсте мера [4]
Table 2. Types of measures [4]

Аспекти управљања ризицима од поплава	Врста	Опис
Нема активности	Нема активности	Није предложена ни једна мера за смањење ризика од поплава у значајном поплавном подручју или другом утврђеном подручју.
Превенција	Избегавање	Мере за спречавање постављања нових или додатних рецептора у поплавна подручја, као што је примена политике или регулативе у области планирања коришћења земљишта.
	Уклањање или премештање	Мере за уклањање рецептора из поплавних подручја, или за премештање рецептора у подручја где је мања вероватноћа плављења и/или мања угроженост.
	Ублажавање	Мере за адаптацију рецептора у циљу ублажавања штетних последица у случају утицаја поплава на зграде, јавне мреже, итд.
	Друге мере превенције	Друге мере за побољшање превенције ризика од поплава (може укључити израду модела и процену ризика од поплава, процену рањивости на поплаве, програме или политику одржавања, итд.).
Заштита	Натурално управљање поплавама / управљање отицајем и сливом	Мере за смањење дотицаја у природне или вештачке системе за одводњавање, као што је пресецање и/или акумулирање површинског дотицаја, побољшање инфилтрације, итд., укључујући и радове у кориту и инундацијама и пошумљавање обала, чиме се обнављају природни системи који помажу код успоравања тока и акумулирања воде.
	Регулисање протока	Мере које укључују физичке интервенције за регулисање протока, као што је изградња, модификација или уклањање објеката за задржавање воде (на пример бране или други простори за акумулирање воде или развој постојећих правила за регулисање протока), и које имају значајан утицај на хидролошки режим.
	Радови на каналима, у приобаљу и поплавним подручјима	Мере које укључују физичке интервенције у каналима, планинским потоцима, естуарима, приобалним водама и поплавним подручјима, као што је изградња, модификација или уклањање објеката или модификација канала, управљање динамиком нанаоса, насипи, итд.
	Управљање површинским водама	Мере које укључују физичке интервенције за смањење плављења површинским водама, типично али не искључиво карактеристично за урбана окружења, као што је побољшање капацитета одводњавања или кроз одрживе системе за одводњавање.
	Друге мере заштите	Друге мере за побољшање заштите од поплава, које могу укључити програме или политике одржавања објеката и опреме за заштиту од поплава.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Аспекти управљања ризицима од поплава	Врста	Опис
Приправност	Прогноза и упозоравање на поплаве	Мера за успостављање или побољшање система прогнозе и упозоравања на поплаве.
	Планирање реаговања на ванредну ситуацију / планирање за непредвиђене ситуације	Мере за успостављање или јачање институционалног планирања хитног реаговања у случају поплава.
	Свест и приправност јавности	Мере за успостављање или побољшање свести и приправности јавности за случај поплава.
	Друге мере приправности	Друге мере за успостављање или побољшање приправности за случај поплава у циљу смањења штетних последица.
Опоровак и анализа догађаја	Опоровак појединаца и друштва	<ul style="list-style-type: none"> - Чишћење и активности на обнови (зграде, инфраструктура, итд.), - Подршка здравственим активностима, укључујући и ментално здравље и управљање стресом, - Финансијска помоћ за случај катастрофа (дотације, порези), укључујући и правну помоћ за случај катастрофе, помоћ за незапослене за случај катастрофе, - Привремено или трајно пресељење, - Друго.
	Опоровак животне средине	<ul style="list-style-type: none"> - Чишћење и активности на обнови (са неколико тема, као што су заштита од буђи, безбедност бунарске воде и обезбеђивање контејнера за хазардни материјал), - Друго.
	Друге мере опоравка и анализа догађаја	<ul style="list-style-type: none"> - Лекције научене из поплава, - Полисе осигурања, - Друго.
Друго		

Уважавајући предложене групе мера, државе у сливу Дунава су за сваки од заједничких циљева дефинисале конкретне мере којима се смањују могуће штетне последице поплава на здравље људи, животну средину, културно наслеђе и привредне активности у значајним поплавним подручјима.

У Плану су размотрени сви аспекти управљања ризицима од поплава, са фокусом на превенцију поплава, заштиту, приправност и опоровак после поплавног догађаја.

У Плану су приказане само стратешке мере, битне на нивоу међународног слива Дунава, односно мере које имају прекогранични утицај или се примењују у више земаља. Све мере су раздвојене на 3 категорије: примењена, будућа и у току.

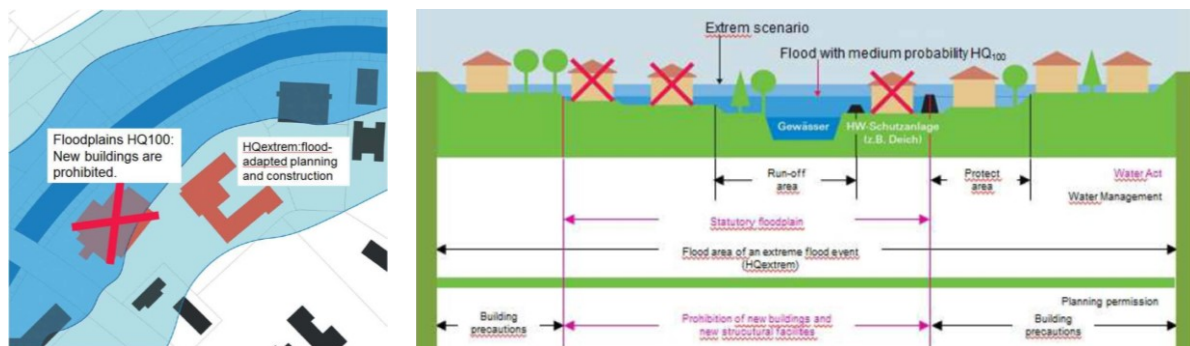
Списак планираних мера по земљама дат је у Анексу 2 Плана. У наставку се дају неки примери добре праксе.

3.1 Мере у циљу избегавања нових ризика

Најефикаснији и најисплатљивији начин да се избегну нови поплавни ризици је забрана изградње нових објеката у поплавном подручју. Ова мера се већ примењује у више земаља у сливу Дунава, које су на основу карата угрожености извршиле зонирање угрожених подручја и законски регулисале ограничења за изградњу објеката на овим просторима.

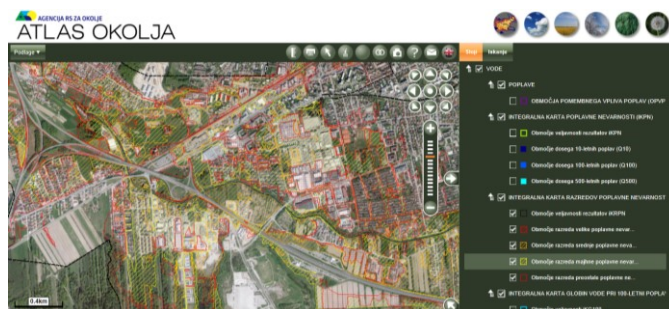
У **Немачкој** је забрањено повећање грађевинског земљишта и изградња нових објеката у подручјима која су потенцијално угрожена 100-годишњим великим водама. У савезној држави Баден-Виртемберг су поплавна подручја утврђена законом, тако да се ограничење изградње спроводи без допунских административних процедура на локалном нивоу. Карте угрожености од поплава се у редовним циклусима преиспитују, по потреби новелирају и поново објављују, како би се за планирање развоја користиле актуелне подлоге, које укључују и утицај климатских промена, промене режима великих вода и ефекте изградње система за заштиту од поплава.

Ограничења изградње у подручјима која су потенцијално угрожена само у случају екстремних догађаја нису тако строга. Међутим, делатности које могу бити угрожене поплавом се морају избећи или прилагодити тим условима.



Слика 1. Зонирање подручја и ограничавање изградње, Баден-Виртемберг [3]
 Figure 1. Flood zoning and construction restriction, Baden-Württemberg [3]

У **Словенији** су, у процесу припреме документације за просторно планирање или самих пројеката, држава, општине и приватни инвеститори дужни да израде карте подручја од интереса са приказом класа угрожености и приложе их уз захтев за добијање водне или грађевинске дозволе. На основу ових карата се доноси одлука да ли је или под којим условима је дозвољена нова градња или радови. Уредба о условима и ограничењима је ступила на снагу 2008. године. До 2015. године израђено је више од 300 хидролошко-хидрауличких студија, које су покриле бројна поплавна подручја, укупне површине веће од 1.000 km² [3]. Резултати хидролошко-хидрауличких студија су јавно доступни, а најважнији резултати - урез великих вода повратних периода 10, 100 и 500 година, као и четири класе угрожености и три класе дубине воде у условима стогодишње велике воде се налазе у дигиталном „Атласу животне средине“ (слика 2).



Слика 2. Класе угрожености од поплава, Словенија [1]
Figure 2. Flood hazard classes, Slovenia [1]

У **Мађарској** су током јуна 2013. године нивои на Дунаву превазишли дотадашње апсолутне максимуме на 90% дужине ове реке. Само захваљујући обимним мерама одбране спречено је преливање или рушење насипа који су димензионисани на основу претходних максимума. Надлежни су посебно били изненађени што је било потребно применити мере заштите од поплава неких насеља на високом терену, за која се до тада веровало да нису угрожена од великих вода. Након поплаве је закључено да треба поново одредити ниво 100-годишње велике воде, која је меродавна за димензионисање насипа, односно до које је држава одговорна за заштиту од поплава. Током 2013. и 2014. извршени су прорачуни нивоа 100-годишње велике воде на око 2.800 km већих река и званично усвојени 1. јануара 2015. Проток $Q_{1\%}$ је одређен статистичком анализом података мерења и осматрања на главним хидролошким станицама (низови дужине 100 - 130 година), а затим је урађен хидраулички прорачун линија нивоа за актуелно морфолошко стање речног корита. Новелирање нивоа $Q_{1\%}$ је обавезно вршити сваких 6 година, или након појаве значајних великих вода.

3.2 Мере у циљу смањења постојећих ризика

У циљу смањења постојећих ризика, **Аустрија** је након поплаве на Дунаву 1991. године утврдила подручја која се не могу заштитити од поплава. Откуп објеката који се налазе у зони угроженој 30-годишњом великом водом отпочео је 1993. године, а затим је проширен и на објекте угрожене 100-годишњом великом водом [3]. На угроженим подручјима забрањена је нова градња, а намена постојећег грађевинског земљишта је промењена.



Слика 3. Објекти који се не могу заштити од поплава, Аустрија [3]
Figure 3. Non-protectable objects, Austria [3]

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

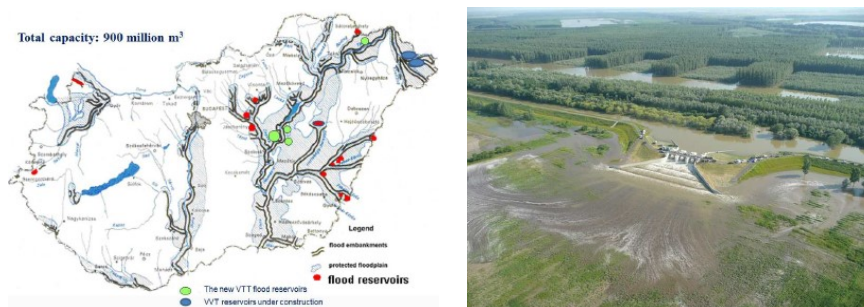
У сливу Дунава се као мера за смањење постојећих ризика све чешће примењује ретензирање поплавних таласа. За Србију, као низводну земљу, од великог значаја су ретенциони капацитети уз Саву у Хрватској и уз Тису у Мађарској.

У **Хрватској** комплекс очуваних мочвара на левој обали Саве има изузетан еколошки значај, али и значајну функцију у редукцији поплавних таласа. Такође, изградњом одговарајућих објеката омогућено је упуштање и задржавање дела поплавних таласа ове реке у уређене ретенционе просторе, што доприноси смањењу поплавне опасности на низводним секторима. Према подацима Хрватских вода, укупан капацитет ретензија на левој обали Саве (Жутица, Лоњско поље, Опека, Трстик и Мокро поље) је око 3.500 милиона m^3 , а на десној обали (Одранско поље, Зеленик) око 1.500 милиона m^3 .



Слика 4. Систем ретензија у Средњој Посавини, Хрватска (извор: Хрватске воде)
Figure 4. Ретенцион пондс in the Srednja Posavina, Croatia (source: Hrvatske vode)

У **Мађарској** се, ради повећања степена заштите од поплава дуж Тисе, спроводи обиман и скуп Нови Вашархељи план. План обухвата мере за повећање пропусне моћи корита за велику воду: уклањање постојећих и спречавање настанка нових препрека течењу на инундацијама, разматрање линија летњих насипа (да ли се насипи задржавају, померају или уклањају), регулација корита и померање траса главних насипа, где је неизбежно. Такође, планирано је 11 нужних ретензија (до сада је изграђено четири, а две су у изградњи). У случају појаве 1000-годишње велике воде, утицај 6 ретензија би се протезао целом дужином Тисе у Мађарској, а пик таласа би се снизио за 60 cm. Када се заврши свих 11 ретензија (укупног капацитета 1.500 милиона m^3), ниво 1000-годишње велике воде ће бити 1 m нижи него данас [3].



Слика 5. Нужне ретензије према Новом Вашархељи плану, Мађарска [3]
Figure 5. Retention ponds according to the New Vasarhelyi Plan, Hungary [3]

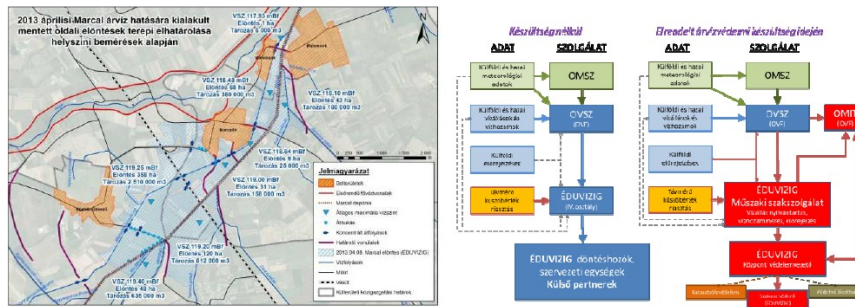
3.3 Мере у циљу повећања отпорности

У Румунији је у току пројекат WATMAN, чији је општи циљ да допринесе одрживом управљању поплавама у најугроженијим подручјима, применом инвестиционих и неинвестиционих мера и у складу са европским законодавством. Овај пројекат ће допринети постизању циљева Националне стратегије управљања водама (смањење последица природних катастрофа по становништво, спровођење превентивних мера у најугроженијим подручјима и коришћење актуелног високо-специјализованог интегрисаног система за подршку одлучивању).

Прва фаза пројекта WATMAN има за циљ повећање степена сигурности хидрограђевинских објеката. Зато ће 89 високих брана бити у аутоматском систему праћења параметара безбедности објекта, уз 125 станица за мерење падавина, 31 водомерну станицу на притокама, 41 аутоматску станицу за мерење протока на испустима корисника (становништва и привреде) и 36 аутоматских станица за мерење протока на захватима. Циљ је такође да се повећа капацитет Румунских вода за реаговање у случају природних катастрофа, односно успостављање 23 центра за брзо реаговање, 15 координационих центара и 51 аутоматске станице са сензорима за праћење квалитета воде широм земље.

У другој фази пројекта ће се интегрисати подаци и информације два постојећа информациона система (SIMIN и DESWAT) у Интегрални информациони систем за подршку одлучивању, што ће омогућити ефикасно и стабилно управљање водним ресурсима на националном нивоу. Такође, биће унапређен систем упозоравања становништва.

У Мађарској је, после поплаве 2013. године, Влада одлучила да регионална Дирекција за воде изради општинске планове за одбрану од поплава насеља дуж Дунава која нису била заштићена јер се сматрало да су на високом терену. Локалне самоуправе су и раније биле обавезне да припреме и финансирају овакве планове, али је њихов квалитет и садржај био веома разнолик. Стога је 2014. из државног буџета финансирана израда око 160 планова, који су се заснивали на упутствима Инжењерске коморе Мађарске. У општинским плановима су дате хидролошке и друге карактеристике површинских и подземних вода у окружењу насеља и дефинисани оперативни задаци општинских институција током различитих фаза одбране од поплава.



Слика 6. Нови Општински планови за одбрану од поплава, Мађарска [3]
 Figure 6. New Municipal flood defence plans, Hungary [3]

3.4 Мере у циљу подизања свести

Земље на сливу Дунава редовно одржавају конференције ради информисања јавности и консултација са заинтересованим странама. У **Аустрији** су, на пример, на 13 река успостављени „дијалози о рекама“, на којима се са релевантним заинтересованим странама дискутује о примени Оквирне директиве о водама и Директиве о поплавама. Заинтересоване стране су политичари, администрација, заступници сектора пољопривреде, туризма, рибарства, индустрије, трговине, енергетике, образовања и заштите природе, становништво и шира јавност. Консултације су организоване у 4 корака: (1) укључивање заинтересованих страна, (2) учешће јавности, (3) дијалог о резултатима и потребама и (4) дефинисање даљих корака. Процењује се да су на овај информације допрле до око 550.000 људи.

3.5 Примена начела солидарности

На међународним сливовима је посебно значајно да земље не примењују мере које би својим обимом и утицајем значајно повећале ризике од поплава у узводним или низводним државама.

У том циљу, **Аустрија** и **Мађарска** су потписале Меморандум о заштити од поплава на сливу реке Лајта, у оквиру SEframe пројекта. У меморандуму су наведени заједнички задаци, а тежи се налажењу мера које интегришу потребе заштите животне средине и заштите од поплава у пограничном подручју, повећавају свест и спречавају повећање ризика. То се остварује захваљујући блиском контакту између надлежних тела за одбрану од поплава, заједничком улагању у превентивне мере и развоју заједничке стратегије за управљање ризицима од поплава.

4 Закључци

Планом управљања ризицима од поплава на сливу Дунава постављени су заједнички циљеви управљања ризицима од поплава и истакнуте стратешке мере којима се, по земљама у сливу, тежи остварењу ових циљева. У Плану су описани поступци техно-економске анализе који се примењују у само неким земљама (за сада) и објашњено је

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

како се примена Директиве о поплавама усклађује са применом Оквирне директиве о водама. Такође, дата су расположива сазнања о утицају климатских промена, међународној сарадњи, примени начела солидарности и обавештавању и консултовању јавности.

Србија активно учествује у активностима ICPDR-а, па је тако и током припреме Плана пружила неопходне информације за своју територију. Стечена су сазнања о активностима које су спроведене у земљама чланицама ЕУ током припреме националних планова управљања ризицима од поплава. Преношење ових искустава ће сигурно олакшати израду Плана управљања ризицима од поплава за територију Републике Србије, која тек почиње 2015. године, разрадом садржаја, динамике и организације израде плана, систематизацијом резултата прелиминарне процене ризика од поплава, приказом угрожености и ризика на основу карата, постављањем циљева управљања ризицима од поплава и израдом каталога мера. Национални план ће бити припремљен применом приступа „са врха наниже“, водећи рачуна о планираним активностима на територијама суседних држава.

Литература

1. ARSO, (2015), Atlas okolja, Agencija Republike Slovenije za okolje, (print screen) http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso
2. ЕЗ, (2007), *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks*, Official Journal L288, 6.11.2007, 27-34.
3. ICPDR, (2015), *Flood Risk Management Plan for the Danube River Basin District*, International Commission for the Protection of the Danube River.
4. WGF, (2012), *A Working Group Floods(CIS) resource document "Flood Risk Management, Economics and Decision Making Support"*.

Zaštita Beograda od velikih voda Dunava i Save

Vojislav Antić¹

Marina Babić Mladenović²

APSTRAKT: U ovom radu preispitani su prethodni kriterijumi zaštite od poplava na teritoriji grada Beograda, vodeći računa o preporukama iz evropske i svetske literature, promenama u režimu voda Dunava i Save koje su sada prisutne ili se mogu očekivati u bližoj budućnosti. Predloženo je da se stepen zaštite visoko vrednog beogradskog priobalja podigne na nivo 1000-godišnje velike vode. Polazeći od sadašnjeg stanja objekata i usvojenih kriterijuma, definisane su lokacije, vrsta i obim potrebnih radova, kao i dinamika i potrebna sredstava za obezbeđenje neophodnog stepena zaštite. Budući da su obale Dunava i Save na teritoriji Beograda sa veoma različitim stanjem uređenosti obala (kotom zaštite od velikih voda) bilo je potrebno definisati jedinstvene i pre svega racionalne i primenljive kriterijume za izbor regulacionih radova.

Ključne reči: Sava, Dunav, beogradsko priobalje, definisanje kriterijuma zaštite

Belgrade protection from the Danube and Sava rivers

APSTRACT: This paper deals with reassessment of previous criteria for flood protection of Belgrade area, by considering recommendations of the European and global literature and, current or potential future changes in water regime of the Danube and Sava rivers. It was suggested to raise the protection level of highly valuable Belgrade riverside to the level of 1000-year floods. Starting from the current state of structures and the adopted criteria, the location, type and extent of required works are defined, as well as the dynamics and necessary resources for ensuring the required protection level. Considering various state of works on the banks of the Danube and Sava in Belgrade (different flood protection levels) it was necessary to define a unique and, above all, rational and applicable criteria for the selection of training works.

Keywords: Sava, Danube, Belgrade riverside, definition of protection criteria

¹ Vojislav Antić, diplomirani građevinski inženjer, Institut "Jaroslav Černi", Jaroslava Černog 80, Beograd, vojislav.antic@jcerni.co.rs

² Dr Marina Babić Mladenović, diplomirani građevinski inženjer, Institut "Jaroslav Černi", Jaroslava Černog 80, Beograd, marina.babic-mladenovic@jcerni.co.rs

1 Uvodne napomene

Za odbranu priobalja od poplava mogu se primeniti različite vrste zaštitnih sistema: stalni, kombinovani i privremeni. Pritom najveću sigurnost branjenom području pruža stalni sistem odbrambenih objekata, koji mogu da čine nasuti plato sa obaloutvrdom ili kejskim zidom, odbrambeni nasip ili odbrambeni zid. U gradskim uslovima može se koristiti i kombinacija stalnih objekata i montažnih - mobilnih elemenata koji se na njih postavljaju.

Objekti sistema za odbranu od poplava projektuju se u odnosu na merodavni nivo, sa odgovarajućim zaštitnim nadvišenjem, kojim se kompenziraju svi uticaji koji nisu bili uključeni u utvrđivanje merodavnog nivoa. Merodavni nivo za odbranu predstavlja tehničko-ekonomsku kategoriju, s obzirom da direktno utiče na investicionu vrednost odbrambenih objekata i vezan je za vrednost i značaj branjenih dobara u priobalju.

S obzirom na prisutne promene u režimu voda Dunava i Save, u Generalnom projektu zaštite Beograda od velikih voda Dunava i Save (Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 2012. godine) analizirani su prethodni kriterijumi zaštite od poplava i predloženi novi, na osnovu izvršene hidrološke i hidrauličke analize velikih voda na području Beograda. Obilaskom terena identifikovane su najkritičnije deonice obala u užem gradskom jezgru i dat predlog odgovarajućih radova, kako bi predloženi kriterijumi zaštite priobalja bili obezbeđeni na tehnički prihvatljiv način. Razmatrana je mogućnost primene različitih tipova sistema za zaštitu priobalja od velikih voda.

2 Sadašnje stanje sistema zaštite od poplava Beograda

Opšti kriterijumi i elementi za projektovanje i izgradnju objekata za odbranu od poplava duž Save i Dunava usvojeni su 70-tih godina, u cilju obezbeđenja jedinstvenog sistema zaštite priobalja na teritoriji Beograda. Kao podloga za dimenzionisanje objekata definisani su merodavni hidrološki parametri (režim nivoa i proticaja vode). Usvojen je merodavni nivo stogodišnje velike vode na ušću Save u Dunav od 76,00 mnm, dok su objekti projektovani sa zaštitnim visinama 1,5 - 1,7 m na Dunavu i 1,2 - 1,5 m na Savi.

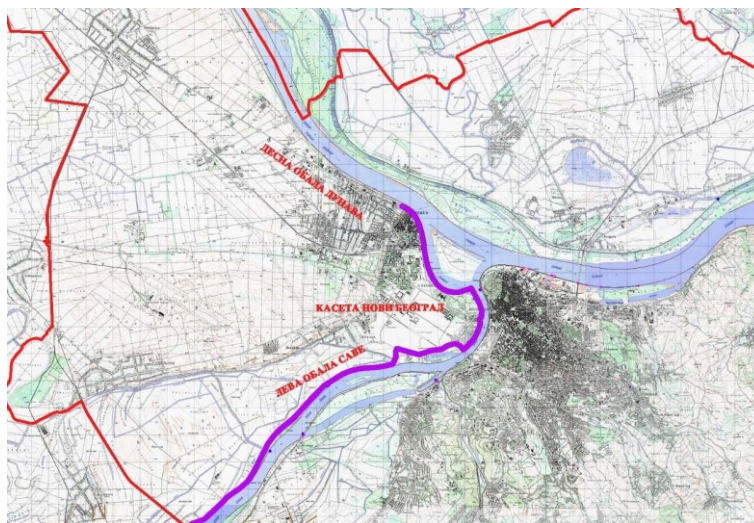
Zaštitu od velikih voda Dunava i Save području Beograda pružaju objekti pasivne zaštite (kejski zidovi u užoj gradskoj zoni i nasipi). Veliki broj objekata izveden je u skladu sa postavljenim opštim kriterijumima, ali adekvatna zaštita od stogodišnje velike vode još uvek nije obezbeđena duž desne obale Save i Dunava, a delimično i na levoj obali Save.

2.1 Leva obala Save i desna obala Dunava uzvodno od ušća Save

Na levoj obali Save pruža se kontinualni sistem objekata za zaštitu od poplava, koji na teritoriji Beograda (od ušća Save u Dunav do Kupinova) ima dužinu od oko 50 km, a u užoj zoni GUP-a (do Ostužničkog mosta) oko 15,5 km (slika 1). Štiti ravničarsko područje Donjeg Srema, odnosno 13000 ha poljoprivrednog zemljišta i 1300 ha visoko vrednog gradskog zemljišta (delovi Zemuna, Novog Beograda, Bežanije i Surčina). Odbrambenu liniju čine različiti tipovi objekata.

U dosadašnjem periodu duž leve obale Save izgrađen je veliki broj obaloutvrda, kejskih zidova i nasipa. Kejski zidovi nalaze se užoj gradskoj zoni, u dužini od oko 5500 m. Ovi objekti, pored osnovne uloge zaštite i stabilizacije ruševnih obala na pojedinim deonicama

imaju i funkciju zaštite od poplava u kombinaciji sa nasutim terenom u zaleđu. Nasipi se nalaze van užeg gradskog jezgra uzvodno od bloka 45, ukupne dužine oko 7500 m.



Slika 1. Odbrambene linije na desnoj obali Dunava i levoj obali Save u zoni GUP-a
Figure 1. Protection line along the right Danube bank and the left Sava bank in CUP area

Od ušća do novobeogradskog bloka 70a (dužine 6 km) sistem zaštite, koji čine nasipi i kejski zidovi, nije ujednačen i ne obezbeđuje sigurnost od plavljenja visoko vrednom zaleđu. Naime, u odnosu na nivo stogodišnje velike vode Save, koji se na ovom potezu kreće od 76,09 do 76,33 mnm, kota zaštite između 75,60 i 76,76 mnm nije odgovarajuća.

Objekti duž desne obale Dunava, na potezu od ušća Save do 400 m uzvodno od restorana "Šaran" u Zemunu (ukupna dužina obale oko 4,6 km), pored objekata duž Save, obezbeđuju zaštitu od poplava Zemuna i Novog Beograda.

Uzvodno od Zemuna je dunavska obala visoka, tako da ne postoji opasnost od plavljenja. Na ovom potezu je, međutim, prisutan problem nestabilnosti visoke lesne obale. Posebno je kritična obala kod starog zemunskog keja, gde je kote zaštite ispod nivoa stogodišnje velike vode na ovom potezu.

2.2 Desna obala Save i desna obala Dunava nizvodno od ušća Save

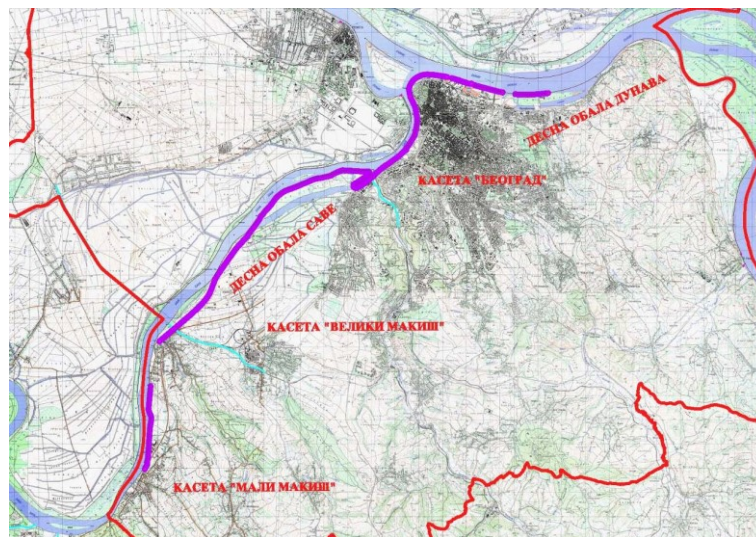
Na desnoj obali Save linija za odbranu od poplava u užoj zoni GUP-a pruža se od ušća u Dunav do Umke (oko 24 km). Čine je kejski zidovi u Beogradu, od ušća do Čukarice (dužine oko 5 km) i nasipi od Čukarice do Umke (dužine oko 16 km), kao i delovi visokog terena. Kontinuitet odbrambene linije na desnoj obali Save prekidaju pritoke (Topčiderska reka, Ostružnička reka).

Savski nasipi i usporni nasipi pritoka formiraju nekoliko kasete (slika 2):

- Uže gradsko područje (kasete "Beograd"), od ušća Save u Dunav do ušća Topčiderske reke, štite kejski zidovi, različitih karakteristika. Kejski zidovi ne samo da nemaju potrebnu zaštitnu visinu, već su niži i od nivoa stogodišnje velike vode (kota krune 74,0 do 76,5 mnm). U branjenom području se nalaze pristanište, autobuska i železnička stanica, Beogradski sajam i drugi značajni poslovni i privredni objekti;

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Kaseta "Veliki Makiš" je po sadržaju izuzetno značajna jer se u njoj nalaze delovi naselja Žarkovo, Čukarička padina i niži delovi Železnika. Ovo područje je povezano sa prostorom Ade Ciganlije, Nasip "Veliki Makiš", koji štiti ovo područje, pruža se od Čukarice do naselja Ostružnica. Rekonstrukcija nasipa je izvršena od uzvodne pregrade jezera do naselja Ostružnica, tako da se na ovoj deonici ne mogu očekivati problemi. Nasip oko Ade Ciganlije je rekonstruisan, sa kotom krune zaštite od 77,0 mm do "špica" ade, odnosno 77,5 mm od "špica" ade do uzvodne pregrade. Rekonstrukcija ovog nasipa, koja je završena, bila je veoma važna sa stanovišta odbrane od poplava, jer bi u slučaju proboja nasipa voda preko Ade i Savskog jezera prodrla u branjeno područje "Velikog Makiša";
- Kaseta "Mali Makiš" obuhvata niske delove terena između Ostružnice i Umke, sa naseljem Umka, industrijskim objektima, kao i melioracionim sistemom površine 230 ha. Područje štiti istoimeni nasip, zadovoljavajućih karakteristika.



Slika 2. Odbrambene linije na desnoj obali Save i Dunava nizvodno od ušća Save u zoni GUP-a

Figure 2. Protection line along the right Sava bank and the right Danube bank downstream of the Sava mouth in CUP area

Desna obala Dunava nizvodno od ušća Save obuhvata deo obale pored kule "Nebojša", uređeni dorćolski kej, marinu "Dorćol", kompleks luke "Beograd", kosi kej nizvodno od Pančevačkog mosta i kosi kej na Adi Huji.

Generalno najkritičniji deo desne obale Dunava nizvodno od ušća Save je potez kod kule "Nebojša". Nizvodno od ovog poteza, obaloutvrde odnosno kejevi, obezbeđuju zaštitu od dvestogodišnje velike vode, ali sa nedovoljnom zaštitnom visinom. Izuzetak je potez na početku dorćolskog keja koji ima zaštitu od stogodišnje velike vode i kosi kej na Adi Huji koji je u odličnom stanju i obezbeđuje zaštitu od hiljadugodišnje velike vode.

2.3 Leva obala Dunava (Pančevački rit)

Duž leve obale Dunava pruža se kontinualna nasipska linija od ušća Karašca do granice opštine Pančevo. Ovaj nasip, dužine 52,6 km (od čega se u užoj zoni GUP-a nalazi 23,4 km), štiti ravničarsko područje Pančevačkog rita, u kome se nalaze naselja Krnjača, Ovča, Borča, brojni industrijski i privredni objekti, kao i oko 34.000 ha poljoprivrednog zemljišta. Nasip je rekonstruisan, tako da obezbeđuje zaštitu od hiljadugodišnje velike vode Dunava uz zaštitnu visinu od 0,2-0,3 m. Kota krune nasipa na ovoj deonici je od 77,10 do 78,00 mm. Na ovoj deonici odbrambene linije nisu potrebni radovi.

3 Definisane nove kriterijume zaštite Beograda

U Generalnom projektu su preispitani prethodni kriterijumi zaštite od poplava, vodeći računa o preporukama iz evropske i svetske literature, promenama u režimu voda Dunava i Save koje su sada prisutne ili se mogu očekivati u bližoj budućnosti itd. Predloženo da se stepen zaštite visoko vrednog beogradskog priobalja podigne na nivo 1000-godišnje velike vode.

Zbog ekonomsko-tehničkih i urbanističkih uslova, predložen je kombinovani sistem zaštite od poplava odnosno kombinacija stalnih objekata (koji se eventualno rekonstruišu) i montažnih - mobilnih elemenata. Mobilni elementi postavljaju se prema potrebi i njima se povećava stepen zaštite branjenog područja u periodu sprovođenja odbrane od poplava do nivoa 1000-godišnje vode. Prednost mobilnih sistema je pre svega u relativno pristupačnoj ceni, brzoi i efikasnoj montaži i ponovnoj primenljivosti.

Polazeći od sadašnjeg stanja objekata i usvojenih kriterijuma, definisane su lokacije, vrsta i obim potrebnih radova, kao i dinamika i potrebna sredstva za obezbeđenje neophodnog stepena zaštite. Radovi na su podeljeni po fazama:

- Na deonicama u užoj gradskoj zoni koje **nemaju uređene obale**, potrebno je zaštitu od spoljnih voda obezbediti izgradnjom kejskih zidova, čija kruna treba da bude na koti 200-godišnje velike vode ($Q_{0,5\%}$), bez zaštitne visine. Ove radove treba izvesti u I fazi. Dodatno nadvišenje od 1,0 m, kojim se obezbeđuje zaštita od 1000-godišnje velike vode ($Q_{0,1\%}$), postiže se mobilnom opremom koja se postavlja na kruni objekta (II faza radova).
- Na deonicama koje **imaju uređene obale, ali je kota zaštite ispod nivoa 100-godišnje velike vode ($Q_{1\%}$)**, radovi se razlikuju u zavisnosti od sadržaja branjenog područja.

Ukoliko se u neposrednom zaleđu zaštitnog objekta nalaze parkovske ili druge zelene površine, obezbeđenje zaštite priobalja od 1000-godišnje velike vode postiže se nasipom potrebne visine (1,0-1,6 m). Nasip se formira sa što blažim nagibima kosina kako bi se bolje uklopio u ambijent. Ovi radovi nemaju urgentan karakter i predviđeni su za II fazu (ZNP).

Ukoliko su u neposrednom zaleđu nalaze stambeni i drugi objekti, potrebno je nadogradnjom postojećeg keja podići kotu zaštite do kote 200-godišnje velike vode bez rezervne visine (I faza). Obezbeđenje zaštite od 1000-godišnje velike vode postiže se postavljanjem mobilne opreme visine 1,0 m (II faza).

Na deonicama koje **imaju uređene obale na nivou 100-godišnje velike vode**, zaštita od 1000-godišnje velike vode postiže se radovima II faze:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

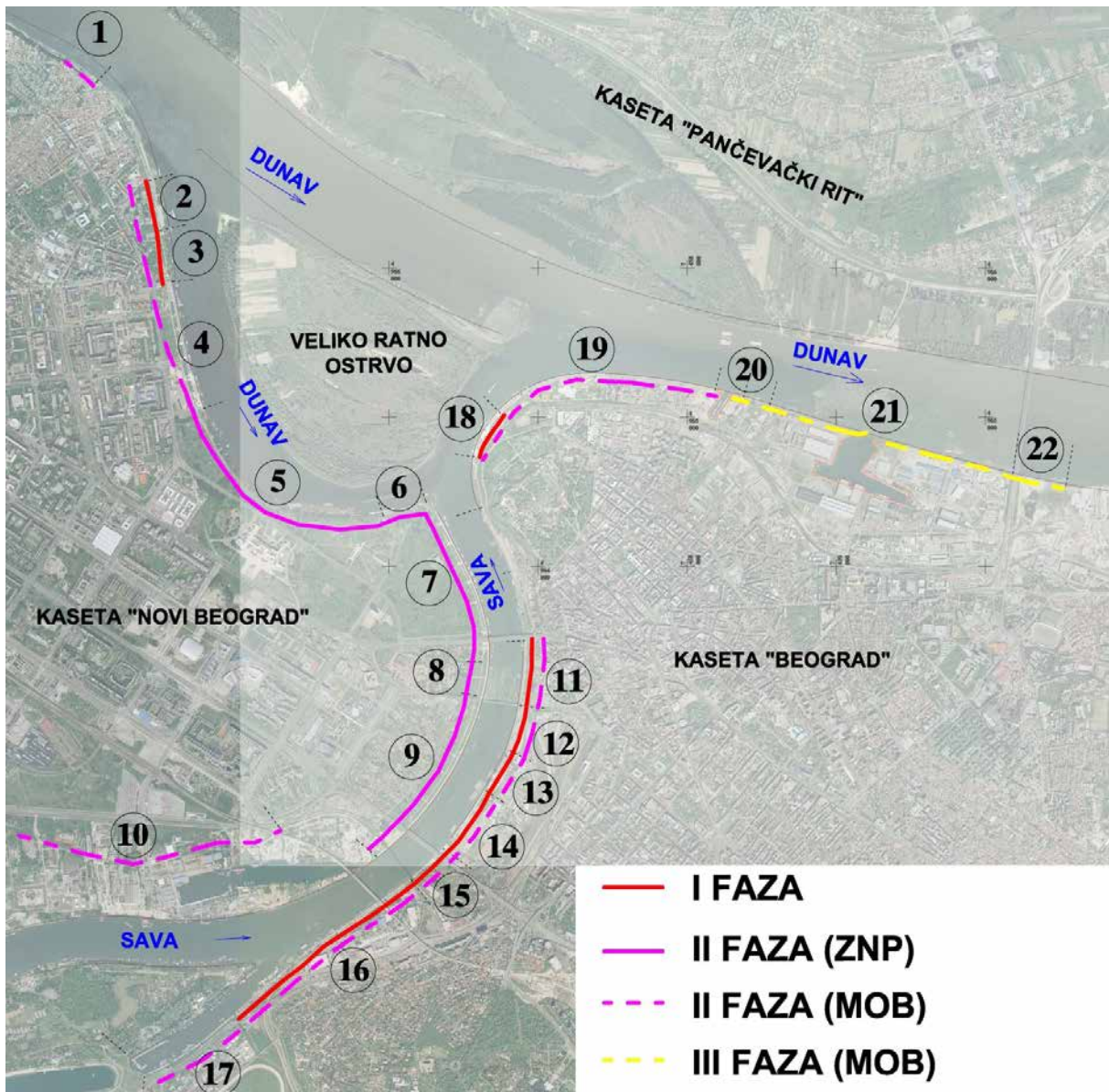
Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Formiranjem nasipa visine oko 1,0 m, ukoliko postoji slobodan prostor za izvođenje nasipa (parkovske ili druge zelene površine);
- Primenom mobilnih sistema zaštite visine 1,0-1,2 m (MOB), ukoliko ne postoji odgovarajući prostor za formiranje i izvođenje nasipa.

Na deonicama koje **imaju obezbeđenu zaštitu od 200-godišnje velike vode, a branjeno područje još uvek nije uređeno**, odnosno privedeno nekoj budućoj nameni radovi nisu urgentni, tako da su planirani za III fazu. U tabeli 1 prikazan je sumarni prikaz predviđenih radova po definisanim fazama, dok je na slici 3 prikazana pregledna situacija.

Tabela 1. Vrste radova po fazama
Table 1. Types of works (phases)

		L (m)	I faza	II faza	III faza
DESNA OBALA DUNAVA UZVODNO OD UŠĆA SAVE					
1	Novi zemunski kej	240	-	MOB	-
2	Kej Dun. parobrodskog društva	350	Rekonstrukcija	MOB	-
3	Neizgrađena obala uzvodno od h. "Jugoslavija"	350	Izgradnja keja	MOB	-
4	Kosi kej kod hotela "Jugoslavija"	900	-	MOB	-
5	Deonica neizgrađene obale kod SIV-a	1600	-	ZNP	-
6	Stari "danski" kosi kej	300	-	ZNP	-
LEVA OBALA SAVE					
7	Kosi kej "Ušće" (od ušća do Brankovog mosta)	1150	-	ZNP	-
8	Spomen obala "Staro Sajmište"	300	-	ZNP	-
9	Kosi kej od starog sav. mosta do starog žel. mosta	1250	-	ZNP	-
10	Ulica savski nasip	1850	-	MOB	-
DESNA OBALA SAVE					
11	Stari pretovarni kosi kej (za ručni pretovar)	450	Rekonstrukcija	MOB	-
12	Stari pretovarni kosi kej (za kolski pretovar)	300	Rekonstrukcija	MOB	-
13	Deonica neuređene obale kod železničke stanice	300	Izgradnja keja	MOB	-
14	Kosi kej duž železničke stanice	500	Rekonstrukcija	MOB	-
15	Kosi kej kod mosta "Gazela"	300	Rekonstrukcija	MOB	-
16	"Sajamski kej"	1500	Rekonstrukcija	MOB	-
17	Kosi kej u Čukaričkom rukavcu	700	-	MOB	-
DESNA OBALA DUNAVA NIZVODNO OD UŠĆA SAVE					
18	Obala kod kule "Nebojša"	350	Rekonstrukcija	MOB	-
19	Dorćolski kej	1500	-	MOB	-
20	Kej kod marine "Dorćol" i kej ispred toplane	400	-	-	MOB
21	Kompleks luke "Beograd"	1700	-	-	MOB
22	Kej nizvodno od Pančevačkog mosta	350	-	-	MOB
PROCENJENA VREDNOST RADOVA (€)			6 097 500	7 889 000	2 010 000



Slika 3. Predviđene faze radova na obalama Save i Dunava u zoni GUP-a
 Figure 4. Planned phases of works on the Sava and Danube riverbanks in CUP area

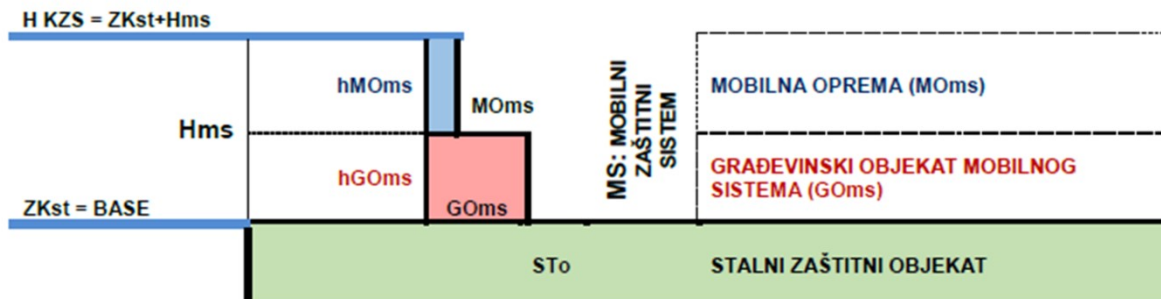
Predložene su ploče kao tip mobilnih elemenata za zaštitu od poplava, kojima bi odbrambena linija bila nadvišena za 1,0 do 1,5 m, radi ostvarenja planiranog stepena zaštite. Po prestanku opasnosti od plavljenja priobalja, ploče se uklanjaju, a postojećim kejevima vraća se pređašnji izgled.

Sistemi ploča za zaštitu od poplava se uvek postavljaju na istom mestu, u niše koje su prethodno ugrađene u najviši nivo postojećeg keja. Ploče su vodonepropusne i jednostavne za montažu (slika 4).



Slika 4. Predložena mobilna oprema
 Figure 4. Proposed mobile protection

Na slici 4 prikazan je primer postavke mobilne opreme po kruni postojećeg keja za varijantu bez građevinskog objekta mobilnog sistema (slika 4 levo) i sa građevinskim objektom (slika 4 desno). Šematski prikaz delova mobilnog zaštitnog sistema dat je na slici 5. Ovaj mobilni sistem može se koristiti proizvoljan broj puta. Nakon upotrebe, odnosno po prestanku opasnosti od poplave, sistem se demontira, temeljno očisti i pripremi za skladištenje.



Slika 5. Šematski prikaz zaštite mobilnom opremom
 Figure 5. Scheme of mobile protection use

4 Zaključak

Unapređenje zaštite uže gradske zone Beograda od velikih voda Dunava i Save je u Vodoprivrednoj osnovi iz 2001. godine navedeno kao prvi prioritet na teritoriji Srbije. Međutim, u prethodnim decenijama je malo urađeno na ovom polju.

Na potrebu da se reši problem zaštite Beograda od velikih voda podsetila je odbrana od poplava 2006. godine. Posle toga su izgrađene dve kraće deonice obaloutvrde u Zemunu, kojima nije zaokružena zaštita kasete "Novi Beograd".

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Velika voda Save 2014. godine nije ugrozila Beograd, jer su uslovi na ušću u Dunav bili povoljni. Međutim, tragedija Obrenovca je probudila svest o mogućim teškim ekonomskim i socijalnim posledicama plavljenja gusto naseljenih priobalnih naselja Beograda. Očekuje se da će, uz pomoć IPA fondova EU uskoro započeti implementacija predloženih mera za unapređenje sistema zaštite Beograda od poplava.

Literatura

1. Generalni projekat zaštite Beograda od velikih voda Dunava i Save (Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 2012. godine)
2. Stručno mišljenje o stanju objekata i efektima zaštite priobalja HE "Đerdap 1" za dobijanje nove vodne dozvole, (Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 2012. godine)

Нове мере заштите града Параћина после поплаве 2014. године

Зоран Кнежевић¹
Владислава Бартош Дивац²
Милан Малешев³

АПСТРАКТ: Интензивне падавине током маја 2014. године проузроковале су катастрофалне поплаве на више водотока. На Црници је дошло до плављења града Параћина. Овај догађај је показао да Параћин није довољно добро заштићен од великих вода Црнице и да је неопходно извршити реконструкцију поплавног таласа из маја 2014. године и дефинисати нове меродавне услове за димензионисање. Након анализе садашењег стања корита, предложена су решења заштите Параћина од великих вода.

Кључне речи: поплаве, Параћин, заштита

New flood protection measures of the city of Paracin after 2014 flood

ABSTRACT: Intense rainfall in may 2014 caused catastrophic flooding in several watercourses. In that time river Crnica flooded City of Paracin. This event showed that Paracin is not good protected from Crnica high waters and that is necessary to make a reconstruction of the flood of may 2014 and define new authoritative requirements for reconstruction. Technical solutions for Paracin protection are proposed, after analyze of the present river conditions.

Keywords: floods, Paracin, protection

¹ Зоран Кнежевић, дипл. инж. грађ, Завод за уређење водних токова, Институт за водопривреду “Јарослав Черни”, Београд, zoran.knezevic@jcerni.co.rs

² Владислава Бартош Дивац, дипл. инж. грађ, Завод за уређење водних токова, Институт за водопривреду “Јарослав Черни”, Београд, vladislava.bartos@jcerni.co.rs

³ Милан Малешев, дипл. инж. грађ, Завод за уређење водних токова, Институт за водопривреду “Јарослав Черни”, Београд, milan.malesev@jcerni.co.rs

1 Увод

Циклон Тамара је у мају 2014. године донео изузетне падавине, које су на подручју Србије и на деловима БиХ и Хрватске проузроковале екстремно велике воде на више водотока у сливу Саве, Дрине и Велике Мораве, што је резултирало катастрофалним поплавама и великим штетама.

Киша средњег и јаког интензитета трајала је од 12. до 19. маја 2014. године, што је веома ретка појава. Као резултат дуготрајних и интензивних падавина на великом простору формирали су се поплавни таласи на Црници и на њеној притоци Грзи. Грза се излила и поплавила село Давидовац, а Црница село Главицу и град Параћин. Током поплаве су настале веома велике штете на инфраструктурним, стамбеним и другим објектима, као и на пољопривредном земљишту.

Овај догађај је показао да град Параћин није довољно добро заштићен од великих вода Црнице и да је неопходно преложити нове меродавне услове за димензисање заштитних система, при чему треба респектовати и резултате реконструкције поплавног таласа из маја 2014. године.

У овом раду приказано је постојеће стање корита, дати су резултати спроведених хидролошких и хидрауличких анализа и прорачуна и прелози меродавних услова за димензионисање и техничко решење заштите.

2 Карактеристике постојећег корита Црнице кроз Параћин

Од ушћа у Велику Мораву до Параћина, као и кроз Параћин, Црница је целим својим током регулисана. У зависности од типа регулације може се издвојити више деоница:

- корито са обостраним насипима од ушћа у Велику Мораву до Параћина (речна стационажа km 0+000-km 4+790),
- корито са обалоутврдама у централном делу Параћина (km 4+790-km 6+277),
- корито узводно од централног дела Параћина до аутопута (km 6+277-km 8+722),
- корито узводно од аутопута на коридору 10 са обостраним насипима који нису повезани са високим тереном на узводном крају код села Главица, па касета није затворена (km 8+722-km 9+780).

Узводно од km 9+780 река Црница није регулисана.

Дуж тока Црнице кроз Параћин постоји више мостова преко корита: 1 железнички мост, 7 друмских и 5 пешачких мостова. Сви мостови својом конструкцијом утичу на течење у кориту Црнице.

Према ранијој пројектној документацији корито Црнице је димензионисано да прихвати меродавну велику воду повратног периода $T=100$ година, која је према тадашњим прорачунима износила $Q=180 \text{ m}^3/\text{s}$.

3 Приказ поплавног таласа у сливу Црнице

Крајем друге декаде априла већи пораст водостаја регистрован је на сливовима Западне и Јужне Мораве, а почетком треће декаде априла и на непосредном току Велике Мораве. Од краја априла водостаји су прешли у мање опадање све до почетка друге

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

декаде маја. Обилне кише које су пале у другој декади маја 2014. године условиле су нагле порасте водостаја у сливу реке Велике Мораве. На метеоролошкој станици Ћуприја током првих 24 сата пало је 41,4 mm кише. Другог дана киша је наставила да пада истим интензитетом, па је за два дана сума пале кише износила 81,6 mm, што представља догађај ретке вероватноће појава. Водостаји су почели да расту 12. маја, а 16. маја је забележен апсолутни максимум на хидролошкој станици Параћин $H_{\max}=408$ cm, што је скоро 1 m изнад до тада забележене максималне вредности од $H=313$ cm (16. маја 1999. године).

Највећа притока Црнице је река Грза, која се улива на km 12+383 речне стационаже, код села Давидовац. Корито Грзе није регулисано. Током мајског таласа поплављен је знатан део села Давидовац. У долини Црнице, низводно од ушћа Грзе, на излазу из клисуре испод брда Чукара, налази се село Главица, чији је већи део, такође, поплављен. Корито Црнице кроз Главицу није регулисано и нема изграђених насипа. С обзиром на то да долина низводно од села није заштићена, вода се разлила по равници, прошла кроз два пропуста испод аутопута и поплавила Параћин. Низводно од аутопута кроз Параћин корито није могло да прихвати велику воду Црнице, тако да се вода на више места излила и разлила ка граду. На слици 1 плавом линијом је означена површина поплављеног подручја, а црвеном површина где се вода дуго задржала (подаци општине Параћин).



Слика 1. Поплављена подручја у зони Параћина
Figure 1. Flooded areas in Paracin city

4 Анализе и прорачуни

Основни циљ анализа је реконструкција мајског поплавног таласа Црнице у Параћину, одређивање максималног реализованог протока и његовог пробабилистичког ранга, као и предлог нових мероданих услова за димензионисање заштитних система.

4.1 Реконструкција поплавног таласа из маја 2014. године

Хидрауличка реконструкцији поплавног таласа реке Црнице из маја 2014. године кроз Параћин базира на анализи трагова великих вода дуж посматраног подручја и хидрауличком прорачуну линија нивоа дуж водотока у циљу детерминисања протока Црнице на деоницама.

Пропагација таласа није била концентрисана на речно корито, већ је обухватила много већи простор у речној долини. На више потеза је дошло до изливања воде у приобаље, тако да се пропагација поплавног таласа одвијала једним делом кроз речно корито, а другим делом кроз речну долину. Стога су коришћени само трагови великих вода на месту где је прошао цео талас велике воде, а то је узана клисура између ушћа Грзе и села Главица. Снимљени трагови велике воде у овој зони искоришћени су за одређивање максималног протока воде Црнице. У зони клисуре су снимљена два попречна профила Црнице, као и два трага велике воде. На основу обраслости корита и обала, респектујући и друге врсте хидрауличких отпора, усвојене су вредности Манинговог коефицијента рапавости. Река је планинског типа, са коритом које је значајно обрасло вегетацијом, са израженим каскадама, локалним удубљенима и неправилностима, тако да вредност n варира од $0,1 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ до $0,125 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Прорачуном, коришћењем Шези–Манингове једначине, добијен је максимални проток Црнице низводно од ушћа Грзе у мајском таласу великих вода око $260 \text{ m}^3/\text{s}$.

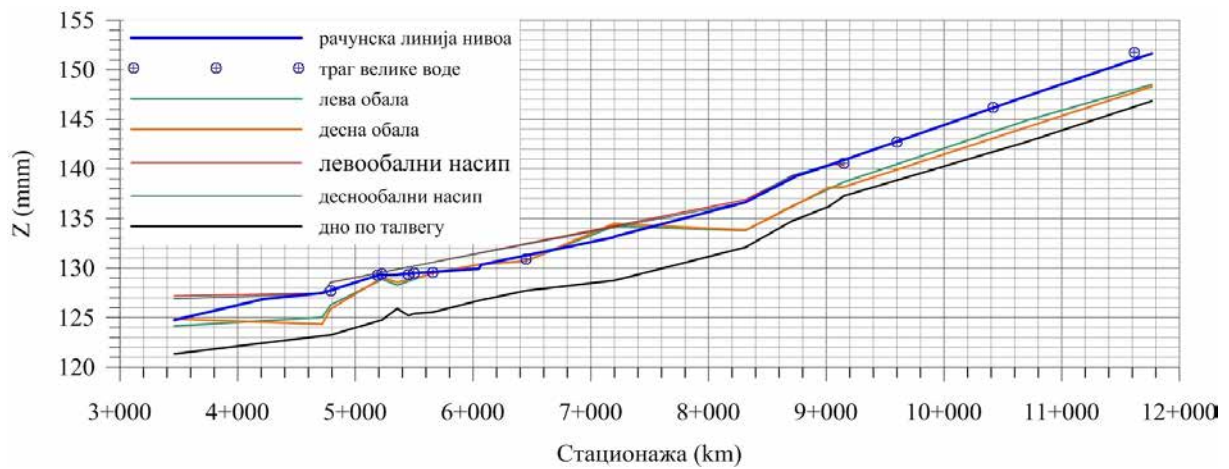
Прорачун линије нивоа воде вршен је применом програма HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System). Улазни подаци су геометрија речног тока и објеката у речном кориту, отпори течењу у речном току и на инундацијама, низводни гранични услов и проток воде.

За постојеће речно корито Црнице, усвојени су следећи Манингови коефицијенти рапавости: у градској зони за миор корито од $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ (корито обложено каменом у цементном малтеру) до $0,04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ (зоне са исталоженом значајном количином шљунка), мајор корито, за пољски тип $0,04\text{-}0,06 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$, за природно корито узводно од Параћина $0,1\text{-}0,125 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Локални отпори у зонама мостова су одређени на основу облика мостовске конструкције и респектујући претпоставку да се површински нанос покренут поплавним таласом зауставља на конструкцији.

Гранични услов за хидраулички прорачун одређен је на основу најнизводнијег снимљеног трага велике воде.

Хидруличким прорачуном за усвојене коефицијенте рапавости и низводни гранични услов, узимајући у обзир снимљене трагове велике воде срачунати су протоци Црнице дуж тока. Максимални проток Црнице на улазу у урбану зону Параћина износио је око $260 \text{ m}^3/\text{s}$. У градској зони Црница се излила на више потеза, тако да је на излазу максимални проток износио $100\text{-}120 \text{ m}^3/\text{s}$. Види се да се највећи део запремине поплавног таласа излио у урбаној зони Параћина. Један део изливане воде се

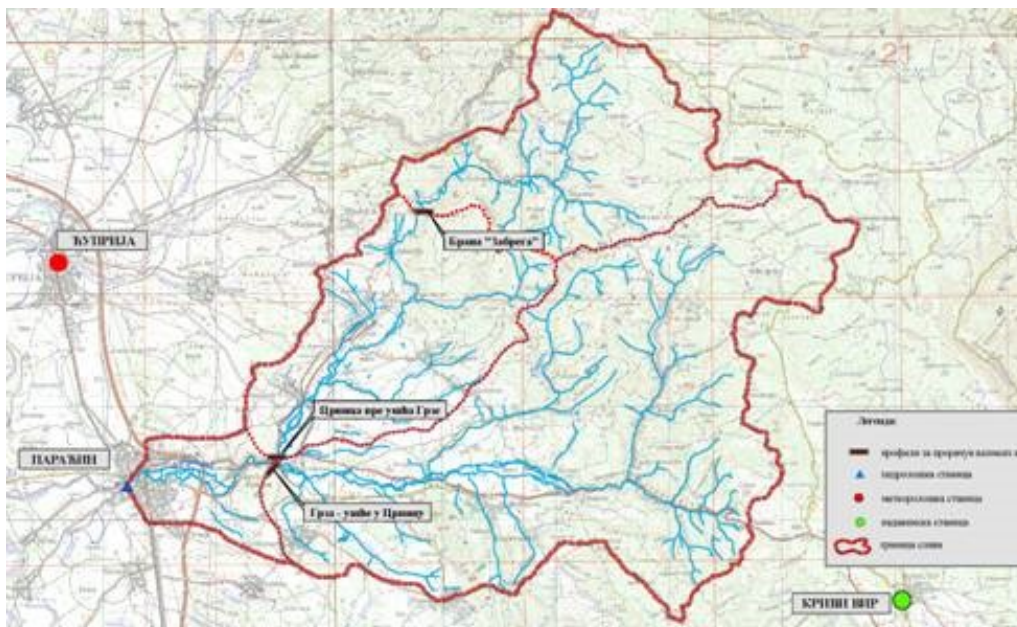
вратио у корито Црнице, после опадања водостаја, док се други део дуже задржао у депресијама у приобаљу.



Слика 2. Подужни профил реке Црнице
Figure 2. Longitudinal profile of the Crnica River

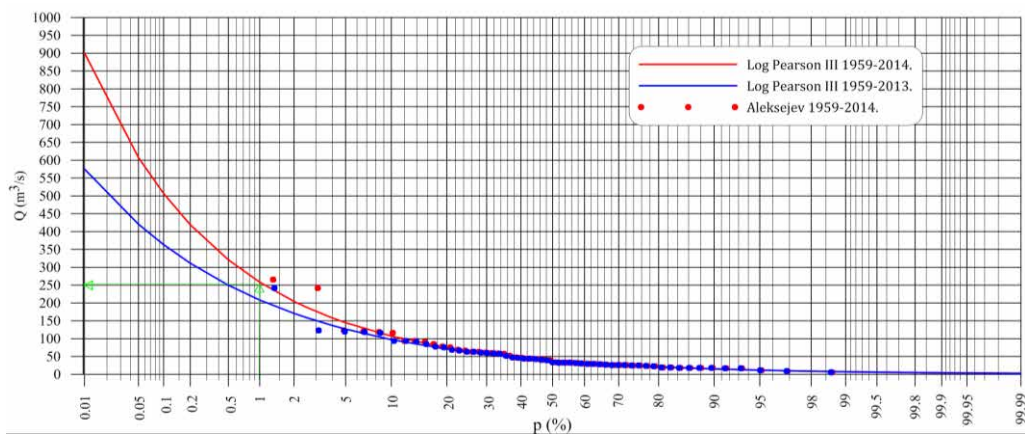
4.2 Хидролошка анализа

Река Црница има слив површине 295 km^2 (слика 3), дуга је непуних тридесет километара и улива се у Велику Мораву код Параћина. Највећа притока Црнице је Грза (159 km^2).



Слика 3. Сливно подручје реке Црнице
Figure 3. The Crnica River catchment area

Хидролошка станица Параћин на реци Црници налази се 5,3 km од ушћа. Површина слива Црнице до профила хидролошке станице је 289 km². На хидролошкој станици водостај се региструје од 1925. године. До 1958. године водостај је мерен летвом - једном дневно, а од 1959. године водостај се бележи лимниграфом. Због тога се за период 1925-1958. године не располаже поузданим подацима о максималним годишњим протоцима. Прорачун рачунских вредности максималних годишњих протока извршен је за два периода, 1959-2013. и 1959-2014. година. Подаци о максималним годишњим протоцима за период 1959-2013. година преузети су од Републичког хидро-метеоролошког завода Србије, а податак за 2014. годину добијен је хидрауличком реконструкцијом поплавног догађаја.



Слика 4. Рачунске вредности протока Црнице на х.ст. Параћин
Figure 4. Calculated values of the Crnica River discharge at the Paracin gauging station

Рачунске вредности великих вода реке Црнице на профили хидролошке станице Параћин добијене су коришћењем класичне процедуре прилагођавања теоријских функција расподеле емпиријској расподели серије максималних годишњих протока. Квалитет прилагођавања теоријских функција расподеле проверен је помоћу χ^2 -теста и теста Колмогоров-Смирнова. Усвојена је Log-Pearson III расподела, која је показала најбољи квалитет прилагођавања.

Рачунска вредност стогодишње велике воде добијена на основу низа максималних годишњих протока из периода 1959-2014. година износи $Q_{1\%}=255 \text{ m}^3/\text{s}$.

Због евентуалне могућности ретезирања воде у узводним деловима слива извршен је и прорачун великих вода за неке карактеристичне профиле у сливу, приказане на слици 4, методом за неизучене сливове (комбинована метода синтетичког јединичног хидрограма са SCS поступком за раздвајање ефективних од бруто падавина).

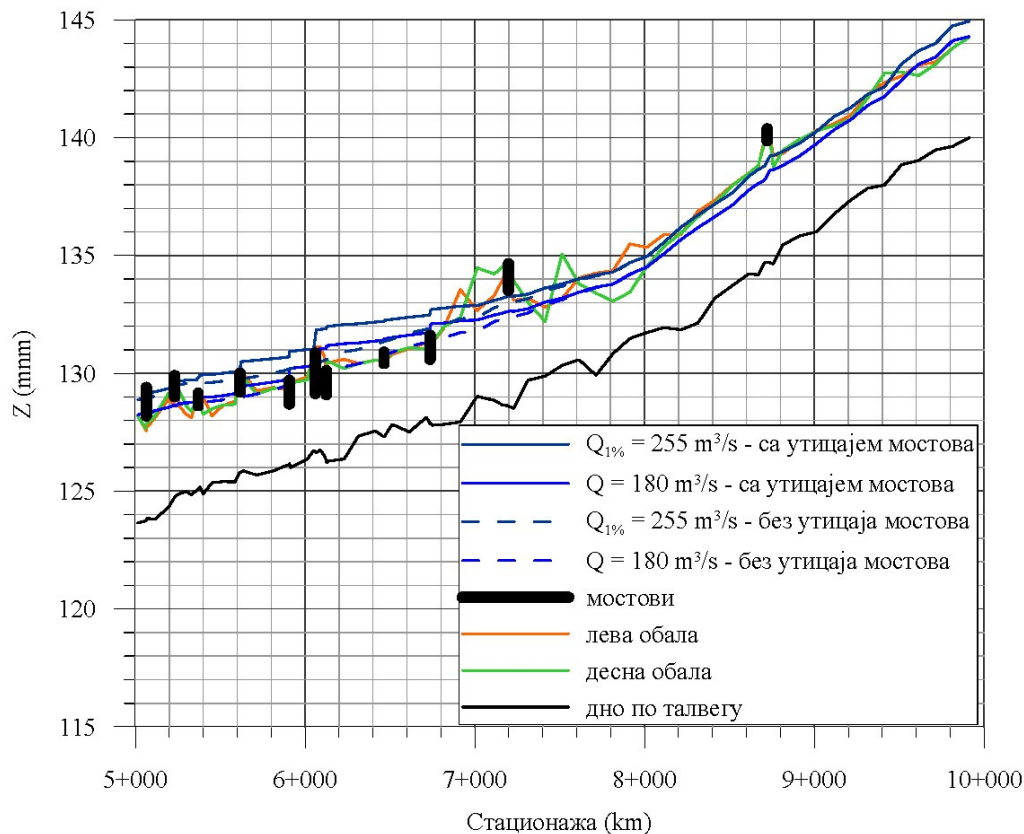
4.3 Хидрауличка анализа

Постојеће регулисано корито Црнице кроз Параћин је димензионисано да пропусти меродавну велику воду $Q=180 \text{ m}^3/\text{s}$. Ово је проверено хидрауличким прорачуном, за услове постојања 13 мостова преко Црнице. Претпостављено је очишћено регулисано

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

корито са Манинговим коефицијентом рапавости $n=0,033-0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Остали могући утицаји, као што је евентуално зачепљење мостовског отвора пливајућим наносом, нису узети у обзир. Као низводни гранични услов на Црници усвојена је ката стогодишње велике воде Велике Мораве на ушћу Црнице.

Резултати прорачуна показују да садашње речно корито, чак и очишћено, не може да пропусти велику воду на коју је пројектовано ($Q=180 \text{ m}^3/\text{s}$), јер мостовске конструкције стварају успор. Због мостова, пропусна моћ постојећег регулисаног корита је око $120-130 \text{ m}^3/\text{s}$. То значи да би се заштита од $Q=180 \text{ m}^3/\text{s}$ (у условима постојања свих мостова) морала обезбедити допунским радовима, као што је надвишење обала. Сваки мост изазива локални успор који износи од неколико центиметара до 70 см. Највећи успор изазива друмски мост (km 6+060) код хотела Петрус, који има изузетно ниску доњу ивицу конструкције. Успор од мостова се осећа узводно до km 8 по стационажи Црнице.



Слика 5. Подужни профил Црнице кроз Параћин са линијама нивоа великих вода (у условима без изливања) са утицајем постојећих мостова и без утицаја мостова
Figure 5. Longitudinal profile of the Crnica River through Paracin presenting the high water levels (no spill conditions) with and without effects of existing bridges

Када би се уклонили/реконструисали сви мостови, нивои воде у регулисаном кориту Црнице би били знатно нижи (код хотела Петрус, чак 1,2 м). У том случају би Ради заштите града од поплава, неопходно је реконструисати корито реке Црнице уз

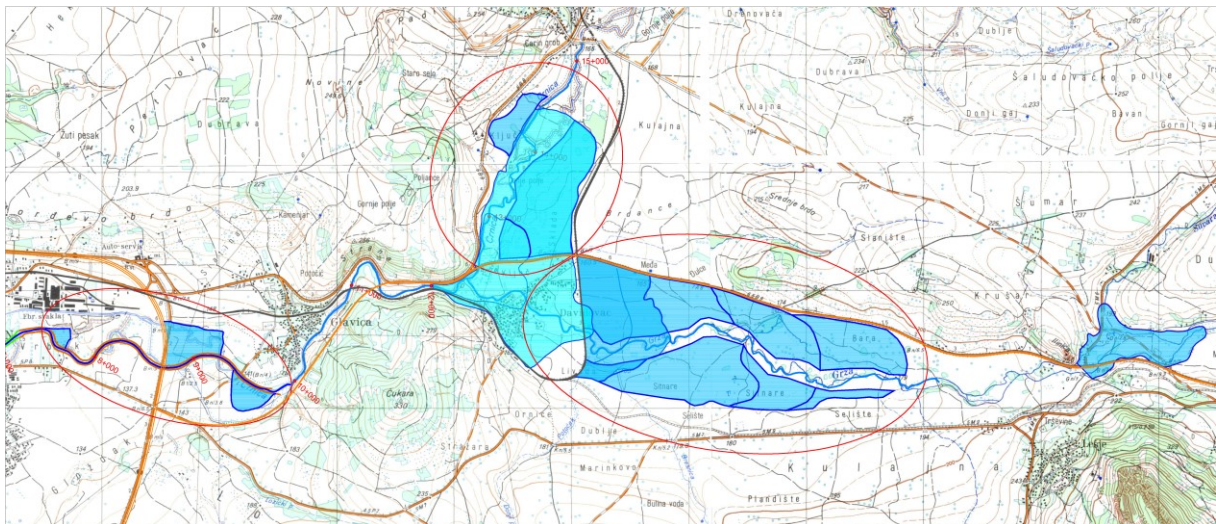
надвишење обала дуж тока, тако да може да прихвати нову меродавну велику воду $Q_{1\%}=255 \text{ m}^3/\text{s}$. Постојеће регулисано корито Црнице кроз Параћин не може да пропусти $Q_{1\%}=255 \text{ m}^3/\text{s}$ без изливања, чак и да се уклоне/реконструишу сви мостови. У случају реконструкције мостова било би потребно надвишење обала у центру Параћина, просечно око 1 m. Утицај мостова на Црници при $Q_{1\%}=255 \text{ m}^3/\text{s}$ је врло значајан - на пример мост код хотела Петрус ствара успор од чак 1,42 m. У условима постојећих мостова на Црници кроз Параћин требало би знатно надвисити леву и десну обалу како би се спречило изливање мероване велике воде.

5 Решење заштите Параћина од великих вода Црнице

У Параћину велике воде Црнице угрожавају преко 25.000 становника, као и врло велике и значајне индустријске и друге привредне објекте. Стога заштита од поплава насеља Параћин према Водопривредној основи Републике Србије спада у прву категорију приоритета, па се као меродаван за димензионисање заштитног система Параћина усваја рачунски проток повратног периода $T=100$ година (вероватноћа појаве 1%).

Техничко решења заштите Параћина подразумева повећања пропусне моћи водотока кроз градску зону и смањење пика поплавног таласа изградњом ретензија на Црници и Грзи.

Ретензирањем дела поплавног таласа Црнице узводно од Параћина повећала би се сигурност заштите од поплава овог града. Разматрано је више могућности и локација за потенцијалну изградњу ретензија, у којима би се, узводно од Параћина, задржао део поплавног таласа и тако смањио максимални проток (слика 6).



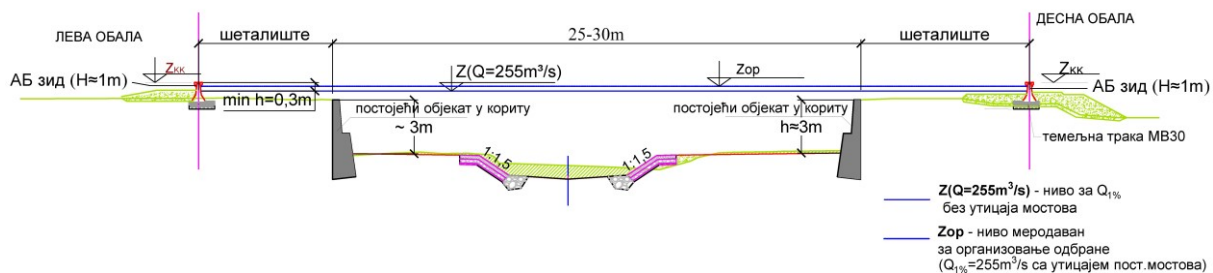
Слика 6. Локације потенцијалних ретензија узводно од Параћина
Figure 6. Potential retentions locations upstream of Paracin

Ублажавањем пика поплавног таласа ретензирањем дела поплавног таласа Параћин не би у потпуности био заштићен од меродавне велике воде. Потенцијалне

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

ретензије нису детаљно анализиране, због недостатка потребних подлога и података. Међутим, простор у коме би се у будућности градиле ретензије мора остати слободан за изливање великих вода (за сада неконтролисано), чиме ће се бар делимично смањити максимални проток кроз градско језгро.

С обзиром на бројна инфраструктурна ограничења, ради повећања пропусне моћи водотока могу се предузети само ограничене хидротехничке мере, углавном у смислу надвишења постојећих обала, одбрамбених насипа и обалоутврда. Предлаже се реконструкција одбрамбене линије дуж тока Црнице кроз насеље Параћин, са потребним сигурносним надвишењем у односу на ниво стогодишње велике воде Црнице вероватноће појаве 1% (слике 7 и 8).



Слика 7. Реконструкција - надвишење обала Црнице у ужој градској зони Параћина
Figure 7. Reconstruction - heighten of the Crnica River banks in Paracin downtown area



Слика 8. Реконструкција-надвишење обала Црнице узводно од уже градске зоне
Параћина
Figure 8. Reconstruction- heighten of the Crnica River banks upstream of Paracin downtown area

Највећи проблем у планирању заштите Параћина од великих вода представљају мостови, који представљају препреку великим водама. У случају да се изврши уклањање/реконструкција мостова постојеће регулисано корито Црнице може да прихвати проток $Q=180 \text{ m}^3/\text{s}$, за који је систем димензионисан, а за услове меродавне стогодишње велике воде ($Q_{1\%}=255 \text{ m}^3/\text{s}$) потребно је надвишење обала Црнице око 1 m у ужој градској зони. Надвишење треба извести изградњом земљаних насипа или изградњом вертикалних бетонских зидова до висине око 1 m, уз примену мобилне заштите до укупне потребне висине, у зависности од услова дуж трасе одбрамбене линије.

Литература

1. *Водопривредна основа Републике Србије*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, а.д, Београд, 2001.
2. *Генерални пројекат уређења Велике Мораве од ушћа у Дунав до састава Западне и Јужне Мораве*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2007.
3. *Водопривредне основа Републике Србије - Хидрометеоролошке подлоге*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“ и Републички хидрометеоролошки завод, Београд 2009.
4. *Експертиза поплавног догађаја из 2014. године са концепцијом техничког решења хитних радова на заштити Параћина од великих вода Црнице*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд 2015.

Узроци плављења Баричке реке и потребне мере заштите од поплава

Борис Крунић¹
Милан Малешев²
Вања Дамјановић³

АПСТРАКТ: Баричка река је типичан мали бујични водоток. Због мале пропусне моћи корита, долазило је до честих изливања и плављења околног подручја, нарочито у зони насеља Барич, где су куће и други објекти изграђени непосредно уз корито Баричке реке. У периоду од 2010-2013 године, урађен је главни пројекат регулације слива Баричке реке, који је обухватио регулисање корита, изградњу бране, противерозионе радове као и изградњу нових мостова. У току 2012. године изведена је низводна регулација у виду проширења и изградње АБ корита у дужини око 3,5 км. Ова регулација је без изливања спровела велике воде које су се јавиле током 2013. године. У мају 2014. године, дошло је до локалног изливања воде из регулисаног корита, а оно је на више места оштећено. У овом раду се указује на узроке овог догађаја и потребу да се сви планирани радови изведу у наредном периоду, како би се комплетирао систем заштите од поплава на Баричкој реци.

Кључне речи: Баричка река, поплава 2014, регулација

Causes of flooding on the Baric River, and necessary flood protection measures

ABSTRACT: Barička River is a typical torrential stream, that causes frequent flooding due to small discharge capacity, especially in the town of Barič where buildings are located on the river banks. During 2010 to 2013, technical documentation for the detailed design of the Barič River regulation works was created, containing design for river training works, one earth dam, anti-erosion works, as well as new bridges. The downstream reach of the river was regulated in 2012, when the riverbed was widened and concrete training works were applied to a length of 3.5 km. This newly-built embankment successfully withstood the flood event of 2013 without overflowing. In May 2014, however, the flood waters overflowed the embankment, and damages occurred in several locations. This paper examines the events that caused the floods and damages, as well as planned works to provide a complete and safe flood protection system on the Barič River.

Keywords: Baric River, flood 2014, river regulation

¹ Борис Крунић, дипл. инж. грађ, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Јарослава Черног 80, Београд, boris.krunic@jcerni.co.rs

² Милан Малешев, дипл. инж. грађ, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Јарослава Черног 80, Београд

³ Вања Дамјановић, дипл. инж. грађ, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Јарослава Черног 80, Београд

1 Увод

Баричка река је типичан мали бујични водоток, са карактеристичним хидролошким режимом и великим распоном протицаја, од малих до великих вода. Извире на простору Милошевице испод Велике Моштанице (територија општине Чукарица), а улива се у Саву, као десна притока у месту Барич, на територији општине Обреновац. Слив Баричке реке има површину од 26,7 km², док дужина тока Баричке реке износи око 13 km.

До 2012. године, Баричка река је била делимично регулисана на најнизводнијем делу тока, у дужини од око 1 km (од ушћа до моста на путу Београд - Обреновац: пут М-19). Узводни део од моста на путу Београд-Обреновац је био нерегулисан, са коритом малог пропусног капацитета, због чега је често долазило до изливања и плављења приобалних насеља Барич и Мала Моштаница. Дуж тока Баричке реке кроз насеље изграђен је велики број стамбених и других помоћних објеката, а обале водотока спаја шеснаест бетонских друмских или пешачких прелаза (мостови или пропусту), као и велики број импровизованих прелаза.

У сливу Баричке реке постоји и неколико мањих притока (три леве и једна десна притока), које гравитирају ка насељу Барич и Мала Моштаница, а својим бујичним режимом угрожавају простор кроз који пролазе. Осим атмосферских вода са слива, Баричка река сакупља и део фекалне канализације насеља Барич и Мала Моштаница.

Корито Баричке реке у зони насеља Барича је недовољног капацитета за велику воду, са ограниченим простором за проширење због великог броја изграђених стамбених објеката у непосредној близини тока. Узводно, у зони Мале Моштанице, корито водотока је скромних димензија, зарасло у бујну вегетацију која се не уклања. Евидентно је и постојање бројних депонија смећа и разног отпадног материјала у кориту Баричке реке.

2 Реконструкција поплавног таласа Баричке реке од 25. 2. 2010. године

Због обилних падавина која су се десиле у 24 и 25 фебруара 2010. године, дошло је до изливања Баричке реке дуж целог њеног тока, када је поплављено пољопривредно земљиште у горњем току Баричке реке, као и објекти који су се налазили у близини корита у урбанизованом делу Барича (слике 1 и 2).

Хидрауличка реконструкција максималног протицаја у таласу велике воде Баричке реке од 25. фебруара 2010. године одређена је на бази познатих морфолошких и хидрауличких карактеристика прорачуном линије нивоа велике воде применом програма HEC-RAS.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 1. Поплављена кућа у Баричу
Figure 1. Flooded house in Baric



Слика 2. Успор настао од локалног моста
Figure 2. Backwater caused by bridge.

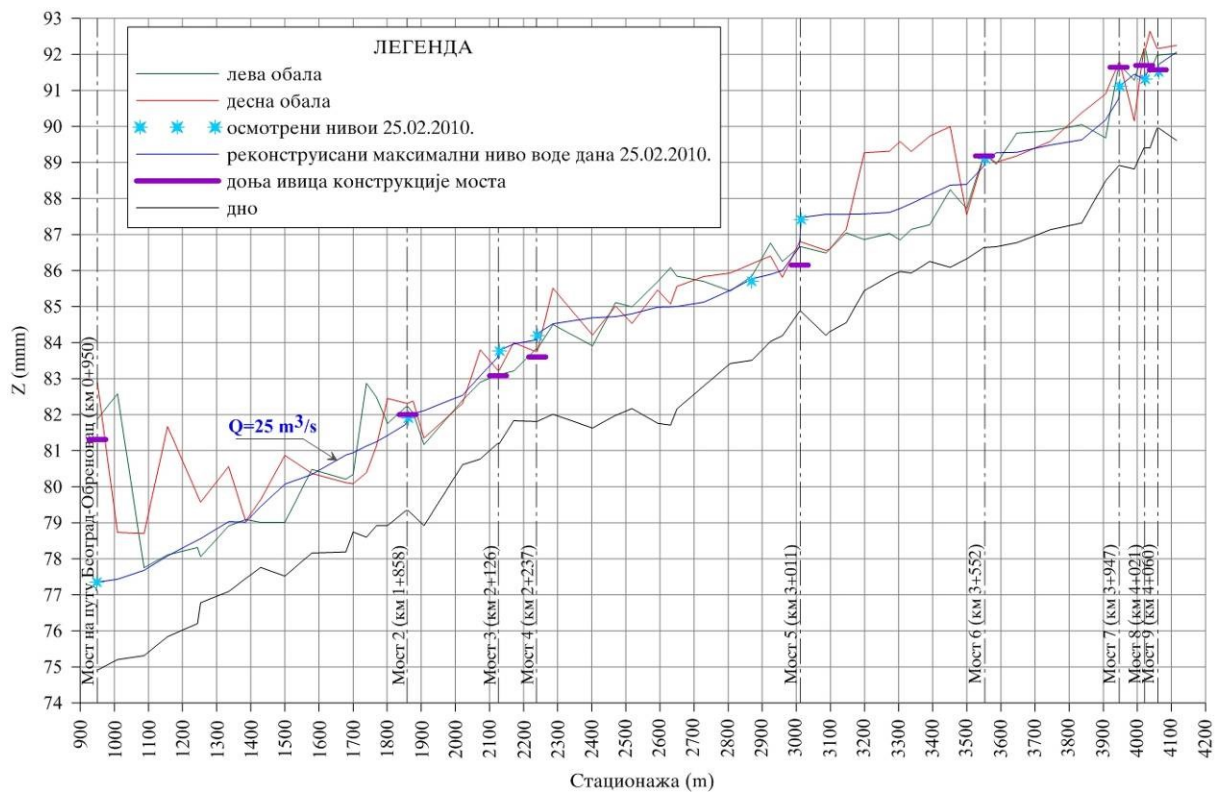
Проблем одређивања максималног протицаја у кориту Баричке реке за дату линију нивоа, решен је поступком итерације (претпостављајући серију протицаја).

На основу података о стању речног корита у време појаве поплавног таласа крајем фебруара 2010. године на потезу водотока дужине око 3 km, од низводног краја код моста на путу Београд-Обреновац (km 0+950) до моста 9 на km 4+058 на узводном крају посматране деонице, на 10 локалитета узводно од моста дефинисани су трагови пика таласа велике воде [1].

На основу прорачуна линија нивоа воде дуж посматраног сектора Баричке реке, за серију протицаја, дате морфолошке и хидрауличке параметре утврђено је да линија нивоа за $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ пролази кроз десет снимљених тачака у карактеристичним профилима узводно од моста при максималном нивоу који се јавио дуж посматране деонице у време поплавног таласа 25. фебруара 2010. године (слика 3).

На основу спроведених анализа, процењује се да максимални протицај у таласу велике воде Баричке реке дана 25. фебруара 2010. године од $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (реконструисано хидрауличким путем), одговара пробабилистичком рангу седмогодишње велике воде ($\sim Q_{15\%}$) [1].

Реконструкцијом поплавног таласа је установљено да поред недовољног пропусног капацитета корита Баричке реке, велики проблем течењу представљају и мостови који својом конструкцијом смањују протицајни профил корита Баричке реке (слика 2), чиме се додатно повећава ниво воде у кориту и инудацијама, што је указало на потенцијала уска грла којима је требало посветити посебну пажњу при пројектовању.



Слика 3. Подужни профил Баричке реке са реконструисаним поплавним таласом
Figure 3. Longitudinal profile with reconstructed flood event

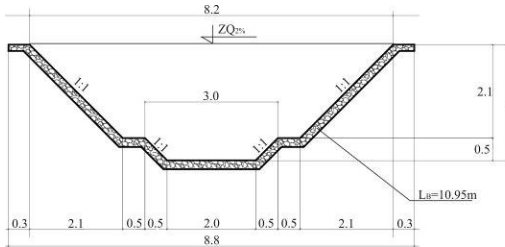
3 Концепција решења регулације

У циљу регулисања водотока Баричке реке, разматрано је неколико варијанти уређења, која су укључивала различите облике попречног пресека корита као и разматрање потенцијалних преградних места за израду ретензије, којом би се ублажио пик поплавног таласа у низводним деловима слива. Након анализе [2], усвојено је техничко решење уређења корита Баричке реке које подразумева:

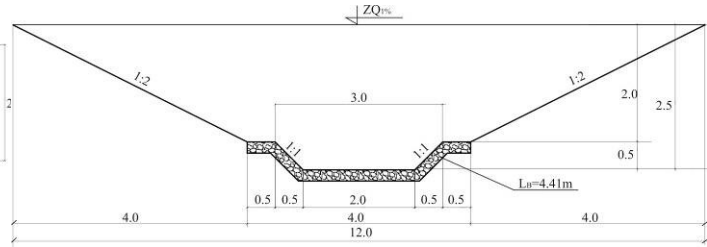
- Изградњу армирано - бетонског двогубог корита у нагибу 1:1 (слика 4) кроз урбанизовани део Барича, од моста Београд-Обреновац на km 0+950 до каскаде 11 на km 4+279. За пројектовање је због недостатка простора усвојена велика вода вероватноће појаве $Q_{2\%} = 51,0 \text{ m}^3/\text{s}$. У циљу смањења подужног пада регулисаног корита, на овом потезу водотока пројектовано је десет каскада, различитих висина (од 0,5 до 0,7 m).
- Изградњу двогубог корита са необложеним косинама у нагибу 1:2 и армирано - бетонским минор коритом у нагибу 1:1 (слика 5) кроз неурбанизовани дело Мале Моштанице, од каскаде 11 на km 4+279 до профила IV-IV на km 8+470. На овом потезу водотока, који није оптерећен изграђеним објектима, за пројектовање је усвојена велика вода $Q_{1\%} = 41,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Такође, предвиђена је израда и три каскаде висине 1,0 m.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

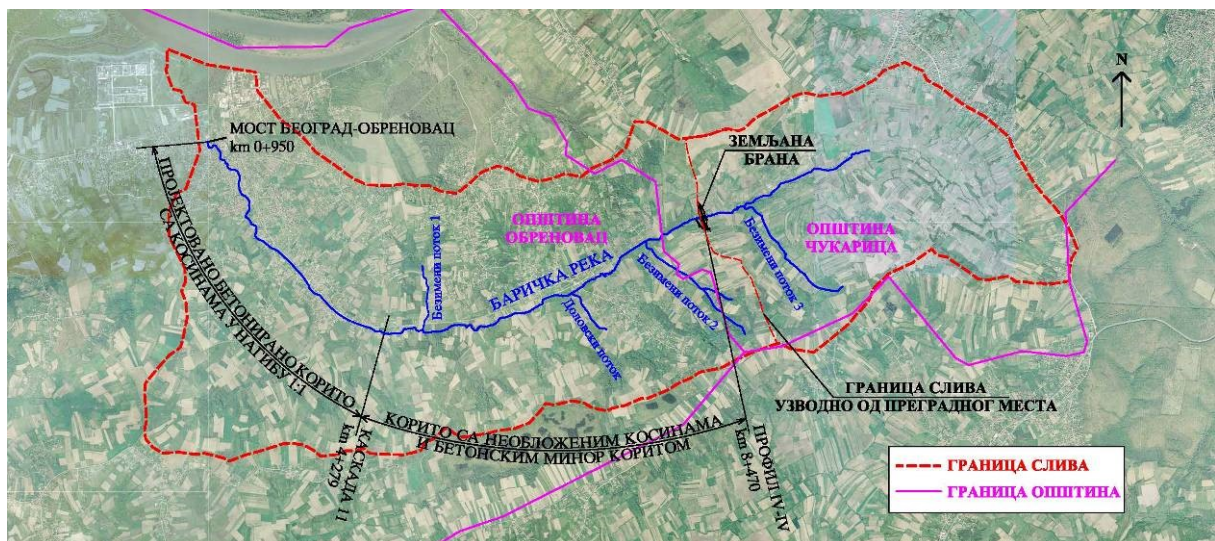
- Изградњу земљане бране и формирање ретензије у профилу IV-IV на km 8+470 Баричке реке [2], чиме би се контролисало око 30% сливног подручја Баричке реке (слика 6).



Слика 4. Пројектовани попречни пресек армирано-бетонског корита на низводном делу Баричке реке
Figure 4. Concrete cross section of designed riverbed on downstream part of Baric River



Слика 5. Пројектовани попречни пресек корита на узводном делу Баричке реке
Figure 5. Designed cross section for upstream part of Baric River



Слика 6. Ситуација сливног подручја Баричке реке са пројектованим регулационим радовима
Figure 6. Location of Barič River basin with designed river training works

У периоду 2011-2012. године, извршена је делимична регулација на делу водотока Баричке реке од моста Београд-Обреновац на km 0+950 до каскаде 11 на km 4+279, при чему је изведено армирано - бетонско корито (слика 7) на читавој деоници, док су остали незавршени радови на замени мостова који немају довољну пропусну моћ. У зони ових мостова направљен је прекид бетонирања, тј. ови мостови нису спојени са остатком армирано-бетонског корита (слика 8), а повезивање корита је предвиђено након замене старих мостовских конструкција са новим. Међутим, иако регулација није

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

у потпуности изведена, све велике воде које су се јавиле током 2013. године су спроведене без изливања кроз регулисани део Баричке реке.



Слика 7. Армирано-бетонско корито
Figure 7. Concrete channel



Слика 8. Прекид армирања у зони моста
Figure 8. Channel discontinuation

4 Поплава из маја 2014. године

Интензивна киша је трајала три дана, од 12. маја 2014. године до 15. маја 2014. године, што је веома ретка појава за кише средњег и великог интензитета које изазивају катастрофалне поплаве. Интензитет кише у првих неколико сати није био на нивоу ретких догађаја, али је због дугог трајања истим или сличним интензитетом сума падавина за 24 сата достигла ниво стогодишње кише. На метеоролошким станицама Београд, Ваљево и Лозница током првих 24 сата пало је око 100 mm кише. Током наредних 24 сата, на истим метеоролошким станицама, измерено је 50-60 mm кише. Регистрована сума падавина за два дана представља догађаје ретке вероватноће појава.

У време обиласка терена током обилних падавина у преподневним часовима 14. маја 2014. године, констатовано је да регулисаним коритом Баричке реке тече вода без изливања, која испуњава бетонско корито приближно до половине дубине. На потезу водотока кроз Барич нису регистрована оштећења бетонског корита, при чему је узводно од каскаде 11 (узводни крај регулације) читав приобални појас био поплављен.

Након проласка поплавног таласа из маја 2014. године, извршен је детаљан обилазак терена дуж тока Баричке реке кроз Барич и Малу Моштаницу 26. и 28. маја 2014. године, и констатован велики обим оштећења бетонске облоге корита на потезу водотока од моста на путу Београд - Обреновац (профила 1 на km 0+950) до каскаде 11 (km 4+279).

На укупној дужини регулисане деонице од 3329 m (од km 0+950 до km 4+279) бетонска облога корита је оштећена на дужини од 351 m (10 % укупне дужине), док је облога делимично подигнута на дужини од 255 m (8 % укупне дужине).

Стари мостови, који су били предвиђени за уклањање и нису имали довољну пропусну моћ, нису били повезани са пројектованом бетонском облогом, због чега је у

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

зони ових мостова дошло до оштећења корита, као и самих мостова, при чему су 3 моста и срушена.

Габионска облога на низводном крају регулације код моста Београд - Обреновац на читавој дужини од 72 m је оштећена, при чему је јако оштећена дуж конкавне обале, док је дуж конвексне обале и по дну остала у релативно добром стању.

На дужини од 226 m, у средњем делу регулације, бетонска облога није оштећена, али је подлога местимично испрана.

Током пика поплавног таласа бетонско корито је било испуњено до врха, али на највећем делу није било изливања, осим на локалитетима на којима је дошло до већих оштећења корита и код мостова који нису реконструисани, док је у време поплаве на узводном нерегулисаном делу кроз Малу Моштаницу, вода текла пуним профилем долине ширине око 300 m, при чему је максимална дубина воде износила око 1,5 m. За услове изградњености бране у профилу IV-IV на km 8+470 Баричке реке, на овом профилу текла би само вода коју пропушта темељни испуст Ø 600.

На сликама 9 и 10 су приказана нека од оштећења на регулисаном делу корита Баричке реке током поплаве из маја 2014. године.



Слика 9. Оштећен мост
Figure 9. Damaged bridge



Слика 10. Оштећено корито
Figure 10. Damaged riverbed

5 Закључак

Баричка река је типичан мали бујични водоток, чија је мала пропусна моћ корита узроковала честа изливања и плављење околног подручја, због чега је урађен Главни пројекат уређења слива Баричке реке.

У току 2012. године је изведена делимична регулација у виду проширења и изградње АБ корита у дужини око 3,5 km на низводном делу тока, кроз урбанизовани део Барича.

Током поплаве из маја 2014. године, на укупној дужини регулисане деонице од 3329 m бетонска облога корита је оштећена на дужини око 351 m (10 % укупне дужине облоге), док је облога делимично подигнута на дужини око 255 m (8 % укупне дужине облоге).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Највећа оштећења регулисаног корита настала су на местима мостовских конструкција које нису биле уклоњене, што је директна последица недовољног пропусног капацитета и прекида бетонирања у зони ових мостова, а повезивање корита је било предвиђено након замене старих мостовских конструкција новим.

На узводном, нерегулисаном делу Баричке реке кроз Малу Моштаницу дошло је до изливања, при чеми је дубина воде достигала и 1,5 m.

Комплетним извођењем система за уређење слива Баричке реке, предвиђеним Главним пројектом (изградња бране, и регулација корита Баричке реке кроз Малу Моштаницу), избегло би се плавлeње узводног нерегулисног дела Баричке реке, док би на низводном регулисаном делу оштећења би минимална.

Литература

1. Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Уређење слива Баричке реке у циљу заштите од поплава - Главни пројекат уређења корита баричке реке од моста на путу Београд-Обреновац (km 0+950) до каскаде 11 (km 4+435) - Реконструкција поплавног таласа Баричке реке од 25. фебруара 2010. године, 2010.
2. Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Уређење слива Баричке реке у циљу заштите од поплава - Главни пројекат (књиге 1 и 2), 2010.

Заштита улаза у луку Ковин од засипања наносом Дунава

Зоран Кнежевић¹

Марина Бабић Младеновић²

АПСТРАКТ: Улаз у марину и зимовник Ковин налази се на левој обали Дунава на km 1108+300, око 3,3 km узводно од ушћа Велике Мораве. На самом улазу у луку и зимовник је присутно стално исталожавање наноса, које угрожава функције ове акваторије, јер проблеме имају чак и корисници чија пловила имају знатно мањи газ од газа меродавног дунавског пловила. Због ових проблема је у више наврата вршено багеровање исталоженог материјала. Циљ регулационих радова је обезбеђење функције акваторије луке Ковин, која поред других функција, у периоду појаве леда на Дунаву има улогу зимовника за 25 пловила домаће заставе. Извршена је прво анализа хидролошко-хидрауличких, морфолошких и псамолошких услова у широј зони улаза у луку/ зимовник. Идентификовани су узроци засипања улаза у луку, размотрена су решења којима се може бар делимично елиминисати проблем засипања и дефинисано решење заштите луке Ковин, које је прилагођено условима на терену.

Кључне речи: Дунав, Ковин, лука, нанос, таложење

Protection of the Kovin port entrance against deposition of the Danube sediment

ABSTRACT: The entrance to the marina and winter shelter Kovin is situated on the left bank of the Danube at km 1108 + 300, about 3.3 km upstream from the Velika Morava mouth. The permanent process of entrance siltation is present, and it threatens the functions of the harbour, because the problems are encountered also by users of vessels having a much smaller draft than regular Danube vessels. The dredging of the deposited material was repeatedly carried out to solve the problem. The aim of training works is to provide functions of port area Kovin, which among other functions, serves as a winter shelter during ice period for 25 vessels under domestic flag. The analysis of hydrologic-hydraulic, morphological and sediment conditions in the wider area of the harbour entrance was carried out firstly. The causes of siltation harbour entrance were identified, solutions which can be at least partially eliminate the siltation problem were reviewed and the site specific solution for protection defined.

Keywords: Danube, Kovin, harbour, sediment, siltation

¹ Зоран Кнежевић, дипл. инж. грађ, Завод за уређење водних токова, Институт за водопривреду “Јарослав Черни”, Београд, zoran.knezevic@jcerni.co.rs

² Др Марина Бабић Младеновић, дипл. инж. грађ, Завод за уређење водних токова, Институт за водопривреду “Јарослав Черни”, Београд, marina.babic-mladenovic@jcerni.co.rs

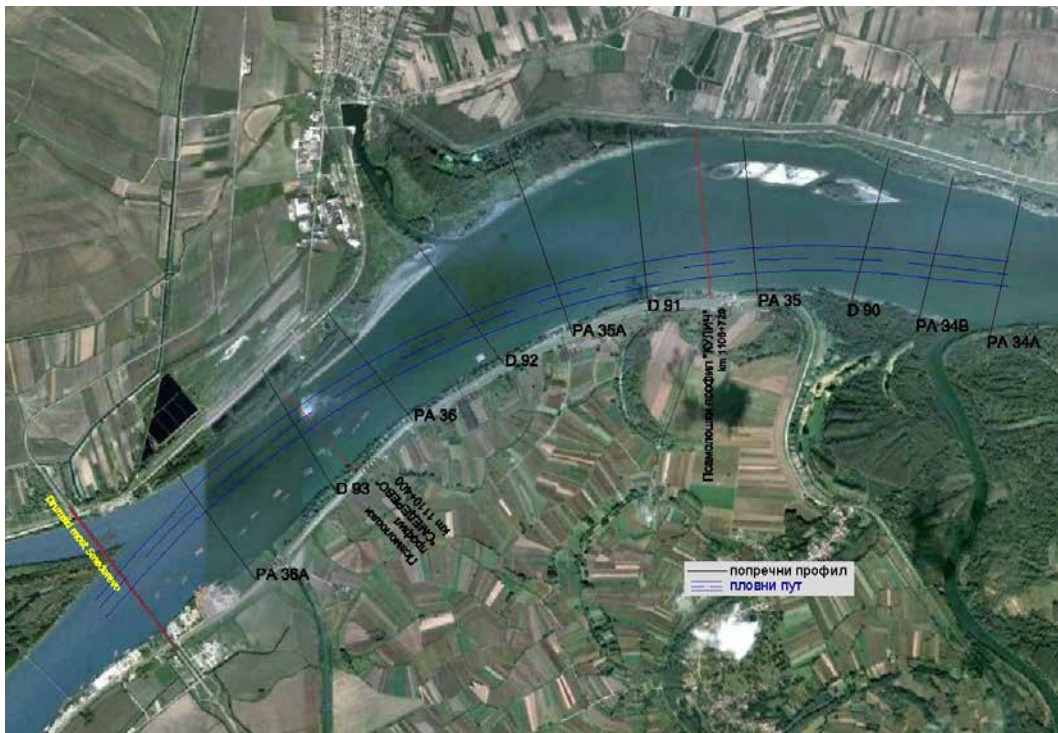
1 Увод

Улаз у луку Ковин налази се на левој обали Дунава, на речној стационажи km 1108+300. Овај локалитет налази се на око 8 km низводно од хидролошке станице Смедерево, док се око 3,3 km низводно од њега налази ушће Велике Мораве у Дунав.

На самом улазу у луку је присутно стално исталожавање наноса, па проблеме имају чак и корисници чија пловила имају знатно мањи газ од газа меродавног дунавског пловила (рибари, рекреативци, наутичари). Због ових проблема је у више наврата вршено багеровање исталоженог материјала. Акваторија луке Ковин у периоду леда на Дунаву има и улогу зимовника. Зимовник је предвиђен за 25 пловила домаће заставе, док га страна пловила могу користити само у нужди.

2 Опис садашњег стања корита Дунава у зони улаза у луку Ковин

Улаз у луку се налази на прелазу са праволинијске деонице у десну кривину Дунава (слика 1). На овом потезу се речно корито Дунава постепено проширује, а уз леву обалу формира ада. У зони улаза речно корито има ширину око 1000 m, док је максимална дубина око 15 m, при средњим водама. Дубине су нешто веће у десној половини профила, где је и најнижа кота, која износи 58 мнм. Ка левој обали се дубине постепено смањују, док се узводно од улаза у зимовник налази спруд који је видљив при средњим водама. На сувом делу спруд је обрастао ниском травом и местимично ниским растињем.



Слика 1. Дунав у зони улаза у луку Ковин

Figure 1. Danube River in the area of Kovin harbour entrance zone

На обалама су изграђени одбрамбени насипи, са круном приближно на коти 75 мнм. Између спруда и насипа је инундација, обрасла шумом.

На шпицу десне обале улаза у зимовник постоје остаци старе, дотрајале и обрушене регулационе грађевине.

Улаз у зимовник Ковин налази се на сектору Дунава који је под утицајем успора изазваног изградњом и радом ХЕ „Ђердап 1“. У периоду рада хидроелектране на овом локалитету су нивои мале воде повећани око 4 m у односу на ниво у природном режиму, док је ниво средње воде повећан око 1,8 m. Брзине тока Дунава су мале, и просечно у профилу улаза износе од 0,25 m/s при малој води до 1,35 m/s при стогодишњој великој води.

С обзиром на то да овај потез Дунава припада Ђердапској акумулацији, на њему се морфолошке промене прате периодичним снимањем сталних профила (1976, 1981, 1984, 1988, 2005 и 2010. године). Улаз у луку Ковин (слика 1) налази се између профила ПА35а (km 1107+960) и Д92 (km 1108+680).

И у дну Дунава и на спруду се налази песак, у дијапазону од прашинастог до средњег песка. Најкрупнији песак захваћен је из дна Дунава у близини улаза у канал.

ПЛОВПУТ је дефинисао габарите приступног пловног пута који су потребни за безбедан улаз у зимовник/луку. Прелиминарне димензије су 30 m ширине и кота дна 65,64 мнм (4 m испод ниског успореног нивоа = 69,64 мнм). Ради обезбеђења ових габарита, често је потребно багеровање на овом локалитету. Од 1982. до 2009. године је уклоњено око 90700 m³ наноса.

3 Анализа процеса засипања улаза у луку Ковин

Да би могло да се дефинише хидротехничко решење којим би се утицало на процес засипања потребно је било одговорити на основно питање: да ли на посматраној деоници Дунава постоји дугорочни тренд деформације корита и који су узроци промена? Због тога су прикупљене различите подлоге, које се односе на период дужине преко пола века, на основу којих је закључено да је засипање улаза у канал који води ка луци Ковин последица интеракције више процеса.

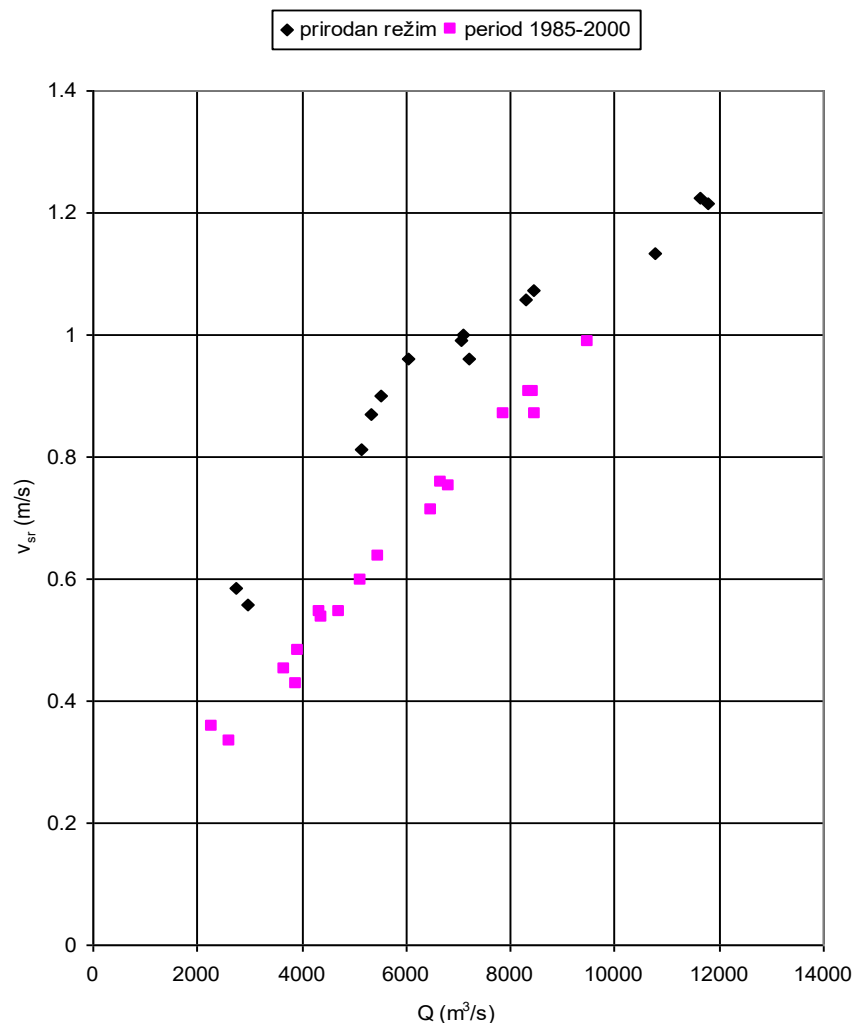
Први процес који утиче на зону улаза у луку Ковин је **исталоживање наноса у акумулацији ХЕ „Ђердап 1“**, које је започето по формирању акумулационог језера изградњом бране на km 943. Основни параметри овог процеса су утврђени на основу бројних комплетних мерења воде и наноса која су на посматраној деоници Дунава вршена у периодима пре и после изградње бране, на оближњем псамолошком профилу Дубравица/Кулич.

На основу упоређења средњих профилских брзина тока Дунава (слика 2), у природном режиму водотока и условима сталног режима експлоатације хидроелектране (после 1985. године), констатовано је да је средња профилска брзина тока смањена за око 0,2 m/s у дијапазону протока од 2000 до 8000 m³/s, док се при већим протоцима брзине у реци нису промениле у односу на природни режим водотока. Услед смањених брзина и повишених нивоа воде, у зони зимовника Ковин долази до исталоживања наноса. Овај процес има трајни карактер, односно одвијаће се све док се не успостави ново квази-равнотежно стање водотока.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

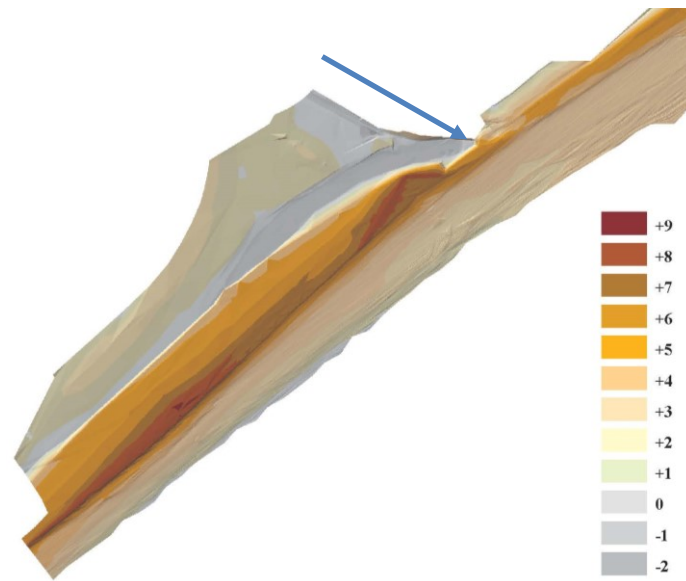
Други значајни процес је **исталожавање наноса на спруду узводно од улаза у луку Ковин**, који је инициран изградњом регулационе грађевине узводно од канала. Према катастру регулационих објеката на Дунаву, у питању је напер са крилом, али не постоје подаци о његовим димензијама ни о години изградње. Размере овог процеса могу се сагледати на основу упоређења 3Д модела терена из 1963. и 2012. године (слика 3). Констатује се да је за 40 година на спруду исталожено 1,9 милиона m^3 наноса, а кота спруда се променила просечно за 3 m.

У садашњем стању спруд чине две целине – део према насипу је између кота 70 mнм и 71 mнм, а део према води између кота 69 mнм и 70 mнм. То значи да је нижи део спруда практично целе године под водом, док је виши у периоду малих и средњих вода сув.



Слика 2. Корелација протока воде и средње брзине тока у природним условима и условима успора ХЕ „Ђердап 1“

Figure 2. Correlation between discharge and the average flow velocity in natural conditions and in the HE „Djerdap 1“ impoundment

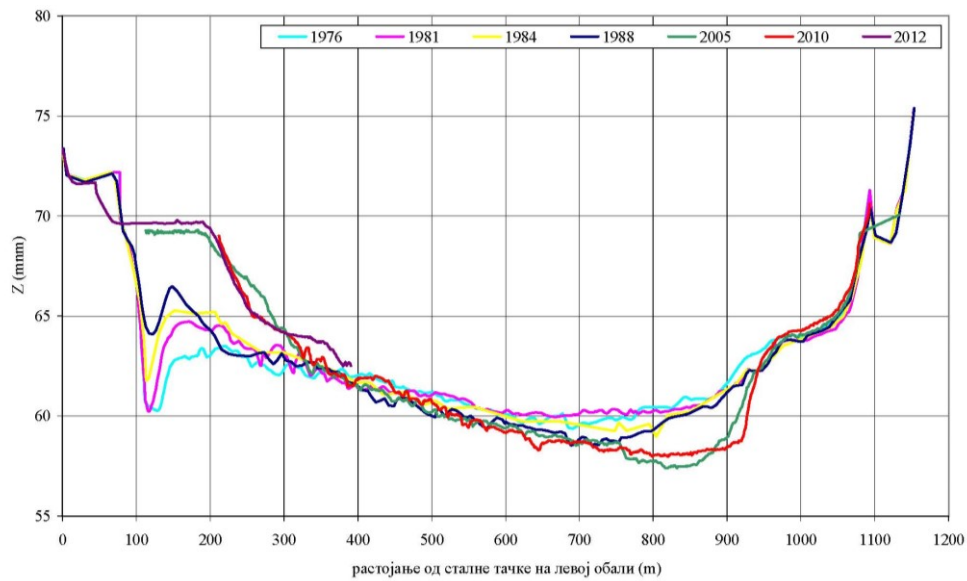


Слика 3. Промене кота терена узводно од улаза у канал, 1963-2012. године
 Figure 3. Changes of terrain elevation upstream of the canal entrance, 1963-2012. year

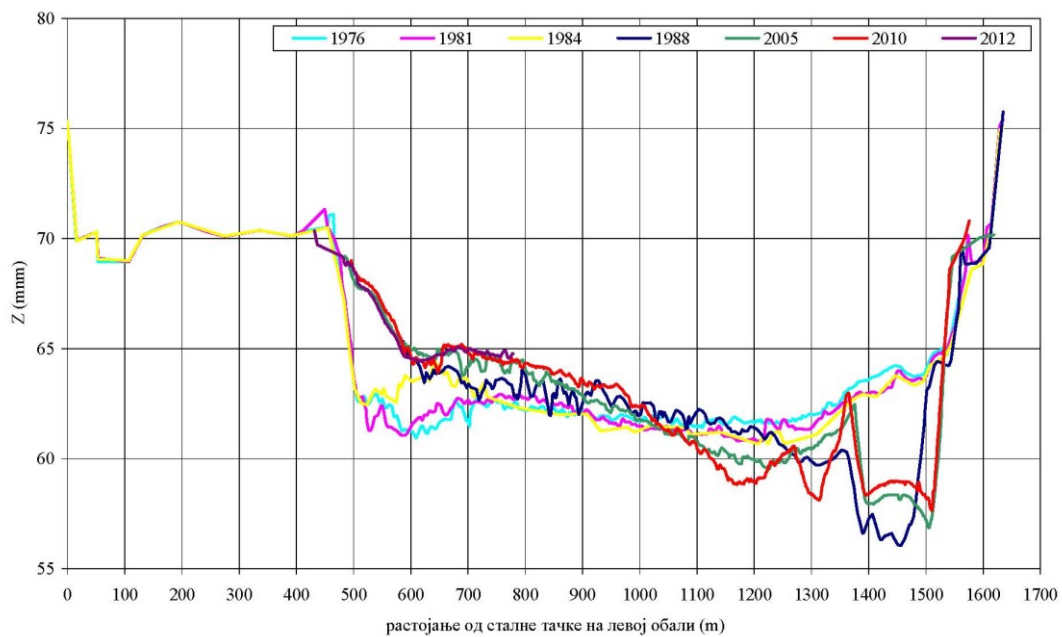
Године 1963. су коте на самом улазу у канал биле више од терена узводно (71-72 мнм). Данас су ту коте ниже до 2 m, као и у ширем појасу узводно. Ово указује да се је дошло до ерозије дела спруда, односно да се вероватно при већим водама формира паралелан ток који спира нанос са спруда директно на улаз канала луке Ковин. Снимања сталних профила акумулације у зони спруда (профил Д92, слика 4) показују да је процес формирања спруда практично завршен.

За посматрани локалитет битне су и **морфолошке промене на потезу Дунава узводно од ушћа Велике Мораве**. Наиме, улаз у луку Ковин се налази на конкавној обали велике речне кривине, тако да би било очекивано да се процес ерозије одвија у зони уз конкавну, леву обалу, а депоновање наноса у делу корита ка конвексној, десној обали. Међутим, на ширем потезу Дунава, између ушћа Велике Мораве и Ковина је у последњих 10-15 година дошло до врло значајних морфолошких промена и тиме је потпуно измењена класична хидрауличко-псамолошка ситуација, јер је на анализираној деоници Дунава (km 1111 – km 1105) процес таложења наноса присутан на левој страни профила, ближе конкавној обали.

Попречни профил Д92 (код улаза у луку, слика 4) је 1976. године имао скоро правоугаони облик, са пролоком уз леву обалу до коте 60 m. Након тога се профил мењао, постепено добијајући троугаони облик, са највећим дубинама у десном делу профила. Спруд уз леву обалу је растао и сада је на коти 69,5 мнм, дуг преко 100 m. Профил ПА35А (слика 5) је у периоду 1976-1984. године је био скоро правоугаони, са нешто већим дубинама уз леву обалу. На снимању 1988. године се види пролока уз десну обалу, која може да представља значајније багеровање, док је лева половина профила засута. Овакав, троугаони облик профила, са највећом дубином уз десну обалу се одржао до данас.



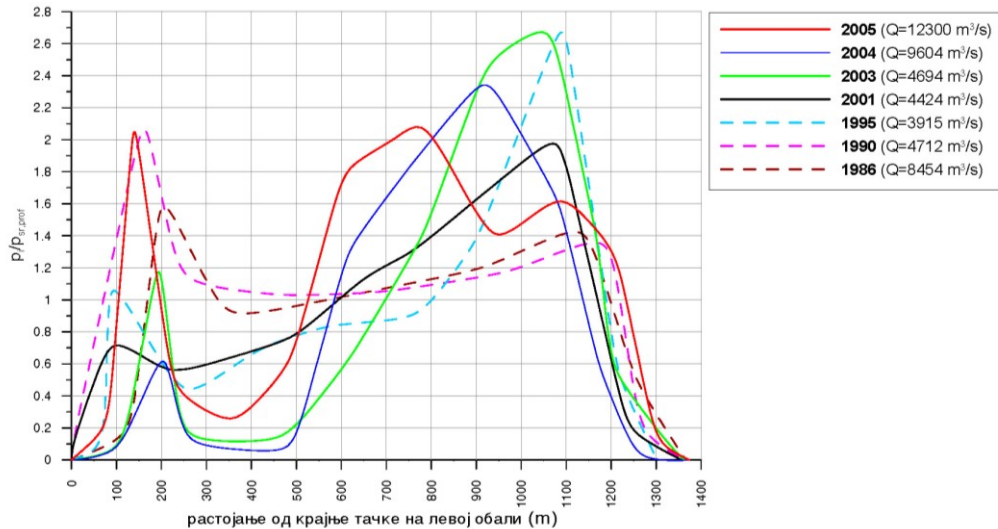
Слика 4. Попречни профил Дунава Д92 (km 1108+680)
 Figure 4. Danube cross section D92 (km 1108+680)



Слика 5. Попречни профил ПА35А (km 1107+960)
 Figure 5. Danube cross section PA35A (km 1107+960)

Између улаза у луку Ковин и ушћа Велике Мораве се одвија веома специфичан процес – уз леву обалу се развија ада, док су се матица и пловни пут померили ка десној обали. Ада представља препреку течењу воде и транспорту суспендованог наноса. Ово се јасно може видети на слици 6, која је формирана на основу комплетних мерења на профилу Кулич.

Раст аде у узводном правцу се може очекивати у наредном периоду. Посматрано у плану, ада представља „диновски напер“, који поспешује даље исталоживање наноса узводно, а самим тим и у зони улаза у луку Ковин.



Слика 6: Бездимензиона расподела проноса суспендованог наноса у профилу Кулич
Figure 6. Dimensionless distribution of suspended sediment transport at the Kulic profile

Према свему наведеном, постоје три узрока засипања наносом улаза у луку Ковин: (1) исталоживање у условима успореног тока, (2) спирање финог наноса са спруда узводно од улаза у луку Ковин и (3) померање матице тока ка десној обали. Не може се проценити колико који од наведених узрока доприноси процесу засипања.

Процес засипања корита Дунава који се налази под успором ХЕ „Ђердап 1“ ће се наставити у будућности. Не постоји мера којом се, у зони улаза у луку Ковин, овај процес може спречити или умањити, осим повременог багеровања.

Процес раста спруда узводно од улаза у луку Ковин је у великој мери завршен. Спирање наноса са потопљеног дела спруда се може спречити извођењем регулационе грађевине, која је приказана у наставку.

За уређење корита на широј деоници између ушћа Велике Мораве и Ковина, на којој се одвијају морфолошке промене које имају негативни утицај на улаз у луку, може се наћи трајно решење - систем напера на десној, конвексној обали и делимично уклањање аде уз леву обалу, чиме би се побољшала струјна слика и умањило исталоживање наноса. Сигурно је, међутим, да би инвестициона вредност изградње система регулационих грађевина далеко превазишла цену повремених багеровања у зони улаза у луку Ковин.

Из претходног разматрања комплексних процеса који доводе до сталног засипања улаза у луку Ковин се може закључити да овај проблем има трајни карактер и не може се потпуно и трајно решити никаквим регулационим захватом. Могуће је само извођење регулационе грађевине по ободу спруда, чиме ће се само смањити количине наноса које се морају уклањати повременим багеровањем.

4 Опис техничког решења

Узводно од улаза у луку Ковин треба на постојећем спруду формирати објекат који би спречио спирање неконсолидованог наноса у канал (слика 7). Објекат има облик напера са крилом, које је усмерено узводно. Укупна дужина објекта је 450 m, од чега је 170 m дуж канала, а 280 m дуж ивице спруда, паралелно са Дунавом.



Слика 7: Положај објекта у односу на улаз у луку
Figure 7. Layout of the structure at the harbour entrance

За извођење објекта се може применити **савремено решење** (цевасти елементи од геотекстила, која се након постављања по планираној траси пуне материјалом избагерованим са локалитета улаза) или **класично решење** (грађевина од камена).

Савремено решење би се извело од MacTube® елемената, који имају следеће особине: израђују се од тканог полипропилена, лако се постављају и на суви и на подводни терен, постављање и пуњење геоконтејнера је једноставно и економски исплативо, са минималним утицајем на животну средину, геотекстил је у боји песка, тако да се елементи визуелно уклапају у околину, ткање геотекстила је такво да он не може да се испара, па има велику отпорност на оштећења, материјал MacTube® елемената је пермеабилан (водопропустљив), тако да у случају да се постављају на суви терен вода се постепено цеди, пуне се кроз ојачани бочни отвор у који се поставља излаз из цеви хидрауличког багера.

MacTube® елементи се производе у различитим димензијама, којима одговарају максималне висине пуњења 1,1 до 3,0 m. Дужина елемента се бира зависно од услова на локалитету (од 15,2 m до 76,2 m). У складу са карактеристикама терена, за локалитет Ковин изабран је MacTube® максималне висине пуњења 2,1 m. Просечна кота спруда је 69,5 mнм, тако да би се уградњом елемената висине 2,1 m постигла кота објекта 71,6 mнм. То значи да би ова грађевина била преливана само при већим водама, које имају трајање око 5% или 15-16 дана у просечној години. У осталом делу године би се иза објекта таложио нанос.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Слика 8. Изглед цевастог елемента од геотекстила (MacTube®)
Figure 8. Geotextile tubular element (MacTube®)

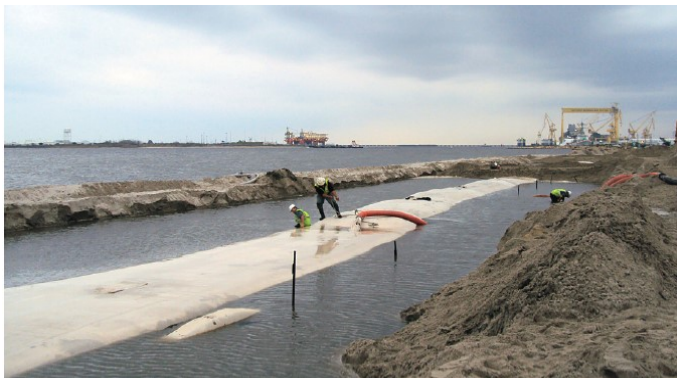


Слика 9. Пуњење елемената од геотекстила, који су постављени на пројектовану трасу
Figure 9. Filling up of geotextile elements, aligned as designed

MacTube® елементе би требало поставити на подводни спруд од ситнозрног песка, али он не може да носи њихову тежину и дошло би до слегања објекта, односно смањења коте заштите. Због тога најпре на спруд треба поставити подлогу која би спречила вертикално слегање објекта и обезбедила функцију објекта у будућности. Предложено је да темељ грађевине буде геокмпозитни материјал MacTexC2S који се састоји од тканог и нетканог геотекстила, а доставља се у ролнама ширине 5,3 m и дужине 100 m.

Дубина воде у зони радова је веома мала - више од пола године је мања од 1 m. Стога би начин постављања геокмпозитне подлоге и MacTube® елемената требало прилагодити условима у време извођења радова: могу се постављати са пловног објекта са плитким газом или их могу постављати радници опремљени одговарајућом заштитном опремом (слика 10).

У делу који је паралелан са каналом за улаз у луку Ковин, потребно је поставити ломљени камен дуж објекта, ради заштите од удара бродова (слика 11).



Слика 10. Постављање везе хидрауличког багера и MacTube® елемента
Figure 10. Setting up a connection between the hydraulic dredger and MacTube® element



Слика 11. Заштита крупним ломљеним каменом
Figure 11. Rock riprap

Класично решење би био објекат од камена ($D_{sr}=30\text{ cm}$, $D_{min}=15\text{ cm}$, $D_{max}=60\text{ cm}$), постављен на подлогу од шљунка на геотекстилу тип 500. Објекат је трапезног попречног профила, ширине у круни 3,0 m и нагибом косина 1:3 на речној страни и 1:2 на страни спруда. Ширина објекта при дну је 10,5 m, док је ширина подлоге 17,5 m – са небрађене стране препуст од 5,0 m и са брађене стране 2,0 m. Подлога од шљунка је укупне дебљине 0,6 m и поставља се у два слоја по 30 cm. Висина каменог дела грађевине је 1,5 m, па је укупна висина 2,1 m. Ширина у круни 3,0 m омогућава да се за извођење користи сувоземна механизација, а објекат изведе напредовањем са чела.

5 Закључак

Постоје три узрока засипања наносом улаза у луку Ковин: (1) исталожавање у условима успореног тока, (2) спирање финог наноса са спруда узводно од улаза у луку Ковин и (3) померање матице тока ка десној обали. Не може се проценити колико који од наведених узрока доприноси процесу засипања. Објекат узводно од улаза у луку Ковин, који би спречио спирање неконсолидованог наноса у канал, би имао локални утицај на режим течења и транспорта наноса у реци Дунав. Гради се у делу попречног профила где, у садашњим условима, практично нема течења, осим при великим водама. С обзиром на то да затвара занемарљив део протицајног профила Дунава, овај објекат не би имао битног утицаја на ниво меродавне велике воде, тако да се не би променили услови заштите које сада обезбеђују насипи на овом потезу реке.

Режим наноса би се локално изменио, што и јесте циљ извођење регулационог захвата. Нови објекат представља у суштини надвишење некадашње грађевине на улазу у луку Ковин. Објекат ће иницирати таложење наноса узводно и спречиће спирање наноса у канал.

У периоду до потпуног засипања наносом, простор ће бити забарен. Мале дубине воде и мирна вода ће вероватно привући барске птице да ту формирају станиште, што може бити повољно са аспекта туризма.

Као што је већ истакнуто, изградњом објекта се елиминише само један од три узрока засипања улаза у луку Ковин. Други процеси који утичу на ову појаву (исталожавање наноса узроковано успором ХЕ „Бердап 1“ и морфолошке промене на ширем потезу Дунава) не могу се елиминисати, тако да ће и у наредном периоду постојати одређено засипање улаза, који ће захтевати повремено чишћење.

Међутим, иако се то тешко може доказати без изузетно комплексних истраживања и моделирања, може се претпоставити да је спирање наноса са спруда узводно од луке доприносило засипању улаза са око 50%. Уколико се претпостави да је век објекта 50 година, просечне количине материјала које треба уклонити са улаза у луку око 4000 m³, а цена багеровања 4 €/m³ добија се да инвестициона вредност објекта не сме бити већа од: $50 \times (0,5 \times 4000) \times 4 \text{ €/m}^3 = 400.000 \text{ €}$. Обе разматране варијанте грађевине имају инвестициону вредност мању од наведене границе, при чему савремено решење има значајно мању цену (укупно 164.800 €) од класичног решења (380.900 €) па је самим тим повољније.

Треба истаћи да је у укупну цену савремене варијанте ушло и багеровање материјала из зоне улаза, које се мора урадити да би се обезбедио материјал за пуњење цевастих елемената. Ова позиција чини чак 1/4 цене главних радова јер је за пуњење

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

потребно око 8000 m³. Ако се редовно измуљење улаза у луку уради у време извођења главних радова односно после постављања подлоге и цевастих елемената, постигла би се уштеда од око 32.000 € само тиме што се багеровани материјал не би враћао у корито Дунава већ би се уграђивао у објекат.

Међутим, ова иновативна технологија била би први пут примењена у Србији. То значи да треба остварити тесну сарадњу са испоручиоцем цевастих елемената и подлоге, како би се радови извели ефикасно, у складу са условима на терену и у доба године које је повољно и за постављање објекта и за багеровање.

Литература

1. *Осматрања, мерења и анализе утицаја режима успорених вода на приобаље Дунава изазваних изградњом ХЕ "Бердап 1 и 2" (Програм I - Режим површинских вода),* Институт за водопривреду "Јарослав Черни", 1974-2012.
2. *Осматрања, мерења и анализе утицаја режима успорених вода на приобаље Дунава изазваних изградњом ХЕПС "Бердап 1 и 2" (Програм III - Режим наноса),* Институт за водопривреду "Јарослав Черни", 1974-2012.
3. *Прорачун успорених нивоа воде у акумулацији ХЕ „Бердап 1“ у режиму дефинисаном у Прилогу I Конвенције о експлоатацији и одржавању ХЕ „Бердап 1“ и ХЕ „Бердап 2“,* Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2007. година
4. *Морфолошке промене у акумулацијама „Бердап 1“, за период 1976-2010. година, и „Бердап 2“ за период 1985-2010. година,* Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2011. година
5. *Идејни пројекат заштите улаза у луку Ковин од засипања речним наносом,* Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, 2013. година

Hidrološko-hidraulički istražni radovi po trasi gasovoda Južni tok

Vladislava Bartoš Divac¹
Vojislav Antičić²
Dragana Ninković³

APSTRAKT: Gasovodi nisu hidrotehnički objekti ali njihova interakcija sa vodotocima na mestima ukrštanja može biti značajna. Zato su u okviru pripreme projekta Južni tok kroz Srbiju izvršena obimna hidrološko-hidraulička istraživanja na prelazima preko vodotoka. Istraživanja su obuhvatila pripremne radove, terenske istražne radove i analize klimatskih, hidroloških, hidrauličkih i morfoloških parametara od značaja za izvođenje ovog objekta. Za svaki prelaz je na osnovu rekognosciranja definisan program terenskih istražnih radova, u zavisnosti od karakteristika vodotoka u široj zoni. Obim istraživanja je bio izuzetan, jer je dužina glavne trase gasovoda oko 422 km, odvojka prema Republici Srpskoj 106 km, a odvojka prema Republici Hrvatskoj je 53 km. Istraženo je više od 500 lokaliteta prelaza, koji se bitno razlikuju po veličini, režimu voda i nanosa i drugim parametrima. U ovom radu prikazana je metodologija istraživanja, neki rezultati, kao i preporuke koje su date projektantima objekta, u cilju zaštite gasovoda od štetnog dejstva voda.

Ključne reči: gasovod, istraživanja hidrološko-hidrauličkih uslova

Hidrological-hydraulic investigative works along the „South stream“ gas pipeline

ABSTRACT: Although gas pipelines are not hydrotechnical structures, their interaction with watercourses at the crossing points can be paramount. With this in mind, extensive hydrological and hydrotechnical investigations were carried out during the preparation of the South Stream Project in Serbia. These included preparatory works, field investigations and analyses of climate, hydrology, hydraulic and morphological parameters of importance for the pipeline construction. Programme of field investigation works was scheduled for each crossing based on reconnaissance surveys, depending on features of watercourse in broader area. The scope of investigations was exceptional since the length of main pipeline route is 422 km while the length of the side prongs to Republic of Srpska and Croatia is 106 km and 53 km respectively. More than 500 crossings which substantially differ in size, water and sediment regime and other parameters were investigated. The paper presents methodology of investigations and some results, as well as recommendations for pipeline designers in order to protect the pipeline from harmful effects of water.

Keywords: gas pipeline, investigations of hydrological and hydrotechnical conditions

¹ Vladislava Bartoš Divac, dipl. inž. građ., Zavod za uređenje vodnih tokova, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, ulica Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, vladislava.bartos@jcerni.co.rs

² Vojislav Antičić, dipl. inž. građ., Zavod za uređenje vodnih tokova, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, ulica Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, vojislav.antonc@jcerni.co.rs

³ Dragana Ninković, dipl. inž. građ., Zavod za uređenje vodnih tokova, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, ulica Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, dragana.ninkovic@jcerni.co.rs

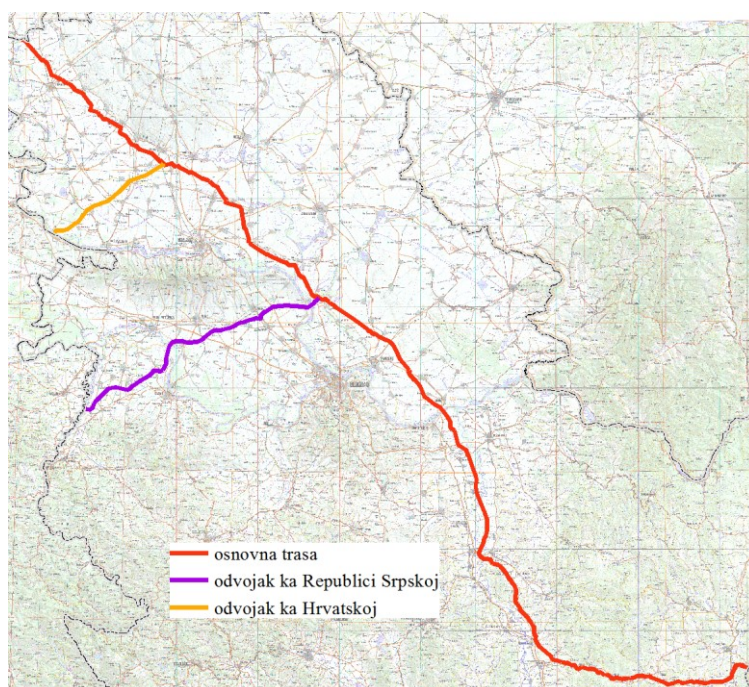
1 Uvod

Gasovod „Južni tok” trebalo je da obezbedi transport prirodnog gasa iz Rusije do zemalja Evropske unije. Jedan krak iz Bugarske planiran je da ide preko Srbije i Mađarske do Austrije. Projekat „Južni tok“ je bio izuzetno značajan za privredni razvoj Srbije i regiona, ne samo u pogledu snabdevanja gasom već i u pogledu bezbednosti snabdevanja, povoljnijeg transporta, cene gasa, velikih razvojnih mogućnosti i veza sa susednim državama. Kapacitet gasovoda u Srbiji trebalo je da bude 40,5 milijardi kubnih metara godišnje, a vrednost investicije 1,7 milijardi evra.

Imajući u vidu značaj objekta i činjenicu da interakcija ovog linijskog objekta sa vodotocima na mestima ukrštanja (prelazi) može biti značajna, u okviru pripreme projekta izvršena su obimna hidrološko-hidraulička istraživanja. Istraživanja su obuhvatila pripremne i terenske istražne radove kao i analize klimatskih, hidroloških, hidrauličkih i morfoloških parametara od značaja za izvođenje ovog objekta.

1.1 Opis trase gasovoda

Trasa gasovoda „Južni tok“ kroz Srbiju (slika 1) počinje od granice sa Bugarskom u reonu Vrške čuke, nastavlja do doline reke Grze, i u dužini od oko 73 km trasa prelazi preko preovlađujuće krečnjačko-peščarske deonice, dakle teško prohodnog terena sa kamenitom podlogom.



Slika 1. Trasa gasovoda „Južni tok“ u Srbiji
Figure 1. „South Stream“ gas pipeline stretch in Serbia

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Od doline Grze do okoline Svilajнца, na dužini od 53 km, trasa prelazi preko neogenog basena brdskog reljefa. Teren je izgrađen od slabo okamenjene stenske mase ili tla.

Od Svilajнца do reke Dunav trasa prolazi kroz široku dolinu reke Velike Morave, izgrađenu od krupnih moravskih šljunkova. Dužina ove deonice je 65,5 km.

Po prelasku reke Dunav pa do reke Tise i dalje do Vrbasa, trasa dužine oko 145 km prolazi kroz banatsku i južno bačku ravnicu, u kojoj je slabo vezano tlo dominirajuća geološka podloga. Na ovom delu trase se nalazi odvojak ka Republici Srpskoj, u blizini Surduka i Čente.

U blizini Vrbasa trasa se u dužini od oko 70 km pruža na platou severne Bačke. Završetak magistralnog gasovoda je kod Bačkog brega, gde prelazi na teritoriju Republike Mađarske. Na ovom delu terena se nalazi i odvojak ka Republici Hrvatskoj.

Odvojak za Republiku Srpsku prelazi preko četiri morfološko-geološke celine jer se odvaja od glavnog (magistralnog) gasovoda u banatskoj ravnici, prelazi u Srem, u delu gde se nalaze naslage tipskog lesa, nastavlja sremskim pobrđem ka Savi, a zatim prelazi u niziju Mačve, iz koje prelazi reku Drinu i ulazi na teritoriju Republike Srpske.

Odvojak za Republiku Hrvatsku počinje u reonu naselja Vrbas, prolazi južnim obodom Bačke (Telečke) lesne zaravni i aluvijalne ravni i prelazi državnu granicu na Dunavu kod Mladenova.

1.2 Opis slivova kroz koje prolazi trasa gasovoda

Trasa gasovoda na teritoriji Srbije preseca oko 500 vodotoka značajno različitih po veličini, režimu vode i nanosa i morfološkim karakteristikama. U skladu sa tim, za potrebe hidroloških i hidrauličkih istražnih radova svi vodotoci su generalno podeljeni na prirodne i veštačke, pri čemu se prirodni vodotoci, u zavisnosti od hidrološke izučenosti svrstavaju u hidrološki izučene i hidrološki neizučeni vodotoke.

Osnovna trasa gasovoda 301 put preseca vodotoke koji pripadaju slivnim područjima Velikog Timoka, Belog Timoka, Crnog Timoka, Velike Morave, Dunava i Tise. Na odvojkju za Republiku Srpsku trasa gasovoda 55 puta preseca vodotoke koji pripadaju slivovima Dunava, Save i Drine. Na odvojkju za Republiku Hrvatsku trasa gasovoda 28 puta preseca vodotoke koji pripadaju slivu Dunava.

Slivnom području Velikog Timoka pripadaju 2 mala prirodna vodotoka koje preseca trasa gasovoda, Buljkov potok i Bezimeni potok.

Slivnom području Belog Timoka pripada 20 prirodnih vodotoka koje preseca trasa gasovoda. Na slivnom području nalazi se i akumulacija „Grište“ na Griškoj reci, koja se koristi za vodosnabdevanje grada Zaječara i okoline.

Slivnom području Crnog Timoka pripada 20 vodotoka koje preseca trasa gasovoda.

Na slivnom području Velike Morave trasa gasovoda preseca 43 prirodna vodotoka. Reku Veliku Moravu trasa gasovoda preseca 3 puta, a njene starače 5 puta. Na rekama Grza i Crnica trasa gasovoda preseca i glavni tok i rukavac. Pored prirodnih vodotoka na slivnom području Velike Morave trasa gasovoda preseca i 18 kanala.

Neposrednom slivnom području Dunava pripada 10 prirodnih vodotoka koje preseca trasa gasovoda. Trasa gasovoda reku Dunav preseca tri puta i ovim lokalitetima je posvećena posebna pažnja s obzirom na to da je Dunav međunarodni plovni put i da se odlikuje intenzivnim pronosom suspendovanog nanosa i pojavom leda u zimskom periodu. Pored prirodnih vodotoka trasa gasovoda na neposrednom slivu Dunava preseca i 75 kanala, 63 na

osnovnoj trasi, 3 na odvojkju za republiku Srpsku i 9 na odvojkju za republiku Hrvatsku.

Na slivu Tise trasa gasovoda preseca 145 kanala i samu reku Tisu nizvodno od brane „Novi Bečej“. Vođeno je računa o činjenici da se nivoi vode na profilu prelaza gasovoda preko Tise formiraju pod uticajem režima rada hidroelektrane „Đerdap 1“.

Slivnom području Save pripada 5 prirodnih vodotoka koje preseca trasa gasovoda: Sava, Šelovrenac, Međeš, Kudoš i Kanal Vojkovci. Na ovim vodotocima se nalazi nekoliko akumulacija uzvodno od mesta ukrštanja sa gasovodom (Šelovrenac na istoimenom potoku, Međeš i Dobrodol na Međešu i Kudoš (Pavlovci) i Borkovac na Kudošu). Pored prirodnih vodotoka trasa gasovoda na slivu Save na odvojkju za Republiku Srpsku preseca i 36 kanala. Kao i u slučaju prelaza preko Tise, vođeno je računa o činjenici da se nivoi vode na profilu prelaza gasovoda formiraju pod uticajem režima rada hidroelektrane „Đerdap 1“.

Na slivnom području Drine, odvojak trase gasovoda prema Republici Srpskoj preseca samo glavni tok Drine i jednu njenu staraču na njenom donjem toku koji odlikuje izuzetno promenljivo rečno korito, sa mnogobrojnim meandrima, adama, rukavcima i sprudovima, koji se menjaju i premeštaju svaki put posle nailaska velike vode.

2 Pripremni i terenski radovi

2.1 Pripremni radovi

Osnov za pripremu podloga za sprovedene istražne radove je baza podataka i dokumentacije Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“.

Najvažniji prostorni podaci neophodni za sprovedene analize su rečna mreža, digitalni model terena, lokacije hidroloških i meteoroloških stanica i karte sa prostornom distribucijom godišnjih suma padavina, srednjih temperatura i vlažnosti vazduha. Sve prostorne analize izvršene su u GIS okruženju, a svi podaci smešteni u odgovarajuću bazu podataka koja sadrži tematske setove podataka o:

- gasovodu (geometrija i atributi trase i prelaza gasovoda preko vodotoka)
- hidrografskim karakteristikama (geometrija i atributi rečne mreže i slivova)
- hidrometeorološkim stanicama (geometrija i atributi meteoroloških i hidroloških stanica)
- granicama slivnih površina vodotoka do lokaliteta prelaza koje su određene pomoću digitalnog modela terena, horizontalne rezolucije od 70 m uz korekciju na osnovu topografskih karata razmere 1:25.000
- digitalnom modelu terena na predmetnom području.

Osim ovih, osnovnih, podataka, baza podataka sadrži i niz namenski kreiranih prostornih i tabelarnih podataka nastalih kao rezultat prostornih analiza veze između lokaliteta prelaza i klimatskih i hidroloških parametara (npr. Tiesenovi poligoni), neophodnih za izradu odgovarajućih karata.

Početna identifikacija lokaliteta prelaza izvršena je presecanjem linijskih elemenata trase gasovoda i rečne mreže korišćenjem GIS alata, tako da je svako ukrštanje gasovoda i vodenih tokova predstavljeno tačkom sa određenim atributnim podacima. Kontrola ovako dobijenih lokaliteta izvršena je uz pomoć aktuelnih satelitskih, ortofoto i drugih raspoloživih podloga (GoogleEarth, geoportal GEOSRBIJA, i sl).

Na ovaj način je dobijena podloga za lociranje prelaza na terenu prilikom rekognosciranja. U toku rekognosciranja i kasnije, po izvršenom geodetskom snimanju, dobijene su precizne lokacije prelaza koje su sadržane u konačnoj verziji baze podataka.

2.2 Rekognosciranje terena

Rekognosciranje profila prelaza sprovedeno je u cilju definisanja potrebnog obima istražnih radova i identifikacije objekata i morfoloških procesa u zoni prelaza i obuhvatilo je:

- utvrđivanje orijentacionih dimenzija korita, prisustva vode, procenu stabilnosti obala i karaktera morfoloških procesa na široj deonici,
- identifikaciju objekata u koritu i na obalama,
- utvrđivanje karakteristika rečnog korita i vegetacije na obalama i inundacijama i
- procenu vrednosti Manningovog koeficijenta u koritu i inundacijama.

Na osnovu izveštaja sa rekognosciranja terena, za svaki prelaz je utvrđen program terenskih istražnih radova.

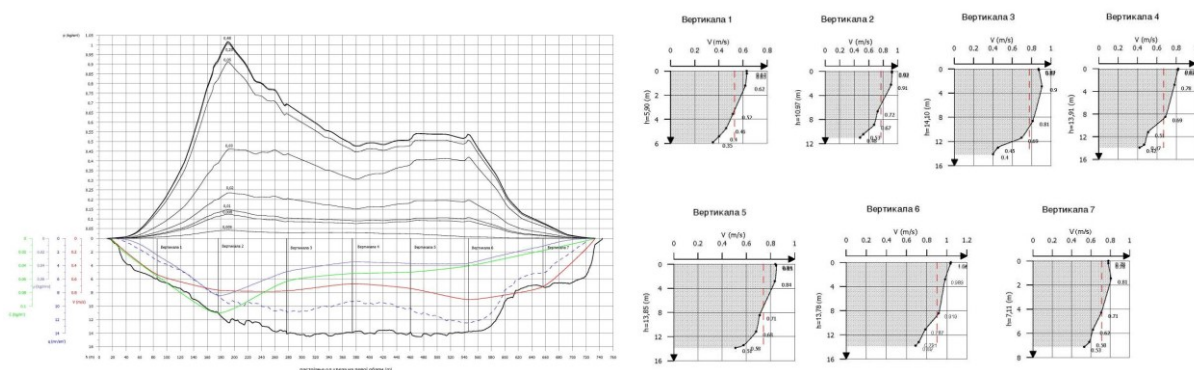
2.3 Terenski istražni radovi

Program terenskih istraživanja obuhvatio je sledeće radove:

- geodetsko snimanje korita,
- hidrometrijska merenja i
- uzorkovanje i analiza granulometrijskog sastava nanosa.

Obim i metoda geodetskih snimanja korita utvrđeni su u skladu sa veličinom vodotoka i deformabilnošću korita u široj zoni prelaza. U slučaju da deformabilnost korita nije izražena, snimljen je pojas od po 100 m uzvodno i nizvodno od profila prelaza. U slučaju izražene deformabilnosti i uzvodno i nizvodno od profila snimljen je pojas dužine jednake petostrukoj širini korita na mestu ukrštanja sa gasovodom. U slučaju da je dubina vode u koritu veća od 1,0 m, snimanja su vršena ehosonderom i GPS metodom, u slučaju manjih dubina sondiranjem, dok je u slučaju suvog korita snimanje urađeno samo GPS metodom.

Hidrometrijska merenja su izvršena u zavisnosti od širine korita (2, 3, 5 ili 7 vertikala) i dubine vode (1, 3, 5 ili 7 tačaka po vertikali). Rezultati obrade su prikazani grafički (slika 2).



Slika 2. Rezultati hidrometrijskih merenja
Figure 2. Results of hydrometric measurements

Merenja nanosa u dnu vršena su u zavisnosti od karakteristika materijala u koritu. U koritima izgrađenim od šljunka vršeno je merenje prečnika zrna nanosa na licu mesta. U koritima u kojima su zastupljene sitnije frakcije vršeno je uzorkovanje nanosa u svakoj mernoj vertikali, obrada je rađena u laboratoriji Instituta „Jaroslav Černi“. Na lokacijama prelaza preko velikih reka (Sava, Dunav, Tisa, Velika Morava, Tamiš) vršeno je i merenje i analiza suspendovanog nanosa.

3 Analiza klimatoloških parametara

Klimatske karakteristike područja kojim prolazi trasa gasovoda „Južni tok“ određene su na osnovu meteoroloških parametara za 38 padavinskih i 13 klimatoloških stanica. Klimatološki parametri određeni su za profile meteoroloških stanica, odnosno karakteristike padavina za profile padavinskih stanica. Obrade su urađene na osnovu sledećih vremenskih serija:

- srednji mesečni podaci klimatoloških parametara, koji su kompletirani za period od 1946. do 2006. godine u okviru dokumentacije [1],
- dnevni meteorološki podaci RHMZ-a (temperatura - minimalna, maksimalna i srednja dnevna, srednja dnevna relativna vlažnost, visina snega, brzina vetra i atmosferski pritisak) iz perioda 1951-2010. godina. Samo za meteorološke stanice Čuprija i Jagodina obrade su izvršene na osnovu nizova dnevnih podataka iz perioda 1961-2010. godina.

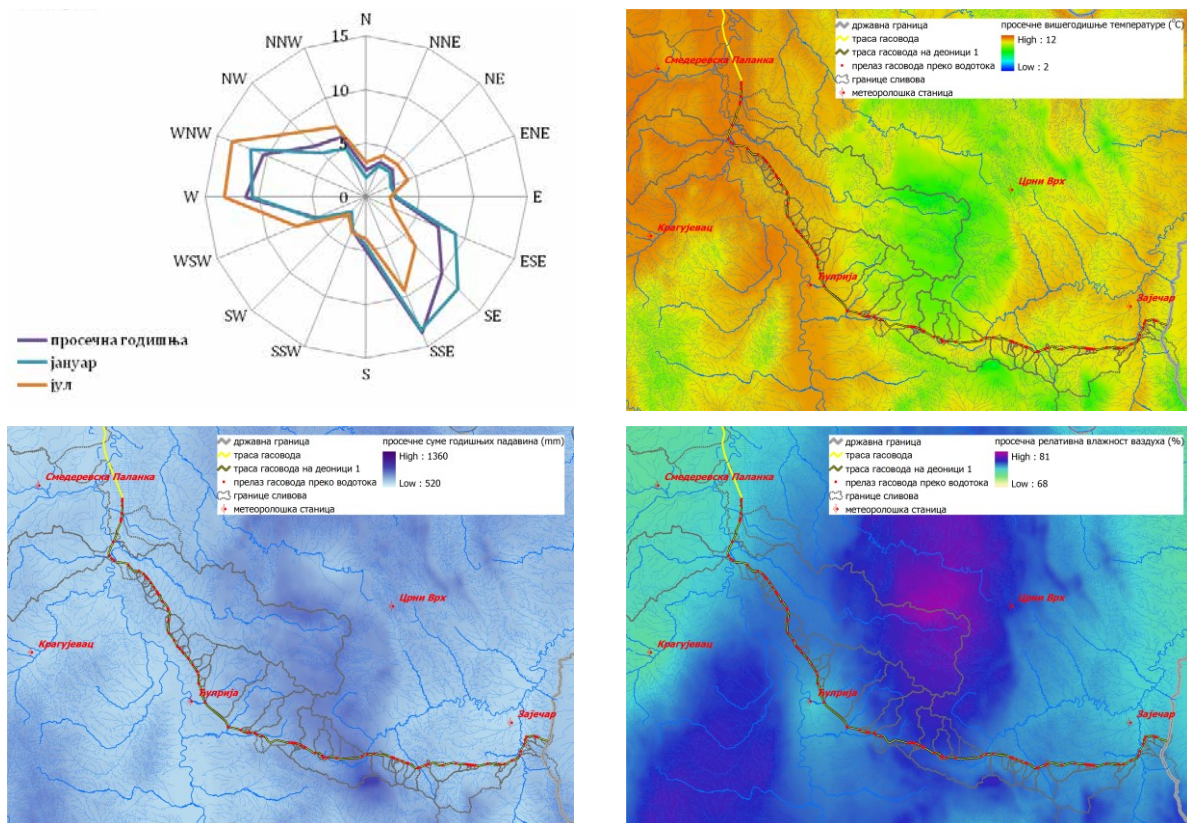
Rezultati obrada dati su za sve stanice, a posebno je naznačeno koja je stanica merodavna na kom potezu trase.

Rezultati analiza i proračuna računskih vrednosti klimatskih parametara prikazani su na način uobičajen u praksi u Srbiji:

- unutar godišnja raspodela za:
 - prosečnu mesečnu:
 - temperaturu vazduha
 - temperaturu tla na dubini 0,5 i 1 m
 - relativnu vlažnost vazduha
 - sumu padavina
 - brzinu vetra
 - atmosferski pritisak
 - ekstremne mesečne temperature vazduha (min i max)
- datumi pojave prvog i poslednjeg mraza i trajanje perioda bez mraza
- računске vrednosti za karakteristične verovatnoće prevazilaženja minimalne godišnje temperature vazduha
- računске vrednosti za karakteristične verovatnoće pojave:
 - ekstremnih godišnjih temperatura vazduha (min i max)
 - maksimalnih godišnjih sume padavina
 - maksimalne brzine vetra
- maksimalni intenzitet padavina za različite intervale vremena
- srednja dekadna visina snežnog pokrivača
- prosečna godišnja učestalost pravca vetra i tišine.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 3. Grafički prikaz rezultata analize klimatoloških faktora
 Figure 3. Graphical presentation of climate parameters analyses results

Pored standardnih analiza klimatoloških parametara koje se uobičajeno sprovode u našoj praksi, rađene su i neke specifične anlizе, na zahtev Investitora. Rezultati su prikazani u vidu:

- unutargodišnje mesečne raspodele:
 - sume energije globalnog zračenja na horizontalnu površinu
 - srednje ekstremne temperature vazduha (min i max)
 - srednje iz apsolutnih ekstremnih temperatura vazduha (min i max)
- datuma nastupanja srednjednevnih tempertura vazduha iznad određenih granica i broj dana sa temperturom izvan ovih granica
- računskih vrednosti minimalnih godišnjih temperatura vazduha za verovatnoću 0,98%
- računskih vrednosti hladnih/toplih petodnevnih temperatura vazduha za verovatnoću 0,92%

Svi rezultati prikazani su numerički, dok su neki parametri prikazani i grafički - ruže vetrova, prosečne temperature vazduha, prosečne godišnje sume padavina i prosečne vlažnosti vazduha (primer slika 3). Ruže vetrova prikazane su za 16 osnovnih pravaca duvanja vetra i to prosečna godišnja i za karakteristične mesece - januar i jul. Prostorna distribucija prosečnih temeperatura, suma padavina i relativne vlažnost vazduha prikazana je na kartama korišćenjem GIS alata.

4 Hidrološki proračuni i analize

Hidrološki proračuni i analize urađeni su na bazi podataka o vodostajima i protocima sa oficijelnih hidroloških stanica RHMZ-a za vodotoke na kojima postoje merenja - izučeni vodotoci, odnosno na bazi podataka sa hidroloških stanica sa sliva analoga i meteoroloških stanica na slivu za vodotoke na kojima ne postoje merenja vodostaja i protoka - neizučene vodotoke. Za izučene i neizučene vodotoke primenjena je različita metodologija proračuna.

Sa hidrološkog aspekta samo se sedam vodotoka koje preseca trasa gasovoda mogu svrstati u kategoriju izučenih (Beli Timok, Velika Morava, Dunav, Tamiš, Tisa, Sava i Drina).

Nekoliko vodotoka svrstavaju se u delimično izučene vodotoke. Takvi su vodotoci: Crni Timok, Crnica i Ravanica na kojima su postavljenije oficijelne hidrološke stanice RHMZ-a na kojima se vrše merenja, ali se profili ukrštanja trase gasovoda sa vodotokom nalaze dosta uzvodnije od ovih stanica i pripadaju hidrološki neizučenim profilima.

Sa sve profile ukrštanja trase gasovoda sa vodotokom (prelazi) analizirani su protoci i izvršen je proračun računskih voda karakterističkih povratnih perioda.

4.1 Metodologija proračuna za neizučene vodotoke

Prosečni višegodišnji protoci vode na profilima prelaza gasovoda određeni su primenom metode regionalne analize, tj metodom analogije. Izvršeno je preslikavanje prosečnog višegodišnjeg protoka vode sa hidrološki izučenog profila - analoga na hidrološki neizučene profile, odnosno slivove vodotoka preko kojih prelazi trasa gasovoda, primenom izraza:

$$\overline{Q}_n = \frac{F_n}{F_a} \cdot \frac{P_n}{P_a} \cdot \frac{H_n}{H_a} \cdot \overline{Q}_a \quad (\text{m}^3/\text{s}), \quad (1)$$

gde je: \overline{Q} - prosečni višegodišnji protok vode ne izučenom profilu (m^3/s), F-površina sliva (km^2), H-prosečna nadmorska visina sliva (mnJm), P-prosečne padavine na slivu (mm), n-oznaka hidrološki neizučenog profila, a-oznaka hidrološki izučenog sliva – analoga.

Unutargodišnja raspodela protoka vode na neizučenom vodotoku određena je primenom analogije sa slivovima-analogima, na osnovu uspostavljenog koeficijenta proporcionalnosti između prosečnih višegodišnjih protoka:

Kao slivovi-analozi korišćeni su slivovi hidrološki izučenih vodotoka do profila hidroloških stanica RHMZ-a Srbije, uzimajući pri njihovom izboru u obzir: isti tip oticaja sa profila ovih stanica i vodotoka koji se istražuju, geografsku blizinu slivova, homogenost formiranja oticaja i sličnost klimatskih uslova. Prosečni protoci za slivove analoga preuzeti su iz dokumentacije [1].

Srednji meženj predstavlja karakteristiku malih voda. Određen je iz unutargodišnje raspodele prosečnih protoka, osrednjavanjem protoka iz meseci u kojima je srednji mesečni protok manji od prosečnog višegodišnjeg.

Male vode na profilima prelaza gasovoda su određene na nivou minimalnog srednjemesečnog protoka 95% obezbeđenosti, pretpostavljajući da je odnos minimalnog srednjemesečnog protoka 95% obezbeđenosti i prosečnog višegodišnjeg protoka na profilu prelaza isti kao na profilu analogu.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Velike vode su određene primenom kombinovane metode sintetičkog jediničnog hidrograma sa SCS postupkom za razdvajanje efektivnih padavina (direktni oticaj P_{ef}), od ukupnih (bruto padavine P_{br}).

Maksimalna ordinata sintetičkog jediničnog hidrograma određena je prema relaciji (2):

$$q_{max} = \frac{0,56 \cdot F}{(1+k) \cdot (t_p + 0,5 t_k)} \quad (m^3 / s \cdot mm) \quad (2)$$

gde je: F-površina sliva (km^2), k-odnos vremena opadanja i vremena podizanja hidrograma i t_p - „vreme zakašnjenja” sliva (čas) $t_p = C \cdot (L \cdot L_c / \sqrt{I_{ur}})^{0,37}$, C je koeficijent čija vrednost zavisi od konfiguracije terena; za izučavane vodotoke usvojena je vrednost $C=0,75$, L je dužina toka (km), L_c dužina toka od razmatranog profila do težišta sliva (km) a I_{ur} uravnat pad toka (%). Maksimalna ordinata hidrograma velikih voda verovatnoće pojave p (%) određena je prema relaciji (3). P_{ef} su efektivne padavine merodavnog trajanja kiše t_k (mm), verovatnoće pojave p (%).

$$Q_{max,p(\%)} = P_{ef,p(\%)} \cdot q_{max} \quad (m^3/s) \quad (3)$$

Prosečne (bruto) padavine do razmatranih profila prelaza gasovoda određene su primenom metode Thiessen-ovih poligona. Podaci o maksimalnim dnevnim padavinama karakterističnih verovatnoća pojave na padavinskim stanicama preuzete su iz dokumentacije [1]. S obzirom na to da se radi o malim slivovima, merodavne su bruto kiše trajanja kraćeg od jednog dana. Ove kiše su određene korišćenjem redukcionih krivih kiša jakog intenziteta sa pluviografskih stanica RHMZ-a koje prostorno gravitiraju razmatranim slivovima. Koeficijent k je određen korišćenjem regionalne zavisnosti $k=f(A)$, uspostavljene na osnovu registrovanih hidrograma u slivu Velike Morave. Kao merodavno trajanje kiše usvojeno je vreme za koje se dobija maksimalna ordinata jediničnog hidrograma. Efektivne padavine (P_{ef}) na slivovima vodotoka do profila prelaza gasovoda određene su korišćenjem formula SCS metode:

$$P_{ef} = \frac{(P_{br} - 0,2 \cdot d)^2}{P_{br} + 0,8 \cdot d} \quad (mm), \quad (4)$$

gde je: d-deficit oticanja (mm), P_{br} -bruto padavine za merodavno trajanje kiše t_k , CN-odgovarajući broj krive za hidrološki zemljišno-biljni kompleks. Korišćenje i način obrade zemljišta su određeni na osnovu podataka Corine Land Cover za 2006. godinu, a tip zemljišta sa pedoloških karata Instituta za proučavanje zemljišta iz Beograda.

4.2 Metodologija proračuna za izučene vodotoke

Prosečni protoci, male i velike vode određeni su na osnovu serija za merodavne hidrološke stanice preuzetih iz dokumentacije [1] i predstavljeni u vidu unutargodišnje raspodele i preko računskih vrednosti karakterističnih povratnih perioda. Računske vrednosti dobijene su prilagođavanjem teorijskih funkcija raspodele serijama osnovnih podataka (prosečne godišnje

ili godišnji ekstremi). Korišćene su četiri funkcije raspodele: Pearson III, Log-Pearson III, Gumbel i troparameterska Log-normalna raspodela. Kvalitet prilagođavanja teorijskih funkcija raspodele proveravani su pomoću četiri testa saglasnosti: χ^2 -test; Kolmogorov-Smirnov i $n\omega^2$ -test.

Srednji meženj je određen iz unutargodišnje raspodele prosečnih protoka na isti način kao i kod neizučenih slivova, osrednjavanjem protoka iz meseci u kojima je srednji mesečni protok manji od prosečnog višegodišnjeg.

5 Hidraulički proračuni i analize

5.1 Hidraulički proračuni

Hidrauličkim proračunom obuhvaćeni su svi vodeni tokovi (reke, bujični potoci, kanali) sa kojima se projektovana trasa gasovoda ukršta. Proračunima je obuhvaćen deo toka (uzvodno i nizvodno od profila prelaza) na osnovu definisanih dužina snimanja urađenih tokom terenskih istražnih radova.

Karakteristični nivoi određeni su hidrauličkim proračunima, primenom programa HEC-RAS. Računska procedura je zasnovana na rešavanju linijske energetske jednačine, u kojoj se gubici energije obuhvataju kroz gubitke na trenje (preko Manningovog koeficijenta) i lokalne gubitke zbog širenja/sužavanja toka (preko koeficijenta kojim se množi brzinska visina). Dinamička jednačina se koristi za deonice sa prelaznim režimom, na kojima se javlja hidraulički skok, kao i pri proračunu tečenja u zoni mostova i ušća.

Nivoi vode na deonicama prelaza gasovoda su računati za pretpostavku ustaljenog tečenja u otvorenom toku nepravilne geometrije. Korišćeni su sledeći ulazni podaci:

- geometrija rečnog toka – poprečni profili minor i major korita, dobijeni geodetskim snimanjem;
- geometrija i hidrauličke karakteristike objekata u koritu i van njega, ukoliko postoje na deonici prelaza;
- otpori tečenju u rečnom toku i na inundacijama (izraženi preko Manningovog koeficijenta otpora), koji su određeni prilikom rekognosciranja terena ili, ukoliko je na deonici prelaza rađeno hidrometrijsko merenje i snimanje ureza vode, tariranjem koeficijenta otpora,
- protoci vode (m^3/s) karakterističnih povratnih perioda, određeni hidrološkom analizom
 - $Q_{sr.meženj}$ – srednji meženj
 - Q_{10} – maksimalni godišnji protok $p=10\%$ (povratni period 10 godina)
 - Q_{50} – maksimalni godišnji protok $p=2\%$ (povratni period 50 godina)
 - Q_{100} – maksimalni godišnji protok $p=1\%$ (povratni period 100 godina).

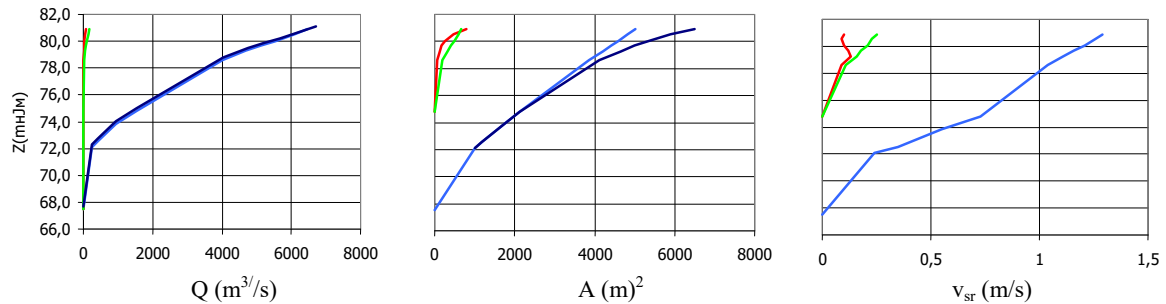
Hidraulički proračuni za kanale su rađeni za dijapazon protoka do punog korita, jer su melioracioni kanali tako dimenzionisani da nema izlivanja vode iz korita.

Nizvodni granični uslov je određen preko Šezi-Manningove jednačine uz korišćenje prosečnog pada dna na deonici prelaza.

Rezultati hidrauličkih proračuna prikazani su:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

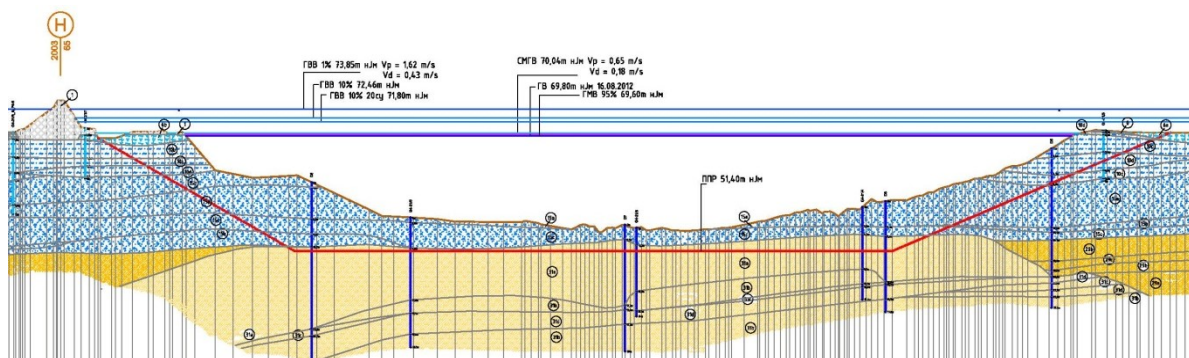
- numerički: kriva protoka vode u profilu prelaza (sumarna, osnovno korito i inundacije), podaci o površini proticajnog profila, širini vodnog ogledala, srednjoj dubini vode, srednjoj brzini vode u poprečnom profilu, kote linije nivoa vode duž vodotoka (za pojas snimanja) i
- grafički: kriva protoka, površina proticajnog profila, srednja brzina vode (slika 4), podužni profili na kome su prikazane kote dna, leve i desne obale, mereni nivoi vode i nivoi vode za karakteristične protoke.



Slika 4. Krive protoka, površine proticajnog profila i srednje brzina vode
Figure 4. Rating curves: discharge, cross sectional area and average flow velocity

5.2 Određivanje kota stabilnog dna za ukopavanje gasovodne instalacije

U cilju obezbeđenja stabilnosti konstrukcije gasovoda, za svaki profil je definisana kota ispod koje se ne očekuju erozioni morfološki procesi, odnosno ispod koje je gasovodna instalacija zaštićena od erozionih procesa u eksploatacionim periodu. Kota stabilnog dna (slika 5) definisana je na osnovu rezultata izvršenih istražnih radova, hidrološko-hidrauličkih proračuna, geomehaničkog kartiranja bušotina i u slučaju izučenih vodotoka (Dunav, Sava, Tisa), raspoloživih podataka o morfološkim promenama u prethodnom periodu.



Slika 5. Poprečni profil vodotoka sa položajem linije stabilnog dna
Figure 5. River cross section with the position of the stable bottom line

Kod kanala je očekivana mala deformacija dna korita zbog malih brzina vode i podužnog pada. U nedostatku podataka o morfološkim promenama u prethodnom periodu,

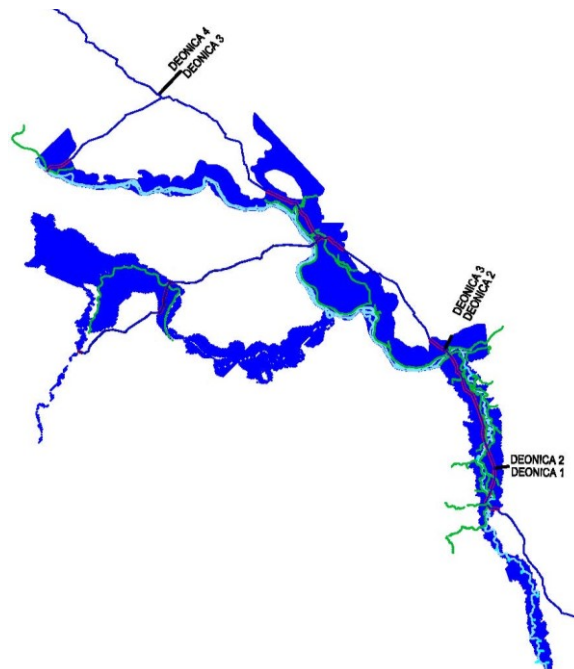
pretpostavljena je vertikalna deformacija dna od 0,5 m ispod najniže snimljene kote dna kanala u pojasu snimanja ili 0,5 m ispod projektovane kote dna, ukoliko je ona niža od postojeće. Ukupna bočna deformacija je procenjena na 20-30% širine korita u visini obala.

Kod bujičnih tokova je očekivana velika deformacija dna korita zbog izraženih brzina vode, velikog podužnog pada vodotoka i trenda erozionih procesa, tako da je na nekim bujičnim potocima predviđeno ukopavanje gasovodne instalacije i do 10 m.

5.3 Opasni hidrometeorološki procesi na trasi gasovoda

Prema rezultatima izvršenih hidroloških i hidrauličkih istraživanja na području trase gasovoda, definisana je i potencijalna ugroženost gasovodne instalacije od izlivanja velikih reka ili rušenja odbrambenih nasipa. Potencijalne i realne plavne zone prikazane su na slici 6.

Delovi trase gasovoda na kojima se nivo podzemnih voda održava putem sistema kanala i crpnih stanica mogu biti poplavljeni unutrašnjim vodama, u slučaju otkaza sistema (crpne stanice).



Slika 6. Plavne zone duž trase gasovoda
Figure 6. Flood area along gas pipeline

Literatura

1. IJČ, (2009.), *Vodoprivredna osnova Republike Srbije – Hidrometeorološke podloge*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ i Republički hidrometeorološki zavod, 2009.
2. IJČ, (2014.), *Istražni radovi za izradu idejnog i glavnog projekta magistralnog gasovoda „Južni tok“ na teritoriji Republike Srbije, Knjiga 4: Završni izveštaj o rezultatima istražnih radova po sekcijama trase*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2013-2014.

О одређивању просечног отицања са неизучених сливова на територији Србије

Драган Јанковић¹

АПСТРАКТ: У раду се разматрају приступи одређивању просечног отицања са малих сливова на територији централног дела Србије, за које нема података хидролошких мерења. Посебна пажња посвећена је методи Langbein-а и методи биланса вода. Извршена је провера применљивости ових метода за централни део територије Србије. Закључено је да обе методе, по правилу, дају нешто мање вредности од оних које су добијене преко података мерења. Провера је извршена одређивањем просечног отицања преко података мерења, и применом поменуте две методе, за 17 мањих сливова, за које постоје подаци вишегодишњих мерења. Коришћењем резултата провере, дефинисане су корелационе регионалне зависности које се могу користити за корекцију резултата добијених применом методе Langbein-а и методе биланса вода. У својству примера примене обе методе, дат је прорачун просечног отицања за слив реке Студенице, до хидролошке станице Ушће.

Кључне речи: неизучен слив, просечно отицање, метода Langbein-а, метода биланса, корекција

On assessment of average runoff from unmeasured catchments in the central part of Serbia

Dragan Jankovic¹

ABSTRACT: The paper considers approaches for determining average runoff from catchments with no measurement data, located in the central part of Serbia. The focus has been on verifying applicability of the Langbein and the water balance methods for assessing runoff from unmeasured catchments in Serbia. It was found out that the runoff values assessed by both methods tend, as a rule, to be somewhat lower than those calculated by using measured data. Analysis was carried out by calculating average runoff for 17 small catchments at which there exist multi-year measurement data, and by assessment of runoff values for the same catchments by using the Langbein and the water balance methods. Based on the results obtained, regional correlative relationships have been established for the central part of Serbia; these can be used for correcting the average runoff estimates obtained by using the Langbein and the water balance methods. As an example, assessment of average runoff for the catchment of Studenica river, the hydrological profile Usce, is presented in the paper.

Key words: unmeasured catchments, average runoff, Langbein method, water balance method, corrections.

¹ Мр Драган Јанковић, дипл. инж. грађ., Панчићева 18, Београд, drjankol@sbb.rs

1 Уводна разматрања

У хидротехничкој пракси често се јавља потреба да се одреде средње, велике и мале воде водотока на коме нема података мерења протока воде. Постоје различите методе и поступци који се користе за дефинисање појединих карактеристика хидролошког режима таквих водотока, а у овом раду разматрају се оне, које се користе за прорачун просечног протока воде у посматраном профилу водотока.

За водотоке, односно њихове сливове, за које не постоје подаци мерења протока воде, овде ће се користити условни називи – "хидролошки неизучени" или само "неизучени" водотоци (сливови). Под "просечним протоком" посматраног водотока у посматраном профилу, или "просечним отицањем" са посматраног слива, подразумева се величина, која се одређује као средња вредност серије средњих годишњих протока за вишегодишњи период, при чему овај период мора бити такве дужине, да се при његовом даљем продужавању средња вредност серије не мења значајно. Просечни проток, просечно отицање, надаље ће се обележавати са " Q_0 ", а одговарајући просечни специфични отицај обележаваће се са " q_0 ". Просечни проток Q_0 ће, по правилу, бити изражаван у (m^3/s), али и у виду слоја отицања, у (cm) или (mm), док ће се просечно специфично отицања изражавати у ($l/s \cdot km^2$). За одређивање просечних вредности других величина, које ће се користити у овом раду (просечних падавина на сливу - P_0 и просечних температура ваздуха - T_0), важи исто, што и за Q_0 – одређују се за довољно дуг, (меродаван, репрезентативан) период времена. Из чињенице да се поменуте величине (Q_0 , P_0 и T_0) одређују на основу довољно дугог периода, произилази да у анализама њихових међусобних зависности, није неопходно да буду одређене за исти период времена, а како је варијабилност поменутих величина различита, ни репрезентативни периоди не морају бити исте дужине. Ово је значајно напоменути, будући да ће се у овом раду величине P_0 и T_0 одређивати помоћу карата изолинија, које су израђене за различите периоде времена, а Q_0 , за сливове где постоје подаци мерења, одређиваће се на бази "довољно дугих" серија средњих годишњих протока различите дужине.

За одређивање Q_0 за неизучене водотоке обично се користе два једноставна поступка - (1) помоћу карте изолинија просечног специфичног отицања и (2) - пресликавањем просечног протока са одабраног слива-аналога, за који постоје подаци вишегодишњих мерења протока. Понекад се примењују, у својству контролног поступка, регионалне зависности просечног отицања од просечних падавина, које је израдио Оцокољић [4], за неколико региона у Србији (Моравски, Колубарски, Западно-моравски, Ибарски, Јужноморавски, Косовски и др.). Осим ова три поступка, релативно често се примењује метода коју је предложио Langbein [2,3] у којој се просечно отицање доводи у везу са просечним падавинама (P_0) и просечном температуром ваздуха на сливу (T_0). По правилу, ова метода се примењује без солидне провере њене прихватљивости за посматрани регион, што би свакако требало чинити, будући да је поменута метода разрађена на основу података прикупљених на територији САД. О потреби да се врши провера применљивости ове методе и увођења корекције добијених резултата у условима Србије, или региона у коме се налази посматрани слив, указали су Janković i dr. [1], на основу праксе примене ове методе у Републичком хидрометеоролошком заводу Србије. Ову методу, са одговарајућом провером у датим условима, предлаже и WMO [7], као једну од могућности за одређивање Q_0 за

неизучене водотоке. Овде треба поменути још једну методу, која би се могла назвати методом биланса вода на сливу или, скраћено, метода биланса. У билансу вода за посматрани слив, и вишегодишњи период времена, приходна страна су просечене падавине (P_0), а расходну страну чине просечан отицај са слива (Q_0) и губитак воде, који чини, скоро искључиво, евапотранспирација. Ако се за одређивање губитка воде користи формула коју је предложио Турс [6], улазни подаци су исти као и за методу Langbein-a - P_0 и T_0 . WMO [7], такође препоручује ову методу, уз коришћење формуле Турс-a, као још једну могућност за одређивање просечног отицања са неизучених сливова. О могућности коришћења ове формуле указали су и Јанковић и др.[1], али њена примена у нашој хидролошкој пракси, ипак није уочена.

Будући да постоји више метода и поступака за одређивање просечног протока за неизучене водотоке, и да нема јасних препорука или упутстава коју од њих, и под којим условима, треба примењивати, често се дешава да обрађивачи користе две-три методе и онда усвају аритметичку средину добијених вредности. Тиме се, свакако, не повећава поузданост прорачуна већ се само стиче привид да је проблематика свестрано сагледана. Наравно, коришћење више метода или приступа, при одређивању просечног протока, је корисно, али се увек мора аргументовано одредити за једну, јер осредњавање резултата добијених применом више метода, не може се препоручити као прихватљив поступак.

Циљ овога рада је да укаже на једну поуздану методу, проверену на већем броју сливова, за које постоје подаци вишегодишњих мерења. Усвајање једне методе, као основне, не треба да искључује коришћење и других метода и поступака, али не са циљем да се сматрају међусобно равноправним и да се коначан резултат добија осредњавањем неколико појединачних резултата, већ да се утврди, да ли неке од метода дају битно различите вредности, а када се то деси, да се изврше одговарајуће провере и да се уочена разлика аргументује. Као метода која би могла да буде предложена као основна у прорачуну просечног отицања, одабрана је метода Langbein-a, а узмајући у обзир чињеницу да и метода биланса, са формулом Турс-a, користи исте улазне податке, паралелно је анализирана, као потенцијално прихватљива алтернатива.

2 О методи Langbein-a и методи биланса вода

Пре свега, овде треба нагласити да се обе методе, које ће бити предмет анализа у овом раду, могу примењивати само за оне сливове са којих нема подземног отицања у друге сливове и на које не дотиче вода са других сливова (сливови код којих се поклапају површинска и подземна вододелница). То, практично, значи да се ове методе не препоручују, или захтевају додатне анализе, у случајевима сливова развијених у регионима са израженим карстним феноменима.

Основна зависност која се користи код методе Langbein-a дата је у форми израза

$$Q_0/E = f(P_0/E), \quad (1)$$

где су Q_0 и P_0 – кореспондентно, просечно отицање и просечне падавине за посматрани слив, изражене у виду слоја отекле и пале воде, а E – температурни фактор које се, у случају да су Q_0 и P_0 изражени у (cm), дефинише преко израза

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

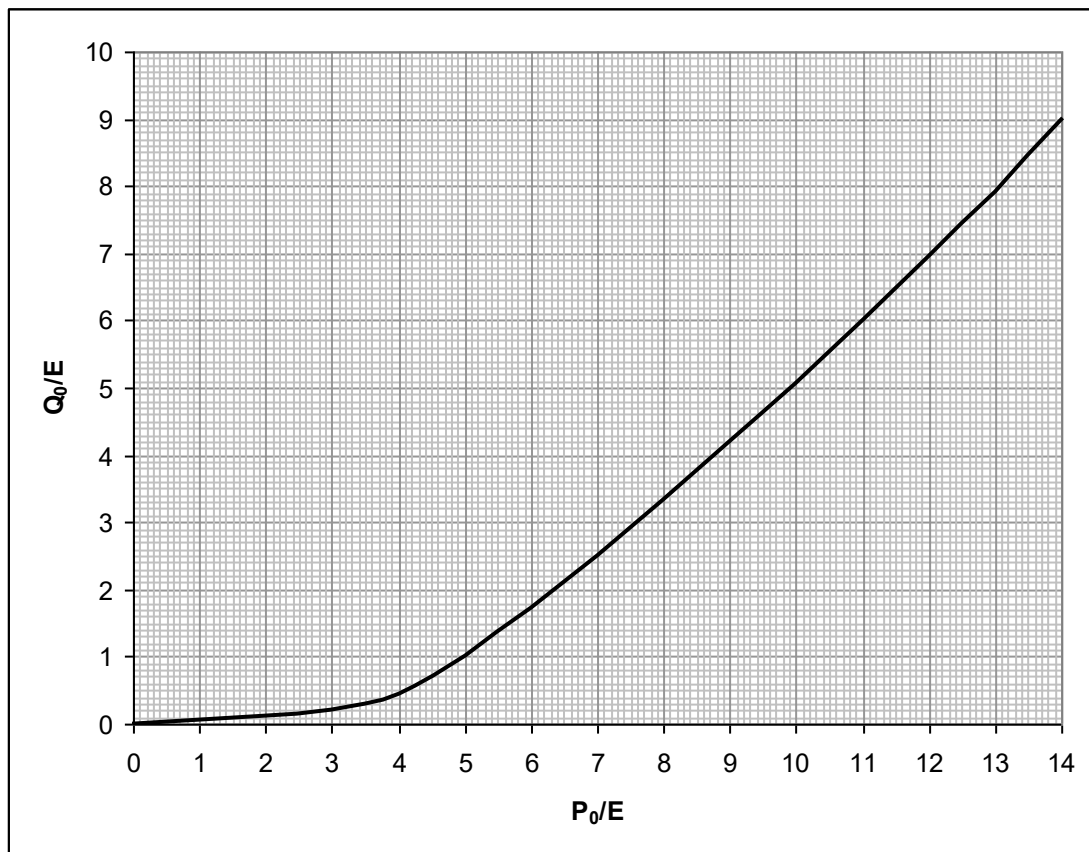
$$\log E = 0,027T + 0,886 \quad (2)$$

где је T_0 – просечна температура ваздуха на сливу, ($^{\circ}\text{C}$).

На основу вредности температурног фактора E и просечних падавина P_0 , одређује се однос P_0/E , а из Табеле 1., или из дијаграма, датог на Слици 1., одређује се однос Q_0/E .

Табела 1. Зависност Q_0/E од P_0/E
Table 1. Values of Q_0/E and P_0/E

P_0/E	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
Q_0/E	0,01	0,03	0,08	0,20	0,48	1,0	1,80	2,60	3,40	5,00	7,00	9,00



Слика 1. Зависност између Q_0/E и (P_0/E)
Figure 1. Relationship between Q_0/E and P_0/E

Овде се Q_0 добија, такође, као слој отицања (cm), па се претварање ове вредности у модул просечног отицања може извршити преко израза

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$q_0 = 0,317 * Q_0, (l/s \cdot km^2) \quad (3)$$

Биланс вода за посматрани слив, и довољно дуг вишегодишњи период времена, може се написати као:

$$P_0 = Q_0 + D_0, \quad (4)$$

где је D_0 – просечни губитак воде на сливу. Губитак воде је, практично, једнак стварној просечној евапотранспирацији, умањеној или увећаној за величину $\pm \Delta Q_0$, која представља додатни проток за рачун исцрпљења подземних вода (ако у посматраном периоду има више сушних него кишних година) или представља умањење протока услед одласка дела падавина на попуњавање исцрпљених резерви подземних вода (ако је у периоду више кишних година). Међутим, ова величина тежи нули, бдући да је D_0 , по дефиницији, одређен за период у коме је једнак број кишних и сушних фаза - репрезентативни период.

Постоји више емпиријских формула за одређивање D_0 , а овде ће се користити формула Турс-а, којој је дата предност и у поменутој публикацији WMO, а која гласи:

$$D_0 = P_0 \cdot \left(0,9 + \frac{P_0^2}{L^2}\right)^{-0,5} \quad (5)$$

где се вредност L одређује преко израза

$$L = 300 + 25T_0 + 0,5T_0^3, \quad (6)$$

у коме је T_0 – просечна температура ваздуха на сливу ($^{\circ}C$), а L се добија у (mm), па се и величине Q_0 , P_0 и D_0 у изразу (5) изражавају у (mm). Сада се просечно отицање са слива може одредити из израза

$$Q_0 = P_0 \left(1 - \left(0,9 + \frac{P_0^2}{L^2}\right)^{-0,5}\right) \quad (7)$$

Овде се Q_0 добија у виду слоја отицања израженог, такође, у (mm), па се претварање ове вредности у модул просечног отицања врши преко израза (3), с том разликом што уместо коефицијента 0,317 треба узети 0,0317.

3 Провера применљивости методе Langbein-а и формуле Турс-а

У циљу провере применљивости методе Langbein-а и, паралелно, методе биланса са формулом Турс-а, на ширем простору централног дела територије Србије одабрано је 17 мањих сливова, на којима нема значајних површина под карстом, за које постоје вишегодишњи подаци мерења протока. Дужина периода мерења протока на сваком од одабраних сливова, n (n – број година мерења), усвајана је као прихватљива за оцену

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Q_0 , ако стандардна грешка оцене није била већа од 6%, при чему је вредност стандардне грешке, ε_{Q_0} , одређивана преко израза:

$$\varepsilon_{Q_0} = \frac{C_V}{\sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где је C_V – коефицијент варијације серије средњих годишњих протока. У случају да расположиви период осматрања није био довољан, вршено је продужавање серије средњих годишњих протока (пример – р.Ношница х.с. Рокци).

За сваки од 17 одабраних сливова, у профилу одговарајуће хидролошке станице, одређена је вредности Q_0 , као аритметичка средина серије средњих годишњих протока.

Просечне падавине (P_0) за посматране сливове, одређиване су на основу карте изохијета просечних падавина, која је израђена у Републичком хидрометеоролошком заводу за период 1954. – 1985.

Просечна температура ваздуха (T_0) за посматране сливове, одређивана је на основу карте просечних температура за период 1931. – 1960., коју је израдио бивши Савезни хидрометеоролошки завод [5].

У својству примера, у Табели 2. приказан је пример прорачуна Q_0 за реку Студеницу, х.с.Ушће ($F = 540 \text{ km}^2$, $P_0 = 850 \text{ mm}$, $T_0 = 5,2^\circ\text{C}$), по методи Langbein-a, а у Табели 3. - по методи биланса.

Табела 2. Прорачун Q_0 за р. Студеницу, х.с. Ушће, по методи Langbein-a
Table 2. Assessment of Q_0 for the river Studenica, the hydrometric profile Usce, by using the Langbein method

Река/хидролошка станица	F (km ²)	P ₀ (mm)	T ₀ (C ⁰)	E	P ₀ /E	Q ₀ /E	Q ₀ (cm)	q ₀ (l/s*km ²)	Q ₀ (m ³ /s)
Студеница/ Ушће	540	850,0	5,2	10,63	8,00	3,40	36,13	11,45	6,18

Табела 3. Прорачун Q_0 за р. Студеницу, х.с. Ушће, по методи биланса
Table 3. . Assessment Q_0 for the river Studenica, the hydrometric profile Usce, by using the water balance method

Река/хидролошка станица	F (km ²)	P ₀ (mm)	T ₀ (C ⁰)	L	D (mm)	Q ₀ (cm)	q ₀ (l/s*km ²)	Q ₀ (m ³ /s)
Студеница/ Ушће	540	850,0	5,2	500,3	436,8	413,18	13,10	7,07

Вредности P_0 , T_0 и просечног протока одређеног преко података мерења (Q_0), по методи Langbein-a ($Q_{0,L}$) и по методи биланса вода ($Q_{0,B}$), за свих 17 одабраних сливова, приказане су у Табели 4., као и вредности површине слива до посматраних хидролошких станица.

Табела 4. Улазни подаци и резултати прорачуна Q_0 за 17 сливова централног дела Србије
Table 4. Input data and results obtained in computing Q_0 for 17 catchments located in the Central Serbia

№	Река/хидрол. станица	F (km ²)	P ₀ (cm)	T ₀ (C ⁰)	Q ₀ (m ³ /s)		
					Преко података	Методом Langbein	Методом биланса
1	Јошаница/Биљановац	265	85,0	6,5	3,47	3,00	2,95
2	Студеница/ Девићи	191	96,0	4,0	2,92	2,90	3,41
3	Студеница/ Мланча	310	90,0	4,3	4,80	4,20	5,69
4	Студеница/ Ушће	540	85,0	5,2	7,10	6,28	7,07
5	Лопатница/Богутовац	116	92,0	6,0	1,91	1,52	1,60
6	Бјелица /Гуча	239	89,0	7,5	2,69	2,58	2,50
7	Моравица/Ивањица	475	96,0	7,2	6,82	6,27	6,07
8	Бистрица/Бистрица	79	98,0	7,0	1,32	1,10	1,08
9	Милешевка/Пријепоље	155	79,0	7,0	1,47	1,40	1,37
10	Ношница/Рокци *)	164	93,0	7,0	2,12	2,08	2,03
11	Власина/Свође	350	84,0	6,3	3,68	3,68	3,92
12	Љубатска /Босилеград	199	85,0	8,0	1,71	1,75	1,72
13	Топоничка/Г. Топоница	202	68,0	8,0	1,05	1,05	1,02
14	Трговишки Тимок/Д. Каменица	360	82,0	8,5	3,35	3,15	2,57
15	Сврљ. Тимок/Ргоште	618	73,0	9,4	3,40	3,46	2,59
16	Козарска /Тупаловце	98	87,0	7,0	1,45	1,04	1,06
17	Ветерница/Бели Поток	364	85,0	8,5	3,37	3,23	2,83

*) Серија средњих годишњих протока продужена преко х.с. Ивањица на р. Моравици

На основу вредности просечног протока, срачунатих на три описана начина, анализирани су корелационе зависности Q_0 од $Q_{0,L}$ и Q_0 од $Q_{0,B}$. У првом кораку дефинисане су одговарајуће линеарне корелационе зависности

$$Q_0 = a_L * Q_{0,L} + b_L \text{ и } Q_0 = a_B * Q_{0,B} + b_B. \quad (9)$$

У оба случаја добијене су чврсте корелационе зависности са коефицијентима корелације блиским јединици. Међутим, проблем код ових зависности је у томе што се, у оба случаја, добијају значајне вредности слободног члана, што даје нереалне вредности Q_0 за мале сливове, за које се заправо и примењују анализирани методе. Ово је последица чињенице да нема довољно малих сливова за које би Q_0 био одређен преко података вишедеценијских мерења – најмањи који је одабран за ову анализу је слив Бистрице, до х.с. Бистрица ($F = 79 \text{ km}^2$). Зато су, у другом кораку, корелационе зависности тражене у форми степене функције

$$Q_0 = a Q_{0,L/B}^b \quad (10)$$

За обе методе прво је претпостављено да је изложилац $b=1,0$, односно претпостављена је линеарна зависност без слободног члана. Затим је дефинисана и зависност код које је изложилац $b \neq 0$. Добијене су следеће корелационе зависности:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$Q_0 = 1,083 * Q_{0,L}, \quad (11)$$

са коефицијентом корелације $r = 0,992$, и

$$Q_0 = 1,031 * Q_{0,B}, \quad (12)$$

са коефицијентом корелације $r = 0,969$.

Дефинисане су и степене зависности и добијено је:

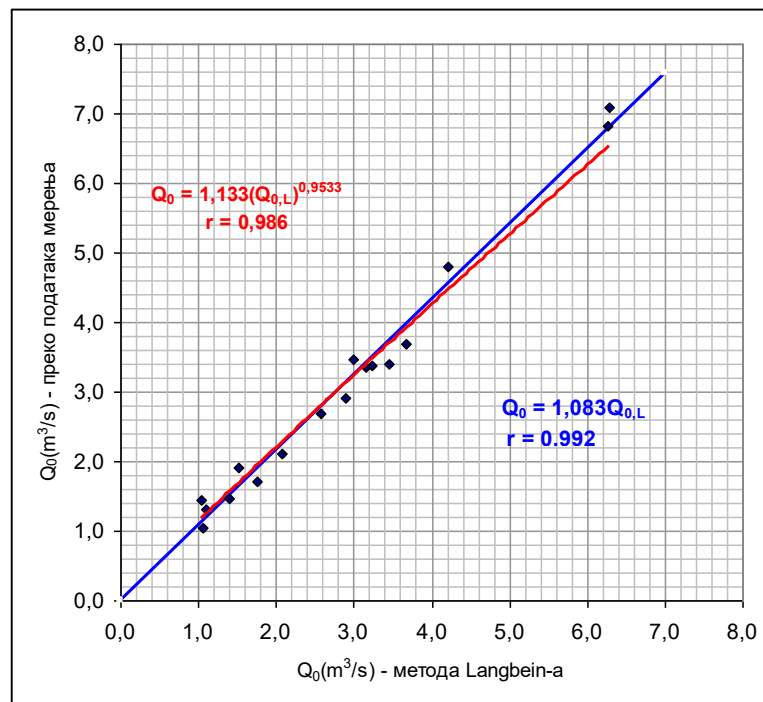
$$Q_0 = 1,133 * (Q_{0,L})^{0,954}, \quad (13)$$

са коефицијентом корелације $r = 0,986$, и

$$Q_0 = 1,196 * (Q_{0,B})^{0,898}, \quad (14)$$

са коефицијентом корелације $r = 0,974$.

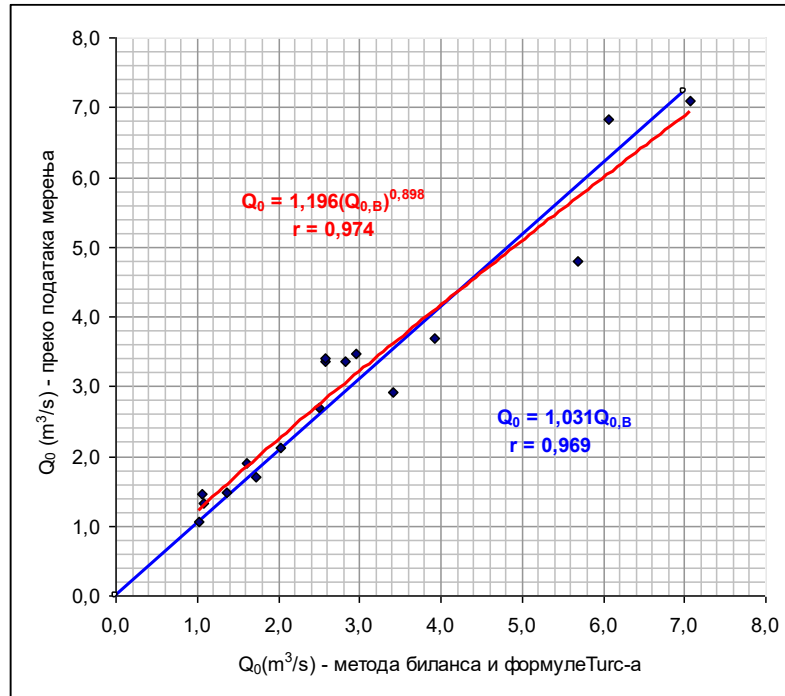
На слици 2 приказане су линеарна и степена зависност просечног протока, добијеног преко података мерења (Q_0), од просечног протока одређеног по методи Langbein-a ($Q_{0,L}$).



Слика 2. Зависност просечног протока, добијеног преко података мерења (Q_0), од просечног протока одређеног по методи Langbein-a ($Q_{0,L}$)

Figure 2. Relationship between the average runoff values calculated from the measurement data (Q_0) and those assessed by using the Langbein method ($Q_{0,L}$)

На слици 3 приказане су линеарна и степена зависност просечног протока, добијеног преко података мерења (Q_0), од просечног протока одређеног по методи биланса ($Q_{0,B}$), где је за одређивање губитка воде коришћена формула Турс-а.



Слика 3. Зависности просечног протока одређеног преко података мерења (Q_0) од просечног протока одређеног преко методе биланса ($Q_{0,B}$)

Figure 3. Relationship between the average runoff values calculated from the measurement data (Q_0) and those assessed by using the water balance method ($Q_{0,B}$)

На основу графичких приказа (Слика 2 и Слика 3) и аналитичких израза корелационих зависности, види се да обе методе дају нешто мање вредности, у односу на оне, које су добијене преко података мерења. Та чињеница се мора уважити код примене ове две методе, односно потребно је извршити корекцију добијених вредности просечног отицања, коришћењем одговарајуће корелационе зависности. Што се тиче одређења за једну од две анализране методе, може се рећи да обе дају прихватљиве резултата, уз поменути корекцију, али се предност, ипак, може дати методи Langbein-а, уз коришћење линеарне корекционе зависности, дефинисане изразом (9).

4 Закључна разматрања

Упоредним прорачунима просечног отицања за 17 сливова на територији централног дела Србије, прко података дугогодишњих осматрања и преко метода Langbein-а и биланса вода (где је коришћена једначина Турс-а), закључено је следеће:

- обе разматране методе прорачуна просечног отицања (Langbein-а и биланса вода) преко просечних падавина (P_0) и просечних температура (T_0), дају

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

прихватљиве резултате за сливове на територији централног дела Србије, уз корекцију резултата помоћу регионалних линеарних зависности, које су одређене за обе методе;

- нешто боље резултате даје метода Langbein-а па се иста препоручује за прорачун просечног отицања са малих неизучених сливова;

Најзад, било би пожељно да се ова анализа употпуни, увођењем сливова још неких река које имају вишегодишње периоде мерења протока, као што су Јадар, Обница, Љиг, Пештан, Лепеница, Јасеница и др. У тако проширену анализу било би веома пожељно укључити и одређени број малих сливова на чијим водотоцима су биле успостављене хидролошке станице такозване "допунске мреже станица", које су радиле по неколико година, за које би се расположиви периоди мерења могли успешно продужити преко оближњих станица "основне мреже" Републичког хидрометеоролошког завода.

Литература

1. Janković, D., Jovanović, S. i Ocokolić, M. (1985): *Hidrološke analize srednjih i malih voda na hidrološki neizučеним сливовима*, Zbornik radova seminara na Bledu, JDH, Beograd, 1985.
2. Langbein, W.B., at all,(1949), *Annual runoff in the United States*, US Geological Survey, Circular 52
3. Langbein, W.B., (1962), The water supply of arid valley in intermountain regions in relation to climate. Bulletin of the International association of Scientific Hydrology, Vol. 7, No1, pp 34/39
4. Оцокољић, М., *Регионалне анализе зависности отицања од падавина*, Гласник српског географског друштва, Свеска LXIV/1, Београд, 1984
5. SHMZ (1969), Atlas klime SFRJ, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1969
6. Turc, L., (1954), Le bilan d'eau des sols: relation entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement ,Troisime journee l'hydraulique, Alger 12-14 avril 1954,pp36-43.(Resume de l'auteur, Paris, 1953, parue dans l'Annuaire de l'agronomie,1954, et Sols africains, Vol. III, 1954WMO, (1994),
7. WMO (1994), *Guide to hydrological practices*, WMO No168, Geneve 1994.

Konsistentno određivanje zavisnosti visina–trajanje–povratni period kiše

Jasna Plavšić¹
Žana Topalović²
Jovan Despotović³

APSTRAKT: Zavisnost visina kiše – trajanje kiše – povratni period (ili zavisnosti HTP) je jedna od osnovnih ulaznih podataka za hidrološke proračune i projektovanje objekata za zaštitu od velikih voda na malim i srednjim slivovima na kojima su merodavna trajanja kiše kraća od 24 sata. Ove zavisnosti se dobijaju statističkom analizom visina kiše u intervalima vremena različitog trajanja. U ovom postupku su često prisutni razni problemi koji mogu dovesti do velikih neizvesnosti u vezi sa rezultujućim računskim kišama. Većina ovih problema potiče od grešaka u merenju i obradi podataka merenja padavina, ali poslovični nedostatak ovih merenja dovodi inženjere u praksi do toga da zavisnosti HTP određuju na osnovu skromnih raspoloživih podataka, bez sagledavanja neizvesnosti koje postoje. U ovom radu se razmatraju navedeni problemi i ukazuje se na metode dostupne u literaturi za konsistentno određivanje zavisnosti HTP, a na primeru podataka sa meteorološke stanice Banja Luka.

Ključne reči: računске kiše, statistička analiza, visina kiše, intenzitet kiše, trajanje kiše, zavisnosti HTP, zavisnosti ITP

Consistent estimation of the rainfall depth–duration–frequency relationship

ABSTRACT: The rainfall depth-duration-frequency (DDF) relationship is one of the main inputs for hydrologic assessment and design of the flood control structures in small and medium catchments for which the sub-daily rainfall is driving the catchment response hydrograph. The DDF relationships are derived from the statistical analysis of rainfall depths occurring in intervals of different duration. Various problems are often associated to this task that can lead to significant uncertainties in the resulting design rainfall depths. Some problems arise from the measurement errors and processing of raw measurement data, but the major problem in Serbia is that the practicing engineers are often compelled to develop the DDF relationships from the limited data and without a possibility to consider the uncertainties involved in the process. The paper describes the problems related to developing the DDF relationships and focuses on possible inconsistencies stemming from the analysis of limited data. A consistent method for the DDF development proposed by Koutsoyannis et al. (1998) is recommended for use with limited short-duration rainfall data. The procedure is described using the data from the Banja Luka rain gauge.

Keywords: design rainfall, rainfall statistical analysis, rainfall depth, rainfall intensity, rainfall duration, DDF relationship, IDF relationship

¹ Dr Jasna Plavšić, v. prof., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Srbija, jplavsic@grf.bg.ac.rs

² Žana Topalović, viši asistent, Univerzitet u Banja Luci – Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Republika Srpska, ztopalovic@aggfbl.org

³ Dr Jovan Despotović, v. prof., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Srbija, edespoto@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Zavisnosti visina kiše – trajanje kiše – povratni period (ili zavisnosti HTP) predstavljaju jedan od osnovnih ulaznih podataka za hidrološke proračune i projektovanje objekata za zaštitu od velikih voda na malim i srednjim slivovima na kojima su merodavna trajanja kiše kraća od 24 sata. Ove zavisnosti se dobijaju statističkom analizom podataka o kratkotrajnim jakim kišama sa pluviografskih stanica nakon primarne obrade u smislu izdvajanja maksimalnih visina kiša u intervalima vremena različitih dužina (najčešće od 5 minuta do 1440 minuta).

U postupku određivanja zavisnosti HTP postoje dva kritična koraka koja mogu dovesti do različitih problema. Prvi kritični korak jeste izdvajanje maksimalnih visina kiša različitih trajanja, gde se po pravilu javljaju mnoge neizvesnosti u pogledu raspoloživosti i reprezentativnosti podataka za razmatranu lokaciju. Drugi kritični korak je postupak statističke analize, koja može da proizvede nelogične rezultate zbog neizvesnosti vezanih za izbor teorijskih raspodela verovatnoće, ocenu njihovih parametara i ekstrapolaciju raspodela izvan raspona osmotrenih vrednosti.

Osnovni problem u Srbiji jeste relativno loša pokrivenost teritorije države pluviografima, tako da se uvek može postaviti pitanje reprezentativnosti raspoloživih podataka ukoliko se pluviograf ne nalazi blizu lokacije za koju je potrebno odrediti računске kiše. Ovaj problem se ne razmatra u ovom radu. Drugi problem vezan za pluviografske stanice u Srbiji jeste njihov ograničen rad koji počinje u aprilu i završava se u oktobru, pa ostaje nepoznato da li su maksimalne visine kiša iz ove sezone zaista i godišnji maksimumi koji se koriste za statističku analizu. Dalji problemi se vezuju za poslovično nepouzdan rad pluviografa, koji su mahom zastareli kišomeri sa plovkom i sa analognim zapisom na papirnoj traci. Poznati su brojni problemi sa ovim tipom pluviografa, od kojih se navode samo neki: gubitak u registrovanoj visini kiše tokom pražnjenja sifona zbog njegove inercije, prekid registrovanja zbog zapušnja i kvarova tokom velikih intenziteta kiše, nekalibrisano pražnjenje sifona (ispražnjenja zapremina ne iznosi 10 mm), neusklađenost pisača pri pražnjenju sifona (pisač pada ispod 0 mm), loš rad satnog mehanizma, loša vremenska sinhronizacija (osmatrač postavlja pisač na 7 časova a ne u tačno vreme zamene trake), itd. Nepouzdan rad pluviografa ostavlja neizvesnost o tome da li su sve relevantne kišne epizode uzete u obzir prilikom izdvajanja maksimalnih kiša i određivanja zavisnosti HTP.

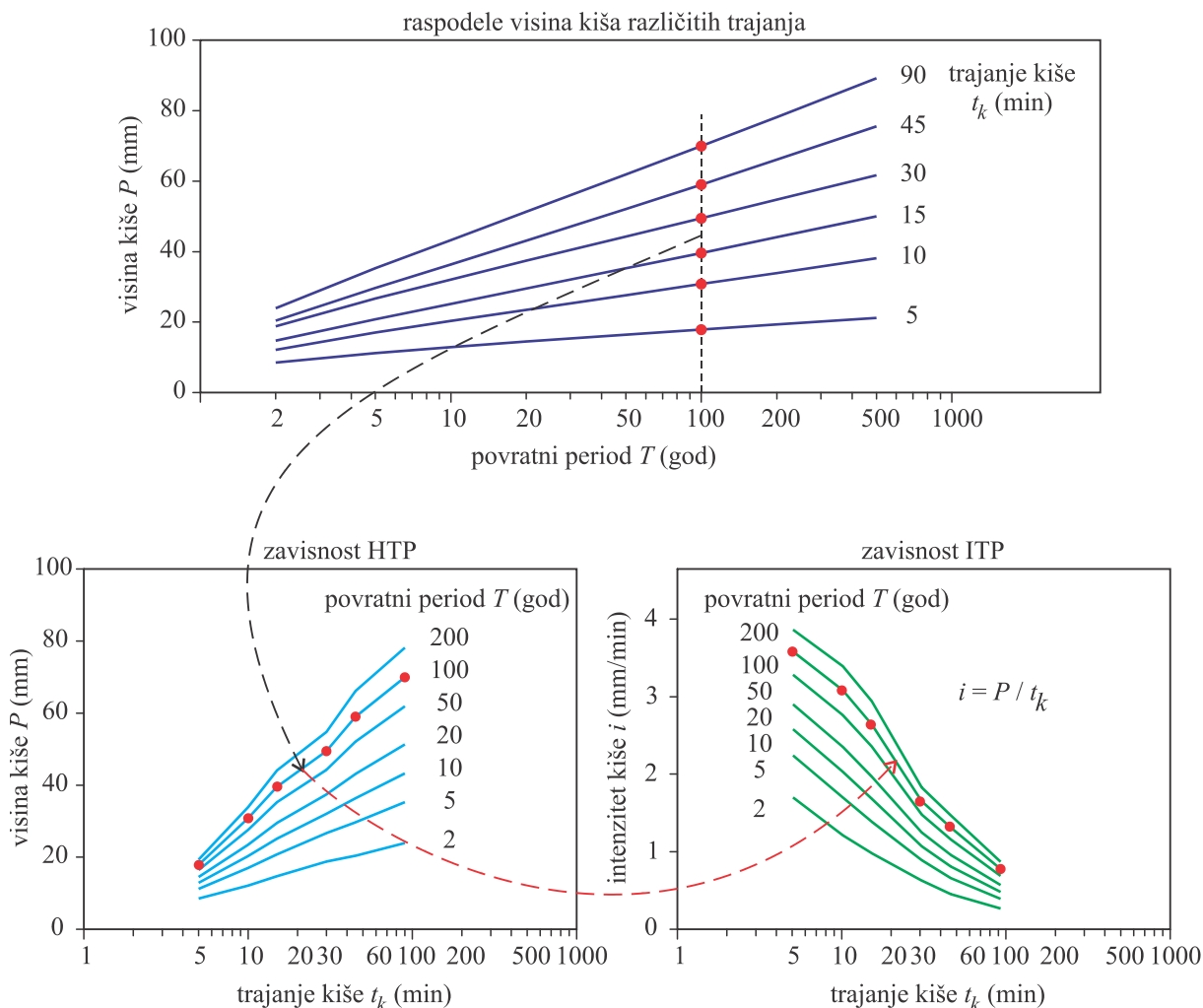
U ovom radu se poredi standardni pristup proračuna zavisnosti HTP sa pristupom koji je predložio Koutsoyannis i sar. (1998), na primeru podataka sa meteorološke stanice Banja Luka. Podatke sa ove stanice pre svega karakterišu dugački periodi bez raspoloživih podataka, što u standardnom pristupu dovodi do problema u konsistentnom određivanju zavisnosti HTP. Pristup Koutsoyannisa i sar. (1998), koji se pre svega zasniva na pretpostavci da (transformisani) intenziteti kiša svih trajanja prate istu raspodelu verovatnoće, pokazao se kao robusan metod kojim se ovi problemi mogu prevazići.

2 Metodologija i podaci

2.1 Standardni postupak formiranja zavisnosti HTP

Standardni postupak statističke analize za formiranje zavisnosti HTP podrazumeva odvojenu analizu podataka za svako pojedinačno trajanje kiše, a zatim formiranje zavisnosti

HTP i ITP na osnovu rezultata te analize. Ovaj postupak je prikazan na slici 1. Kao rezultat statističke analize, dobijaju se kvantili visina i intenziteta kiša različitih trajanja za izabrane povratne periode. Povezivanjem kvantila različitih trajanja istog povratnog perioda mogu se nacrtati krive zavisnosti visine i inteziteta kiše od trajanja za svaki povratni period.

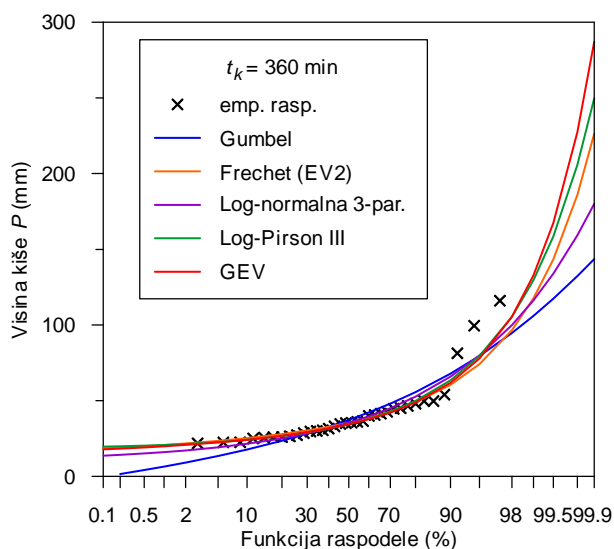


Slika 1. Standardni postupak formiranja zavisnosti HTP (dole levo) i ITP (dole desno) iz raspodela verovatnoće visina kiše različitih trajanja (gore).

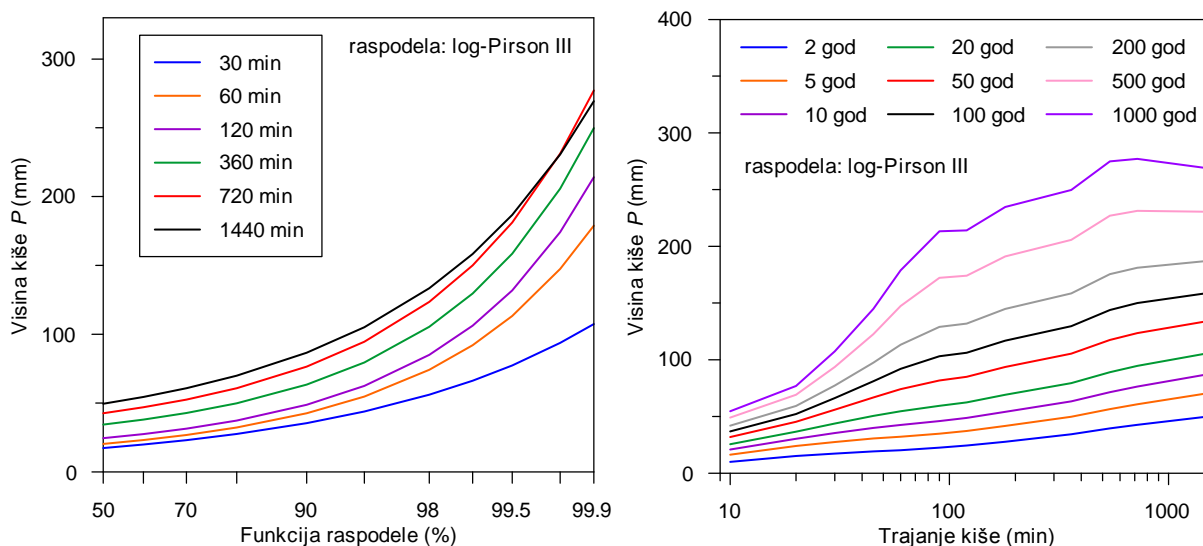
Statistička analiza u prvom koraku standardnog postupka se najčešće sprovodi sa maksimalnim godišnjim visinama kiše zadatih trajanja, dok primena metode pikova nije zaživela u praksi uprkos njenom promovisanju iz akademskih krugova (npr. Vukmirović i Despotović, 1986; Vukmirović i Petrović, 1991). Kao i kod svake statističke analize maksimalnih vrednosti, dva osnovna problema koja se za nju vezuju jesu izbor teorijske raspodele verovatnoće i neizvesnost na gornjem kraju raspodele. Teorijsku raspodelu bi trebalo usvojiti na osnovu njenih osobina kao što su koeficijenti varijacije i asimetrije, kao i na osnovu testova saglasnosti empirijske i teorijske raspodele. Međutim, u praksi je izbor raspodele obično subjektivan i najviše zavisi od iskustva obrađivača. Pri tome rezultati testiranja saglasnosti empirijske i teo-

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

rijske raspodele služe samo kao orijentacija za izbor raspodele, dok se o osobinama primenjenih teorijskih raspodela često ne vodi računa. Na primer, primena dvoparametarskih raspodela sa fiksnom asimetrijom može značajno da utiče na potcenjivanje ili precenjivanje gornjeg kraja raspodele. Na slici 2 prikazan je primer primene različitih teorijskih raspodela za niz visina kiša trajanja 360 minuta u Banja Luci, gde se vidi da neizvesnost u oceni kvantila za povratne periode preko 50 godina može da bude značajna. Na primer, 100-godišnja visina kiše se kreće od 106 do 133 mm u zavisnosti od raspodele, a 1000-godišnja od 144 do 287 mm.



Slika 2. Raspede verovatnoće visine kiše trajanja 360 minuta u Banja Luci prema različitim teorijskim raspodelama – velike neizvesnosti u zoni ekstrapolacije izvan raspona osmotrenih vrednosti.



Slika 3. Raspede verovatnoće visina kiše raznih trajanja u Banja Luci prema raspodeli log-Pirson III sa nekonsistentnim vrednostima kvantila na gornjem kraju raspodele (levo) i odgovarajuće krive HTP (desno).

Kada se formiraju zavisnosti HTP na osnovu raspodela visina kiše za svako pojedinačno trajanje, dešava se da rezultati ne budu konsistentni u smislu da visine kiša istog povratnog perioda a različitih trajanja ne rastu sa trajanjem. To dovodi do presecanja raspodela na njihovim gornjim krajevima, kao u primeru na slici 3 levo, kao i do opadanja krive HTP za najveći razmatrani povratni period na slici 3 desno.

Zbog lakše primene, za zavisnosti ITP se često traži analitički oblik do kojeg se dolazi regresionom analizom. Jedan pristup je da se za svaki povratni period formira posebna regresiona zavisnost $I_T(t_k)$, dok se u drugom pristupu formira jedna zavisnost za sve povratne periode, tj. $I(t_k, T)$. Tipičan oblik zavisnosti koji se traži je

$$I_T(t_k) = \frac{a}{(t_k + c)^m} \quad (1)$$

odnosno za drugi pristup

$$I(t_k, T) = \frac{aT^k}{(t_k + c)^m} \quad (2)$$

U literaturi se mogu naći i nešto drugačiji izrazi, dok su gornji najčešći. Navedeni oblici (1) i (2) se jednostavno linearizuju logaritmovanjem čime se olakšava primena metode najmanjih kvadrata za ocenu parametara u ovim izrazima.

Suštinska razlika između dva pristupa jeste da se u prvom pristupu dobija onoliko zavisnosti (1) koliko se povratnih perioda razmatra, a time i toliko različitih vrednosti parametara a , c i m . Kod postojanja više zavisnosti može se postaviti pitanje konsistentnosti isto kao i kod različitih raspodela za različita trajanja.

U drugom pristupu, parametri a , c , m i k su jedinstveni za jednu zavisnost ITP. Međutim, vrednosti ovih parametara će zavisiti od izabranih povratnih perioda sa kojima se ušlo u formiranje regresionih zavisnosti. Drugim rečima, parametri jednačine (2) neće biti isti ako se posmatraju rezultati statističke analize npr. za povratne periode 10, 50 i 100 godina, ili ako se u obzir uzmu neki drugi povratni periodi.

Svi navedeni problemi upućuju na to da je od suštinskog značaja da se zavisnosti HTP i ITP odrede konsistentno kako bi odnosi visina kiša različitih trajanja a iste verovatnoće pojave bili logični.

2.2 Opšta formula Koutsoyannisa

Koutsoyannis i sar. (1998) su predložili da se opšta formula za zavisnost ITP izrazi u obliku u kome se razdvaja uticaj trajanja i verovatnoće pojave:

$$I(t_k, T) = \frac{A(T)}{B(t_k)} \quad (3)$$

Za zavisnost HTP se onda može napisati:

$$P(t_k, T) = i(t_k, T) \cdot t_k = \frac{A(T)}{B(t_k)} \cdot t_k = \frac{A(T)}{B'(t_k)} \quad (4)$$

Deo koji zavisi od trajanja kiše ima oblik stepene funkcije:

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$B(t_k) = (t_k + c)^m \quad (5)$$

gde su m i c parametri koje treba oceniti (pri čemu je $0 < m < 1$ i $c > 0$). Ovaj deo opšte formule je isti kao i u standardnim oblicima datim u izrazima (1) i (2).

Deo $A(T)$ koji zavisi od povratnog perioda u izrazu (3) ima oblik stepene funkcije (tj. aT^b) dok u nekim drugim formulama taj deo ima oblik logaritamske funkcije (npr. $a + b \ln T$). Ove formule su empirijskog karaktera i nastale su da bi se olakšali proračuni, a ne kao rezultat teorijskih razmatranja. Međutim, ovaj deo opšte formule se može formulisati drugačije ako se pretpostavi da intenzitet kiše $I(t_k)$ za neko trajanje t_k prati određenu teorijsku raspodelu:

$$P\{I(t_k) \leq i\} = F_{I,t_k}(i) \quad (6)$$

Transformisana slučajna promenljiva Y :

$$Y = I(t_k) \cdot B(t_k) \quad (7)$$

ima istu raspodelu kao i intenzitet kiše jer se dobija množenjem intenziteta neslučajnom funkcijom:

$$F_Y(y) = P\{Y \leq y\} = P\{I(t_k) \cdot B(t_k) \leq y\} = P\left\{I(t_k) \leq \frac{y}{B(t_k)}\right\} = F_{I,t_k}\left(\frac{y}{B(t_k)}\right) \quad (8)$$

Kako je zapravo $Y = A(T)$, sledi da se ovaj deo opšte formule za zavisnost ITP može dobiti kao kvantil funkcije raspodele promenljive Y :

$$A(T) \equiv Y = F_Y^{-1}(1 - 1/T) \quad (9)$$

Suština ove transformacije je u tome što se njom pretpostavlja da transformisana promenljiva ima istu raspodelu kao i intenziteti kiša svih trajanja.

Oblik izraza (9) zavisi od pretpostavljene raspodele intenziteta kiše. Za neke raspodele ovaj izraz će imati eksplicitan oblik, ali za neke druge raspodele koje nemaju eksplicitnu inverznu formu (normalna, Pirsonova III tipa), ovaj deo opšte formule se može odrediti iz tablica, približnim formulama ili numeričkim proračunom.

Ako se pretpostavi da intenzitet kiše prati Gumbelovu raspodelu sa parametrom lokacije u i parametrom razmere α , tada je:

$$F_Y(y) = \exp[-\exp(-(y - u)/\alpha)], \quad -\infty < y < \infty \quad (10)$$

dok je inverzna forma:

$$A(T) = u - \alpha \ln(-\ln(1 - 1/T)) \quad (11)$$

Za opštu raspodelu ekstremnih vrednosti (GEV) sa parametrom oblika κ , parametrom razmere α i parametrom lokacije u , funkcija raspodele glasi:

$$F_Y(y) = \exp\left[-\left(1 - \kappa \frac{y - u}{\alpha}\right)^{1/\kappa}\right], \quad \kappa \neq 0, \quad \begin{array}{l} y > u + \alpha/\kappa, \quad \kappa < 0 \\ y < u + \alpha/\kappa, \quad \kappa > 0 \end{array} \quad (12)$$

dok se za $\kappa = 0$ svodi na Gumbelovu raspodelu. Tada je inverzna forma:

$$A(T) = u + \frac{\alpha}{\kappa} [1 - (-\ln(1 - 1/T))^{\kappa}] \quad (13)$$

Za raspodelu log-Pirson III je poznato da nema eksplicitnu inverznu formu. Njeni kvantili se često računaju na osnovu faktora frekvencije:

$$A(T) = \exp[\mu_{\ln Y} + \sigma_{\ln Y} K(T)] \quad (14)$$

gde su $\mu_{\ln Y}$ i $\sigma_{\ln Y}$ srednja vrednost i standardna devijacija logaritmovane promenljive, dok se faktor frekvencije $K(T)$ može približno sračunati pomoću Wilson-Hilferty formule (Stedinger i sar. 1993), koja se smatra dobrom za verovatnoće između 0.01 i 0.99 i za $|C_s| \leq 2$ i koja glasi

$$K(T) = \frac{2}{C_s} \left[\left(1 + \frac{C_s}{6} Z_N(T) - \frac{C_s^2}{36} \right)^3 - 1 \right] \quad (15)$$

gde je C_s koeficijent asimetrije logaritmovane promenljive Y , a $Z_N(T)$ je odgovarajuća standardna normalna promenljiva za razmatrani povratni period. Alternativno, kvantili log-Pirson III raspodele se mogu odrediti i u MS Excelu pomoću ugrađenih funkcija za gama raspodelu (Plavšić, 2015).

2.3 Ocena parametara u opštoj formuli Koutsoyannisa

Koutsoyannis i sar. (1998) su predložili dve metode za ocenu parametara u opštoj formuli (3). Prvu metodu je nazvao „robustna metoda“, u kojoj se prvo ocenjuju parametri dela $B(t_k)$, a zatim parametri dela $A(T)$. Drugom metodom se ocenjuju svi parametri odjednom, i to primenom metode najmanjih kvadrata za minimizaciju greške između empirijskih raspodela visina kiša i pretpostavljene teorijske raspodele. Ova druga metoda podrazumeva primenu nekog optimizacionog algoritma za pronalaženje minimuma funkcije, pa u standardnoj praksi zahteva primenu nekih gotovih rešenja kao što je dodatak Solver u MS Excelu ili kolekcije alata za optimizaciju u Matlabu. U ovom radu je zato prikazana samo prva metoda koja je primenljivija u praksi.

Robusna metoda se zasniva na jednakosti raspodela promenljivih $Y = I(t_k) B(t_k)$ za sva trajanja. Ako se analiza sprovodi na intenzitetima kiša za K trajanja, tada imamo K nizova intenziteta $I_j, j = 1, 2, \dots, K$, i K odgovarajućih nizova promenljive Y :

$$Y_j = I_j \cdot B(t_{k,j}), \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

Ako se raspolaze sa n godina osmatranja, tada je $N = nK$ ukupan broj vrednosti Y .

Hipoteza o jednakosti raspodela K grupa podataka je zapravo hipoteza testa Kruskal-Wallisa. Kontrolna statistika ovog testa glasi:

$$KW = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^K n_j \left(\bar{r}_j - \frac{N+1}{2} \right)^2 \quad (17)$$

gde su n_j dužine nizova intenziteta I_j za pojedina trajanja, N je ukupan broj podataka (tj. $N = n_1 + n_2 + \dots + n_K$, odnosno $N = nK$ za jednake dužine pojedinih nizova), dok je \bar{r}_j srednji rang vrednosti iz niza Y_j u celovitom nizu od svih N vrednosti Y . Manja vrednost Kruskal-Wallisove statistike bolje ukazuje na to da svi nizovi potiču iz iste raspodele. Kako rangovi vrednosti Y

zavise od parametara c i m , to i Kruskal-Wallisova statistika zavisi od njih, pa se problem ocene parametara svodi na optimizacioni problem

$$KW = f(c, m) \rightarrow \min \quad (18)$$

Za rešavanje ovog optimizacionog problema može se primeniti neki optimizacioni algoritam, ali se on može lako rešiti i probanjem, tj. sukcesivnim pretpostavljanjem vrednosti parametara i njihovim korekcijama do postizanja minimuma.

Treba naglasiti da ovaj postupak minimizacije Kruskal-Wallisove statistike ne treba poistovećivati sa primenom Kruskal-Wallisovog testa. Naime, osnovna pretpostavka ovog testa je da se ispituju nezavisni uzorci, što u ovoj primeni nije slučaj s obzirom da podaci koji čine nizove Y_j , tj. nizovi visina i intenziteta kiša različitog trajanja, ne predstavljaju nezavisne nizove s obzirom da potiču iz istih meteoroloških događaja.

Koutsoyannis i sar. (1998) preporučuju da se ocena parametara dela $B(t_k)$ sprovodi samo na podacima većeg intenziteta, odnosno da se u proračunu zadrži samo npr. polovina ili trećina najvećih vrednosti Y za svako trajanje.

U drugom delu određivanja zavisnosti ITP formira se celovit niz svih vrednosti Y sa ocenjenim parametrima m i c (sada se radi sa svim vrednostima, a ne samo sa najvećim). Prema pretpostavci da sve ove vrednosti prate istu raspodelu, traži se teorijska raspodela koja se najbolje prilagođava ovim podacima. Usvajanjem raspodele dolazi se i do oblika i vrednosti parametara dela $A(T)$, čime se postupak završava.

Radi preglednosti, postupak definisanja opšte formule prema predloženoj metodi je rezimiran kroz sledeće korake:

1. Pretpostave se vrednosti parametara c i m u formuli (5).
2. Primenom formule (7) izračunaju se vrednosti promenljive Y za sva trajanja $t_{k,j}$, $j = 1, 2, \dots, K$.
3. Za sva trajanja izdvoji se deo nizova Y sa najvećim vrednostima (npr. ako su za sva trajanja na raspolaganju podaci iz 45 godina, zadržava se najvećih 15-20 podataka). Na taj način u analizi ostaje N^* podataka od ukupno N podataka.
4. Odrede se rangovi N^* vrednosti promenljive Y . Najveća vrednost dobija rang 1, dok najmanja dobija rang N^* . Za vrednosti koje se ponavljaju računa se srednji rang tih vrednosti.
5. Za svako trajanje $t_{k,j}$ odredi se prosečan rang \bar{r}_j i računa se statistika KW prema formuli (17) uz $N = N^*$.
6. Vrednosti parametara c i m se variraju dok se ne dođe do najmanje vrednosti KW .
7. Sa usvojenim vrednostima c i m računa se ceo niz od N vrednosti Y prema formuli (7).
8. Formira se empirijska raspodela za niz Y .
9. Pretpostavlja se teorijska raspodela za niz Y i ocenjuju se neni parametri standardnim metodama. U ovom koraku može se pretpostaviti više različitih teorijskih raspodela, dok se najbolja može izabrati na osnovu testova saglasnosti, osobina raspodele i vizuelne provere na papirima verovatnoće.
10. Koristi se izraz za $A(T)$ za usvojenu raspodelu (npr. izraz (11) za Gumbelovu raspodelu, izraz (13) za opštu raspodelu ekstremnih vrednosti ili izraz (14) za log-Pirson III raspodelu), u kome se koriste ocene parametara usvojene raspodele.

2.4 Podaci

Kao primer za ovaj rad korišćeni su podaci o godišnjim maksimumima visine kiša sa pluviografske stanice Banja Luka za dvanaest trajanja između 10 i 1440 minuta. Ukupna dužina nizova iznosi 34 godine, ali podaci zapravo pokrivaju tri razdvojena perioda (1960-1976, 1994-1999 i 2003-2013) između kojih postoje značajni prekidi (posebno onaj između 1977. i 1993. godine). U tabeli 1 prikazane su osnovne statistike nizova visina kiše različitih trajanja.

Tabela 1. Osnovne statistike nizova maksimalnih godišnjih visina kiša na stanici Banja Luka.

	trajanje kiše (min)											
	10	20	30	45	60	90	120	180	360	540	720	1440
min (mm)	2,4	4,0	5,5	6,8	8,7	11,4	12,5	16,0	21,8	24,1	24,9	26,3
max (mm)	37,6	57,6	67,6	80,6	86,2	90,1	91,6	97,7	116	143,7	155,9	157,1
sr. vred. (mm)	11,8	17,5	20,4	23,2	24,9	27,7	29,7	33,5	40,6	46,4	49,7	56,5
st. dev. (mm)	7,3	10,3	12,4	14,8	16,2	17,2	17,6	18,9	20,8	23,4	24,7	25,8
koef. asim.	1,81	2,02	2,07	2,36	2,47	2,41	2,28	2,16	2,34	2,69	2,77	2,19

3 Rezultati

3.1 Standardni postupak

Iz tabele 1 se može videti da nizovi visina kiše za sva trajanja imaju izraženu asimetriju. Zato su u preliminarnoj analizi ispitane samo dve teorijske raspodele koje bi se mogle usvojiti za ove podatke: log-Pirson III raspodela i opšta raspodela ekstremnih vrednosti (GEV), za koju su parametri ocenjeni metodom L-momenata. Za obe raspodele javile su se nekonsistentnosti u smislu presecanja gornjih krajeva raspodela, kao što je pokazano na slici 3 levo za log-Pirson III raspodelu. Log-Pirson III raspodela je odbačena, dok je isprobana GEV raspodela sa parametrima ocenjenim metodom L-momenata, ali sa fiksiranim parametrom oblika $\kappa = -0,2$ zbog kontrole gornjeg kraja raspodele. Rezultat je prikazan na slici 4.

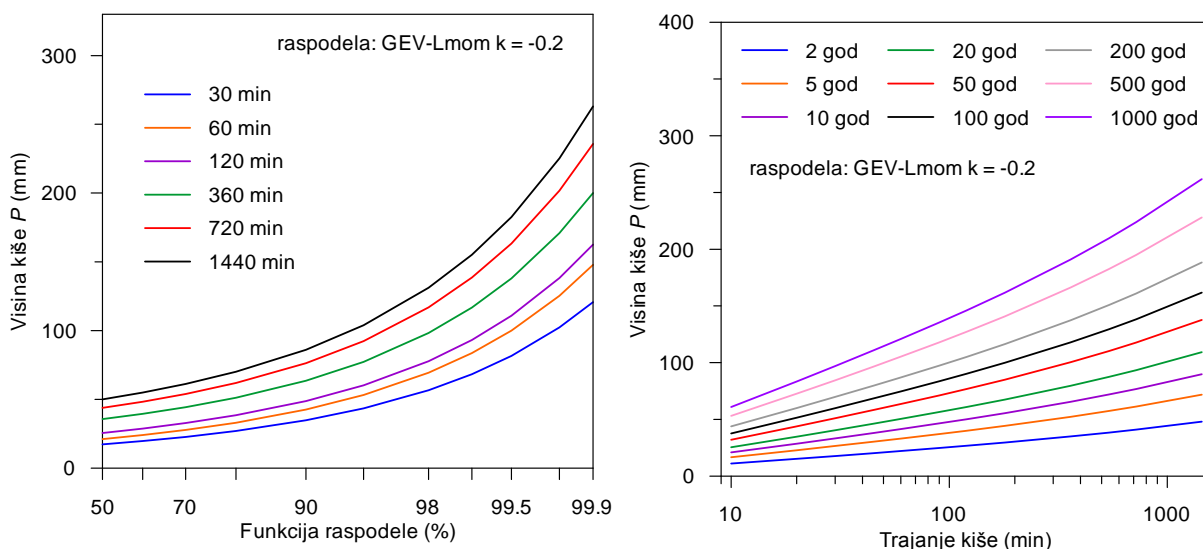
3.2 Opšta formula Koutsoyannisa

Prema postupku opisanom u poglavlju 2.3, najpre su formirani nizovi transformisanih intenziteta Y za svih $K = 12$ trajanja kiše. S obzirom da ukupno ima $n = 34$ godina osmatranja, ukupan broj podataka je $N = nK = 408$. Za ocenu parametara c i m u delu $B(t_k)$ opšte formule zadržano je 15 najvećih vrednosti od ukupno 34 za svako trajanje, pa se ukupan broj podataka sveo na $N^* = 15K = 180$. Probanjem se došlo do vrednosti $c = 9,0$ i $m = 0,77$ za koje je dobijena najmanja vrednost Kruskal-Wallisove statistike od $KW = 0,131$.

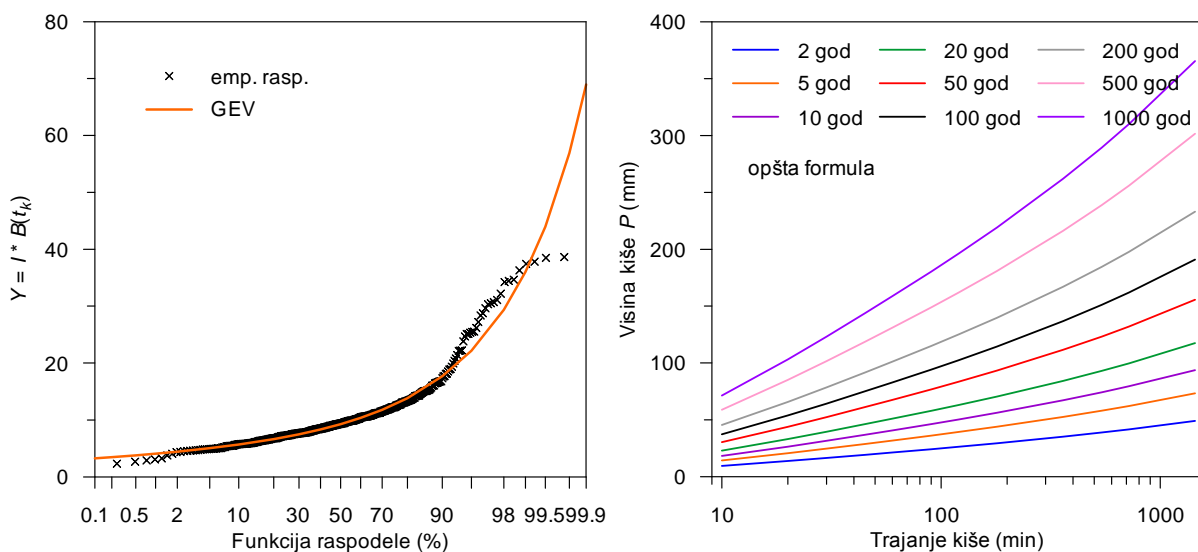
U drugom delu ove metode pretpostavljeno je da se niz od svih $N = 408$ vrednosti Y najbolje može prilagoditi GEV raspodelom. Parametri ove raspodele su ocenjeni metodom L-momenata, sa vrednostima $\kappa = -0,26$, $\alpha = 1,15$ i $u = 8,06$. Na slici 5 levo prikazana je ova raspodela. Opšta formula za ovu ITP zavisnost tada glasi:

$$I(t_k, T) = \frac{8,06 - 12,1[1 - (-\ln(1 - 1/T))^{-0,26}]}{(t_k + 9)^{0,77}}, \quad t_k \text{ (min)}, \quad I \text{ (mm/min)} \quad (19)$$

Na slici 5 desno prikazane su HTP krive prema opštoj formuli (19).

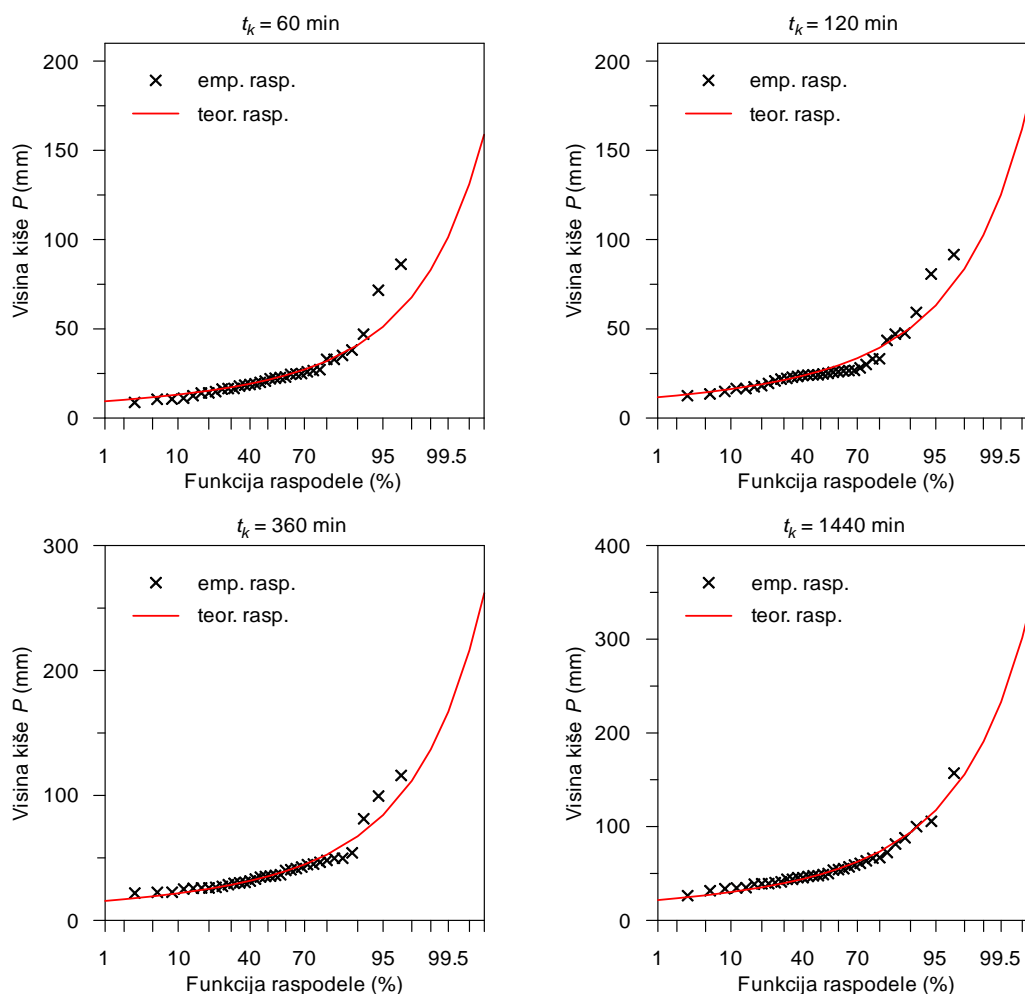


Slika 4. Standardni pristup: raspodele verovatnoće visina kiše raznih trajanja u Banja Luci prema GEV raspodeli sa (levo) i odgovarajuće krive HTP (desno).



Slika 5. Opšta formula Koutsoyannisa: raspodela transformisanih intenziteta Y za sva trajanja u Banja Luci prema GEV raspodeli (levo) i odgovarajuće HTP krive (desno)

Na slici 7 prikazano je nekoliko primera kako se opšta formula prilagođava podacima za pojedina trajanja. Sa ove slike se može videti da je slaganje empirijske raspodele i opšte formule (19) kada se u nju stavi neko konkretno trajanje veoma dobro za sva trajanja, što indirektno potvrđuje da pretpostavka o jedinstvenoj raspodeli transformisanog intenziteta za sva trajanja ima smisla.



Slika 7. Opšta formula Koutsoyannisa, raspodele visine kiše za pojedina trajanja za Banja Luku – empirijske raspodele i raspodele prema opštoj formuli.

4 Zaključak

Pristup Koutsoyannisa i sar. (1998) za konstrukciju za-visnosti visina – trajanje – povratni period kiše (HTP), koji se pre svega zasniva na pretpostavci da (transformisani) intenziteti kiša svih trajanja prate istu raspodelu verovatnoće, pokazao se kao robustan metod kojim se mogu prevazići problemi u određivanju ovih zavisnosti u inženjerskim zadacima u kojima je neophodno da se definišu računске kiše. Prekidi i greške u merenjima, kao i kratki nizovi, jesu najčešći problemi koji se vezuju za obradu pluviografskih podataka, zbog kojih konstrukciju zavisnosti HTP često prate nelogičnosti i nekonsistentni podaci. Rezultati ovog rada pokazuju, na primeru podataka iz Banja Luke, da metod Koutsoyannisa daje logične i konsistentne rezultate i u uslovima velikih prekida u nizovima koji doprinose velikim neizvesnostima na gornjem kraju raspodele. Iz navedenih razloga, ovaj pristup se preporučuje za praktične proračune u inženjerskoj praksi.

Zahvalnost

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja u projektu tehnološkog razvoja TR 37010 kod Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“. Autori se takođe zahvaljuju Republičkom hidrometeorološkom zavodu Republike Srpske za stavljanje podataka za istraživanje na raspolaganje.

Literatura

1. Koutsoyiannis D., Kozonis D., Manetas A. (1998) A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206: 118-135.
2. Plavšić J. (2015) Praktikum iz stohastičke hidrologije, nastavni materijali za studente master studija, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, http://www.hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/Stoh_2009/StohHidrol2009.htm
3. Stedinger J.R., Vogel R.M., Foufoula-Georgiou E. (1993) Frequency Analysis of Extreme Events, u: *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment (ed.), McGraw Hill
4. Vukmirović V., Despotović J. (1986) Osnovne faze statističke obrade jakih kiša kratkog trajanja, *Vodoprivreda*, 18 (2-3), str. 89-93.
5. Vukmirović V., Petrović J. (1991) Statistical Analysis of Rainfall - A Basis for Urban Runoff Modelling, u: *New Technologies in Urban Drainage*, Proc. UDT '91, Dubrovnik, Č. Maksimović (ed.), Elsevier, London, pp. 13-19.

Проблеми и решења при изради хидролошких анализа за коришћење вода код обновљивих извора енергије

Срђан Марјановић¹

АПСТРАКТ: Издавање мишљења Републичког хидрометеоролошког завода Србије према Закону о водама. Садржина мишљења и методе које се примењују при изради хидролошких прорачуна. Одабир и усвајање методологија за прорачун карактеристичних протока. Проблеми проистекли из неусаглашености различитих закона који се односе на обновљиве изворе енергије. Проблеми због различитих тумачења истих закона са освртом на утицај на хидрологију. Очекивања у покушају решавању проблема.

Кључне речи: Закон о водама, мишљења, хидрологија, методе, проблеми, очекивања

Problems and solutions in hydrological analysis for water use in renewable energy

ABSTRACT: Expert opinions issuing by RHMSS according to Water Law. Content of opinions and methods in hydrological analysis. Selection and adoption of a methodology for calculation of characteristic flows. Problems resulting from the incompliance of the various laws relating to renewable energy. Problems due to different interpretations of the same laws with regard to the impact on hydrology. Expectations in an attempt to solve the problem.

Keywords: Water Law, expert opinions, hydrological analysis, methods, problems, expectations

¹ Срђан Марјановић, дипл. инж. грађ., РХМЗ, Кнеза Вишеслава бр. 66, Београд,
srdjan.marjanovic@hidmet.gov.rs

1 Увод

Републички хидрометеоролошки завод Србије (у даљем тексту: РХМЗ), као посебна организација у оквиру система државне управе има јасно прописану улогу у поступку израде техничке документације за изградњу хидротехничких објеката. Улога РХМЗ-а у овом делу је предвиђена и прописана Законом о водама, како онима из претходног периода, тако и актуелним законом из 2010. године и састоји се издавању мишљења у поступку добијања водних услова од надлежних органа. Одговарајућим подзаконским актом, Правилником, предвиђени су форма и садржина обрасца мишљења. Између осталих, мишљења се издају и за хидроцентрале које користе воду као обновљиви извор енергије, са посебним акцентом на објекте снаге до 10 MW (микро, мини и мале хидроцентрале или хидроелектране). Суштина мишљења која РХМЗ издаје за ову групу објеката представљају хидролошке величине карактеристичних протока (тзв. велике, средње и мале воде), које се користе за прорачуне инсталисаног капацитета, димензионисање објеката, заштиту животне средине и задовољење потреба низводних корисника.

2 Методе које се примењују за хидролошке прорачуне

Мишљења се издају на основу достављених захтева подносилаца. Код анализе достављених захтева најпре се има у виду да ли се објекти и радови планирају на водотоцима на којима постоје осматрања или на неизученим или недовољно изученим сливовима.

На водотоцима на којима нема осматрања или су недовољна, подносилац је у обавези да уради хидролошке прорачуне у складу са правилима струке и на основу расположивих података. У складу са одредбама Закона о планирању и изградњи, РХМЗ као лице које утврђује један од услова у поступку израде техничке документације не може да учествује у изради хидролошких прорачуна у случајевима када за исти објекат даје и мишљење. Практично, уколико би РХМЗ радио хидролошке прорачуне, не би могао касније и да мишљењем верификује прорачун, чиме би подносилац био онемогућен да прибавља водна акта.

Код водотока на којима се врше мерења и осматрања ситуација је нешто другачија. РХМЗ за ове водотоке већ обрађује податке који се публикују у годишњацима, па се и мишљења за ове водотоке дају на основу сопствене стручне документације (студије, анализе, претходна мишљења и друго) или се, у складу са потребама, спроводе неке додатне анализе расположивих података. Једноставно речено, код ових водотока већ постоји нека процена очекиваних резултата. Осмотрени хидролошки подаци представљају имовину РХМЗ-а и ако су већ анализирани и стоје на располагању, подносиоцима се не намеће обавеза да додатно рачунају нешто што постоји и што је већ верификовано. Да не би било забуне, подносилац може да уради и достави хидролошку анализу и за водотоке на којима РХМЗ врши осматрања и мерења, али се на томе не инсистира приликом издавања мишљења, што се временом показало као могуће погрешан приступ. Када би се исправно спроводила процедура, сваки озбиљан инвеститор МХЕ би за своје потребе при изради генералних и идејних решења, урадио претходна истраживања, што обухвата и прикупљање расположивих

хидролошких података. На основу тога би се урадио избор техничког решења, па процена износа инвестиције и у складу са тим, озбиљном инвеститору није никакав проблем да уради и хидролошку анализу на основу расположивих података. Међутим, то врло често није случај, о томе ће бити више речи касније, па се хидрологија заврши са издавањем мишљења РХМЗ.

Као што је у уводу речено, суштину мишљења РХМЗ представљају велике, средње и мале воде водотока. Велике воде се морају познавати због заштите самог објекта, одређивања акумулационог простора и трансформације поплавног таласа. Средње воде су неопходне за димензионисање инсталисаног капацитета, деривационих органа и режима рада у току године. Мале воде се рачунају због заштите животне средине и заштите низводних корисника.

Код великих вода за изучене сливове најчешће се користи статистичка анализа расположивих података максималних осмотрених годишњих протока, понекад и анализе таласа великих вода.

Код неизучених сливова користе се методе које се базирају на физичко-географским карактеристикама слива и анализи падавина. Од метода највише се користи тзв. СЦС метода (некадашњи назив, сада НРЦС), односно метода синтетичког јединичног хидрограма за апроксимацију рачунских великих вода троуглом. Од осталих метода, користи се НРЦС метода са апроксимацијом сложеним таласом, теорија граничних интензитета и статистичка анализа великих вода добијених регионалним моделирањем. Уочено је да готово нико не користи рационалну методу, нарочито код малих сливова (до 3 km²).

У склопу слике 1 Приказан је један уобичајени хидролошки прорачун великих вода који се доставља на мишљење у РХМЗ.

Код средњих вода за изучене сливове се користе расположиви подаци, док се код неизучених сливова користе регионалне анализе (корелације, изолиније) или детерминистичке методе попут Лангбајна. Као и за велике воде, на слици 2. Је дат део прорачуна средњих вода за један неизучени слив.

Код малих вода за изучене сливове, такође се користе расположиви подаци, а код неизучених сливова се примењује регионална анализа или законитости усвојене у стручној пракси (проф. Ђорђевић) (слика 3).

Шта је проблем? Проблем представља непостојање усвојене или макар стручно одабране методологије за израду хидролошких анализа и то важи за велике, средње и мале воде. Посебно су интересантне велике воде, јер се ове величине користе и за све друге хидротехничке објекте. Код великих вода за изучене сливове пракса се базира на решењима других земаља (нпр. Билтен 17 из САД) и ту је још колико-толико могуће држати ствари под контролом. Међутим, код неизучених сливова ситуација је знатно другачија. Применом различитих метода могу се добити веома значајне разлике у резултатима, који сваки на свој начин могу бити и тачни и нетачни, нема доказа, јер нема мерења! Веома често се питање хидрологије завршава на мишљењу и уопште се не анализира у каснијим фазама пројектовања и ревизије, што свакако није добро.

Након утврђивања методе за велике воде, у следећој фази треба се позабавити средњим и малим водама, с тим да се код средњих и малих вода пракса у сваком случају базира на регионалним анализама, разлике у резултатима су мање изражене и могу се превазићи избором техничких решења у оквиру самог објекта (на пример, инсталисани проток на турбини може бити и 1.5 Q_{sr}, али и 2 Q_{sr}).

3. ХИДРОЛОШКИ ПРОРАЧУНИ

3.1. Прорачун максималног протицаја

Завојничка река и њена лева притока, Глеђевачки поток, представљају типичне бујичне водотокове (нагли надоласци поплавног таласа, покретање великих количина наноса, изражена деструктивна енергија). Обављен је прорачун великих вода одређене вероватноће појаве $Q_{\text{max}(%)}$, коришћењем комбиноване методе, која има два основна сегмента:

- примену теорије синтетичког јединичног хидрограма за детерминисање вршне ординате јединичног отицаја q_{max} ;
- примену SCS методологије за раздвајање ефективних падавина P_e (формирају директан отицај) од укупних (брutto падавина P_b).

Применом комбинованог поступка максималан протицај одређене вероватноће појаве $Q_{\text{max}(%)}$ се добија као:

$$Q_{\text{max}(t)} = q_{\text{max}} \cdot P_e(t) \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (3.1)$$

Читав поступак прорачуна је спроведен коришћењем програма "SCS" (аутор: Драган Малошевић, 1995.).

3.1.1. Синтетички јединични троугаони хидрограм

На слици 3.1. су приказани основни елементи синтетичког јединичног троугаоног хидрограма.

$$t_p = 0.75 \frac{(L + L_c)^{0.385}}{\sqrt{I_s}} \quad [\text{h}] \quad (3.2)$$

t_p - време од тежишта хијетотограма ефективне кише до тренутка појаве вршне ординате синтетичког јединичног хидрограма (време кашљења).

Релација (3.2.) је изведена на основу истраживања која су репрезентативна за регион (Ристић, Р., Малошевић, Д. 2011.).

T_k - трајање ефективне кише [h]

$$T_p = \frac{T_k}{2} + t_p \quad [\text{h}] \quad (3.3)$$

$A = 0.3$ (konstanta)

$\beta = 0.82$ (вредност коефицијента β , меродавна за сливове Завојничке реке и Глеђевачког потока, одређена је коришћењем карте изоленија, која је дата у прилогу на крају овог поглавља)

T - трајање кише [min]

$H_{(24h,P)}$ - максимална дневна киша одређене вероватноће појаве [mm]

Максимална дневна киша одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ се добија обрадом података са најближе кишомерне станице (издвајањем дневних максималних падавина за читав период рада станице и применом неке од теоријских функција расподеле вероватноћа). Примењена је Log Pearson Type III расподела, а приликом одређивања максималног протицаја сматра се да он има исту вероватноћу појаве као и киша која га је изазвала. Максимална дневна киша одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ одређена је на основу обраде података осматрања са К.С. Авала и Врчин (табела 3.1.), применом методе „година-станица“ (у периоду 1953-2014):

Табела 3.1. – Резултати прорачуна максималних дневних падавина

Вероватноћа појаве (%)	Повратни период (година)	Висина кише (mm)
0.1	1000	149 718
0.5	200	119 386
1	100	107 351
2	50	95 833

Интензитет меродавне кише се добија на основу релације (Јанковић, Д., 1994.):

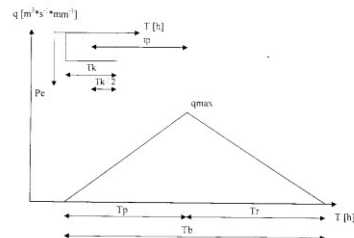
$$I_{(T,P)} = \frac{a}{1440} \left(\frac{1440 \cdot A + 1}{A \cdot T + 1} \right)^{\beta} \cdot H_{(24h,P)} \quad [\text{mm min}^{-1}] \quad (3.6)$$

$I_{(T,P)}$ - интензитет меродавне кише трајања (Т), вероватноће појаве (P)

3.1.3. Ефективне падавине P_e

Ефективна киша P_e , за било које трајање, може се добити на основу једначине:

$$P_e = \frac{(P_b - 0.2d)^2}{P_b - 0.8d} \quad [\text{mm}] \quad (3.7)$$



Слика 3.1. - Синтетички јединични троугаони хидрограм

T_p - време пораста хидрограма

$$T_r = k \cdot T_p \quad [\text{h}] \quad (3.4)$$

T_r - време опадања хидрограма

k - коефицијент облика хидрограма

3.1.2. Рачунска киша

Максимални протицаји на мањим сливним површинама ($A < 1000 \text{ km}^2$) су последица киша чије је трајање краће од 24 h. Због тога је потребно максималну дневну кишу одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ свести на меродавну кишу $H_{(T,P)}$, односно, количину падавина која доводи до појаве максималног протицаја. То се постиже коришћењем модела који је изведен за територију Србије, а употребљив је за североисточне, источне и југоисточне делове Црне Горе (Јанковић, Д., 1994.):

$$H_{(T,P)} = \frac{a \cdot T}{1440} \left(\frac{1440 \cdot A + 1}{A \cdot T + 1} \right)^{\beta} \cdot H_{(24h,P)} \quad [\text{mm}] \quad (3.5)$$

$H_{(T,P)}$ - меродавна киша трајања (Т), вероватноће појаве (P)

$a \approx 1.0$ (konstanta)

Табела 3.3. – Вредности CN за просечне и надпросечне услове влажности

Водоток	Вредност CN	
	Просечни услови влажности	Надпросечни услови влажности
Завојничка река	71	86
Глеђевачки поток	71	86

3.1.5. Меродавна велика вода $Q_{\text{max}(%)}$

Спроведеним поступком прорачуна добијен је максималан протицај на Завојничкој реци и Глеђевачком потоку, за повратне периоде од $T=1000, 200, 100$ и 50 година (вероватноћа појаве $p=0.1, 0.5, 1$ и 2%), за надпросечне услове влажности (табела 3.4.).

Табела 3.4. – Резултати прорачуна максималног протицаја за надпросечне услове влажности

Водоток	Q [m³ s⁻¹]			
	$p=0.1\%$	$p=0.5\%$	$p=1\%$	$p=2\%$
Завојничка река	189.19	135.97	115.65	96.57
Глеђевачки поток	26.36	18.65	15.72	13.00

Надпросечни услови влажности се јављају у условима високе или потпуне сатурације земљишта водом, што значи да је инфилтрационо-ретенциони капацитет сведен на минимум. Такви услови се јављају уколико у периоду пре појаве екстремне кише земљиште прими већу количину падавина, или приликом коинциденције отапања снега и појаве интензивних падавина. Трансформација троугаоног синтетичког јединичног хидрограма у реалан криволинијски хидрограм изведена је на основу SCS бездимензионалног јединичног хидрограма.

У прилогу, на крају подпоглавља, приказана је процедура прорачуна са улазним и излазним подацима, као и одговарајући хидрограми.

Слика 1. Приказ прорачуна великих вода

У Прилогу 1.3. приказано је одређивање уравниога пада тока Големе р. до профила водозахвата и машинске зграде.

2. СРЕДЊЕ ВОДЕ

Прорачун средњих вода Големе р. до профила водозахвата, извршен је у следећа 4 корака: 1) утврђивање репрезентативног периода обраде средњих вода; 2) одређивање вредности просечног протока Големе р. до профила водозахвата, методама које се примењују за сливове без податке хидролошких мерења; 3) прорачун нивоа средњих месечних протока преко одговарајућих протока Козарске р. у профили х.с. Тупаловце; 4) одређивање криве трајања дневних протока за Козарску р., а преко ње и за Голему р. у профили водозахвата МХЕ "Тупола река".

2.1. Меродавни период обраде средњих вода

За Козарску р., х.с. Тупаловце постоје подаци о протоцима воде за период од 53 године (1961. – 2013.). Ова дужина серија требало би да буде довољна да грешка оцене (ϵ_{Q_0}) просечног протока (Q_0), буде мања од неке разумно усвојене дозвољене грешке. За грешку оцене просечног протока важи следећи израз:

$$\epsilon_{Q_0} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где је n – број година расположивог периода, а C_v – коефицијент варијације серије средњих годишњих протока.

Како је за серију годишњих протока Козарске р., у профили х.с. Тупаловце, за период 1961. – 2013., $C_v = 0,384$, а $n = 53$, и ако се као дозвољена грешка оцене Q_0 усвоји дозв. $\epsilon_{Q_0} = 6\%$, добија се $\epsilon_{Q_0} = 100 \cdot C_v / \sqrt{n} = 100 \cdot 0,384 / \sqrt{53} = 5,2\%$, што је мање од дозвољене грешке, па се овај период може усвојити као репрезентативан за прорачун средњих вода у сливу Козарске р.

2.2. Прорачун просечног протока Големе р. до профила водозахвата

Просечни проток Големе р. до профила водозахвата, одређен је по методи *Langbein-a*, уз одговарајућу проверу применљивости ове методе за шири регион

Метода *Langbein-a* користи основну зависност која је дата у форми

$$Q_0/E = f(P_0/E), \quad (2.3)$$

где је Q_0 – просечно отицање са посматраног слива у см, P_0 – просечне падавине на сливу, такође у см, а E – величина које се дефинише преко израза

$$\log E = 0,027T + 0,886 \quad (2.4)$$

Хидролошка анализа Големе реке

страница 3 од 15

где је T – просечна температура ваздуха на сливу у °С. На основу вредности E и просечних падавина P_0 , одређује се однос P_0/E , а затим, из дијаграма *Langbein-a* (Прилог 2.1), одређује се однос Q_0/E . Q_0 се добија у виду слија отицања, у см. Претварање ове вредности у модула просечног отицања врши се преко израза

$$q_0 = 0,317 Q_0(\text{cm}), \quad (\text{Us} \cdot \text{km}^2) \quad (2.5)$$

У Таб. 2.1. дат је прорачун Q_0 Големе р. и Козарске р. методом *Langbein-a*.

Река/профил	F (km ²)	P ₀ (cm)	T ₀ (°C)	E (cm)	P ₀ /E	Q ₀ /E	Q ₀ (cm)	Φ ₀ (l/skm ²)	Q ₀ (m ³ /s)
Голема/водоз	23,3	94,0	6,5	11,52	8,16	3,50	40,32	12,8	0,298
Козарска/Тупал.	98,0	87,0	7,0	11,89	7,32	2,82	33,53	10,63	1,042

Провера подразумева прорачун просечног протока, применом ове методе (Q_0) и преко података мерења (Q_0), за већи број река у ширем региону, на којима постоје вишегодишња мерења, и поређење ових вредности, да би се утврдило да ли се применом методе добијају вредности веће, мање или приближно исте, као и преко података осматрања. Таква провера применљивости методе *Langbein-a* извршена је за већи број мањих река на територији централне Србије (Јанковић, Д.: *Резултати примене методе Langbein-a за сливове мањих река на територији Србије, рад у припреми*), укључујући и реку-аналог - Козарску, х.с. Тупаловце.

Таб.2.1. Преглед просечних протока одређених преко података мерења и преко методе *Langbein-a* за наведене реке

Река/мерод. станица	Q ₀ (m ³ /s)	
	Преко података	Методом <i>Langbein-a</i>
Јошаница/Бивановац	3,47	3,00
Студеница/Делићи	2,92	2,90
Студеница/Млавац	4,80	4,20
Студеница/Ушаје	7,10	6,28
Липовина/Богутовац	1,91	1,52
Брдина/Гуча	2,69	2,58
Моравица/Ивањина	6,82	6,27
Бистрица/Бистрица	1,32	1,10
Малешијева/Пристоје	1,47	1,40
Нашица/Рожица	2,12	2,08
Железница/Крупацке стјепе (ВаХ)	8,35	7,14
Висоцица/Висока Ржана	6,10	4,73
Власина/Свође	3,68	3,68
Љубатска/Љоснеград	1,71	1,75
Тополничка/Тополница	1,05	1,05
Трговица/Тимок/Тор. Каменица	3,35	3,15
Сврљ. Тимок/Проште	3,40	3,46
Козарска/Тупаловце	1,45	1,04

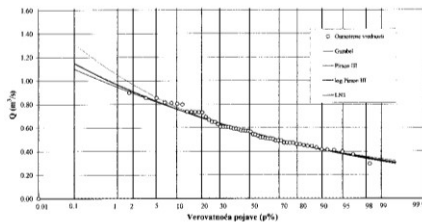
Хидролошка анализа Големе реке

страница 4 од 15

Слика 2. Приказ прорачуна средњих вода

На слици 7 дат је графички приказ расподеле средње годишњих проточија у профили ВЗ МХЕ «Савковић». Нумеричке вредности ове расподеле (Log-Pirson III) дате су такође у табели 7.

SI.7 Емпириска и теориска расподела средње годишњих проточија Река: Крива река Профил: ВЗ МХЕ "Савковић"



3.3 Дефинисање меродавних малих вода

Под појмом "минимални отицај-мале воде" подразумева се фаза рећног отицаја у којој се по правилу проточија воде формира на рачун исцрпљивања подземних водних резерви у сливу. Осим вредности проточија намеће се и потреба дефинисања трајања малих вода, па се проблем одређивања малих вода своди на дефинисање средњих проточија за унапред, фиксирано трајање маловодног периода. Обзиром да су ови проточија случајне променљиве, то се меродавне мале воде могу дефинисати релацијом

$$Q_{\text{min}, T, p\%} = f(Q_{\text{med}, T}, C_v, C_s)$$

где је T -трајање малих вода, $p\%$ -вероватноћа појаве; C_v, C_s - статистички параметри серије минималних проточија воде (варијабилност и асиметријност), $Q_{\text{med}, T}$ -средњи минимални проточија трајања T .

Иначе, у нашој хидротехничкој пракси важи појам "биолошког" минимума који означава 30-дневни минимални проточија вероватноће појаве $p=95\%$.

Основни постулати за прорачун малих вода на водоточима који поседују систематска хидролошка осматрања и мерења свде се на пробабилстичкој статистичкој анализи временских серија карактеристика малих вода.

За оцену малих вода у профили МХЕ на Кривој реци, обзиром да нису вршена никаква систематска хидролошка осматрања на овом водотоку, применjen је принцип регионалне анализе.

10

минимални 30-дневни проточија вероватноће појаве $p=95\%$, износи

$$Q_{\text{min}, 30 \text{ д}, p=95\%} = 0,094 \text{ m}^3/\text{s}$$

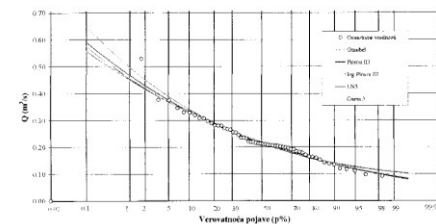
У наставку, статистичком анализом минималних средње месечних проточија воде на Кривој реци у профили ВЗ МХЕ «Савковић» – према подацима из табеле 1, одређени су основни статистички параметри који су приказани у табели 8

Табела 8. Статистичке вредности минималних средње месечних проточија на Кривој реци у профили ВЗ МХЕ «Савковић» (по Log-Pirson III)

Ознака променљиве	Статистички параметри						Tip rasp
	Sr	C _v	C _s	50%	75%	90%	
$Q_{\text{min}, \text{mes}}$	0,226	0,348	1,088	0,217	0,171	0,137	0,119 / 0,191

Графички приказ емпириске и теориске расподеле минималних средње месечних проточија воде у профили ВЗ МХЕ «Савковић» приказан је на слици 10.

SI.10 Емпириска и теориска расподела минималних средње месечних проточија Река: Крива река Профил: ВЗ МХЕ "Савковић"



У складу са препорукама *Vodoprivredne osnove Srbije* (VOS 1996), као меродавни минимални проточија ("биолошки минимум"), може се усвојити минимални средње месечни проточија 95%-обезбеђености.

Према табели 8, он за профил МХЕ «Савковић» износи:

$$Q_{\text{min}, \text{mes}} = 0,119 \text{ m}^3/\text{s}$$

12

Слика 3. Приказ прорачуна малих вода

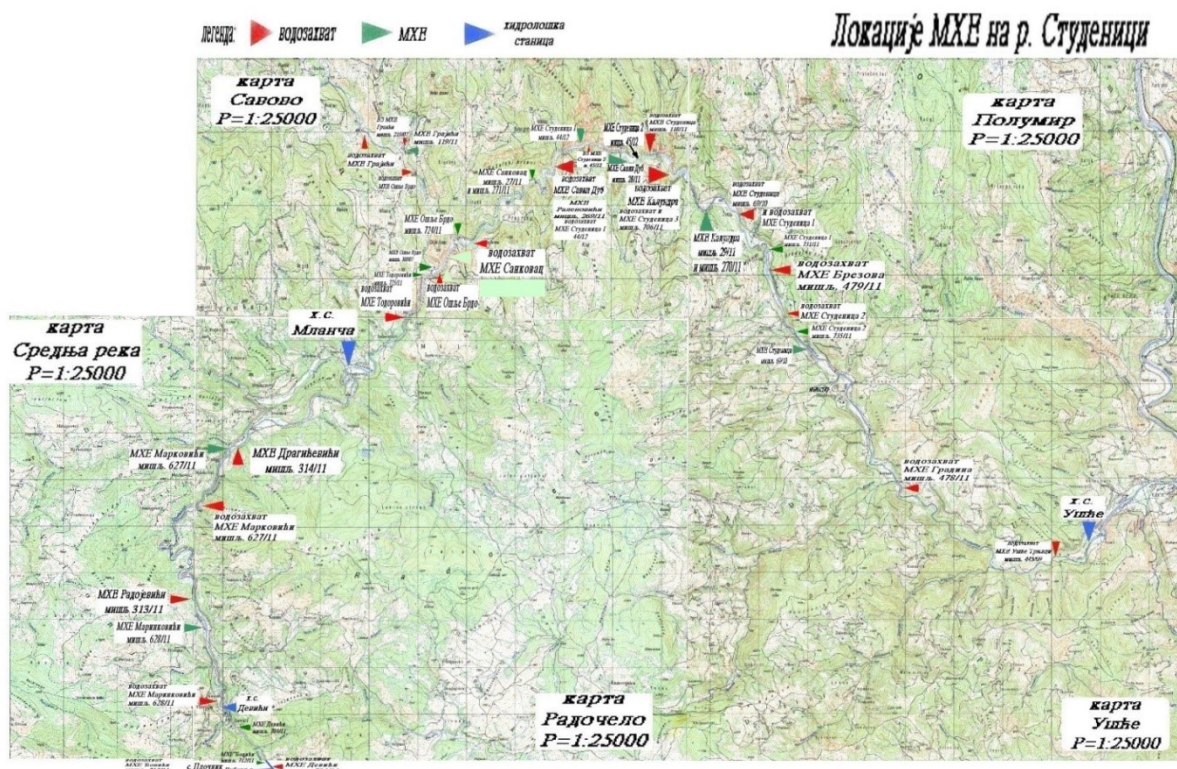
3 Законска регулатива и проблеми са предлогом решења

Из неког разлога, веома могуће и због покушаја упрошћавања законских прописа, у значајној мери су "угушена" претходна истраживања, па инвеститори некада не знају ни где се водоток налази и цела идеја се базира на добијању протока верификованих у мишљењу РХМЗ. На тај начин, држава на себе преузима обавезу обезбеђивања различитих врста подлога, па и хидролошких, али ниједна држава на свету није толико богата да може да познаје све ресурсе за сваку тачку своје територије (осим онога што се види, постоји значајан део који се не види на небу или у земљи). Математика и примењени модели у сваком случају дају неке резултате, али веома често у пракси се испостави да математички добијене вредности не постоје на терену. РХМЗ кроз своја мишљења налаже вршење мерења и осматрања у периоду од бар једне хидролошке године (са пуном свешћу да је то кратак период), пре свега због средњих и малих вода, али у пракси се ово не дешава. РХМЗ налаже мерења и осматрања водотока и у складу са Законом о енергетици који прописује максимално коришћење расположивих ресурса (дакле, или користиш цео водни потенцијал или препусти место другоме), али...

Даље, законска регулатива се уопште не бави појмом микро, мини и малих хидроелектрана, односно шта је шта. И у литератури границе ових објеката се различито наводе, негде је микро до 10 kW, негде до 100 kW, па следствено томе се померају и границе за мини и мале. Негде се наводи да су мале од 1 до 10 MW, а негде да је доња граница за мале ХЕ 2, негде 3 или 5 MW. Једина граница која је јасно постављена су објекти преко 10 MW инсталисане снаге, односно ова граница је везана за надлежност издавања грађевинске дозволе од стране министарства надлежног за грађевинарство. Због тога се инвеститори максимално труде да прикажу да је капацитет објекта до 10 MW инсталисане снаге, јер до те границе грађевинске дозволе дају локалне самоуправе. И тек ту почиње велика заврзлама! Имали смо случај да на Старој планини водоток представља границу Пирота и Књажевца и да обе локалне самоуправе предвиде локацију за МХЕ на истом месту, а при томе објекат се планира у природно заштићеном подручју, па чак и забрањен од стране Завода за заштиту природе. Зашто је даље битан овај појам микро, мини и малих хидроелектрана? Битан је због водозавхвата. Код мањих водотока обично се ради о ниским преградама са тиролским или бочним водозавхватама одакле се вода деривационим цевоводом транспортује до машинске зграде. Акумулациони простори ниских преграда су мали и водни режим се ремети у мањој мери, односно за ону количину која се користи, а сав вишак воде прелива преко преграде и одлази низводно. Међутим, код већих водотока не исплати се правити деривацију великог пречника, па се ту користе прибранска постројења. У закону о планирању и изградњи стоји да за високе бране грађевинску дозволу даје министарство, али није постављена граница шта су то високе бране! Стручна литература познаје овај појам и везан је како за висину бране (брuto, укупну са темељима), али и за запремину и дужину акумулације, које показују колики је поремећај водног режима на тој деоници реке, али нема дефинисане поделе. Према раду г-дина Љубомира Вајде високе бране су са $H_{br} \geq 15m$ и за такве објекте би требало да буде надлежно министарство, али утисак је да о томе нико не води рачуна и да то по правилу завршава у локалној самоуправи. То не би био проблем кад не би постојао утицај и преко граница локалних самоуправа, али то није тако са водним режимом. Имали смо случај каскадног повезивања више објеката на Ибру, који су сви били

"спаковани" у објекте малих хидроелектрана са високим бранама и значајним акумулацијама (више милиона m^3).

Следећи проблем који се јавља је уништавање водотока планирањем безброј МХЕ на појединим водотоцима. Идеја коришћења воде као обновљивог извора енергије је свакако добра и корисна, али хаотичан приступ не доприноси томе. Теоријски, не постоји ништа што човек замисли, а да не може да се изгради и не постоји тачка на водотоку на коме није могуће искористити воду за прављење струје. Али уз два питања: зашто и пошто? Па тако можете предвидети прављење струје на било ком профилу водотока и бесконачно много малих хидроелектрана на било ком водотоку. Само, колика је цена такве користи? У пракси се јавио проблем реке Студенице. РХМЗ је за овај водоток издао око 30 мишљења за око 25 објеката МХЕ (за неке МХЕ се појавило више подносилаца) на делу од улива Брусничке реке па све до ушћа Студенице у Ибар, као и на узводним саставницама Студенице, што ће рећи по целом току реке! Сви објекти су, наводно, типа МХЕ и отприлике до места Ушће су ниске преграде са деривацијама. Ако узмемо просек деривације око 2 km, пошто је од интереса да се добије што већа висинска разлика, уместо Студенице потенцијално добијамо цевовод дужине 50 km! На слици 4 су приказане локације замишљених МХЕ на току Студенице и може се видети колико је то густо паковано.



Слика 4. Локације замишљених МХЕ на Студеници

Пре више деценија је, из различитих разлога, одбачена идеја изградње акумулације на Студеници (овде не говоримо о том пројекту, али то је био резултат дискусија), да бисмо сада дошли у ситуацију да зарад неизвесних отприлике 30 MW

изгубимо целу реку. Са сличним идејама, кроз достављене захтеве, РХМЗС се сусрео на доста водотока у Србији (Ибар, Лим, Тимок, Нишава, Јужна Морава, Западна Морава) .

Треба истаћи посебан проблем који постоји код малих вода. Немамо у законској регулативи, а ни у стручној литератури дефинисано шта су меродавне мале воде. Користећи Водопривредну основу Србије из 2002. године, уведен је појам минималног месечног протока обезбеђености 95% и он се користи и у мишљењима. Вероватно је већини јасно, али није згорег поновити, сматра се да мале воде представљају количину воде која се јавља у неком дужем периоду (месец дана), односно у хидролошким анализама се не користе краткотрајни маловодни периоди (тренутни или дневни). Тако за водоток на коме се врше мерења и осматрања кажемо да је меродавни проток малих вода 0 (нула) тек када је забележено суво корито у непрекидном трајању од бар 15 дана. У стручној литератури (између осталог лит. [3]) мале воде се веома често везују за средње воде у различитим емпиријским односима (од 0.1 до 0.25 x Q_{sr}). При изради хидролошких студија овај проблем се превазилази коришћењем адекватних аналог-сливова, који дају веће мале воде. На основу анализа рађених у РХМЗ-у према подацима са хидролошких станица, овај однос се креће од 0.07 до 0.15 (ретко преко тога) x Q_{sr} , па је за практичну примену као доња граница малих вода усвојен однос 0.1 x Q_{sr} . Потпуно је јасно из угла анализе хидрограма да се са порастом слива мења однос базног и директног отицаја, односно да је у горњим деловима слива удео базног отицаја већи, па је тиме и однос малих и средњих вода већи, али у ситуацији када није прописано шта су меродавне мале воде, нема могућности да се инвеститору намеће већа обавеза.

4 Проблеми проистекли из тумачења закона и утицај на хидрологију

Као што је вероватно велика већина нас имала искуства да осети, постоји проблем чувеног тумачења закона.

Како се то огледа везано за коришћење вода за обновљиве изворе енергије? Поступак изградње објекта хидроелектране у овом тренутку у Србији можете, потпуно равноправно, кренути из 3 правца: од енергетике (која је и најважнија, јер се електране и праве да би се роба=струја продавала), од грађевинских услова и дозвола (министарство или локална самоуправа) и од водопривреде. Дакле, 3 различита човека могу, сваки за себе, без икаквих проблема, да се интересују и ангажују за исту локацију, а да при томе немају појма о преосталој двојници. То не би било ништа спорно да у том процесу нема улагања новца и да из тога не проистичу одређена права и да не постоји могућност сукоба интереса. Веома често се сусрећемо са ситуацијом да подносиоци захтева немају представу да ли је локација за коју су поднели захтев уопште одобрена да се ту гради, да ли ће за њу добити енергетску сагласност или грађевинску дозволу. Локалне самоуправе, са друге стране, од подносилаца траже да доставе мишљење РХМЗ-а, али не и водне услове Републичке дирекције за воде. Зашто су, осим што су прописани законом, битни водни услови? Водним условима се даје начин решавања утицаја на водни режим у складу са концепцијом објекта предложеном од стране корисника. У поступку издавања водних услова се врши, између осталог, провера имовинско-правних односа. Дакле, са једне стране локална самоуправа крши законски прописан поступак који каже да се мишљења издају искључиво за водне

услове (дакле, не по слободно исказаној вољи било кога), а са друге стране јавља се проблем што локална самоуправа не зна да постоји могућност заинтересованости још некога на истој локацији.

Везано за енергетску сагласност, на састанку одржаном у Влади Србије поводом јавног позива министарства енергетике за локације МХЕ, од стране представника ЕПС-а је јасно речено да прикључивање "уситњених" енергетских објеката представља како просторни, тако и временски проблем са акцентом на нестабилност производње таквих објеката.

Ту долазимо и до хидролошког проблема. Изградња МХЕ у основи, не би требала да представља проблем са становишта поремећаја водног режима, Вода се, што је веома важно, не троши, она се користи и након одређеног пређеног пута, враћа у водоток, са побољшаним карактеристикама (аерисана). Велике, средње и овде посебно напомињем мале воде, на тај начин су дате за један релативно кратак део реке, бар би тако требало. Међутим, када нагомилате објекте један до другог, онда и тако прелиминарно дефинисане мале воде немају никакав значај за водоток, просто река и околина немају могућност да то искористе и да се регенеришу.

Веома често имамо проблем да инвеститори не схватају да нагомилавањем објеката утичу једни другима на рад, колико год биле мале запремине акумулисане воде на преградама водозахвата.

Истовремено је од стране представника ЈВП "Србијаводе" на више скупова и на правим местима-министарствима, указано, потпуно добронамерно, на један јако велики проблем. Издавањем грађевинске дозволе одобрава се изградња на неводном, али и на водном земљишту. Са једном веома битном разликом-питање имовине и власника на водном земљишту није решено! Слободан (нерегулисан) приступ заузимања водног земљишта не може да буде начин решавања овог проблема. Коришћење воде, као рудног богатства, није решено! Стално се прича о концесији, закон постоји и активан је, али се не примењује.

5 Очекивања и препоруке

У претходном тексту изнето је више проблема са којима се хидрологија суочава у покушају да се струка усклади са законском регулативом. Свакако, за очекивати је да се понуде и решења која су проистекла из вишегодишње праксе. Очекивања од стручне јавности своде се на јачање улоге хидрологије која се користи кроз законску регулативу. Пре свега, неопходно је утврдити шта је стратегија у области вода за Републику Србију и у оквиру тога, шта су приоритети у овој области. У тренутној ситуацији преовлађују ситни интереси, који се јако лоше одражавају на струку, јер свако вуче на своју страну. На жалост, крајњи резултат може бити погубан за хидрологију, уколико се сада не утврде границе у којима се креће област вода. Пример око изградње МХЕ показује да уопште није јасно чије су и докле иду надлежности, што хидрологију, као део једне целине која треба да има своју сврху, доводи не у подређен, него у потпуно небитан положај. Решење је да мора стручна јавност да се коначно умеша, да се јасно утврди стратегија у области вода, да се одреде приоритети, боље је и сада одустати од неких активности да не бисмо касније запали у нерешив хаос. Оно што се очекује и преоручује може се поделити на два дела: административни и стручни.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Административни поступци свакако не зависе много од струке, али их треба навести. Неопходно је да држава, односно државни органи, на основу досадашњег искуства јасно дефинишу процедуру прибављања дозвола. Даље, неопходно је да држава заузме јасан став око тога шта и где може да се гради. У том смислу, резултати рада међуресорних тела (као што је била комисија за јавне позиве за изградњу МХЕ) морају се уважити и користити као основ за утврђивање могућности изградње, односно не сме се дозволити да и поред утврђених локација, општине и даље код инвеститора подстичу личну иницијативу (што је био случај са наведеном комисијом).

Такође, постоји међупростор који је везан и за струку и за администрацију. Веома важна је израда новог катастра МХЕ, као техничке основе са јасно наведеним подручјима где је могуће коришћење водног потенцијала и који мора бити донет у јасно утврђеној административној процедури. Као веома обиман подухват, за израду катастра МХЕ се мора предвидети адекватно финансирање у циљу добијања добрих и употребљивих резултата. Даље, неопходно је да водопривреда, као део државног апарата, добије јасна овлашћења да на основу стручне анализе и сагледавања чињеница има право да штити водотоке у складу са приоритетима (да, по потреби, забрани градњу у складу са стручном проценом).

Са чисто стручне стране, потребно је решити питање метода које се користе. Било би непрофесионално везати решење проблема искључиво за по једну методу за велике, средње и мале воде, нарочито када се има у виду да се код нас јако тешко мењају ствари, а струка напредује. Али у сваком случају, за очекивати је и потребно је да стручна јавност одабере и усвоји које су то методе које се могу користити. На пример за почетак, потребно је усвојити методу која ће бити меродавна за прорачун великих вода за неизучене сливове у Србији.

Литература

1. Закон о водама ("Службени гласник РС" бр. 30/10)
2. Водопривредна основа Србије (2002)
3. Прохаска С., *Хидрологија I део* (2003)
4. Ђорђевић Б., Дашић Т., *Гарантовани протоци низводно од брана као мера заштите биоценоза* (Други конгрес ЈДВБ, 2003)
5. Вајда Љ., *Мале, средње и високе бране Категоризација, особености и пројектне велике воде* (Грађевински календар, 1998)
6. Стручна документација РХМЗ

Hidrološko modeliranje - dostupnost i pouzdanost podataka u realnom vremenu

Marija Ivković¹

Julijana Nađ²

ABSTRAKT: U prethodne tri godine u okviru FP7 DRIHM projekta razvijan je distribuirani HBV model vremenskog koraka od jednog sata prema specifičnim zahtevima projekta kao i za operativnu primenu u najavi poplavnih talasa. Nakon formiranja neophodne strukture modela i interfejsa, model pilot sliva reke Kolubara je kalibrisan u cilju najave ekstremnih hidroloških pojava. Problemi u tom procesu ogledali su se u dostupnosti malog broja padavinskih i temperaturnih podataka u realnom vremenu i kratki istorijski nizovi. Neadekvatne količine padavina i njihova raspodela uslovile su dublju analizu dostupnosti drugih izvora količina i raspodele padavina na slivu. Razmatrana je mogućnost korišćenja PAC produkata radara na Fruškoj Gori i njihova pouzdanost u ekstremnim uslovima. Kalibracija modela na jednom izvanrednom hidrološkom događaju kao što su majske poplave 2014. godine u slivu reke Kolubare bila je izazov jer su bila prisutna velika izlivanja vode iz korita reka, kao i zadržavanje određene zapremine vode u akumulaciji Stubo-Rovni i kopovima RB Kolubara. Takođe, velike vode su odnele dva limnigrafa (na hidrološkim stanicama Valjevo i Draževac) pa su podaci o vodostajima bili nepouzdan. Vrednosti parametara modela kalibrisani su poređenjem zapremina i maksimalnih vrednosti proticaja talasa na deonicama gde prirodni režim toka nije bio znatno poremećen.

Ključne reči: wflow_hbv model, radar, kalibracija, poplave, maj 2014

Hydrological modelling - availability and reliability of the data in real time

ABSTRACT: Within FP7 DRIHM project, a distributed HBV model, with time step of one hour, was developed according to the specific requirements of the project, parallel with a version to be used operationally for early flash flood warning. Once the necessary model structure and interface had been put in place, the model of the pilot river basin Kolubara was calibrated for issuing early warnings of the extreme hydrological phenomena. Main problems faced in this process were concerned with availability of sufficient real-time and historical precipitation and temperature data. Inadequate number of stations with precipitation data and their spatial distribution motivated a deeper analysis of other available sources of precipitation information. Possibility of using PAC products from the radar located at the Fruška Gora hill and their reliability under extreme weather conditions was examined. Calibration of the HBV model by using available data of the extraordinary hydrological flood event that occurred in May 2014 represented a great challenge. Huge volume of water spilled into the river plains causing water accumulation in the Stubo-Rovni and unexpected inundation of the Kolubara coal mines. In addition, flood wave had broken and flashed away two water level recorders (at the hydrological stations Valjevo and Draževac) and water level data become unreliable during the most important period. The model parameters were calibrated by comparing volume and maximum discharge of the flood hydrograph at the river reaches where the natural flow regime was not significantly disturbed.

Key words: wflow_hbv model, radar, calibration, floods, May 2014

¹ Marija Ivković, hidrolog RHMZ, marija.ivkovic@hidmet.gov.rs

² Julijana Nađ, meteorolog RHMZ, julijana.nadj@hidmet.gov.rs

1 Uvod

U operativnoj hidrološkoj praksi u Republičkom Hidrometeorološkom Zavodu koristi se semidistribuirani HBV model, vremenskog koraka od jednog dana, kalibrisan za više rečnih slivova u Srbiji. Modeli zbog svojih karakteristika ne mogu da daju dovoljno jasne i precizne informacije o trenutku nailaska poplavnog talasa kao ni o njegovoj zapremini. Za simulaciju naglih promena proticaja na slivovima bujičnog karaktera neophodno je koristiti modele sa što finijim vremenskim korakom kako bi te nagle promene model mogao adekvatno da isprati. Kompleksnost topografije slivova bujičnog karaktera, takođe zahteva primenu i prostorno distribuiranog hidrološkog modela.

Uvođenjem u operativnu praksu wflow_hbv distribuiranog hidrološkog modela vremenskog koraka od jednog sata značajno će se unaprediti kvalitet informacije o nailasku poplavnih talasa. Tačnost hidrološkog modela u najvećoj meri zavisi od kvaliteta ulaznih podataka tj. raspodele količina padavina i temperatura vazduha osmotrenih na slivu, pa je iz tog razloga urađena analiza dostupnosti i kvaliteta podataka o padavinama u realnom vremenu na pilot slivu reke Kolubara na slučaju ekstremne hidrološke situacije iz maja 2014. godine.

2 Distribuirani wflow_hbv model

Model wflow_hbv [9] je prostorno distribuirani hidrološki model koji simulira proces transformacije padavina u oticaj, i koji je modifikacija HBV-96 modela razvijenog u Švedskom hidrometeorološkom institutu (SMHI) [1]. Model koristi PCRaster [5] sistem za dinamičko modeliranje distribuiranih sistema. Za razliku od originalne verzije modela wflow_hbv kao rutinu za transformaciju talasa koristi metod kinematskog talasa. Transformaciju padavina u oticaj simuliraju tri glavne rutine koje manipulišu padavinama, kontrolišu vlažnost zemljišta i formiraju zapreminu talasa.

Padavine na slivu se u zavisnosti od temperature vazduha dele na kišu ili sneg i kao takve ulaze u rutinu za akumulaciju i topljenje snega ili direktno u rutinu zemljišne vlage. Pojam 'vlažnost tla' u modelu podrazumeva vlagu u tlu od površine do kraja zone korenog sistema. Voda koja infiltrira u ovu rutinu popunjava skladište vlage ukoliko njen maksimalni kapacitet nije premašen ili nastavlja svoje kretanje naniže. Dva linearna rezervoara u modelu simuliraju brzi potpovršinski i bazni oticaj. Proces kapilarnog penjanja i intercepcije takođe su modelirani.

Model reke Kolubara formiran je za slivnu površinu do hs Draževac na mreži 250x250m. Vremenska rezolucija modela je jedan sat. Statičke mape modela pripremljene su korišćenjem SRTM DEM-a [3]. Podaci o vrsti vegetacije na analiziranim slivovima preuzeti su iz Corine Land Cover (2000) [2].

3 Dostupni podaci o raspodeli količina padavinama u realnom vremenu

U operativnom radu ali i za proces kalibracije i verifikacije modela [6], kao ulazne podatke wflow_hbv modelu neophodno je obezbediti prostorno raspodeljene, časovno akumulirane padavine i temperature vazduha u realnom vremenu. Takve informacije je moguće dobiti interpolacijom merenja na automatskim kišomernim stanicama (AWS) i iz PAC produkta

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Mali broj AWS uslovio je primenu IDW metode za interpolaciju padavina. U literaturi se za interpolaciju padavina predlažu i druge metode ali one u našim uslovima nisu primenljive jer nemamo dovoljan broj AWS koje se postavljaju kao minimalan broj stanica da bi se metoda promenila. Nakon interpolacije na mrežu hidrološkog modela, poređenje sa padavinama izmerenim na padavinskim stanicama pokazalo je značajna negativna odstupanja od osmotrenih suma na delovima sliva koji nije pokriven sa AWS u proseku za 18%, ali i na stanicama Koceljeva, Donje Crniljevo na podslivu reke Tamnava i Liplje i Štavica na podslivu reke Ljig gde je AWS zabeležio više kiše za prosečno 38% nego na PS (Slika 1.). Nedostatak AWS stanica na slivu uslovio je ovako nepovoljnu raspodelu padavina zato je bilo neophodno analizirati druge izvore padavinskih podataka.

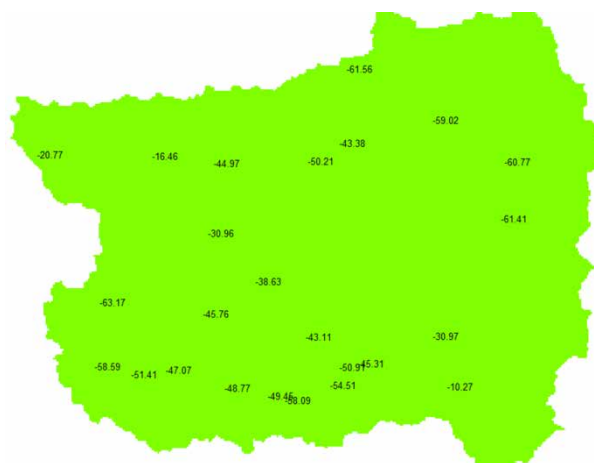
4.2 Radar

Tokom kišne epizode radio je radar na Fruškoj Gori pa su podaci o časovnim akumulacijama dostupni za skoro celu kišnu epizodu. Radar je vazdušnom linijom od najudaljenije tačke sliva na rastojanju od oko 120 km, pa se može tvrditi da radar bez veće greške usled Zemljine zakrivljenosti i slabljenja radarskog snopa biti u mogućnosti da da dobru procenu količine kiše koja je pala na sliv. Relacija koja se koristi za određivanje količine kiše (QPE) na ovom radaru je:

$$z = 200R^{1.6} \quad (1)$$

gde je Z faktor radarske reflektivnosti a R padavine u mmh^{-1} . Ova relacija se zasniva na Marshall-Palmerovoj raspodeli veličine kapi [7], i u literaturi se preporučuje za primenu u proceni količina padavina iz slojaste oblačnosti ukoliko za određenu teritoriju i vrstu oblačnosti nisu određene posebne jednačine. Ovu Z-R relaciju koristi najveći broj meteoroloških službi.

Analiza raspodele padavina procenjenih radarom i poređenje sa podacima na PS pokazalo je značajno podcenjivanje količine padavina u rasponu od 10 do 61%, prosečno za 46% (Slika 2.).



Slika 2. Odstupanja (%) QPE (13. i 14. maj, $Z=200R^{1.6}$) od vrednosti sa PS
Figure 2. Deviation of the QPE (13. and 14. Maj, $Z=200R^{1.6}$) from rain gauge measurements

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

U cilju daljeg istraživanja mogućih uzroka ovako velikih odstupanja analizirani su različiti koeficijenti u Z-R relaciji koji bi mogli bolje opisati vezu faktora reflektivnosti i količine padavina. Takođe je razmotren i potencijalni uticaj atenuacije radarskog signala koja bi se mogla javiti usled prolaska radarskog snopa kroz oblačnost.

4.3 Atenuacija

Kada se na putu radarskog snopa nađe široko rasprostranjena oblačnost javlja se slabljenje radarskog signala usled rasipanja i absorpcije elektromagnetnih talasa na tečnim i čvrstim česticama u atmosferi. Za talasnu dužinu radara Fruška Gora od 10 cm atenuacija je procenjena na oko 0.01 km^{-1} . Ukoliko radarski snop prolazi kroz više zona padavina poređanih u pravcu prostiranja snopa atenuacija može biti i višestruko veća.

Kako bi se ispitala mogućnost da je ova vrsta atenuacije razlog podcenjenih vrednosti QPE, vrednosti reflektivnosti su uvećane za +1, +2 i +3 dBZ i praćene su promene odstupanja u odnosu na vrednosti izmerene na automatskim stanicama. Na osnovu jednakosti (1) izračunate su količine padavina koje odgovaraju novim vrednostima reflektivnosti. Novodobijene vrednosti su verifikovane poređenjem sa vrednostima izmerenim na PS (Tabela1.).

Tabela 1. Odstupanja dvodnevni sume padavina dobijenih povećanjem radarske reflektivnosti za +1,+2 i +3dBZ u odnosu na merenja na PS
Table 1. Deviation of the two day precipitation sums from PS measurements

Stanica:	+1 dBZ (mm)	Odstup. (%)	+2 dBZ (mm)	Odstup. (%)	+3 dBZ (mm)	Odstup. (%)	PS (mm)
Majinović	94.69	0.55	109.34	0.48	126.27	0.40	209.2
Sopot	72.07	0.66	83.23	0.60	96.11	0.54	139.7
Stragari	105.06	0.50	121.32	0.42	140.10	0.33	162.2
V.Ivanča	55.52	0.73	64.12	0.69	74.04	0.65	103.9
Valjevo	107.05	0.49	123.62	0.41	142.76	0.32	131.6
Prosečno:		0.58		0.52		0.45	

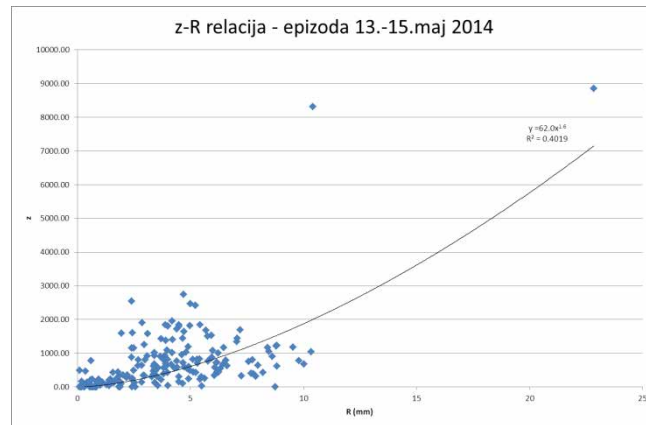
Smanjenje odstupanja ukazuje da bi ova vrsta smetnje mogla biti deo uzroka podcenjivanja količine padavina radarom, ali poređenje sa merenjima na PS i dalje ne daje dovoljno dobra slaganja.

4.4 Korekcija Z-R relacije

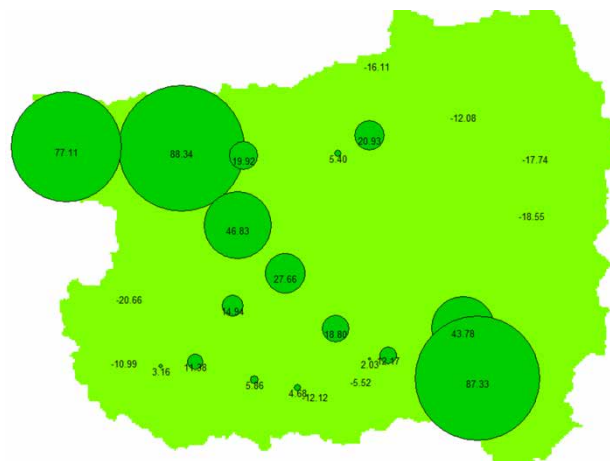
Greške koje su posledica pogrešnog izbora koeficijenata u Z-Rrelaciji mogu biti značajne pri proceni količine padavina, posebno u ekstremnim uslovima kada postoji i najveća opasnost od bujičnih poplava. Vrednosti koeficijenata variraju od $Z=31R^{1.71}$ kod orografskih do $Z=486R^{1.37}$ kod pljuskovitih padavina. U toku analiziranog perioda kiša je padala umerenim, povremeno jakim intenzitetom. Ova činjenica daje osnov za tvrđenje da se koeficijenti Z-R relacije trebaju tražiti između vrednosti $Z=31R^{1.71}$ i $Z=200R^{1.6}$ tj relaciju koja za niže vrednosti reflektivnost daje veće količine padavina [8].

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Primenom metode korelacije na uzorku od 190 članova dobijena je nova relacija $Z=62.0R^{1.6}$ sa koeficijentom korelacije od $r=0,5865$ (Slika 3.). U slučaju da između veličina Z i R korelacija ne postoji vrednost koeficijenta r bi bila $r_0=0,032$. Smatra se da je koeficijent korelacije zadovoljavajući ukoliko je šestostruko veći od vrednosti r_0 , što je ovde ispunjeno.



Slika 3. Relacija Z-R (period od 13. do 15. maja 2014. godine)
Figure 3. Z-R relation (from 13. to 15. May 2014)



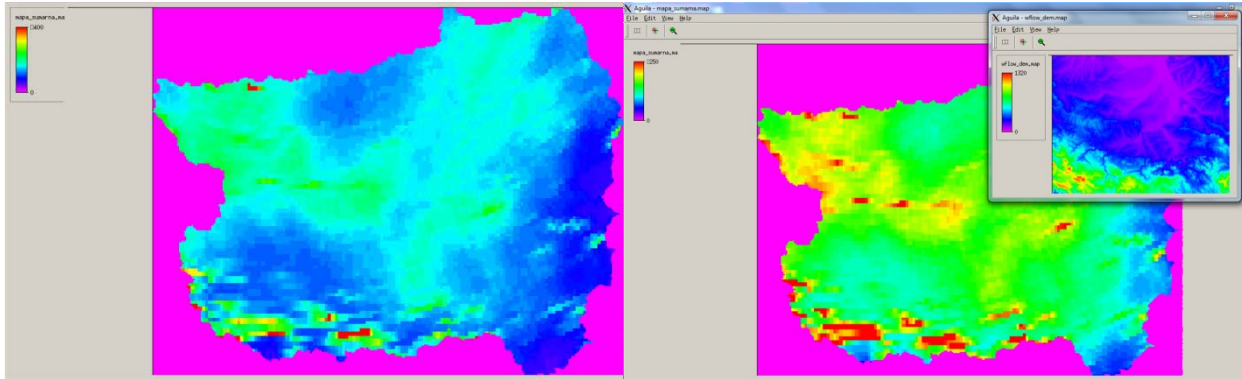
Slika 4. Odstupanja (%) QPE (13. i 14. Maj, $Z=62.0R^{1.6}$) od vrednosti sa PS
Figure 4. Deviation of the QPE ($Z=62.0R^{1.6}$) from rain gauge measurements

Koristeći novu Z-R relaciju dobijaju se količine padavina koje imaju bolja slaganja sa izmerenim vrednostima na PS od padavina dobijenih primenom (1) jednačine (Slika 4.). Značajno precenjivanje količina uočljivo je na mestu stanica Koceljeva, Donje Crniljevo, RC Valjevo, Lukavac, Liplje i Štavica. Upoređivanjem slike dvodnevnih akumuliranih padavina sa digitalnom mapom terena teritorije na kojoj se sliv reke Kolubara nalazi (Slika 5.) uočava se da su veće količine padavina javljaju na lokacijama koje su više od 300 mm. Ovo ukazuje na mogućnost pojave stalnih odraza.

Ovakva odstupanja bi mogla biti takođe posledica i lošeg merenja na padavinskim stanicama jer i ovako imaju vrednosti dosta niže od izmerenih vrednosti na okolnim stanicama.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

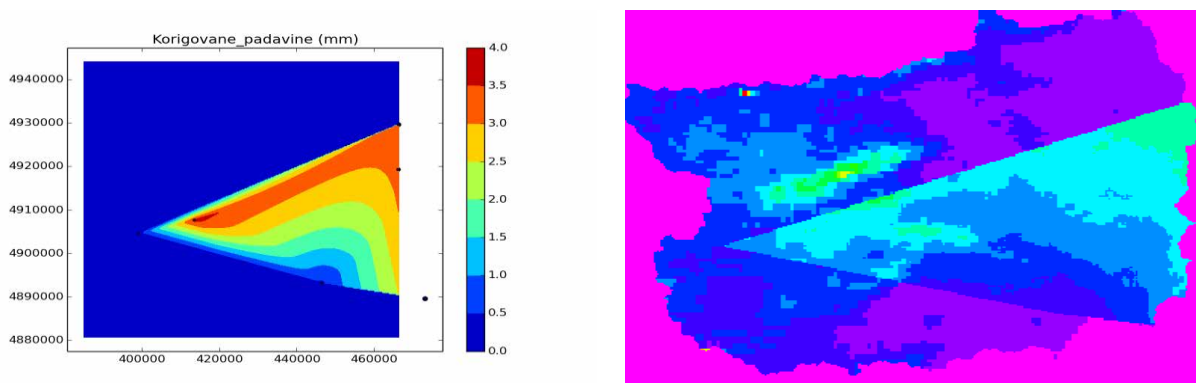
Period od dva dana sigurno nije dovoljan za određivanje Z-R relacije za stratusnu oblačnost, već je za taj postupak neophodan dug niz podataka razvrstan prema vrsti oblačnosti i obliku reljefa. Ovde je postupak primenjen samo radi uočavanja razlike u proceni količina padavina po dve Z-R relacije.



Slika 5. Dvodnevne akumulirane QPE, $Z=62.0R^{1.6}$
Figure 5. Two day QPE totals calculated using $Z=62.0R^{1.6}$

4.5 Korekcija radara sa registrovanim padavinama na AWS

Metod korekcije raspodele količina padavina dobijenih radarom ($Z=200R^{1.6}$) sa padavinama registrovanim na AWS je uobičajena metoda kojom se popravljaju informacije o količini i raspodeli kiše pale na sliv. Mreža tačaka sa informacijama o padavinama sa radara razlikuje se od mreže tačaka hidrološkog modela pa je neophodno interpolirati mrežu od 600x600m (Fruška Gora) na mrežu hrv modela koja je 250x250m. Razlike između QPE na pozicijama automatskih stanica i vrednosti padavina na AWS interpolisane su na mrežu hidrološkog modela, a zatim su dodate količinama padavina sa radara [10].



Slika 5. Korekcija QPE podacima sa AWS
Figure 5. QPE corrected with precipitation data from AWS

Usled malog broja AWS korekciju je moguće izvršiti delimično na centralnom i istočnom delu sliva. Nakon korekcije značajno su smanjene razlike između merenja na PS i

padavina sa korigovane mape padavina, u tačkama mreže PS stanicama zahvaćenih ovom korekcijom (Tabela 2.). Kako bi se uspešno primenila ova metoda neophodno je imati razvijenu mrežu AWS što se danas može reći za mali broj slivova.

Tabela 2. Promena odstupanja padavina nakon korekcije QPE sa AWS
Table2. Changes in precipitation after QPE correction with data from AWS

	AWS (%)	Radar (%)	Radar + AWS (%)
Valjevo	-11.11	-45.76	0.05
Lukovac	-20.69	-38.62	-12.98
Vrujci	-15.45	-50.91	-3.17
Mionica	-9.22	-43.11	-8.65
Ljig	-1.66	-45.31	-15.90
Liplje	37.79	-30.96	17.36
Štavica	55.48	-10.27	-13.56
Sibnica	-27.42	-60.77	22.33

5 Hidrološka analiza

Sve raspodele količina padavina dobijene u toku ove analize, korišćene su kao ulazne veličine za wflow_hbv hidrološki model. Analizirana su slaganja zapremina i oblik hidrograma jer su ti pokazatelji važni za kvalitetnu kalibraciju modela kao i za stvaranje dobrog slaganja osmotrenog i simuliranog proticaja na rečnom profilu pre izdavanja prognoze proticaja.

Hidrogrami oticaja na odabranim profilima dobijeni korišćenjem informacija o padavinama sa automatskih stanica imaju dosta dobra slaganja sa osmotrenim hidrogramima oticaja. Na većem broju profila uzlazna grana simuliranih proticaja dobro prati podizanje talasa koje je registrovao limnigraf. Veća odstupanja javljaju se na profilima Belo Polje, Bogovađa i Zeoke, koji su posledica većih razlika u merenja padavina na AWS i PS.

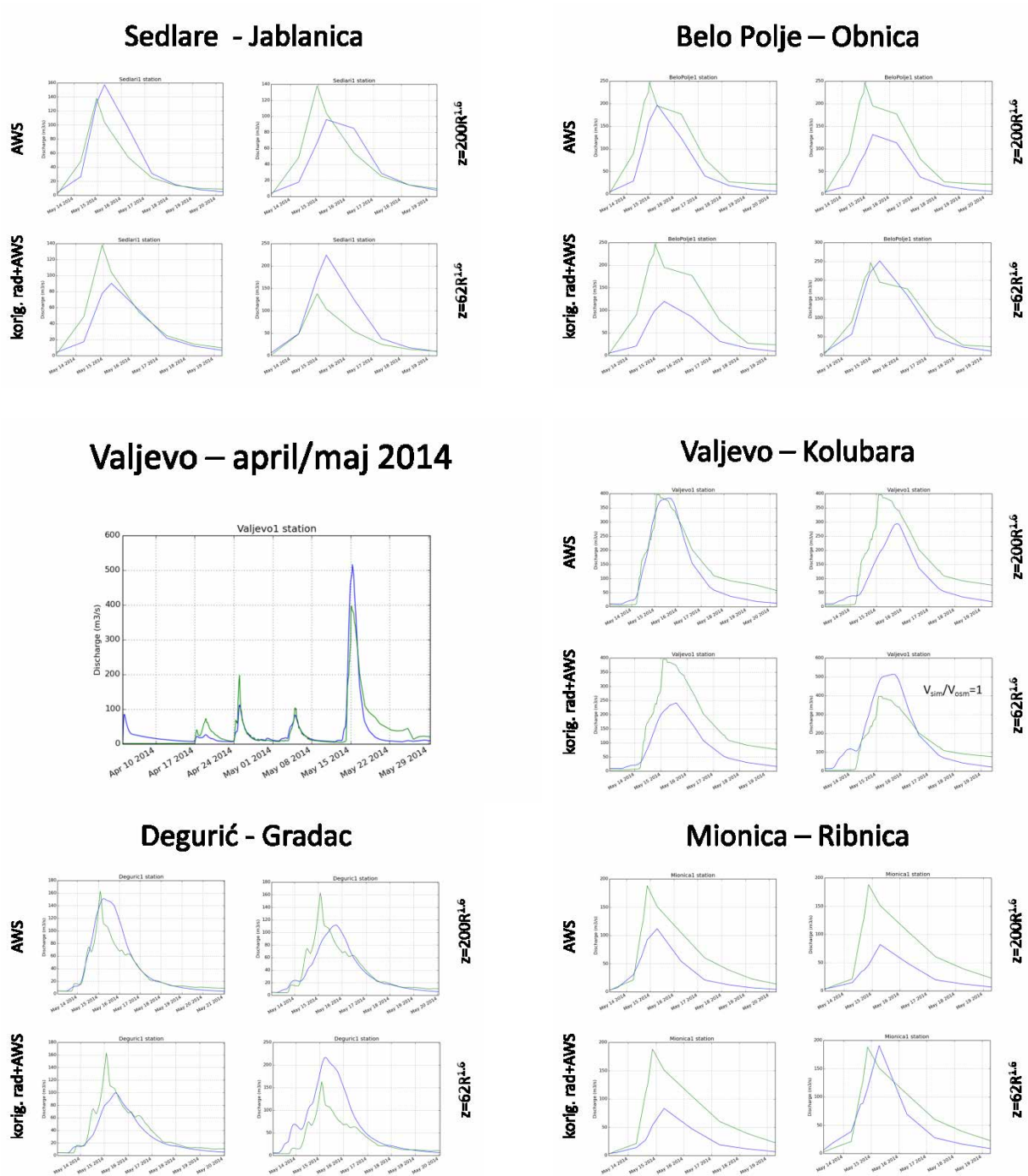
Značajno manje količine padavina određene radarom uslovile su niže vrednosti zapremina talasa na svim profilima. U toku analize podataka sa PS uočeno je značajno odstupanje merenja na padavinskim stanicama Donje Crniljevo i Koceljeva, na slivu reke Tamnava hs Koceljeva, i na stanicama Liplje i Štavica, sliv reke Ljig hs Bogovađa, od merenja na okolnim PS i AWS. Nasuprot tome, uočeno je dobro slaganje sa radarskim padavinama. Dobro slaganje uzlazne grane hidrograma simuliranog i osmotrenog hidrograma na profilima Bogovađa i Koceljeva govori u prilog tome da je radar dobro odredio vremensku i prostornu raspodelu kiše i da odstupanja nisu posledica pogrešnog merenja, kako je u prvi mah izgledalo.

Korekcije QPE sa podacima sa AWS u ovom slučaju nije doneo značajne korekcije u zapreminama i obliku hidrograma zbog malog broja AWS na slivu kao i zbog razlika u merenju na AWS i PS na bliskim lokacijama.

Sa novom Z-R relacijom na južnim i zapadnim delovima sliva postali su uočljivi stalni odrazi koji su podigli vrednosti padavina i uslovili visoke vrednosti proticaja na tim delovima

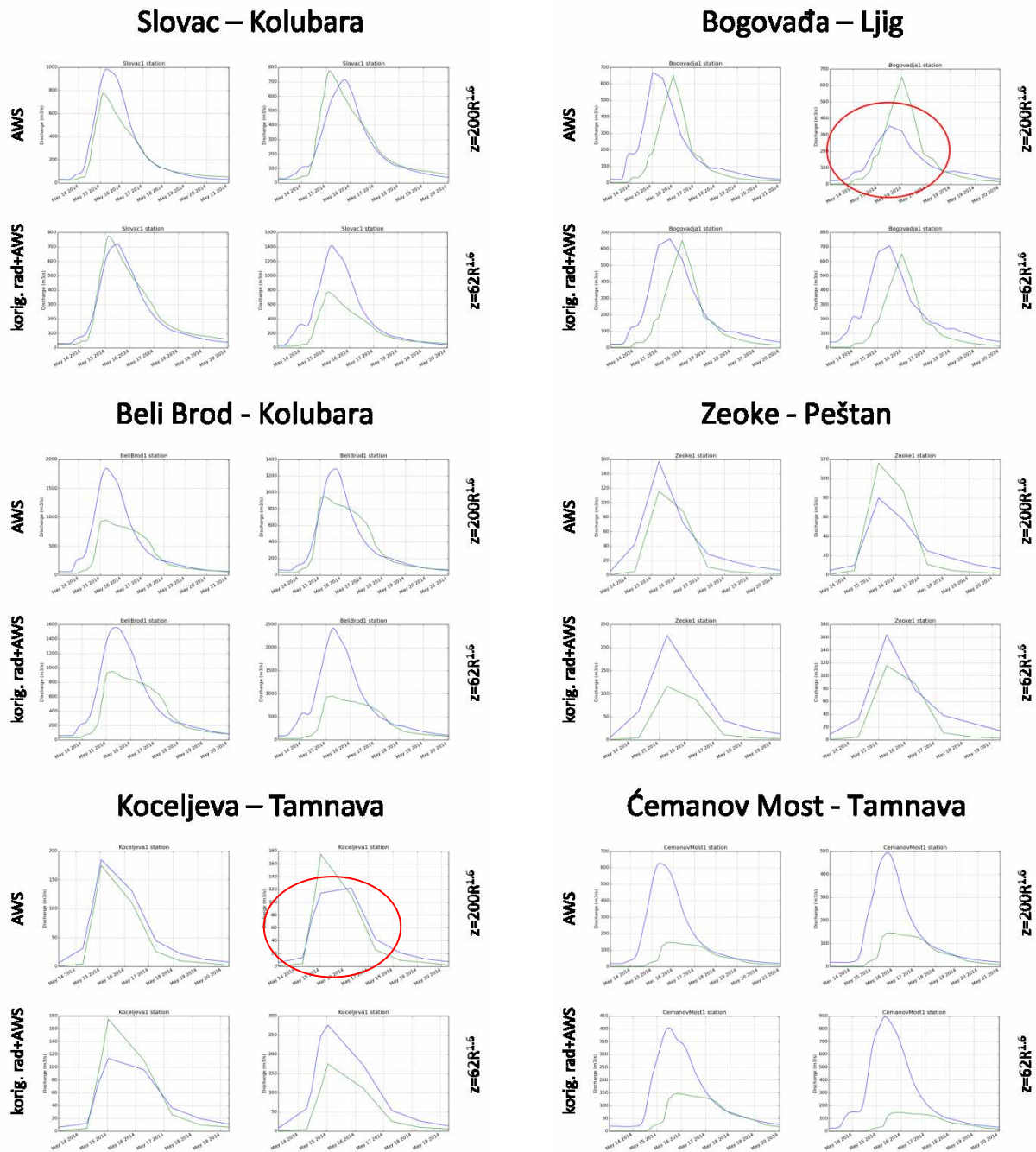
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

sliva reke Kolubara. Ovom korekcijom dobijena su prihvatljivi rezultati koji se ogledaju u dobrim slaganjima zapremina i obliku hidrograma (slika 6).

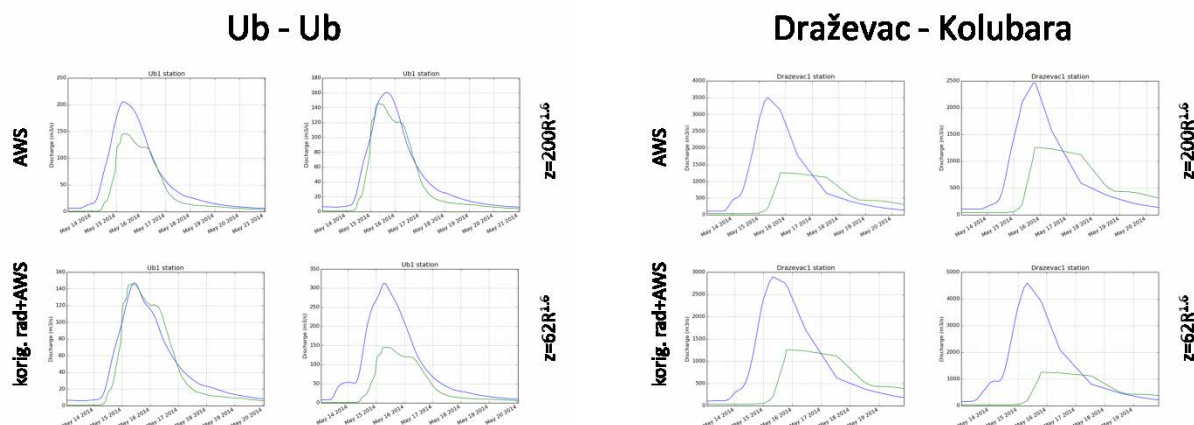


Slika 6. Simulirani i osmotreni hidrogrami.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 6. Simulirani i osmotreni hidrogrami (nastavak).



Slika 6. Simulirani i osmotreni hidrogrami (nastavak).

6 Zaključak

Distribuirani hidrološki model kao što je wflow_hbv je prvi distribuirani hidrološki model koji se uvodi u operativni rad u Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije sa ciljem izdavanja hidroloških prognoza. Kao takav model zahteva raspodeljene podatke o količina padavina i temperatura na slivu koje je moguće obezbediti sa automatskih kišomernih stanica i radara. Ovi izvori informacija o padavinama na slivu do sada nisu korišćeni kao ulaz u hidrološke modele, pa njihova dostupnost i pouzdanost nije analizirana.

Automatske kišomerne stanice su dobar i pouzdan izvor informacija ukoliko se na sliv postavi dovoljan broj stanica i ukoliko se one redovno održavaju. Daljinska detekcija padavina radarom je takođe dobar izvor informacija jer su količine padavina prostorno raspodeljene. Početni nedostaci koji su uočeni zahtevaju investicije u kalibracije radara, ali i neinvesticione mere koje bi se počele preduzimati sa nastavkom saradnje zaposlenih u radarskoj meteorologiji i hidrologiji.

Literatura

1. Bergstrom S., Forsman A. (1973): Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model, *Nordic Hydrology*, 4, pp 147-170.
2. EEA (2000): CORINE Land Cover Technical Guide – Addendum 2000, Technical report No. 40, European Environment Agency.
3. Farr T.G. et al. (2007): The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, p. RG2004.
4. Gematronik Gmb: Rainbow Product Manual, Version 3.4, Document Release 4.2 (2001-05-02)
5. Karssen D., Schmitz O., Salamon P. De Jong, K. Bierkens, M.F.P. (2009): A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environmental Modelling and Software* 25 (2009): 489-502.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

6. Lawrence D., Haddeland I., Langsholt E. (2009): Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation, Report 01, Oslo.
7. Marshall, J.S., R.C., Langille, and W. McK. Palmer (1947): Measurement of rainfall by radar. J. Meteor., 4, 186-192.
8. Radinović Đ., Kostić A. (1997): Radarsko merenje padavina u Srbiji, studija, Republički hidrometeorološki zavod Srbije
9. Schellekens J. (2012): Home OpenStreams deltares public wiki, <http://publicwiki:deltares.nl/display/OpenS/Home>.
10. Wilson, J. W. (1970): Integration of Radar and Raingage Data for Improved Rainfall Measurement. J. Appl. Meteor., 9, 489-497.

Optimalno upravljanje višenamenskom akumulacijom korišćenjem modela HEC-5

Aleksandra Ilić¹
Dragan Milićević²
Olivera Potić³

APSTRAKT: Kako bi se odredilo optimalno upravljanje akumulacijom, a u cilju obezbeđivanja korisnika vodom tj. odredila raspodela raspoloživih vodnih resursa na više korisnika, u radu je korišćen simulacioni model HEC 5, koji simulira rad sistema višenamenskih akumulacija. U zavisnosti od usvojene strategije upravljanja, modelom se simuliraju ispuštanja iz akumulacija neophodna za zadovoljenje zahteva za električnom energijom, snabdevanje korisnika vodom, navodnjavanjem kao i održavanje potrebnih protoka u rečnim koritima. U radu je prikazan model formiran za akumulaciju Selova na Toplici. Za definisanje dva scenarija korišćeni su raspoloživi podaci na hidrološkoj stanici Donja Selova i zahtevi korisnika bazirani na podacima za opštine: Niš, Prokuplje, Merošina, Kuršumljia, Blace i Žitorađa. Na kraju rada je uporedna analiza razmatranih varijanti prikazana tabelarno i grafički.

Ključne reči: optimalno upravljanje, HEC 5 simulacioni model, višenamenska akumulacija, garantovani ekološki protok

Multi-purpose reservoir operation using the HEC-5 model

ABSTRACT: In order to determine optimal reservoir operation with the aim to provide customers, i.e. to determine the optimal water resources allocation to more users, model HEC 5 has been applied in the paper which simulates the operation of the system of multi-purpose reservoirs. Depending on the adopted strategy, discharges from reservoir are modeled necessary to meet demands for electricity, water supply, irrigation and maintenance of the required flow in the river basins. This paper presents a model that was formed for the accumulation Selova. To define two scenarios, available data on hydrological station Donja Selova were used and user requirements based on the data for the municipalities of Nis, Prokuplje, Merošina, Kuršumljia, Blace and Žitorađa. Finally, the comparative analysis of the considered variants is shown in tables and graphs.

Key words: optimal operation, HEC 5 simulation model, multi-purpose reservoir, guaranteed ecological flow

¹ Ass. Aleksandra Ilić, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

² Doc. Dr Dragan Milićević, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, drgara@gaf.ni.ac.rs

³ Prof. dr Olivera Potić, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, olivera_p@yahoo.com

1 Uvod

Kako bi se odredilo optimalno upravljanje akumulacijom, a u cilju obezbeđivanja korisnika vodom (garantovani ekološki protok, snabdevanje vodom, navodnjavanje i energetika), tj. odredila raspodela raspoloživih vodnih resursa na više korisnika napravljen je simulacioni model primenom paketa HEC 5 - US Army Corps of Engineers.

Simulacioni model HEC 5, simulira rad sistema višenamenskih akumulacija, sa hidroelektranama ili bez njih. U zavisnosti od usvojene strategije upravljanja, model određuje ispuštanja iz akumulacija neophodna za zadovoljenje zahteva za električnom energijom, snabdevanje korisnika vodom, kao i održavanje potrebnih protoka u rečnim koritima u cilju odbrane od poplava.

Radom je ilustrovano upravljanje višenamenskom akumulacijom Selova, na reci Toplici kod Kuršumilje na osnovu raspoloživih vodnih resursa i zahteva korisnika za vodom. Razmatrane su dve varijante u odnosu na broj korisnika, da li se u sistem uključuje rad hidroelektrane ili ne, odnosno mogućnost usmeravanja određene količine vode za navodnjavanje oko 3500 ha.

2 Metode i postupci - Simulacioni model HEC 5

Model HEC5 se primenjuje u fazi planiranja ali i operativnog upravljanja vodoprivrednim sistemima. Može se koristiti za određivanje karakteristika vodoprivrednih objekata, potrebnih dimenzija korisne zapremine u akumulacijama za različite namene (vodosnabdevanje, hidroenergetsku proizvodnju, navodnjavanje i dr.) ali i zapremine za zaštitu od poplava.

Model može poslužiti kao efikasno sredstvo za unapređenje upravljanja postojećim hidroenergetskim sistemima, za procenu efekata uvođenja novih hidroelektrana u sistem i za planiranje ili replaniranje proizvodnje električne energije. Takođe se može koristiti i za određivanje godišnje garantovane vode za vodosnabdevanje ili garantovane godišnje energije koju akumulacija može da obezbedi.

Odbrana od poplava se organizuje na taj način što se voda iz akumulacija ispušta pre kritičnog trenutka (nailaska maksimalnog protoka), a da se pri tome ne prevaziđu maksimalni protoci i izazovu poplave u nizvodnim kontrolnim tačkama. Istovremeno se obavlja bilansiranje zapremine vode u akumulacijama.

Osnovnu hidrološku komponentu u simulacionom modelu predstavljaju hidrogrami dotoka koji se definišu u kontrolnim tačkama sistema. Model koristi inkrementalne lokalne dotoke koji se izračunavaju u modelu na osnovu prirodnih proticaja i proticaja dobijenih simulacijom zadatih ispuštanja iz akumulacija.

Zahtevi vezani za stanja (ispunjenost) zapremine akumulacija se postižu istovremeno uz zadovoljenje svih nizvodnih zahteva. Vremenski intervali na koje se deli period analize mogu biti od jednog meseca do jednog sata.

Osnovne komponente višenamenskog vodoprivrednog sistema čiji se rad simulira su: glavni vodotok, akumulacije, kontrolne tačke, vodozahvati, tačke promene hidrološkog režima dotoka (ušća pritoka i sl.). Program prihvata bilo koju konfiguraciju sistema uz uslov da nema dimenzionalnih prekoračenja u pogledu broja kontrolnih tačaka i akumulacija. Kružni tokovi vode kao što su kanali i cevovodi za razmenu voda između akumulacija mogu

se implicitno specificirati u obliku vodozahvata i povratnih tokova ("negativni zahvati"). Program zahteva da najuzvodnija kontrolna tačka bude akumulacija dok najnižvodnija može biti ili akumulacija ili protočna kontrolna tačka.

Akumulacija se u programu tretira kao kontrolna tačka, pa je potrebno definisati podatke o akumulacijama i nizvodnim kontrolnim tačkama na kojima akumulacija može promeniti režim protoka.

Svaku akumulaciju definišu minimalni i maksimalni kapacitet, kao i karakteristične zapremine akumulacije: mrtva zapremina, nekorisna zapremina, korisna zapremina i zapremina za odbranu od poplava.

Neophodno je specificirati početnu zapreminu akumulacije, na početku simulacije, kao i krivu zapremine akumulacije $V=f(Z)$, krivu površine akumulacije $A=f(Z)$ kapacitet ispusta i prelivnih organa na brani.

Prioriteti ispuštanja vode iz akumulacija definišu se zadavanjem "indeksnih nivoa" prema odgovarajućoj nameni dela zapremine akumulacije (slika 1).



Slika 1: Indeksni nivoi karakterističnih zapremina akumulacije u modelu HEC 5 [6]

3 Konceptija akumulacije "Selova"

Reka Toplica na kojoj se nalazi akumulacija Selova kao i objekti hidročvora, među kojima je i hidroelektrana sa mašinskom zgradom, predstavlja deo Južno Moravskog sliva.

Toplica je leva pritoka Južne Morave u koju se uliva kod Doljevca. Površina sliva je 2217 km².

Akumulacija je predviđena sa ciljem da se poveća obezbeđenost korišćenja protoka ukoliko se uravnoteži njihova raspodela, smanji štetni uticaj poplavnih talasa, povećaju protoci u sušnom periodu.

Akumulacija je površine 235 ha i ukupne zapremine 53,20×10⁶ m³ (pri NUN 516,50 mm). Od ukupne zapremine akumulacije projektom je 46×10⁶ m³ namenjeno vodosnabdevanju i garantovanom ekološkom protoku a 7,3×10⁶ m³ nanosu. Projektom je predviđeno da ova zapremina u svakom trenutku obezbedi 1,9 m³/s za vodosnabdevanje i 0,3 m³/s za garantovani ekološki protok.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Zapremina akumulacije iznad normalnog uspornog nivoa 516,50 mm do kote krune preliva 523,50 mm iznosi $17,20 \times 10^6 \text{ m}^3$ i služiće kao prostor za zaštitu od poplava [8]. Akumulacijom su zahvaćena i ušća reka Rankovice i Lukovske. Ukupna dužina jezera pri koti maksimalnog uspora bi bila 26,5 km.

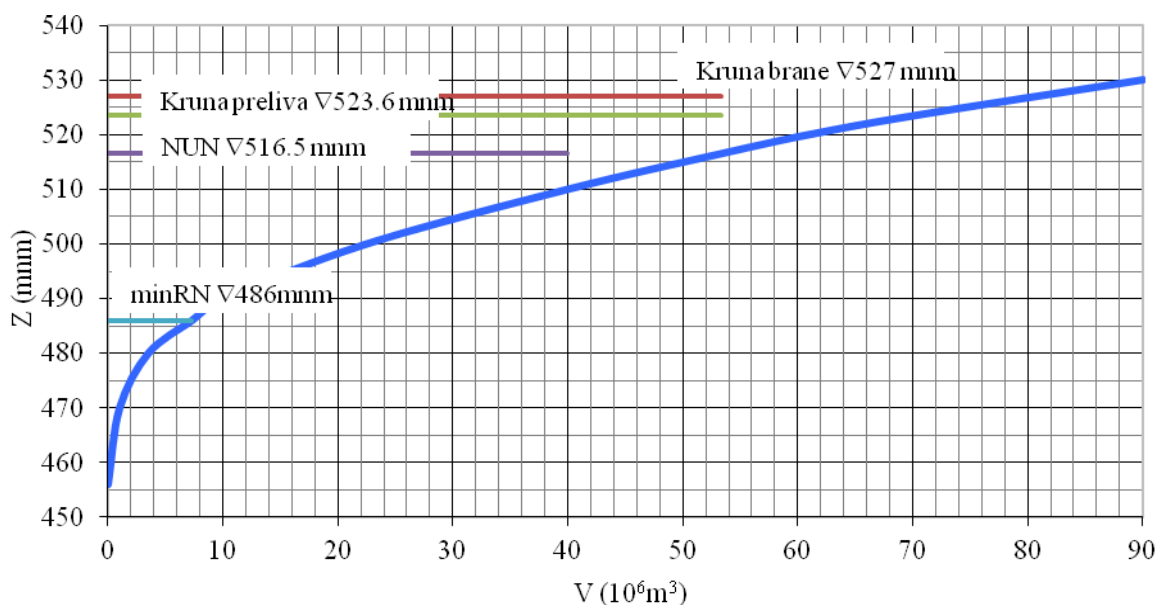
Na slici 2 prikazana je kriva zapremine akumulacije.

Temeljni ispušt je namenjen za brzo pražnjenje akumulacionog bazena i za evakuaciju viška vode u slučaju kada je akumulacija puna a dotok vode u akumulaciju je veći od potrebnih količina vode za vodosnabdevanje i garantovani ekološki protok.

Zahvatna građevina za vodosnabdevanje je predviđena u vidu zahvatne kule sa većim brojem nivoiskih zahvata. U slučaju izgrađenosti elektrane, svaki zahvat ima kapacitet od $5 \text{ m}^3/\text{s}$ kolika je maksimalna količina vode koja prolazi kroz elektranu. Od zahvatne kule vodi odvodni tunel po desnoj strani, nizvodno od portala tunela projektovana je račva sa dva cevovoda jedan za elektranu i drugi koji ide do umirujućeg bazena [8].

Osnovna koncepcija rešenja akumulacije Selova sa hidroelektranom je da se raspoložive vode iz akumulacije propuste predhodno kroz hidroelektranu a da se obezbede svi zahtevani uslovi za osnovne korisnike akumulacije (vodosnabdevanje, navodnjavanje, garantovani ekološki protok).

Hidroelektrana je locirana u prirodnom rečnom koritu 60 m nizvodno od nožice brane.



Slika 2: Kriva zapremine akumulacije „Selova“

4 Varijantna rešenja

Pri višenamenskom korišćenju vode iz akumulacije varijantna rešenja koja su analizirana u ovom radu formirana su na osnovu potreba za vodom i razmatranja uključivanja navodnjavanja kao korisnika akumulacije. U prvoj varijanti usvojen je koncept akumulacije sa elektranom. Sva zahvaćena voda za potrebe vodosnabdevanja stanovništva i obezbeđivanja

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

garantovanog protoka kao i navodnjavanja nizvodno od akumulacije prolazi kroz agregate hidroelektrane uzimajući u obzir sezonske zahteve biljnog i životinjskog sveta nizvodno od brane, koristeći statističke podatke o protocima. Mesto zahvatanja vode za potrebe navodnjavanja je definisano novom kontrolnom tačkom. U drugoj varijanti je zadržan prioritet vodosnabdevanja i garantovanog protoka u odnosu na navodnjavanje ali je zahvatanje vode direktno iz akumulacije, nema hidroenergetskog zahteva.

U tabeli 1. prikazane su šeme vodoprivrednog sistema sa usvojenom upravljačkom strategijom koja se definiše indeksnim nivoima za obe varijante.

Tabela 1: Varijantna rešenja i upravljačke strategije

Varijanta	Šema vodoprivrednog sistema	Upravljačka strategija – indeksni nivoi
I	<p>KT1 – akumulacia</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vrh mrtve zapremine $Z=463,00$ mmm 2. Vrh nekorisne zapremine $Z=486$ mmm 3. Minimalni radni nivo HE $Z=495,00$ mmm 4. Minimalni radni nivo agregata za GEP $Z=502,00$ mmm 5. Minimalni radni nivo agregata za vodosnabdevanje $Z=510,00$ mmm 6. Vrh korisne zapremine $Z=516,50$ mmm 7. Vrh zapremine za odbranu od poplava $Z=523,60$ mmm 8. Kota maksimalnog uspora $Z=527,33$ mmm
II	<p>KT1 – akumulacija</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vrh mrtve zapremine $Z=463,00$ mmm 2. Vrh nekorisne zapremine $Z=483,5$ mmm 3. Vrh korisne zapremine $Z=516,50$ mmm 4. Vrh zapremine za odbranu od poplava $Z=523,60$ mmm 5. Kota maksimalnog uspora $Z=527,33$ mmm

5 Potrebe za vodom

5.1 Garantovani ekološki protok (GEP)

U teoriji vodoprivrednih sistema posebno su važna dva upravljana vodna režima koja treba ostvariti nizvodno od brana ili nekih vodozahvata u rekama [3]: protok za vodoprivredne potrebe i garantovani ekološki protok na osnovu kojih se određuje potrebno ispuštanje nizvodno od brane.

GEP metoda uzima u obzir specifičnost lokalnog rečnog ekosistema odnosno, strukturu, potrebe i sezonsku dinamiku hidrobionata i njihovih razvojnih oblika (jaje, larva, mlađ). U hladnom delu godine garantovani ekološki protok je manji, jer su tada i funkcije biocenoza smanjene. U toplom delu godine protok se povećava u skladu sa povećanim potrebama hidrobionata i kao rezultat daje ispuštanje većih količina vode u malovodnim periodima što ima za rezultat očuvanje i zaštitu biotopa i biocenoze vodenih ekosistema [4].

Organizmi u prirodnom okruženju žive uglavnom negde ispod njihove optimalne temperature pa blage oscilacije temperature ne moraju obavezno da utiču na strukturu populacije. Blago povećanje temperature kao rezultat daje povećanu produkciju, jer se temperatura približava optimalnoj na kojoj je produkcija najveća [7].

Primena GEP metode zasniva se na primeni tri parametra [4], [5]: 1. prosečni višegodišnji protok na profilu brane, odnosno mestu zahvata vode (Q_{sr}), 2. minimalni srednjemesečni protok obezbeđenosti 95% ($min.mes Q_{95\%}$), 3. minimalni srednjemesečni protok obezbeđenosti 80% ($min.mes Q_{80\%}$). Ukoliko se raspoloživo višegodišnjim serijama dnevnih protoka, umesto minimalnih srednjemesečnih protoka, mogu se koristiti odgovarajuće vrednosti 30-dnevnih protoka malih voda istih verovatnoća ($min.(30) Q_{95\%}$) i ($min.(30) Q_{80\%}$).

Polazeći od navedenih ulaznih parametara garantovani ekološki protok (Q_{GEP}) se usvaja na osnovu relacija (1) i (2) na sledeći način [4]:

- 1) U hladnom delu godine, koji obuhvata period (oktobar – mart)

$$Q_{GEP} = \begin{cases} 0.1 \times Q_{sr} & \text{za } Q_{95\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{95\%}^{min(30)} \leq 0.1 \times Q_{sr} \\ Q_{95\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{95\%}^{min(30)} & \text{za } 0.1 \times Q_{sr} \leq Q_{95\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{95\%}^{min(30)} \leq 0.15 \times Q_{sr} \\ 0.15 \times Q_{sr} & \text{za } Q_{95\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{95\%}^{min(30)} \leq 0.15 \times Q_{sr} \end{cases} \quad (1)$$

- 2) U toplom delu godine, koji obuhvata period (april – septembar)

$$Q_{GEP} = \begin{cases} 0.15 \times Q_{sr} & \text{za } Q_{80\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{80\%}^{min(30)} \leq 0.15 \times Q_{sr} \\ Q_{80\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{80\%}^{min(30)} & \text{za } 0.15 \times Q_{sr} \leq Q_{80\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{80\%}^{min(30)} \leq 0.25 \times Q_{sr} \\ 0.25 \times Q_{sr} & \text{za } Q_{80\%}^{min.mes} \text{ или } Q_{80\%}^{min(30)} \leq 0.25 \times Q_{sr} \end{cases} \quad (2)$$

5.2 Potrebe za vodosnabdevanjem iz akumulacije (VS)

Potrebe za vodom definisane su na osnovu podataka iz literature [8] i Republičkog zavoda za statistiku. Sadrže potrebe za vodosnabdevanjem stanovništva i industrije za šest opština u

topličkom i nišavskom okrugu na osnovu prognoziranog porasta potreba do 2020. godine (tabela 5).

5.3 Potrebe za navodnjavanjem iz akumulacije (N)

Potrebe za vodom za navodnjavanje određuju se i zavisnosti od navodnjavane površine i hidromodula sistema po jednačini (3)[1]:

$$Q = q \cdot F \quad (3)$$

gde je: Q – protok vode za dimenzionisanje sistema za navodnjavanje (l/s, m³/s).

Hidromodul predstavlja količinu vode koju treba dovesti na zemljište u jedinici vremena na jedinicu površine i uspostavlja vezu između dnevne količine vode koju treba dovesti na zemljište u radnom danu i dužine dnevnog radnog vremena [1].

$$q = \frac{10000 \cdot \Delta h}{T} \quad (4)$$

gde je: q – hidromodul sistema (l/s/ha), Δh – merodavna dnevna potrošnja vode (mm), T – dnevno radno vreme sistema (s).

Najčešće korišćeni pristup pri određivanju merodavne dnevne potrošnje je preko deficita vode odnosno norme navodnjavanja [9].

Neto norma navodnjavanja određuje se iz jednačine vodnog bilansa zemljišta (5):

$$V_n = ET - P_e \quad (5)$$

gde je: ET – količina vode koja se troši u zemljištu u vegetacionom periodu. Uzima se da je jednaka evapotranspiraciji, P_e – efektivne padavine.

Postoji veliki broj metoda za proračun referentne evapotranspiracije (ET₀). U ovom radu ona je određena po jednačini Hargreaves-a [9], kod koje se izračunavanje bazira na maksimalnim, minimalnim i srednjim dnevnim temperaturama vazduha, kao i na ekstraterestričkom Sunčevom zračenju i dužini obdanice tokom godine za dati lokalitet (6):

$$ET_{0,aharg} = 0.0023 \cdot 0.408 \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right) \quad (6)$$

gde je: ET_{0,aharg} – referentna evapotranspiracija (mm/dan), R_a – ekstraterestrijalna radijacija (MJ/m²/dan), T_{max} – srednja maksimalna temperatura vazduha (°C), T_{min} – srednja minimalna temperatura vazduha (°C).

Plodored se usvaja na osnovu klimatskih i topografskih podataka kao i na osnovu potreba prehrambene industrije. Potrebe svake kulture za vodom dobijene su iz izraza (7):

$$ET = k_c ET_0 \quad (7)$$

gde je: k_c – koeficijent kulture, ET – evapotranspiracija kulture (mm).

Vrednosti koeficijenata kultura dobijaju se po proceduri iz literature [2]. Evapotranspiracija se određuje prema učešću svake kulture, a efektivne padavine prema USDA SCS metodi (8):

$$P_e = 1.2525 \cdot (P^{0.82416} - 2.3435) e^{0.0022ET} \delta(D_n) \quad (8)$$

gde je: P – mesečne padavine (mm), $\delta(D_n)$ – korekcionni faktor koji zavisi od norme zalivanja.
Elementi za proračun potreba za navodnjavanjem 3500 ha prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2: Elementi za proračun potreba za navodnjavanjem

	April	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep
ET (mm)	41,84	64,48	73,87	66,56	52,02	40,07
P (mm)	58,0	72,3	72,9	57,2	53,0	52,4
P_e (mm)	34,43	41,90	42,20	34,01	31,76	31,40
V_n (mm)	7,41	22,57	31,67	32,55	20,25	8,67

6 Ulazni podaci u model

6.1 Podaci o akumulaciji

Na početku simulacije zapremina akumulacije je 53300000 m³, tj. nivo vode u akumulaciji je na koti vrha korisnog prostora. Usvojen je mesečni interval prognoze dotoka. Zapremine i maksimalni kapaciteti ispuštanja u funkciji nivoa vode shodno promeni zahteva nizvodnih korisnika prikazani su u tabeli 3. Evaporacija se zanemaruje pri računanju bilansa akumulacije.

Tabela 3: Zapremine, nivoi vode, prirodni dotok i maksimalni kapaciteti ispuštanja iz akumulacije

Zapremina (1000 m ³)	0	500	5717	7300	10625	16250	26000	40000	53300	70500	81865
Nivo (m)	456	463	483,5	486	490,5	495	502	510	516,5	523,6	527,33
Prirodni dotok (m ³ /s)	3,85	4,50	5,62	6,47	5,18	3,34	2,21	1,62	1,61	1,83	2,62
Maks. kapacitet ispuštanja (m ³ /s)	0	0,638	0,638	0,638	0,638	3	5	5	40	429	429

6.2 Podaci o hidroelektrani

Optimalni ukupni instalisani protok hidroelektrane je 5 m³/s dobijen ekonomskom analizom. Ukupna instalisana snaga agregata iznosi 1810kW a prosečna godišnja proizvodnja energije je 7616,1 MWh [8].

Nivo donje vode i hidraulički gubitak je 446 m, a pri radu agregata za vodosnabdevanje koji se uključuje pri zapremini akumulacije, 40x10⁶ m³, iznosi 484,5 m.

Maksimalna moguća proizvodnja snage u funkciji zapremine akumulacije prikazana je u tabeli 4, pri koeficijentu korisnog dejstva 0,85.

Tabela 4: Maksimalna moguća snaga u funkciji zapremine akumulacije

Zapremina (1000 m ³)	500	7300	16250	26000	40000	53300	70500
Snaga (kW)	0	0	264,6	518,8	1202,2	1775,90	1810

6.3 Podaci o vodozahvatima

U simulacionom modelu se voda zahvata iz akumulacije, u prvoj varijanti je zahvatanje vode uslovljeno kapacitetom agregata hidroelektrane, dok je u drugoj varijanti ograničeno kapacitetom nivoiskih vodozahvata na zahvatnoj kuli.

Maksimalni dozvoljeni protok pri kome nema plavljenja je 429 m³/s, minimalni željeni protok je 0,300 m³/s, dok je minimalni zahtevani protok 0,441 m³/s.

Potrebe za vodom u tačkama sistema prikazane su u tabeli 5.

Za proračun propagacije talasa usvojena je Maskingem metoda za vremenski period 6 časova.

Tabela 5: Potrebe za vodom u tačkama sistema (m³/s)

	Jan	Feb	Mart	April	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
VS (m ³ /s)	1,58	1,58	2,03	2,25	2,48	2,70	2,48	2,48	2,70	2,48	2,48	1,80
GEP (m ³ /s)	0,441	0,441	0,441	0,638	0,638	0,638	0,638	0,638	0,638	0,441	0,441	0,441
N (m ³ /s)	0	0	0	0,100	0,393	0,533	0,420	0,230	0,076	0	0	0
E (MWh)	444	444	571	635	698	762	698	698	762	698	698	508

7 Rezultati

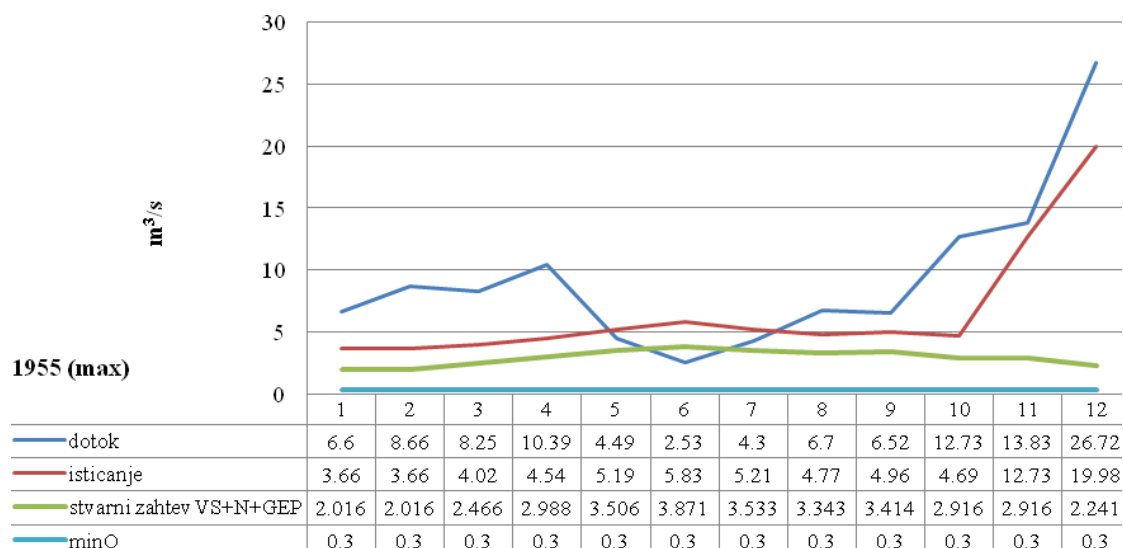
Rad akumulacije "Selova" simuliran je prema nizu mesečnih protoka za 57 godina u skladu sa podacima o prirodnom dotoku u akumulaciju sa vremenskim inkremantom 1 mesec. Početna zapremina vode u akumulaciji je 53300000 m³ za obe varijante, na početku simulacije akumulacija je puna.

U prvoj varijanti sva zahvaćena voda prolazi kroz agregate hidroelektrane, dok se u drugoj varijanti voda zahvata direktno iz akumulacije. Prioritet je dat vodosnabdevanju i oplemenjivanju malih voda u odnosu na navodnjavanje što je definisano indeksnim nivoima.

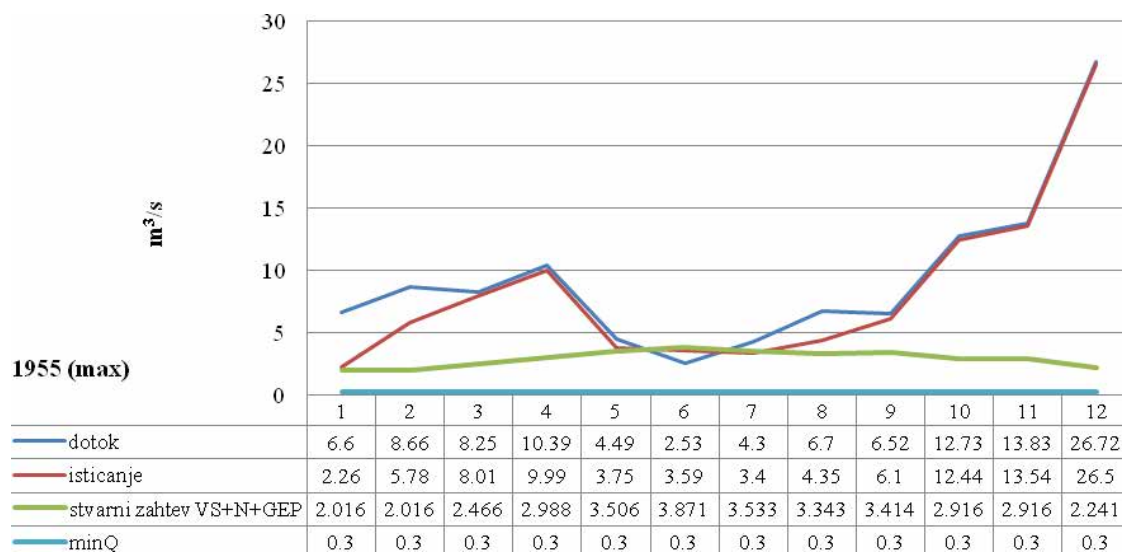
Zadovoljenje potreba za vodom stanovništva i industrije kao i mogućnost navodnjavanja u velikoj meri zavisi od usvojenog koncepta, da li će sistem raditi sa uključenjem hidroelektrane ili bez nje.

Na slikama 2 i 3 prikazani su uporedo dotok, isticanje i potrebe za vodom za obe varijante respektivno. Protok minQ predstavlja minimalno zahtevano projektovano ispuštanje iz akumulacije.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 2: Dotok, isticanje i potrebe za vodom u najvodnijoj godini za Varijantu 1



Slika 3: Dotok, isticanje i potrebe za vodom u najvodnijoj godini za Varijantu 2

8 Zaključak

U radu je prikazan model formiran za akumulaciju Selova na Toplici. Za definisanje dva scenarija korišćeni su raspoloživi podaci na hidrološkoj stanici Donja Selova i zahtevi

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

korisnika bazirani na podacima za opštine: Niš, Prokuplje, Merošina, Kuršumlija, Blace i Žitorađa.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da akumulacija „Selova“ uglavnom omogućava zadovoljenje projektovanih potreba od 1,9 m³/s, ali da zadovoljenje potreba za vodom stanovništva i industrije kao i mogućnost navodnjavanja u velikoj meri zavisi od usvojenog koncepta, odnosno da li će sistem raditi sa uključenjem hidroelektrane ili bez nje. Simulacija rada akumulacije primenom simulacionog modela HEC 5, pruža značajnu pomoć u optimalnom upravljanju akumulacijom, sa ciljem obezbeđivanja svih korisnika vodom u različitim uslovima eksploatacije.

Zahvalnost

Predstavljeno istraživanje je sprovedeno za potrebe naučnih projekata TR37018, TR37005 i III43007, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u periodu 2011.-2015.

Literatura

1. Avakumović, D. (1994) *Hidrotehničke melioracije - Navodnjavanje*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
2. Allen, G., R., Pereira, S., L., Raes, D., Smith, M. (2006) Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), *FAO Irrigation and Drainage paper No, 56*
3. Đorđević, B. (1990) *Vodoprivredni sistemi*, Građevinski fakultet Beograd
4. Đorđević, B., Dašić, T. (2007) Garantovani protoci nizvodno od elektrana, *Elektroprivreda*, br. 1, str. 3
5. Đorđević, B., Dašić, T. (2011) Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, *Vodoprivreda* 0350-0519, 43 252 - 254, str. 151
6. Hidrologic Engineering Center (1985), *Users Manual*, U,S,Army - Corps of Engineers: HEC-5 Simulation of Flood Control and Conservation Systems, Davis
7. Ilić, A., Komarnicki-Ćirlić, A., Potić, O., (2013) Determination of Optimal Water Allocation of Arilje Reservoir on the Veliki Rzav River by applying Simulation Model HEC 5, *International Science Conference Reporting for Sustainability Proceedings*, SciEMC 2013, Montenegro, pp. 131-136
8. Nikolic, V. (2011) System Dynamics Simulation Selova Reservoir Case Study, *Special Topics in Water Resources Management*, The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering
9. Trajković, S. (2009) *Metode proračuna potreba za vodom u navodnjavanju*, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet

Prihvatljivost gama raspodele za proračun indeksa suše u slivu Južne Morave

Vladislava Mihailović¹
Borislava Blagojević²

APSTRAKT: Proračun pokazatelja suše SPI (Standardized Precipitation Index) i SRI (Standardized Runoff Index) se sastoji iz više koraka, a najvažniji je određivanje teorijske raspodele koja se najbolje prilagođava mesečnim sumama padavina, odnosno protoka. U svetu je najčešće u upotrebi Gama raspodela, koja je vremenom prihvaćena kao deo metodologije proračuna pokazatelja, tako da se danas retko proverava da li ova raspodela zaista najbolje odgovara osmotrenim podacima. Cilj ovog rada je da istražimo mogućnost primene i nekih drugih dvoparametarskih i troparametarskih raspodela na 13 hidroloških stanica na prostoru sliva Južne Morave. Prihvatljivost raspodela ispituje se za različite vremenske skale agregacije ulaznih podataka (1, 2, 3, 6, 12 i 24 meseca). Kao preliminarni kriterijum za određivanje mogućih raspodela koristimo dijagrame L-momenata, a odabrane raspodele zatim rangiramo na osnovu mere AWOD (Averaged Weighted Orthogonal Distance).

Ključne reči: meteorološka suša, hidrološka suša, SPI, SRI, raspodele verovatnoća, AWOD, Južna Morava

Gamma distribution suitability for drought indices assesment in the Južna Morava basin

ABSTRACT: The drought indexes SPI (Standardized Precipitation Index) and SRI (Standardized Runoff Index) calculation comprises several steps, the most important being theoretical probability distribution choice, according to the monthly precipitation and runoff sums, respectively. The Gamma distribution is the most frequently applied worldwide, and it has become a part of the indices calculation methodology. Nowadays, it is rarely checked if it is the best observed data fit. Our research aim is to assess suitability of some other two and three parameter distributions at 13 hydrological stations in the Južna Morava river basin. We investigate the distribution fit for several time scale aggregation (1, 2, 3, 6, 12 and 24 months). As a preliminary criterion for the distribution fit, we use L-moment diagrams, and then rank the distributions according to the Averaged Weighted Orthogonal Distance (AWOD).

Keywords: meteorological drought, hydrological drought, SPI, SRI, probability distribution, AWOD, Južna Morava

¹ Dr Vladislava Mihailović, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, ul. Kneza Višeslava 1, 11000 Beograd, vladislava.mihailovic@sfb.bg.ac.rs

² Dr Borislava Blagojević, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, ul. A. Medvedeva 14, 18000 Niš

1 Uvod

Za otkrivanje i analizu meteorološke suše, u svetskoj i domaćoj praksi je prihvaćen pokazatelj SPI (*Standardized Precipitation Index*) [9]. Razlog za brzo prihvatanje i intenzivnu upotrebu ovog indeksa leži u njegovoj svestranosti i jednostavnosti primene- za proračun se kao ulazni podaci koriste samo mesečne sume padavina. Svestranost indeksa SPI ogleda se u uvidu u intenzitete suša različitih trajanja (kratkoročne, sezonske ili višegodišnje), što se postiže izračunavanjem za više vremenskih skala agregacije [11]. U praksi se najčešće koriste vremenske skale 1, 3, 12 do 36 meseci. U želji da se i hidrološka suša ocenjuje na isti način, jedan od predloženih pokazatelja je i SRI (*Standardized Runoff Index*) [13], kod koga su ulazni podaci srednji mesečni protoci. Procedure za proračun oba pokazatelja su praktično iste.

Ključna faza procedure proračuna je izbor teorijske raspodele koja se najbolje prilagođava mesečnim nizovima. Osnovni izvor neizvesnosti u proračunu SPI proističe upravo odatle [4]. Proračun se sprovodi na mesečnim nizovima u višegodišnjem periodu, tj. za svaki kalendarski mesec se generiše po jedan niz i za njega se određuje raspodela verovatnoća i njeni parametri. Imajući u vidu unutargodišnju varijaciju mesečnih nizova, moguća su dva pristupa: (a) usvaja se ista raspodela za sve kalendarske mesece i za sve vremenske skale, sa parametrima koji variraju tokom godine; (b) raspodela se menja tokom godine, prema rezultatima testova. Ako se uzme u obzir da se SPI računa za 12 meseci i za više vremenskih skala, jasno je da se radi o obimnim proračunima. Zbog toga se u praksi najčešće promenjuje prvi pristup, tako što se (bez provere) usvaja gama raspodela. Najčešće predlagana alternativa gama raspodeli je Pirson 3, na osnovu istraživanja mogućnosti primene i drugih raspodela ([2], [5], [15]). Ju i saradnici [17] su ispitivali veći broj dvo i troparametarskih raspodela za područje Japana i zaključili da su najbolje rezultate pokazale raspodele Pirson 3 i log-Pirson 3, a da alternativa možda može biti troparametarska log-normalna raspodela.

Proticaji, zbog uticaja brojnih dodatnih faktora, pokazuju veću prostornu varijabilnost, u odnosu na klimatske faktore koji se koriste za izračunavanje pokazatelja suša. Samim tim postoji i velika raznolikost u izboru raspodela koje se najbolje prilagođavaju mesečnim nizovima proticaja [16]. Osim toga, proticaji pokazuju uvek veći koeficijent asimetrije od padavina, tako da se autori uglavnom okreću troparametarskim raspodelama, prvenstveno opštoj raspodeli ekstremnih vrednosti, opštoj logističkoj i log-normalnoj ([7], [8], [16]). Takođe je bitno i da rezultati istraživanja pokazuju da je teško usvojiti jedinstvenu raspodelu za sve stanice, zbog velike varijacije statističkih osobina mesečnih nizova [16].

U ovom radu prikazujemo početne rezultate istraživanja primene različitih dvoparametarskih i troparametarskih raspodela u našim klimatskim uslovima – na prostoru sliva Južne Morave. Od dvoparametarskih raspodela, razmatramo: Pareto (GPA2), log normalnu (LN2), gama (GAM2) i Vejbul (W2), a od troparametarskih: opštu logističku (GLOG), opštu raspodelu ekstremnih vrednosti (GEV), Pirson3 (P3), log-Pirson 3 (LP3), Pareto (GPA), Vejbul (W3) i log-normalnu (LN3). Prihvatljivost raspodela ispitujemo za različite vremenske skale sumiranja ulaznih podataka (1, 2, 3, 6, 12 i 24 meseca) u skladu sa skalama koje primenjuje Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije (RHMZS) i rezultatima prethodnih istraživanja [3]. Kao preliminarni kriterijum za određivanje mogućih raspodela koristimo dijagrame L-momenata.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Ovo istraživanje je deo opširnije studije, čiji je cilj da se uspostavi veza između hidroloških i meteoroloških pokazatelja suše [3], da bi se na osnovu operativnih podataka RHMZS o prognoziranim vrednostim SPI [18], dobijale vrednosti SRI i bliže određivale karakteristike hidrološke suše na našem području.

2 Metodologija

2.1 Standardizovan pokazatelj padavina (SPI)

SPI je meteorološki pokazatelj [9], koji kvantifikuje stanje vlažnosti na određenoj lokaciji ili površini. Kao ulazni podaci koriste se jedino mesečne sume padavina. Neka je $X_{i,j}$ niz mesečnih padavina, zabeležen tokom N godina ($i=1,2,\dots,N$, a $j=1,2,\dots,12$). Numerička vrednost pokazatelja SPI za godinu i , kalendarski mesec j i za vremensku skalu agregacije k , računa se u nekoliko faza [12]: (1) formira se niz kumulativnih padavina po mesecima, $Y_{i,j}^{(k)}$, za određenu vremensku skalu, tako što se padavine u datom mesecu sabiraju sa padavinama iz prethodnih $k-1$ meseci; (2) za svaki mesečni niz (januara, februara, itd.) određuje se „najbolja” teorijska raspodela; (3) izračunavaju se vrednosti funkcije raspodele za svaki podatak iz mesečnih nizova; (4) raspodela se zatim transformiše u standardnu normalnu raspodelu (po principu jednakih verovatnoća) i tako se dobijaju vrednosti SPI za dati mesec. Vrednosti SPI su zapravo vrednosti standardizovane normalne promenljive, tako da SPI ima srednju vrednost nula i standardnu devijaciju jedan.

2.2 Standardizovan pokazatelj oticaja (SRI)

Pokazatelj hidrološke suše, SRI se proračunava po istom principu kao SPI. Ulazna promenljiva su mesečni proticaji ili drugi pokazatelji izdašnosti sliva na izučavanom profilu, a računa se za iste vremenske skale kao i SPI. Ovaj indeks uključuje hidrološke aspekte suša i može predstavljati korisnu dopunu u izučavanju suše, paralelno sa SPI [13].

2.3 Dijagrami L-momenata

Za identifikaciju odgovarajuće raspodele (ili nekoliko kandidata) ovde su korišćeni dijagrami bezdimenzionalnih L -momenata [6], koji prikazuju vezu između LC_v (koef. L -varijacije) i LC_s (L -koef. asimetrije) za dvoparametarske, odnosno LCK (L -koef. spljoštenosti) i LCs za troparametarske raspodele. Osim vizuelne inspekcije dijagrama, kao mera saglasnosti uzoračkih i teorijskih vrednosti, može se uzeti i rastojanje (odnosno srednje rastojanje) između tačaka dobijenih iz uzorka i odgovarajućih tačaka sa krive za teorijsku raspodelu. Ovde je računata srednja vrednost rastojanja, ponderisana za svaku stanicu prema dužini raspoloživog niza [8]. Autori su ovu meru nazvali AWOD (*Averaged Weighted Orthogonal Distance*).

2.4 Podaci

Tabela 1 prikazuje osnovne podatke o stanicama odabranim za analizu. U skladu sa metodologijom opsežnije studije pokazatelja suše [3], mesečne padavine su po metodi

Tisenovih poligona transformisane u prostorne padavine na slivovima hidroloških stanica. Mesečni proticaji su transformisani u sloj oticaja [14].

Tabela 1. Izučavano područje: hidrološke stanice sa područja sliva Južne Morave.

Table 1. Study area: hydrologic stations in the Južna Morava river basin.

R. br.	Hidrološka Stanica (HS)	Reka	Sliv	Površ. sliva (km ²)	PROTICAJI		PADAVINE	
					Period	Broj godina	Period	Broj godina
1	Mojsinje	J. Morava	V. Morava	15390	1961-2014	53	1961-2008	48
2	Korvingrad	J. Morava	V. Morava	9396	1961-2014	53	1961-2008	48
3	Grdelica	J. Morava	V. Morava	3782	1961-2014	53	1961-2009	49
4	Tupalovce	Kozarska	J. Morava	98,1	1961-2014	53	1961-2009	49
5	Svođe	Vlasina	J. Morava	350	1961-2014	53	1961-2009	49
6	Pečenjevce	Jablanica	J. Morava	891	1961-2014	53	1961-2008	48
7	Niš	Nišava	J. Morava	3870	1961-2014	53	1961-2009	49
8	Bela Palanka	Nišava	J. Morava	3087	1961-2014	53	1961-2009	49
9	Pirot	Nišava	J. Morava	1745	1961-2014	53	1961-2009	49
10	Trnski Odorovci	Jerma	Nišava	557	1961-2014	53	1961-2014	54
11	Strazimirovce	Jerma	Nišava	95	1961-2014	53	1961-2009	49
12	Dimitrovgrad	Nišava	J. Morava	482	1961-2014	53	1961-2009	49
13	Doljevac	Toplica	J. Morava	2052	1961-2014	53	1961-2008	48

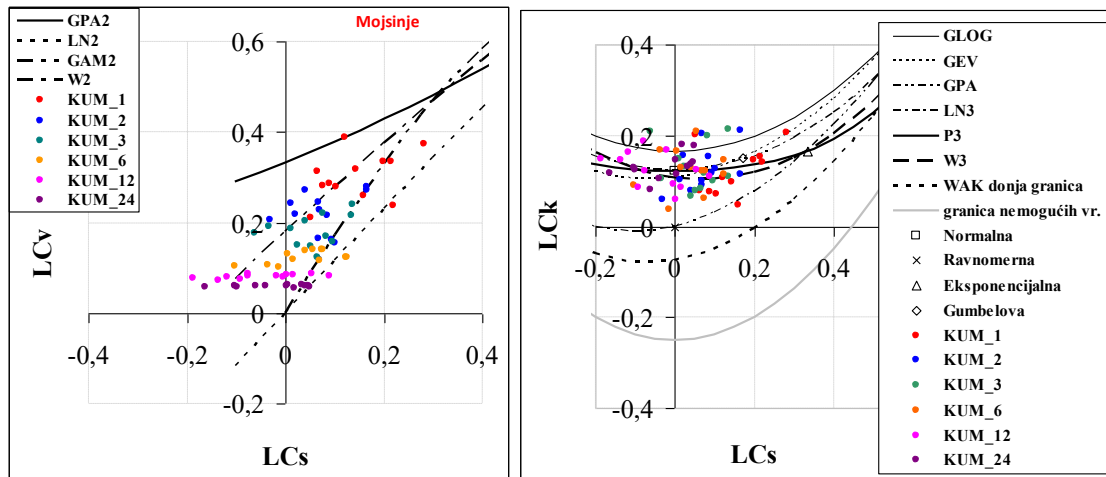
3 Rezultati i diskusija

Rezultati istraživanja su prikazani dijagramima $LCv-LCs$ i $Lck-LCs$, koji se koriste za izbor između dvoparametarskih, odnosno, troparametarskih raspodela. Dijagrami su dati i za padavine i za proticaje. Na dijagrame su nanete tačke-vrednosti za sve razmatrane vremenske skale – periode agregacije, a odgovarajuće oznake u legendi su prema dužini perioda sumiranja (KUM_1 jednomesečne sume, KUM_2 su dvomesečne, itd.). Za svaku izučavanu vremensku skalu ima po 12 tačaka, za 12 kalendarskih meseci. Oznake za raspodele na dijagramima i u daljem tekstu su date u Uvodu.

Na slikama 1 i 2 su za sve periode agregacije, na dijagrame L -momenata naneti empirijski nizovi mesečnih LCs i LCv (odnosno Lck), za HS Mojsinje (Slika 1 – padavine, Slika 2- proticaji). Na slikama se uočava da je LCs za padavine vidno manji nego za proticaje. Kako se produžava period agregacije, tako se i LCs smanjuje, tako da kod padavina odlazi i značajnije u negativne vrednosti. Za duže periode agregacije, LCv (pa i Lck) mogu se smatrati konstantnim tokom godine.

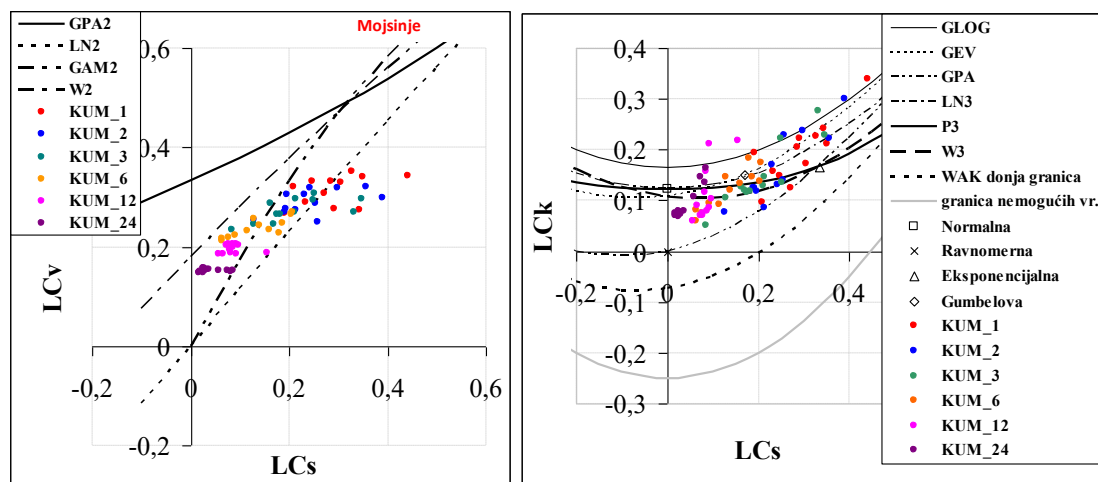
Slike 3, 4, 5 i 6 ilustruju način izbora najbolje raspodele, koji se odvija po mesecima, za svaku vremensku skalu. Zbog uštede u prostoru, prikazani su dijagrami L -momenata samo za jednomesečne sume padavina (Slike 3 i 4) i proticaja (Slike 5 i 6). Na dijagrame su, osim tačaka koje predstavljaju empirijske L -momente za svaku stanicu, nanete i prosečne vrednosti za sve stanice (plavi krstići). Slika 3 prikazuje dijagrame $LCv-LCs$ po mesecima, za padavine. Tačke se uglavnom nalaze između teorijskih linija za GPA2 i LN2 raspodele, tako da u obzir očigledno dolaze raspodele GAM2 i W2, osim u julu i oktobru (GPA2). Kod troparametarskih raspodela situacija nije očigledna, zbog velike varijabilnosti Lck tokom godišnjeg ciklusa,

tako da se izbor ne može obaviti vizuelno. Sa slike 5 se vidi da je od dvoparametarskih raspodela, LN2 prvi izbor za proticaje za jednomesečne nizove. Dijagrami L -momenata za troparametarske raspodele (Slika 6), kao i kod padavina, nisu od veće koristi. LCK varira u još većem opsegu nego kod padavina, tako da očigledno u dalje razmatranje treba uvrstiti veći broj troparametarskih raspodela.



Slika 1. HS Mojsinje: Dijagrami LCv - LCs (levo) i LCK - LCs (desno), padavine, sve vremenske skale.

Figure 1. HS Mojsinje: Diagrams LCv - LCs (left) and LCK - LCs (right), precipitation, all aggregation scales.

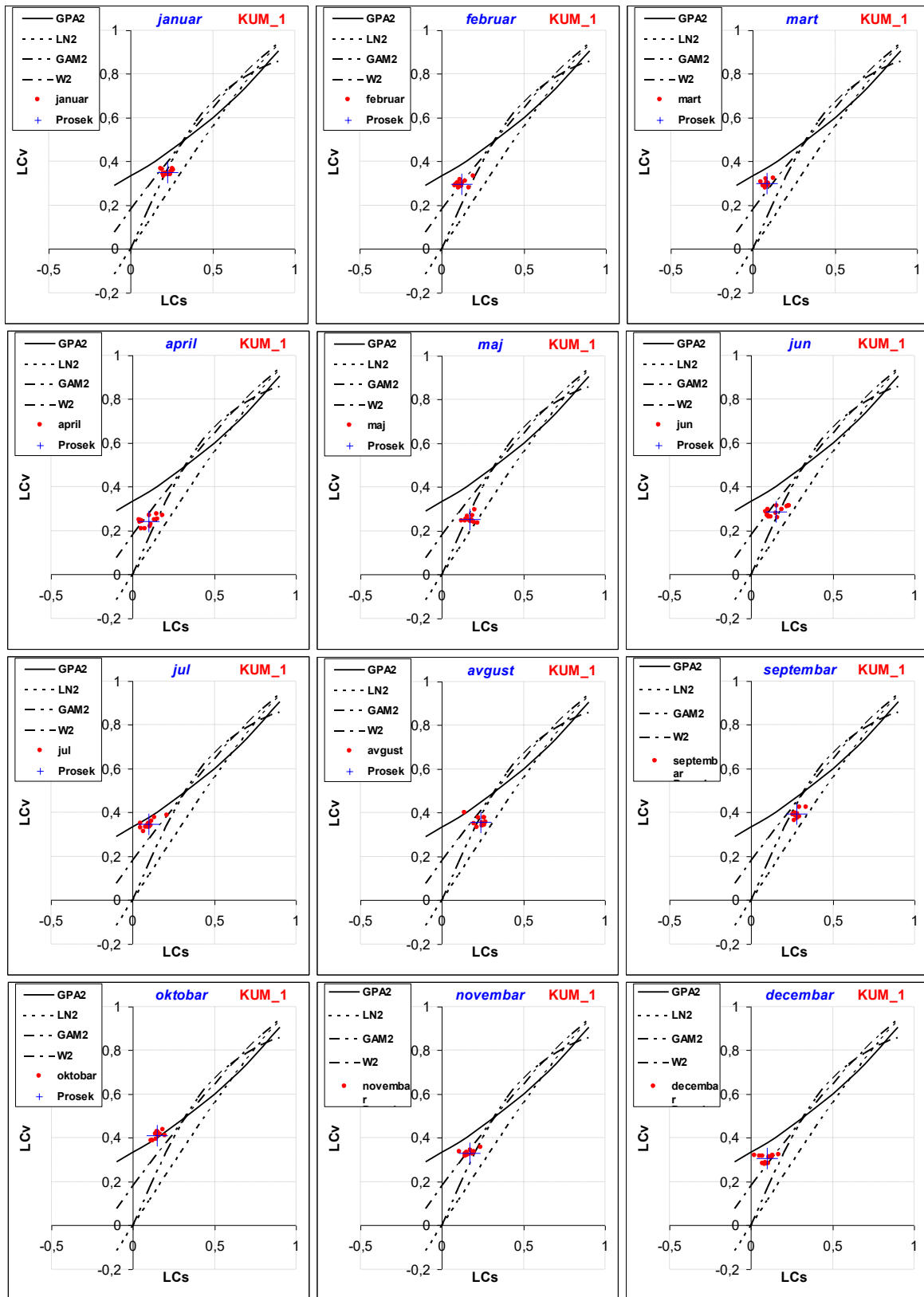


Slika 2. HS Mojsinje: Dijagrami LCv - LCs (levo) i LCK - LCs (desno), proticaji, sve vremenske skale.

Figure 2. HS Mojsinje: Diagrams LCv - LCs (left) and LCK - LCs (right), runoff, all aggregation scales.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

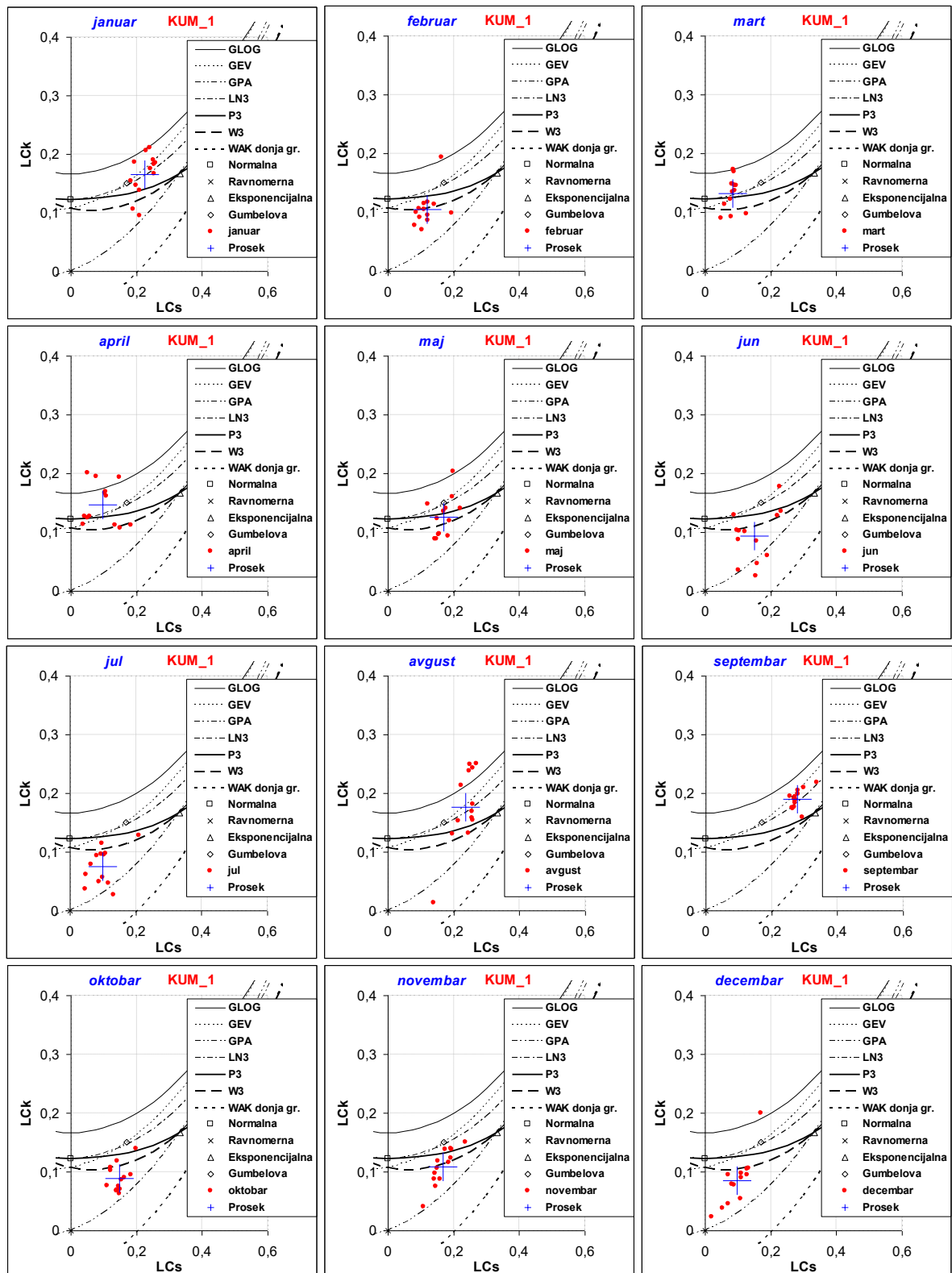
Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



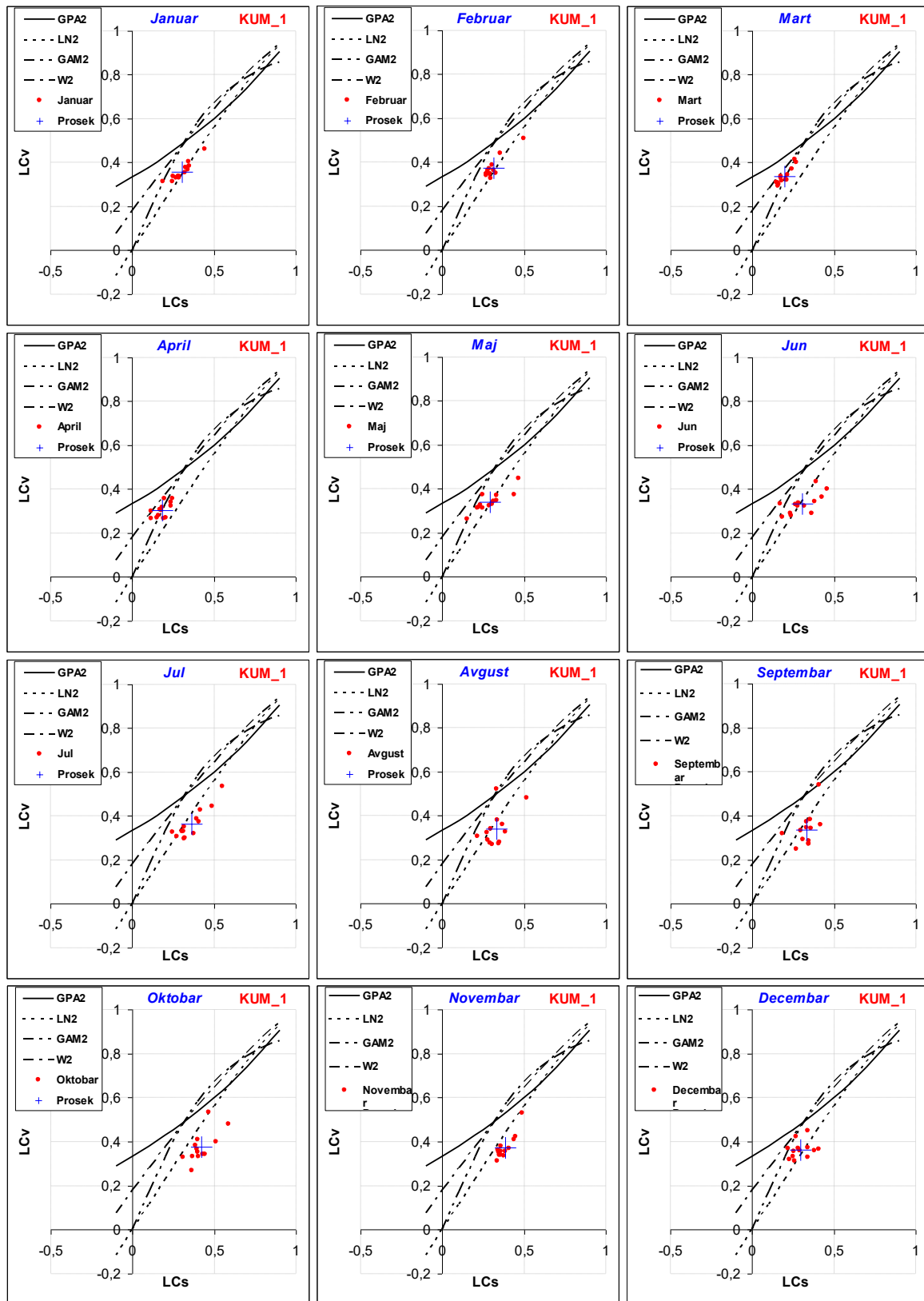
Slika 3. Dijagrami $LCv-LCs$ za padavine, vremenska skala 1 mesec, za sve stanice.
 Figure 3. Diagrams $LCv-LCs$, one month precipitation scales, all HS.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



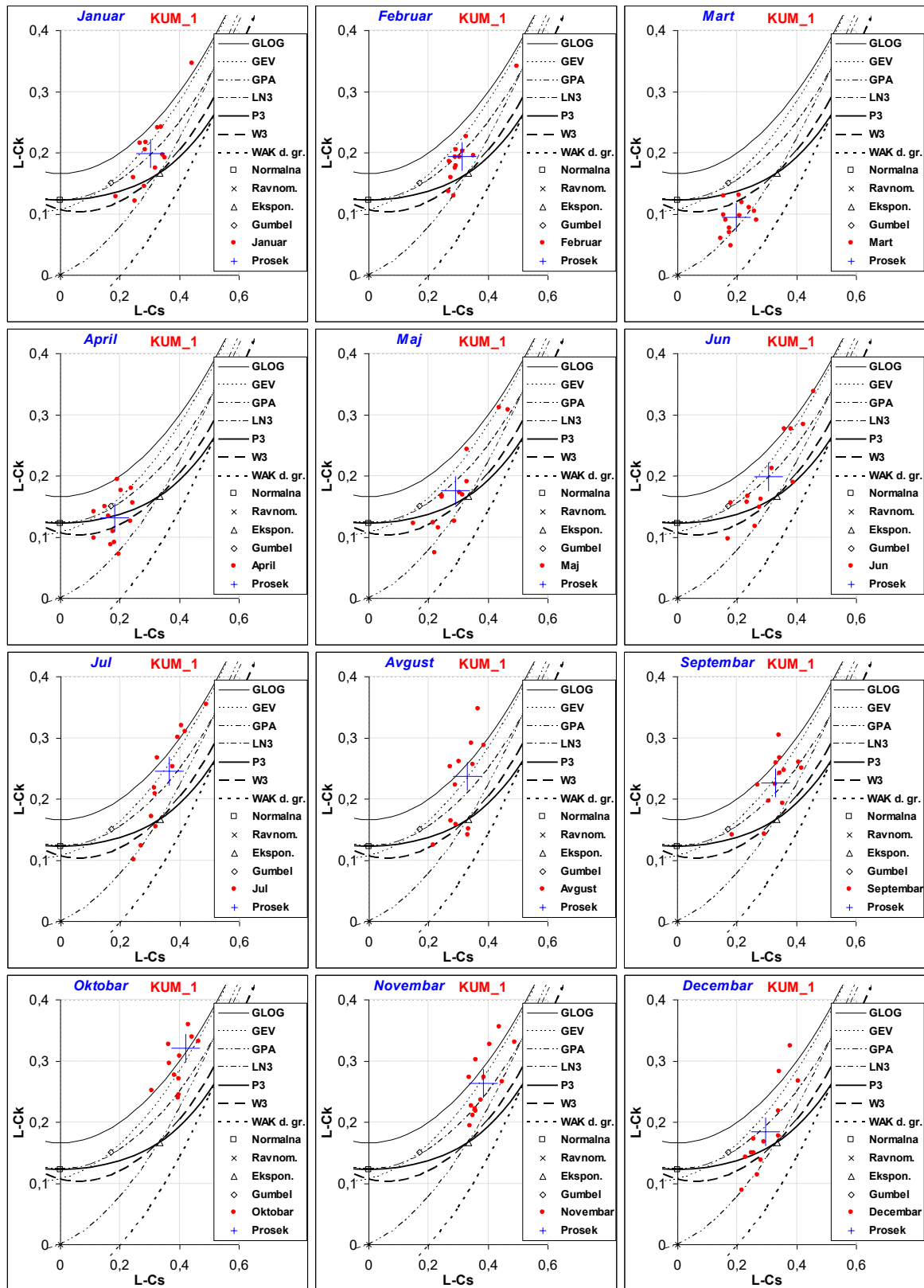
Slika 4. Dijagrami $LCK-LCs$ za padavine, vremenska skala 1 mesec, za sve stanice.
 Figure 4. Diagrams $LCK-LCs$, one month precipitation aggregation scales, all HS.



Slika 5. Dijagrami $LCv-LCs$ za proticaje, vremenska skala 1 mesec, za sve stanice.
 Figure 5. Diagrams $LCv-LCs$ for one month discharge aggregation scales, all HS, month wise.

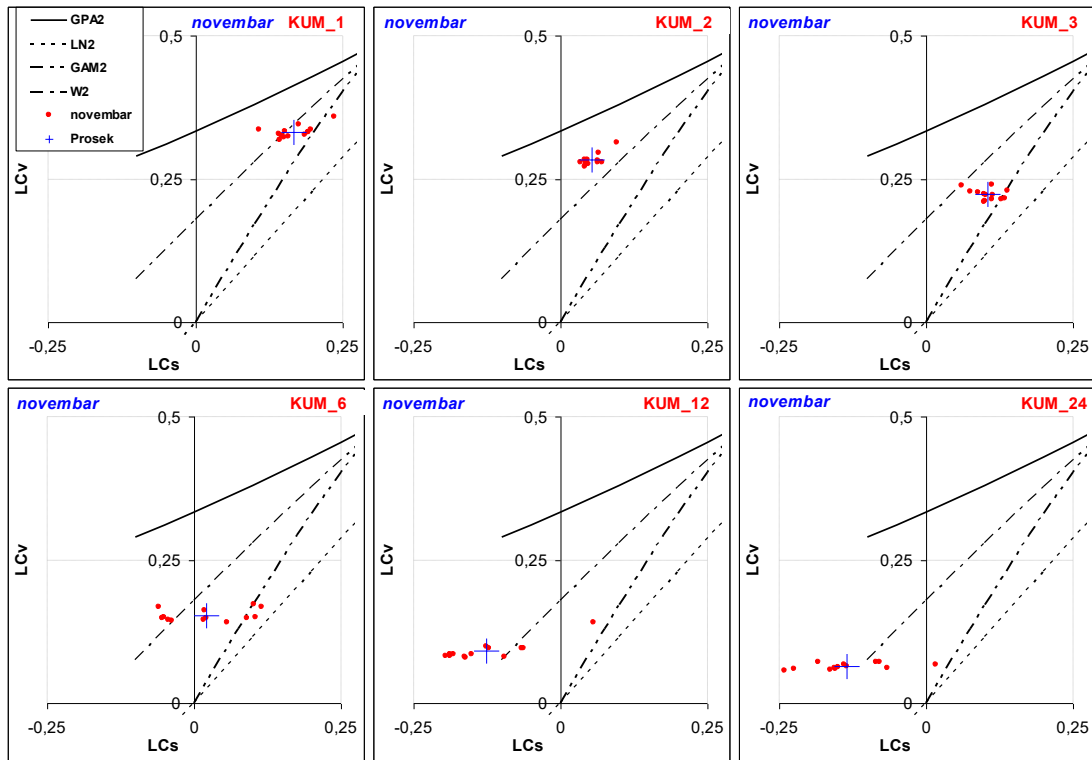
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

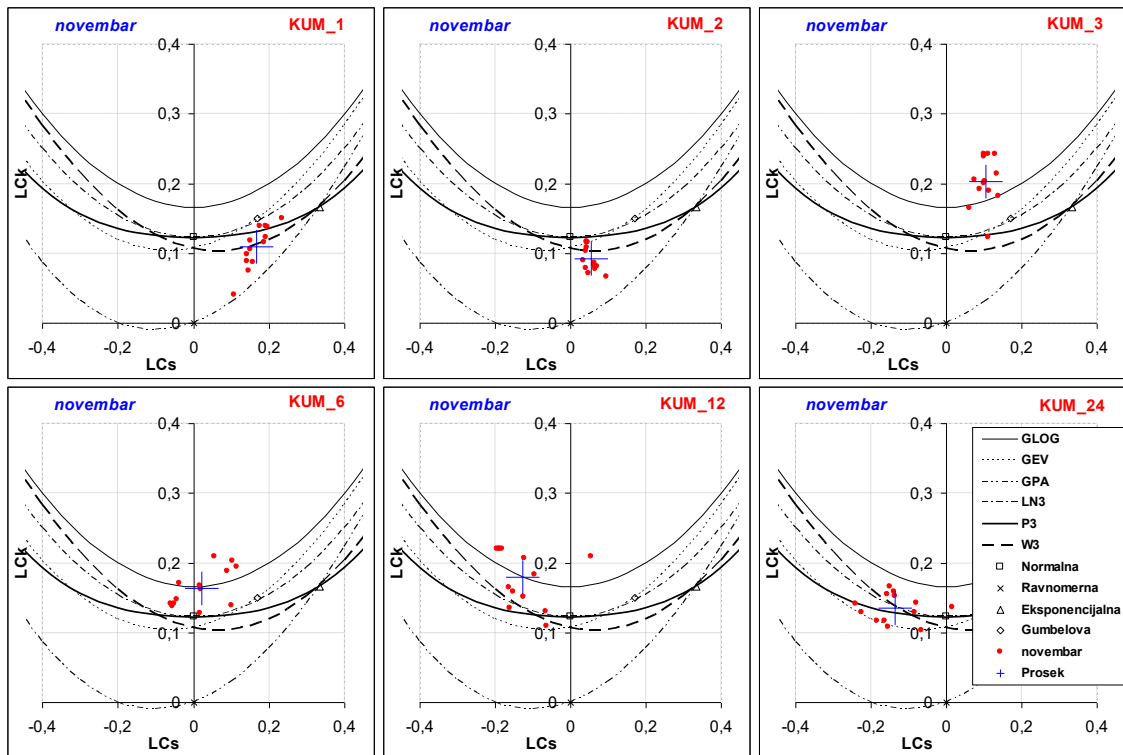


Slika 6. Dijagrami $L_{Ck}-L_{Cs}$ za proticaje, vremenska skala 1 mesec, za sve stanice.
 Figure 6. Diagrams $L_{Ck}-L_{Cs}$ for one month discharge aggregation scales, all HS.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

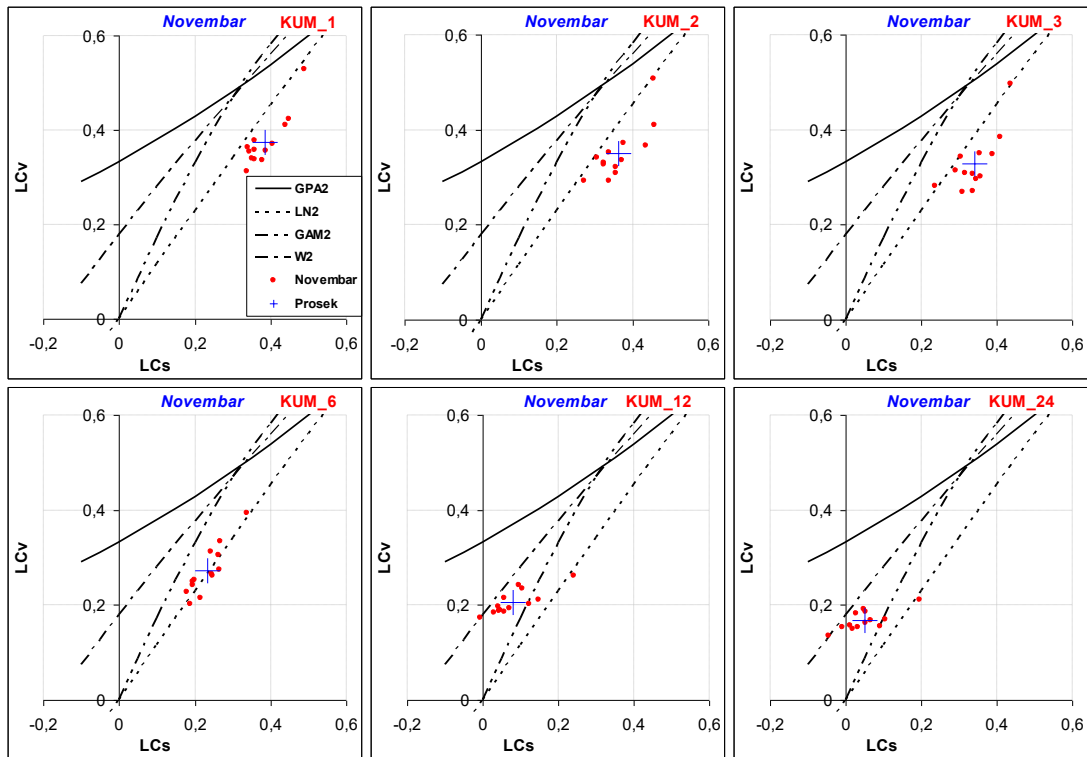


Slika 7. Dijagrami $LCv-LCs$ za novembar, za padavine, za sve periode agregacije.
Figure 7. Month of November: $LCv-LCs$ diagrams for precipitation, all aggregation scales.

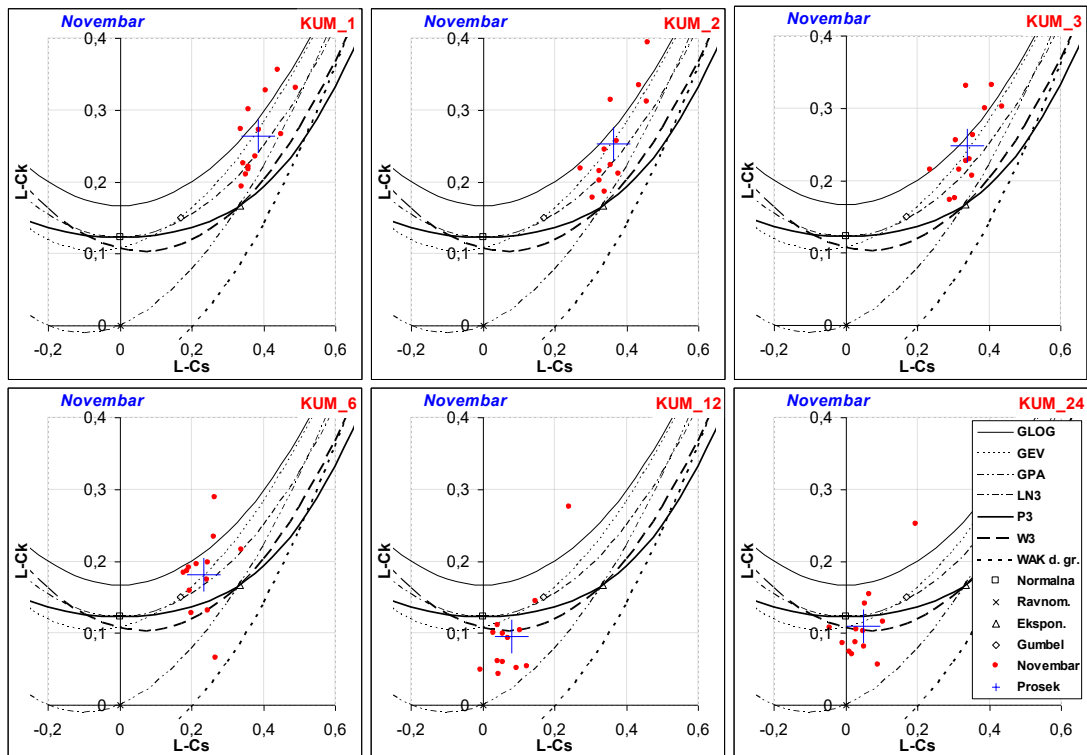


Slika 8. Dijagrami $LCK-LCs$ za novembar za padavine, za sve periode agregacije.
Figure 8. Month of November: $LCK-LCs$ diagrams for precipitation, all aggregation scales.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 9. Dijagrami $LCv-LCs$ za novembar za proticaje, za sve periode agregacije.
Figure 9. Month of November: $LCv-LCs$ diagrams for runoff, all aggregation scales.



Slika 10. Dijagrami $L-Ck-LCs$ za mesec novembar za proticaje, za sve periode agregacije.
Figure 10. Month of November: $L-Ck-LCs$ diagrams for runoff, all aggregation scales.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 2. Rangovi raspodela po kalendarskim mesecima na stanicama u slivu Južne Morave.
Periodi sumiranja protoka i padavina: 1, 2 i 3 meseca.

Table 2. Theoretical distribution ranks for calendar months in the Južna Morava river basin.
Runoff and precipitation aggregation periods: 1, 2, and 3 months.

Period sumiranja (mes)	Mesec	Protoci								Padavine							
		Rang dvoparametarskih raspodela			Rang troparametarskih raspodela				Rang dvoparametarskih raspodela			Rang troparametarskih raspodela					
		1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4		
1	Jan	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	GLG	LP3	GAM	W2	GPA2	GEV	LN3	P3	LP3		
	Feb	LN2	GAM	W2	LN3	LP3	GEV	GPA3	W2	GPA2	GAM	W3	LP3	P3	GEV		
	Mar	GAM	W2	GPA2	GPA3	W3	P3	LP3	W2	GPA2	GAM	LN3	P3	GEV	W3		
	Apr	GAM	W2	LN2	LP3	P3	LN3	W3	W2	GAM	GPA2	LN3	P3	GEV	GLG		
	Maj	LN2	GAM	W2	LN3	LP3	GEV	GPA3	GAM	LN2	W2	P3	W3	LN3	GEV		
	Jun	LN2	W2	GAM	LN3	GEV	W3	P3	W2	GAM	GPA2	LP3	W3	P3	GPA3		
	Jul	LN2	GPA2	W2	GEV	GLG	LN3	GPA3	GPA2	W2	GAM	W3	LP3	GPA3	P3		
	Avg	LN2	W2	GAM	GEV	GLG	LP3	LN3	GAM	W2	LN2	LN3	GEV	GLG	P3		
	Sep	LN2	W2	GPA2	LN3	GEV	LP3	GLG	GAM	W2	LN2	LN3	GEV	P3	LP3		
	Okt	LN2	GPA2	W2	GLG	GEV	LP3	LN3	GPA2	W2	GAM	W3	GPA3	P3	LN3		
	Nov	LN2	GPA2	W2	GEV	GLG	LN3	LP3	W2	GAM	GPA2	LP3	W3	P3	LN3		
	Dec	LN2	GAM	W2	LP3	GPA3	W3	P3	W2	GPA2	GAM	W3	GEV	P3	LN3		
2	Jan	LN2	GAM	W2	LN3	GEV	LP3	P3	GAM	W2	LN2	GLG	LP3	GEV	LN3		
	Feb	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	LP3	GLG	W2	GAM	GPA2	W3	LP3	P3	GEV		
	Mar	W2	GAM	LN2	LP3	W3	LN3	P3	W2	GPA2	GAM	GEV	P3	W3	LN3		
	Apr	GAM	W2	LN2	P3	W3	LN3	LP3	GAM	LN2	W2	GLG	LN3	LP3	GEV		
	Maj	W2	GAM	GPA2	LP3	W3	GEV	P3	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	P3		
	Jun	LN2	GAM	W2	LP3	LN3	P3	W3	GAM	W2	LN2	W3	GEV	P3	LN3		
	Jul	LN2	GAM	W2	LN3	W3	P3	GEV	W2	GAM	GPA2	GLG	LN3	P3	GEV		
	Avg	LN2	GAM	W2	GPA3	LP3	W3	LN3	W2	GPA2	GAM	W3	GEV	P3	LN3		
	Sep	LN2	GAM	W2	GLG	GEV	LP3	LN3	GAM	W2	LN2	P3	W3	GEV	LN3		
	Okt	LN2	GPA2	W2	GEV	GLG	LP3	LN3	GAM	W2	LN2	GLG	GEV	LN3	P3		
	Nov	LN2	GPA2	W2	GEV	GLG	LN3	LP3	W2	GPA2	GAM	LP3	W3	GEV	P3		
	Dec	LN2	GAM	W2	LN3	P3	W3	GEV	W2	GPA2	GAM	LP3	GPA3	W3	GEV		
3	Jan	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	P3	W3	LN2	GAM	W2	GLG	LN3	LP3	GEV		
	Feb	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	LP3	GLG	W2	GAM	LN2	GLG	LP3	LN3	P3		
	Mar	W2	GAM	GPA2	LP3	GEV	W3	LN3	W2	GPA2	GAM	W3	LP3	GEV	P3		
	Apr	GAM	W2	LN2	W3	P3	LN3	LP3	LN2	GAM	W2	LN3	GEV	LP3	P3		
	Maj	W2	GAM	GPA2	W3	LP3	GEV	LN3	GAM	W2	LN2	GEV	W3	LP3	LN3		
	Jun	W2	GAM	GPA2	LP3	W3	GEV	P3	W2	GAM	LN2	W3	GEV	LP3	P3		
	Jul	LN2	GAM	W2	P3	LP3	LN3	W3	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	P3	LN3		
	Avg	LN2	GAM	W2	LN3	P3	W3	LP3	W2	GPA2	GAM	LP3	W3	GEV	P3		
	Sep	LN2	GAM	W2	LP3	LN3	GEV	W3	W2	GPA2	GAM	W3	GEV	LP3	P3		
	Okt	LN2	W2	GAM	GEV	GLG	LP3	LN3	W2	GAM	LN2	GEV	LN3	P3	LP3		
	Nov	LN2	GPA2	W2	GEV	GLG	LN3	LP3	GAM	W2	LN2	GLG	LN3	GEV	P3		
	Dec	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	W3	P3	W2	GPA2	LN2	GLG	LN3	P3	W3		

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 3. Rangovi raspodela po kalendarskim mesecima na stanicama u slivu Južne Morave.
Periodi sumiranja protoka i padavina: 6, 12 i 24 meseca.

Table 3. Theoretical distribution ranks for calendar months in the Južna Morava river basin.
Runoff and precipitation aggregation periods: 6, 12, and 24 months.

Period sumiranja (mes)	Mesec	Protoci (Q)								Padavine (P)							
		Rang dvoparametarskih raspodela			Rang troparametarskih raspodela				Rang dvoparametarskih raspodela			Rang troparametarskih raspodela					
		1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4		
6	Jan	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	P3	W3	GAM	LN2	W2	W3	LP3	GEV	P3		
	Feb	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	LP3	GLG	LN2	GAM	W2	W3	P3	GPA3	LP3		
	Mar	GAM	W2	LN2	LP3	GEV	LN3	W3	W2	GAM	LN2	GLG	LN3	P3	GEV		
	Apr	GAM	W2	LN2	LP3	W3	GEV	P3	LN2	GAM	W2	LN3	GEV	P3	LP3		
	Maj	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	LN3	GAM	LN2	W2	LP3	GEV	P3	LN3		
	Jun	W2	GAM	GPA2	LP3	GEV	W3	LN3	GAM	W2	LN2	W3	GEV	LP3	GPA3		
	Jul	W2	GAM	LN2	LP3	GEV	W3	LN3	W2	LN2	GAM	GEV	LP3	W3	P3		
	Avg	W2	GAM	GPA2	LP3	GEV	W3	LN3	W2	LN2	GAM	LN3	P3	GLG	W3		
	Sep	W2	GAM	LN2	LP3	GEV	W3	LN3	W2	GAM	LN2	LN3	P3	LP3	W3		
	Okt	LN2	GAM	W2	LP3	P3	LN3	GEV	W2	LN2	GAM	GEV	LP3	P3	W3		
	Nov	LN2	GAM	W2	GEV	LN3	LP3	GLG	W2	GAM	LN2	GLG	LN3	P3	GEV		
	Dec	LN2	GAM	W2	LN3	GEV	P3	LP3	W2	LN2	GAM	W3	P3	LN3	GEV		
12	Jan	GAM	W2	LN2	GEV	LN3	LP3	P3	W2	LN2	GAM	P3	LN3	W3	GEV		
	Feb	GAM	LN2	W2	GLG	GEV	LN3	LP3	W2	LN2	GAM	GLG	LN3	P3	W3		
	Mar	GAM	LN2	W2	GLG	LN3	GEV	LP3	W2	LN2	GAM	GLG	LN3	P3	W3		
	Apr	GAM	W2	LN2	LP3	GEV	LN3	W3	LN2	W2	GAM	W3	GEV	LP3	LN3		
	Maj	GAM	W2	LN2	LP3	GEV	W3	LN3	LN2	GAM	W2	GEV	LP3	LN3	P3		
	Jun	GAM	W2	LN2	LP3	GEV	W3	LN3	LN2	GAM	W2	GEV	W3	LP3	LN3		
	Jul	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	LN3	W2	LN2	GAM	GEV	W3	LP3	P3		
	Avg	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	LN3	LN2	GAM	W2	GEV	W3	LN3	P3		
	Sep	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	LN3	W2	LN2	GAM	GEV	LP3	P3	W3		
	Okt	W2	GAM	LN2	LP3	W3	GEV	LN3	W2	LN2	GAM	LP3	P3	LN3	W3		
	Nov	W2	GAM	LN2	LP3	GEV	W3	LN3	W2	GPA2	LN2	GLG	W3	LN3	P3		
	Dec	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	W3	LN3	W2	LN2	GPA2	LN3	P3	GLG	W3		
24	Jan	W2	GAM	LN2	GEV	LN3	LP3	P3	W2	LN2	GAM	GEV	W3	LP3	P3		
	Feb	GAM	LN2	W2	GEV	LN3	P3	LP3	W2	LN2	GAM	GEV	W3	LP3	P3		
	Mar	GAM	W2	LN2	GLG	LN3	GEV	P3	W2	LN2	GAM	LN3	P3	LP3	W3		
	Apr	GAM	LN2	W2	GLG	LN3	GEV	P3	LN2	GAM	W2	LP3	LN3	P3	GEV		
	Maj	GAM	W2	LN2	GEV	LP3	LN3	P3	LN2	GAM	W2	LN3	LP3	P3	GEV		
	Jun	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	P3	LN2	GAM	W2	W3	LP3	P3	GEV		
	Jul	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	W3	LN2	W2	GAM	P3	LN3	LP3	W3		
	Avg	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	W3	LN2	GAM	W2	GLG	P3	LN3	LP3		
	Sep	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	W3	LN2	GAM	W2	GLG	LN3	P3	LP3		
	Okt	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	W3	W2	LN2	GAM	P3	LP3	LN3	GEV		
	Nov	W2	GAM	LN2	GEV	LP3	LN3	W3	W2	GPA2	LN2	P3	LP3	LN3	GEV		
	Dec	W2	GAM	LN2	GEV	LN3	LP3	P3	W2	LN2	GPA2	P3	LN3	W3	LP3		

Za ilustraciju promene statističkih pokazatelja empirijskih raspodela za jedan mesec, za sve stanice, a za različite vremenske skale, na Slikama 7 i 8 prikazani su dijagrami L -momenata za padavine za mesec novembar. Odgovarajući prikaz za proticaje nalazi se na slikama 9 i 10. Kod padavina je koeficijent varijacije približno isti za sve stanice, za vremenske skale od tri meseca i više, što nije slučaj kod proticaja. Problem u modeliranju raspodela, i kod padavina i kod proticaja, može predstavljati to što koeficijenti asimetrije prelaze u negativne vrednosti.

Konačno, sumarni rezultati rangiranja slaganja ispitivanih teorijskih raspodela sa osmotrenim podacima na izučavanom slivu, prikazani su u tabelama 2 i 3. Familija gama raspodela je istaknuta drugom bojom i za padavine i za proticaje, u odnosu na sve druge ispitivane raspodele. Za dvoparametarske raspodele, rezultati su prikazani do trećeg, a za troparametarske, do četvrtog mesta. Posebno su rangirane dvoparametarske raspodele, a posebno troparametarske. Kod padavina je očigledno da od dvoparametarskih raspodela, osim GAM2, treba računati i na W2, naročito za kraće vremenske skale. Za duže skale, dolazi u obzir i LN2. Kod proticaja se od dvoparametarskih raspodela izdvaja LN2, a sledi je GAM2. Kao što je već rečeno, kod troparametarskih raspodela se ne može uočiti pravilnost u izdvajanju/ponavljanju najboljih raspodela. Čini se, da u obzir treba uzeti još raspodela i u daljoj analizi dodatnim testovima ispitati njihovu prihvatljivost.

4 Zaključak

Preliminarni rezultati pogodnosti gama raspodele u odnosu na set drugih ispitivanih raspodela, pokazuju da je potrebno proširiti istraživanje i daljom analizom utvrditi redosled prihvatljivosti teorijskih raspodela. Tek posle dublje analize pogodnosti pojedinih raspodela, ne samo sa stanovišta rezultata tetsova saglasnosti, već i posmatrajući i sposobnost raspodele da aproksimira dati fizički proces, mogu se izvući neki opštiji zaključci.

Problem u modeliranju raspodela, i kod padavina i kod proticaja, može predstavljati i prelazak koeficijenata asimetrije u negativne vrednosti. Uopšte, ovde se ispituje veliki broj nizova (broj meseci \times broj vremenskih skala \times broj stanica), i mogući su brojni problemi u proračunu funkcija raspodela ([16], [10]). Troparametarske raspodele su svakako fleksibilnije nego dvoparametarske. Međutim, postoji opasnost da se pojave negativne vrednosti kvantila, u slučaju da njihova donja granica pada u negativne vrednosti. Slično, može se desiti da postoji i gornja granica i da je ona suviše nisko u odnosu na zabeležene najviše podatke. Za bolje rangiranje raspodela u pogledu saglasnosti sa empirijskim nizovima, potrebno je uključiti dodatne testove. Rezultati istraživanja upućuju i na eventualnu mogućnost promene proračunskog, prostornog i vremenskog pristupa problemu: posmatranje uzoraka prema skalama agregacije podataka, veličini slivova i prema sezonama, koje bi obuhvatile godišnja doba, periode vegetacije i slično.

U nastavku šireg istraživanja, pratićemo i razliku u jačini hidrološke suše prema SRI, na osnovu modela koji koristi SPI kao ulazne podatke, za profile gde je sa teorijskog stanovišta od Gama raspodele prihvatljivija druga raspodela. Svrha ovog razmatranja je minimiziranje mogućnosti donošenja pogrešnih odluka u aktiviranju mera zaštite voda i vodnih resursa na osnovu produkata hidroinformacionog sistema za ranu najavu suša.

Izjava

Rezultati istraživanja prikazani u radu su finansirani u okviru projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR37003 „Hidroinformacioni sistem za ranu najavu suša“.

Literatura

1. Angelidis P., Maris F., Kotsovinos N., Hrisanthou V. (2012), *Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions*, Water Resour. Manage. (2012) 26:2453-2473, DOI 10.1007/s11269-012-0026-0.
2. Blain G.C. (2012), *Revisiting the probabilistic definition of drought: strengths, limitations and an agrometeorological adaptation*, Bragantia, Campinas, v. 71, n. 1, p.132-141.
3. Blagojević B., Mihailović V., Gocić, M. Trajković S. (2013), *Streamflow Drought Index modelling through Standard Precipitation Index assisted by service-oriented paradigm*, Digital Conference Proceedings of the 1st CIGR Inter-Regional Conference on Land and Water Challenges – Bari (Italy), 10-14 September, 2013. Lamaddalena, N., Todorovic, M., Pereira, L.S. (Eds.). ISBN 2-85352-519-8. Conference e-proceedings USB\Full papers\Session 9\S9-2, 10 p.
4. Cancelliere A., Bonaccorso B. (2009) *Uncertainty analysis of the Standardized Precipitation Index in the presence of trend*, http://hydrologydays.colostate.edu/Papers_2009/Cancelliere_paper.pdf
5. Guttman N. B.(1999) *Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm*, J. Am. Water Resour. Assoc. 1999, 35, 311-322.
6. Hosking J.R.M. (1990), *Analysis and Estimation of distributions Using Linear Combinations of Order Statistics*. Journal of the Royal Statistical Societ, Series B (Methodological), 52, (1): 105–124.
7. Lorenzo-Lacruz J., Mor'an-Tejeda E., Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J. I. (2013), *Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 119–134, 2013www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/119/2013/doi:10.5194/hess-17-119-2013
8. Kroll C.N., Vogel R.M. (2002), *Probability Distribution of Low Streamflow Series in the United States*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 7, No. 2, March 1, 2002. ASCE, p.137-146
9. McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993), *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, In: 8th Conference on Applied Climatology, 17–22 January, Anaheim, California, pp. 179–184.
10. Mihailovic V. (2012), *Složena analiza hidroloških vremenskih serija u cilju modeliranja ekstremnih događaja*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.
11. Mishra, A.K., Singh, V.P. (2010), *A review of drought concepts*, J. Hydr. 391 , 202–216.
12. Paulo A. A., Pereira L. S., Matias P. G. (2003), *Analysis of local and regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the standardized precipitation index*, in G. Rossi, A. Cancelliere, L. S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, and A. Zairi (eds.), Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions, Kluwer, pp. 55–78.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

13. Shukla, S., Wood A. W. (2008), *Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought*, Geophys. Res. Lett., 35L02405, doi:10.1029/2007GL032487.
14. Texas A&M Research Foundation (2007) *Drought Monitoring Index for Texas*, Final Technical Report submitted by the Texas A&M Research Foundation (RF- 468511) to the Texas Water Development Board on behalf of the project investigators (June 30, 2007).
15. Vicente-Serrano, S.M. (2006) *Differences in Spatial Patterns of Drought on Different Time Scales: An Analysis of the Iberian Peninsula*, Water Resources Management, 20, 37-60.
16. Vicente-Serrano, S., López-Moreno, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., and Morán-Tejeda, E. (2012) *Accurate Computation of a Streamflow Drought Index*, J. Hydrol. Eng., 17(2), 318–332.
17. Yue S., Hashino M.(2007), *Probability distribution of annual, seasonal and monthly precipitation in Japan*, Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 52(5) October 2007, p.863-877
18. RHMZS http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/uslovi_vlaznosti.php

Pirsonov sistem raspodela i njegova primena u hidrologiji

Marija Radičević¹
Vesna Jevremović²
Jasna Plavšić³
Dragutin Pavlović⁴

APSTRAKT: Nalaženje raspodele koja pravilno prati često kompleksno ponašanje podataka je značajan problem u statistici jer je potrebno naći raspodelu koja će zadovoljiti širok raspon asimetrije i spljoštenosti. Pirsonov sistem raspodela odgovara podacima koji su vidno asimetrični. Ovaj sistem obuhvata 12 neprekidnih raspodela koji proističu iz zajedničke opšte diferencijalne jednačine sa četiri parametra, dok se pojedini tipovi dobijaju za određene karakteristične vrednosti prarametara. U ovom radu prikazane su teorijske osnove Pirsonovog sistema raspodela, date su praktične preporuke za njegovu primenu i prikazani su primeri primene u statističkoj analizi velikih voda u hidrologiji na većem broju hidroloških stanica u Srbiji. U ovoj analizi akcenat je stavljen na poređenje rezultata dobijenih iz opšteg Pirsonovog sistema i primenom raspodele tipa III koja se standardno koristi u hidrološkoj praksi.

Ključne reči: Pirsonov sistem raspodela, statistička analiza, velike vode, maksimalni godišnji protoci, Pirsonova raspodela III tipa

The Pearson distribution system and its application in hydrology

ABSTRACT: Finding a distribution that adequately describes a complex data behaviour is an important problem in statistics because it is necessary to find a distribution applicable to a range of skews and kurtoses. The Pearson distribution system is suitable for highly skewed data. This system comprises 12 continuous distributions that originate from a joint general differential equation with four parameters, while the individual types are obtained for some characteristic parameter values. This paper presents the theoretical basis of the Pearson distribution system, gives recommendations for its application and also presents the examples of its application in statistical analysis of floods in hydrology at a number of hydrologic stations in Serbia. The emphasis is put on comparison of the results obtained from the general Pearson system to the results of the standard procedure in hydrology in which the type III distribution is often applied.

Keywords: Pearson distribution system, statistical analysis, floods, annual maximum floods, Pearson type III distribution

¹ Marija Radičević, diplomirani matematičar, student master studija, Univerzitet u Beogradu – Matematički fakultet, marijar@matf.bg.ac.rs

² Dr Vesna Jevremović, v. prof., Univerzitet u Beogradu – Matematički fakultet, v_jevremovic@matf.bg.ac.rs

³ Dr Jasna Plavšić, v. prof., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, jplavsic@grf.bg.ac.rs

⁴ Dr Dragutin Pavlović, docent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, epavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Značajan problem u statistici i u oblastima koje je koriste kao alat jeste nalaženje raspodele koja na prihvatljiv način prati karakteristike podataka. Još krajem XIX veka bilo je poznato kako modelirati posmatrane podatke tako da im odgovaraju prva dva teorijska momenta neke raspodele, ali pretpostavljajući simetriju te raspodele. Mnogi naučnici su došli do zaključka da raspodela nije dovoljno objašnjena na taj način. Međutim, nije bilo poznato kako konstruisati raspodelu verovatnoća u kojoj su asimetrija i spljoštenost netipični. Potrebno je bilo naći raspodelu koja će zadovoljiti širok raspon osobina. Sa ovim problemom se istraživači i danas sreću – kako u praktičnim, tako i u teorijskim razmatranjima.

Mnoge asimetrične raspodele i raspodele sa netipičnom spljoštenošću bile su poznate još u XIX veku, samo pod drugačijim nazivima nego danas. Pirsonov sistem raspodela upravo odgovara podacima koji su vidno asimetrični. Ovaj sistem raspodela predstavlja sistem od 12 neprekidnih raspodela. Prvi radovi u vezi sa ovim sistemom su objavljeni od strane Karla Pirsona⁵ 1895. godine i tada su uvedena 4 tipa ovih raspodela kao dopuna normalnoj raspodeli, koja je prvobitno numerisana brojem V. Ovaj sistem je proširen između 1901. i 1916. godine u mnogobrojnim radovima vezanim za biostatistiku.

U prvobitnom radu, Pirson je tipove klasifikovao na osnovu oblasti definisanosti raspodela, u zavisnosti od toga da li je raspodela definisana na ograničenom intervalu, pozitivnom delu realne prave ili na celoj realnoj pravoj. U drugom radu, 1901. godine, Pirson je predefinisao tip V, koji je prvobitno obuhvatao samo normalnu raspodelu, i uveo još jedan tip raspodele u sistem. Nakon toga, Pirson uvodi specijalne tipove i podtipove raspodela čime je dobijeno ukupno 12 tipova raspodela.

U ovom radu prikazane su teorijske osnove Pirsonovog sistema raspodela, date su praktične preporuke za njegovu primenu i prikazani su primeri primene u statističkoj analizi velikih voda u hidrologiji, na podacima sa izabranih hidrometrijskih stanica u republici Srbiji.

2 Pirsonov sistem raspodela

Pirsonov sistem je parametarska familija raspodela čija se funkcija gustine može lako izraziti u eksplicitnom obliku. Osobine ovog sistema čine ga pogodnim i za teorijske i za empirijske probleme. Gustine svih tipova raspodela Pirsonovog sistema se dobijaju kao rešenje diferencijalne jednačine:

$$\frac{p'(x)}{p(x)} = \frac{x - a}{b_0 + b_1x + b_2x^2}, \quad (1)$$

gde je $p(x)$ funkcija gustine, a a, b_0, b_1 i b_2 parametri raspodele. Oblik raspodele zavisi od vrednosti parametara.

Iz formule (1) transformacijama i integraljenjem mogu se dobiti jednačine koje važe za sve tipove raspodela iz Pirsonovog sistema. Te jednačine povezuju momente i parametre raspodele. Odatle sledi da se mogu odrediti momenti nižih redova u zavisnosti od parametara a, b_0, b_1, b_2 raspodele i momenata $m_0 = 1$ i m_1 , ali takođe, mogu se izraziti i parametri raspo-

⁵ Carl Pearson, 1857-1936, engleski matematičar i biostatističar

dele u odnosu na momente raspodele. Pošto se centralni momenti⁶ mogu izraziti preko momenta raspodele i pošto je $\mu_1 = 0$, parametre raspodele možemo izraziti i preko centralnih momenta raspodele. Zamenom $n = 0, 1, 2, 3$ u tako dobijenu jednačinu i sređivanjem dobijenog sistema, dobija se da su parametri Pirsonovog sistema u direktnoj vezi sa centralnim momentima (μ_2, μ_3, μ_4) raspodele na sledeći način:

$$b_1 = a = -\frac{\sqrt{\mu_2\beta_1(\beta_2+3)}}{10\beta_2-12\beta_1-18}, \quad b_0 = -\frac{\mu_2(4\beta_2-3\beta_1)}{10\beta_2-12\beta_1-18}, \quad b_2 = -\frac{2\beta_2-3\beta_1-6}{10\beta_2-12\beta_1-18} \quad (2)$$

gde su $\beta_1 = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^2}$ i $\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}$ kvadrat koeficijenta asimetrije i koeficijent spljoštenosti, respektivno⁷. Ova veza se može koristiti u konkretnim situacijama.

2.1 Tipovi Pirsonove raspodele

Oblik Pirsonove raspodele zavisi od vrednosti parametara a, b_0, b_1, b_2 . Ako a nije rešenje jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$ i ako je $x = a$, gustina je konačna i $p'(x)$ je nula. Ako je $x \neq a$ i $p(x) \neq 0$, onda je i $p'(x) \neq 0$.

Pošto je $p(x)$ gustina raspodele, onda moraju biti zadovoljeni uslovi da je $p(x) \geq 0$ i $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$. Iz (1) sledi da $p(x) \rightarrow 0$ kada $x \rightarrow \pm\infty$, pa i $p'(x) \rightarrow 0$ kad $x \rightarrow \pm\infty$. Ukoliko prethodno ne važi, onda nije zadovoljeno da je $p(x) \geq 0$ i potrebno je ograničiti skup vrednosti x -a na one gde je $p(x) > 0$, a inače definisati da je $p(x) = 0$.

Rešenje jednačine (1) zavisi od prirode korena jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$, a različiti koreni odgovaraju različitim tipovima raspodele.

Ako je $b_1 = b_2 = 0$, onda se iz jednačine (1) i iz odgovarajućih uslova za gustinu raspodele, dobija da je u pitanju normalna ili Gausova raspodela sa očekivanjem a i disperzijom $-b_0$. Normalna raspodela je granična raspodela svih tipova Pirsonovog sistema raspodele.

U nastavku će biti prikazano svih 12 tipova Pirsonovog sistema, sa formulama za njihovu gustinu i nekim osnovnim karakteristikama. Formule za gustine koje će biti prikazane se dobijaju rešavanjem jednačine (1) i sređivanjem tako dobijenog izraza uvođenjem novih oznaka radi kraćeg zapisa.

Tip I. Pirsonovoj raspodeli tipa I odgovaraju realni koreni jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$ koji su različitog znaka⁸. Rešavanjem jednačine (1) u tom slučaju i korišćenjem osobina gustine raspodele, dobija se da je gustina Pirsonove raspodele tipa I:

$$p(x) = \frac{\alpha^{m_1}\beta^{m_2}}{(\alpha + \beta)^{m_1+m_2+1}B(m_1 + 1, m_2 + 1)} \left(1 + \frac{x}{\alpha}\right)^{m_1} \left(1 - \frac{x}{\beta}\right)^{m_2}, \quad -\alpha \leq x \leq \beta. \quad (3)$$

Ako su m_1 i m_2 strogo pozitivni, gustina raspodele je unimodalna⁹ i uzima vrednost 0 na krajevima oblasti definisanosti. Ako je jedan od m -ova između 0 i 1, kriva zaklapa oštar

⁶ Ako je X slučajna veličina, njen n -ti centralni momenat je $\mu_n = E(X - E(X))^n, (\forall n)$.

⁷ Pri ovako navedenim formulama koeficijenta asimetrije i koeficijenta spljoštenosti, vrednosti ovih koeficijenata za normalnu raspodelu su redom 0 i 3.

⁸ Koreni navedene jednačine se najčešće označavaju sa α i β .

ugao sa x -osom. Ako je tačno jedno m manje od 0, onda kriva ima beskonačnu ordinatu i ima oblik slova J. Ako su oba m -a manja od nule, onda kriva ima oblik slova U. Ovaj tip raspodele predstavlja generalizaciju beta raspodele.

Tip II. Pirsonova raspodela tipa II je specijalan slučaj raspodele tipa I. Ovaj tip raspodele se dobija kada se u jednačini (1) pretpostavi da je parametar $b_1 = 0$, a parametri b_0 i b_2 su različitog znaka. Na sličan način kao u prethodnom slučaju dobija se da je funkcija gustine Pirsonove raspodele tipa II:

$$p(x) = \frac{1}{\alpha B\left(m+1, \frac{1}{2}\right)} \left(1 - \frac{x^2}{\alpha^2}\right)^m, \quad -\alpha \leq x \leq \alpha. \quad (4)$$

Ova raspodela je simetrična. Ako je $m > 0$ raspodela je unimodalna, a ako je $m < 0$ onda raspodela ima U oblik. Ako je $m = 0$, dobija se gustina koja odgovara uniformnoj raspodeli na segmentu $[-\alpha, \alpha]$.

Raspodela tipa II je korišćena u formiranju tabele Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova¹⁰ kada je broj elemenata serije manji od 100.

Tip III. Ako je u jednačini (1) $b_2 = 0$ (i $b_1 \neq 0$), dobija se Pirsonova raspodela tipa III. Funkcija gustine raspodele tipa III je:

$$p(x) = \frac{\beta^{m+1} \alpha^m}{e^{\alpha\beta} \Gamma(m+1)} \left(1 + \frac{x}{\alpha}\right)^m e^{-\beta x}, \quad (5)$$

za $x \in (-\alpha, +\infty)$ ako je $\alpha > 0$, odnosno za $x \in (-\infty, -\alpha)$ ako je $\alpha < 0$.

Raspodela je unimodalna ako je $m > 0$, a ima J oblik ako je $m < 0$. Gama raspodela spada u Pirsonovu raspodelu tipa III.

Tip IV. Ako je diskriminanta jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$ negativna, onda ta jednačina nema realne korene. Jedan od takvih slučajeva odgovara Pirsonovoj raspodeli tipa IV. Ovaj tip raspodele se najčešće koristi u sledećem obliku:

$$p(x) = K \left(1 + \frac{x^2}{\omega^2}\right)^m e^{-c \cdot \arctan \frac{x}{\omega}}, \quad x \in \mathbb{R} \quad (6)$$

gde je K normirajuća konstanta koja se dobija iz uslova da je $p(x)$ gustina raspodele. U opštem slučaju teško je odrediti konstantu K numeričkim putem. Oblast definisanosti ove raspodele je cela realna prava i raspodela je unimodalna. Jednačina (6) dovodi do komplikovanog računa ako se pokuša izračunavanje funkcije raspodele. Najlakše je u jednačini (2) teorijske momente zameniti stvarnim momentima iz konkretnih podataka i tako dobiti parametre raspodele.

⁹ Unimodalna raspodela je raspodela koja ima tačno jedan maksimum.

¹⁰ Ako postoji značajno odstupanje raspodele od normalne ili ako podaci nisu numerički, onda se ne može primeniti Pirsonov koeficijent korelacije. Tada se primenjuje Spirmanov koeficijent korelacije koji se bazira na rangovima podataka.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

Tip V. Pirsonova raspodela tipa V se dobija kada su koreni jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$ međusobno jednaki, tj. kada je $b_1^2 = 4b_0b_2$. Gustina Pirsonove raspodele tipa V je:

$$p(x) = \frac{(ma)^{m-1}}{\Gamma(m-1)} x^{-m} e^{-\frac{ma}{x}}, 0 \leq x < +\infty. \quad (7)$$

Slično se dobija za $-\infty < x \leq 0$. Ova raspodela je unimodalna.

Tip VI. Ako su koreni jednačine $b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$ realni i istog znaka onda je u pitanju Pirsonova raspodela tipa VI. Gustina Pirsonove raspodele tipa VI je:

$$p(x) = \frac{\omega^{m_1-m_2-1}}{B(m_1-m_2-1, m_2-1)} x^{-m_1} (x-\omega)^{m_2}, x \in (\omega, +\infty). \quad (8)$$

Slično se dobija za $x \in (-\infty, \omega)$. Jednostavnom transformacijom $y = \frac{a}{x}$ se iz ove raspodele dobija Pirsonova raspodela tipa I. Ako je $m_2 > 0$, onda je raspodela unimodalna. Ako je $m_2 < 0$, onda raspodela ima J oblik.

Tip VII. Ako su parametri u jednačini (1) takvi da $b_1 = a = 0$, $b_0 > 0$ i $b_2 > 0$, onda je u pitanju Pirsonova raspodela tipa VII. Ovaj tip raspodele se razlikuje od raspodele tipa II jer su kod nje parametri b_0 i b_2 bili različitog znaka. Gustina raspodele tipa VII je:

$$p(x) = \frac{1}{\alpha B\left(\beta - \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{\alpha^2}\right)^{-\beta}, x \in R. \quad (9)$$

Ovom tipu raspodela pripada Studentova t-raspodela. Kada je $\alpha = n^2$, a $\beta = \frac{n+1}{2}$, dobija se Studentova raspodela sa n stepeni slobode.

Tip VIII. Ako su u jednačini (1) parametri takvi da važi da je $b_0 = 0$ i $b_1 > 0$ dobija se Pirsonova raspodela tipa VIII. Funkcija gustine Pirsonove raspodele tipa VIII je:

$$p(x) = \frac{(-\alpha)^{\frac{a}{b_1}-1}}{B\left(1 - \frac{a}{b_1}, 2 + \frac{a}{\alpha}\right)} \left(1 + \frac{x}{\alpha}\right)^{1+\frac{a}{\alpha}}, 0 \leq x \leq \alpha. \quad (10)$$

Tip IX. Ako se u jednačini (1) zameni da je $b_0 = 0$ i $b_1 < 0$, dobija se raspodela tipa IX. Jednačina (1) će imati isti oblik kao i kod prethodnog tipa raspodele (imati u vidu da je znak parametra b_1 suprotan u odnosu na prethodni slučaj). Samim tim i funkcija gustine će biti istog oblika.

Tip X. Ako su u jednačini (1) b_1 i b_2 jednaki nuli, dobija se da je gustina raspodele:

$$p(x) = \frac{1}{\omega^{1+\frac{a}{\omega}} \Gamma\left(1 + \frac{a}{\omega}\right)} x^{\frac{a}{\omega}} e^{-\frac{x}{\omega}}, 0 \leq x < +\infty. \quad (11)$$

Tip XI. Ako su u jednačini (1) b_0 i b_1 jednaki nuli, dobija se Pirosonova raspodela tipa XI čija je gustina:

$$p(x) = (\omega - 1)b^{\omega-1}x^{-\omega}, b \leq x < +\infty, \quad (12)$$

gde je $b > 0$ parametar položaja i zavisi od konkretnih podataka.

Tip XII. Raspodela tipa XII je specijalan slučaj raspodele tipa I, kada je $10\beta_2 - 12\beta_1 - 18$. Tada se ne mogu koristiti izrazi koje povezuju momente i parametre raspodele. Jednačina (3) se može napisati na sledeći način:

$$p(x) = \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^m}{(\alpha + \beta)B(m + 1, 1 - m)} \left(\frac{1 + \frac{x}{\alpha}}{1 - \frac{x}{\beta}}\right)^m, -\alpha \leq x \leq \beta, |m| < 1.$$

3 Praktična primena Pirsonove raspodele

Za praktičnu primenu Pirsonove raspodele od koristi može da bude dijagram odnosa koeficijenata asimetrije i spljoštenosti dat na slici 1, koji prikazuje oblasti koje odgovaraju određenim tipovima Pirsonove raspodele. Prikazano je samo prvih sedam raspodela pošto preostalih pet raspodela predstavljaju podtipove ovih raspodela. Može se primetiti da Pirsonovim raspodelama tipa I, IV i VI odgovaraju oblasti, dok ostalim raspodelama odgovaraju linije na dijagramu i one se zbog toga nazivaju prelaznim tipovima (na x -osi je kvadrat koeficijenta asimetrije da bi slika bila preglednija).

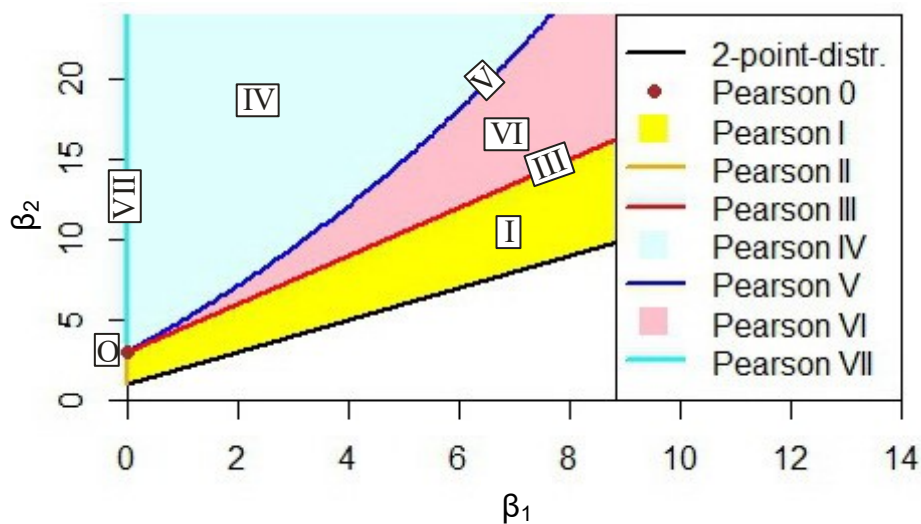
Da bi se nekim podacima dodelio neki od tipova Pirsonove raspodele, potrebno je proći kroz sledeće korake:

- 1) određivanje numeričkih vrednosti prva 4 momenta posmatranih podataka,
- 2) određivanje numeričkih vrednosti parametara Pirsonove raspodele koristeći vezu između momenata i parametara raspodele u jednačini (2),
- 3) koristeći dobijene parametre (i/ili dijagram na slici 1) odrediti kojem tipu Pirsonove raspodele podaci pripadaju,
- 4) zamenom vrednosti parametara u jednačini konkretne raspodele dobija se tražena raspodela.

Korisne informacije prilikom povezivanja podataka sa Pirsonovim sistemom:

- Tipovi Pirsonovih raspodela se spajaju u geometrijskom smislu. Na primer, tip V može biti posmatran kao prelaz između tipova IV i VI;
- Podaci moraju imati konačni momenti bar četvrtog reda;
- Kada se ne može jasno odrediti koji tip raspodele odgovara podacima potrebno je primeniti neku transformaciju momenata, kao što je na primer Šepardova korekcija;

- Često se integral Pirsonove krive ne može rešiti numeričkim putem, pa se tada primenjuju aproksimacije.



Slika 1. Oblasti primene pojedinih tipova Pirsonove raspodele

Radi lakšeg rada sa Pirsonovim sistemom raspodela u konkretnim situacijama mogu se koristiti razni programski paketi koji imaju ugrađene funkcije za rad sa ovim sistemom. U ovom radu korišćeno je programsko okruženje *R* i paket *PearsonDS* za rad sa Pirsonovim sistemom raspodela. Ovaj paket omogućava implementaciju Pirsonovog sistema raspodela, uključujući gustinu, funkciju raspodele, kvantile i slučajan uzorak iz određene raspodele, kao i prilagođavanje metodom momenata i metodom maksimalne verodostojnosti za prvih 7 tipova Pirsonovog sistema.

Za razmatrane podatke, potrebno je najpre testirati njihovu slučajnost¹¹. Postoji veliki broj testova za testiranje slučajnosti. Trebalo bi na podatke primeniti više od jednog testa, a primenjeni testovi bi trebalo da se baziraju na različitim svojstvima uzorka. Ako su *p*-vrednosti svih testova velike, znači da se prihvata nulta hipoteza o slučajnosti uzorka.

Kod Pirsonovog sistema raspodela parametri raspodele se određuju na osnovu prva četiri momenta: srednje vrednosti, varijanse, koeficijenta asimetrije i koeficijenta spljoštenosti. Koristeći funkciju *empMoments()* iz paketa *PearsonDS* mogu se izračunati empirijski momenti u konkretnom primeru. Primenom dobijenih momenata, metodom momenata može se odrediti tip i parametri Pirsonove raspodele uz pomoć funkcije *pearsonFitM()*.

Drugi način za određivanje parametara raspodele je metodom maksimalne verodostojnosti. Funkcija *pearsonMSC()* iz paketa *PearsonDS* vrši procenu parametara svih tipova Pirsonove raspodele numeričkom optimizacijom. Pored računanja logaritma funkcije verodostojnosti, ova funkcija daje i vrednosti drugih kriterijuma selekcije koji koriste logaritam funkcije verodostojnosti, kao i odgovarajuće parametre za svaki tip Pirsonove raspodele. Poslednji deo izlaza ove funkcije prikazuje koji tip raspodele je najbolji prema svakom od kriteriju-

¹¹ Ako je u pitanju prost slučajan uzorak redosled elemenata se može menjati, a ako uzorak nije slučajan, bitan je redosled elemenata u uzorku i u pitanju je vremenska serija.

ma¹². Kada su poznati tip raspodele i njeni parametri može se odrediti funkcija gustine, izrazi za funkciju raspodele i proračun kvantila kao i crtati odgovarajući dijagrami verovatnoće.

Na kraju je potrebno testirati saglasnost empirijske raspodele i dobijene raspodele. U ovom radu primenjen je test Kolmogorov-Smirnova, kojim se utvrđuje da li se raspodela populacije iz koje potiče uzorak (podaci) može opisati teorijskom raspodelom sa prethodno dobijenim parametrima.

4 Analiza velikih voda u Srbiji pomoću Pirsonovog sistema

Hidrološka praksa u analizi velikih voda na našim prostorima preporučuje upotrebu Gumbelove, log-normalne i log-Pirson III raspodele za analizu maksimalnih godišnjih protoka. Osvrt na ovu praksu i preporuke najnovijeg datuma dali su Blagojević i sar. (2014). Cilj ovog rada je da se ispita mogućnost primene Pirsonovog sistema raspodela za analizu velikih voda u Republici Srbiji.

Imajući u vidu osnovna svojstva Pirsonovog sistema, očekuje se da se njegova četvoroparametarska forma može prilagoditi raznovrsnim skupovima podataka. Podaci koji se koriste moraju ispuniti pretpostavke o slučajnosti i homogenosti. Pored toga, u hidrologiji se smatra da raspodela najvećih ekstremnih vrednosti ne bi trebala da bude ograničena sa gornje strane. U Pirsonovom sistemu raspodele tipa III, IV, V i VI nisu ograničene sa gornje strane (za pozitivne vrednosti promenljive i pozitivne parametre razmere).

4.1 Podaci i metodologija

Početni skup podataka čine nizovi maksimalnih godišnjih protoka sa 67 hidrometrijskih stanica u periodu do 2012. godine, koje je obezbedio Republički hidrometeorološki zavod Srbije. Za sve stanice je testirana slučajnost nizova testovima Wold-Wolfovitz i testom tačaka zaokreta. Neparametarskim testovima Mann-Whitney i Mann-Kendall testirana je homogenost i prisustvo monotonog trenda. Sve stanice za koje su nulte hipoteze o slučajnosti i homogenosti odbačene na pragu značajnosti 5% izuzete su iz dalje analize, tako da je za analizu ostala ukupno 28 stanica. Izabrane stanice su nabrojane u tabeli 1, gde su date i vrednosti prva četiri empirijska momenta nizova osmotrenih podataka.

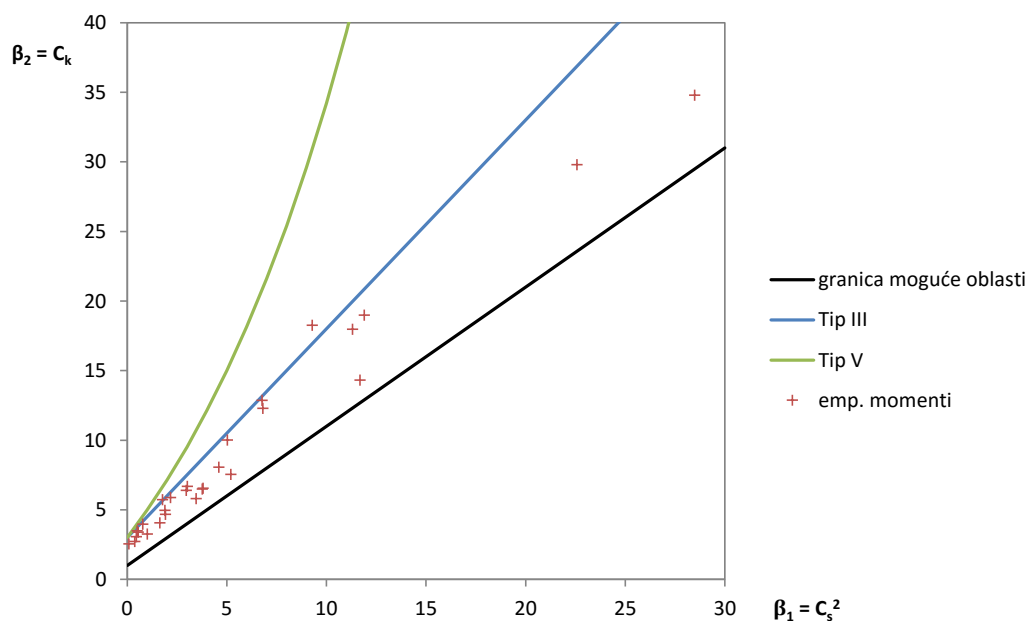
Proračun parametara i izbor tipa Pirsonove raspodele sproveden je pomoću funkcija iz paketa *PearsonDS* u programskom okruženju R, kao što je opisano u prethodnom odeljku. U ovom paketu tip Pirsonove raspodele se bira na osnovu vrednosti empirijskih koeficijenta asimetrije i spljoštenosti, odnosno na osnovu oblasti pojedinih tipova raspodela na slici 1. Na slici 2 prikazan je isti dijagram odnosa ovih momenata za razmatrane nizove maksimalnih godišnjih protoka. Na slici se može videti da najveći broj stanica pripada oblasti tipa I, dok samo dve stanice pripadaju oblasti tipa VI. Podseća se da je tip III granični tip između tipova I i VI.

¹² Kao alternativa može se koristiti funkcija *pearsonFitML()* koja kao rezultat daje samo tip i parametre raspodele prema kriterijumu maksimalne verodostojnosti.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 1. Odabrane hidrološke stanice sa statistikama (prva četiri uzoračka momenta).

Reka/Stаница	Površina sliva (km ²)	Empirijski momenti			
		\bar{x}	C_v	C_s	C_k
Dunav/Bezdan	210250	4935	0.24	0.75	3.38
Dunav/Bogojevo	251593	5543	0.23	0.71	3.49
Tisa/Senta	141715	2185	0.27	0.69	3.07
Lim/Brodarevo	2762	471	0.36	1.33	5.72
Lim/Prijepolje	3160	485	0.40	1.48	5.87
Beli Timok/Vratarnica	1771	142	0.55	0.89	3.96
Kolubara/Slovac	995	175	0.41	0.32	2.55
Moravica/Arilje	830	124	0.65	1.74	6.68
Skrapež/Požega	630	116	0.88	2.24	10.01
Veliki Rzav/Arilje	564	100	0.48	1.38	4.96
Kosanica/Visoka	370	70.3	0.83	2.60	12.85
Vlasina/Vlasotince	879	152	0.85	2.61	12.27
Sava/S. Mitrovica	87996	4147	0.18	0.63	2.71
Kolubara/Valjevo	340	87.8	0.70	1.39	4.67
Obnica/Belo Polje	185	59.7	0.61	1.01	3.26
Visočica/Bračevci	227	40.6	0.65	1.28	4.05
Bjelica/Guča	239	70.9	0.67	1.72	6.38
Rasina/Brus	213	31.7	0.74	1.95	6.54
Dičina/Brđani	208	45.9	0.81	2.15	8.05
Belica/Jagodina	193	19.6	0.93	1.94	6.48
Jablanica/Sedlari	140	41.9	0.89	1.86	5.79
Crnajka/Crnajka	96	29.2	1.14	2.28	7.54
Studenica/Ušće	540	59.4	0.65	3.36	17.96
Moravica/Ivanjica	475	76.5	0.79	3.45	18.97
Toplica/Magovo	180	29.7	1.23	3.42	14.30
Vlasina/Svođe	350	54.4	1.45	5.34	34.77
Lužnica/Svođe	319	61.0	1.12	4.75	29.78
Z. Morava/K. Stena	3077	310	0.50	3.05	18.24



Slika 2. Dijagram odnosa momenata C_s^2 i C_k za izbor tipa raspodele iz Pirsonovog sistema.

U korišćenim R funkcijama, parametri izabranog tipa teorijske Pirsonove raspodele određuju se metodom momenata na osnovu sva prva četiri empirijska momenta pomoću sistema jednačina (2).

Da bi se uporedio ovaj pristup usvajanja tipa i parametara raspodele sa standardnim pristupom u hidrologiji koji podrazumeva primenu tipa III, sprovedene su tri varijante proračuna teorijske raspodele za svaki niz:

- 1) Izbor tipa raspodele je prepušten softveru, odnosno tip se bira prema oblastima na dijagramu na slici 2 u kojoj se nađu empirijski momenti. Parametri izabranog tipa raspodele se ocenjuju metodom momenta na osnovu prva četiri empirijska momenta i sistema (2). Ovako dobijena raspodela označena je sa Px_mom4 .
- 2) Pirsonova raspodela III tipa sa parametrima ocenjenim metodom momenata na osnovu prva četiri empirijska momenta i sistema (2). Oznaka za ovu raspodelu je $P3_mom4$.
- 3) Pirsonova raspodela III tipa sa parametrima određenim metodom momenata na „klasičan“ način, odnosno iz prvih tri empirijska momenta (npr. Rao i Hamed, 2000). Oznaka za ovu raspodelu je $P3_mom3$.

4.2 Rezultati

U tabeli 2 prikazani su, pored empirijskih koeficijenata asimetrije i spljoštenosti, tip Pirsonove raspodele prema vrednostima empirijskih momenata i rezultati (p -vrednosti) testiranja saglasnosti empirijske i teorijskih raspodela testom Kolmogorov-Smirnova (KS). Velika p -vrednost ukazuje da nema razloga za odbacivanje nulte hipoteze o saglasnosti, dok za p -vrednosti ispod praga značajnosti α nultu hipotezu treba odbaciti. Uobičajeni prag značajnosti je $\alpha = 0,05$. Oznaka „NA“ znači da softver nije mogao da nađe rešenje sistema (2) i odredi parametre Pirsonove raspodele III tipa iz prva četiri momenta.

Prema vrednostima empirijskih momenata, većini nizova odgovara tip I jer su ovi momenti u zoni ispod prave linije koja odgovara tipu III (slika 2), dok je tip VI dodeljen samo dvema stanicama.

Rezultati u tabeli 2 su grupisani u više grupa po stepenu slaganja teorijskih raspodela sa empirijskom. Pripadnost grupi je data u poslednjoj koloni tabele 2. Na slici 3 prikazane su p -vrednosti KS testa u zavisnosti od koeficijenta asimetrije, gde su stanice razvrstane u grupe. Dijagrami zavisnosti p -vrednosti KS testa od koeficijenta spljoštenosti izgledaju veoma slično.

Rezultati upućuju na više zaključaka. Najpre se uočava da se primenom metode momenata kroz rešavanje sistema jednačina (2) uvek dobijaju bolji rezultati ako se usvoji tip raspodele prema oblastima na slici 1 (prvi pristup) nego ako se pretpostavi tip III (drugi pristup). Međutim, tip III čiji se parametri ocene iz prva tri empirijska momenta (treći pristup) je superiorniji u odnosu na rezultate koji se zasnivaju na sva četiri empirijska momenta. Razlog verovatno leži u manje pouzdanoj oceni četvrtog empirijskog momenta zbog pristrasnosti i veće uzoračke disperzije u kraćim nizovima.

U svim pristupima najbolja slaganja se postižu za podatke sa umerenom asimetrijom tj. za koeficijente asimetrije $C_s < 2$. Primena klasičnog pristupa sa parametrima ocenjenim iz prva tri momenta na podatke sa $C_s < 2$ uvek daje dobre rezultate, dok za ocene iz sistema jednačina (2) to nije pravilo (stanice u grupi 4). Na slici 4 prikazana su dva primera rezultata za ovu grupu stanica. Na primeru stanice Jagodina na Belici na levom dijagramu može se videti da prvi pristup daje Pirsonovu raspodelu tipa I sa relativno niskom gornjom granicom raspo-

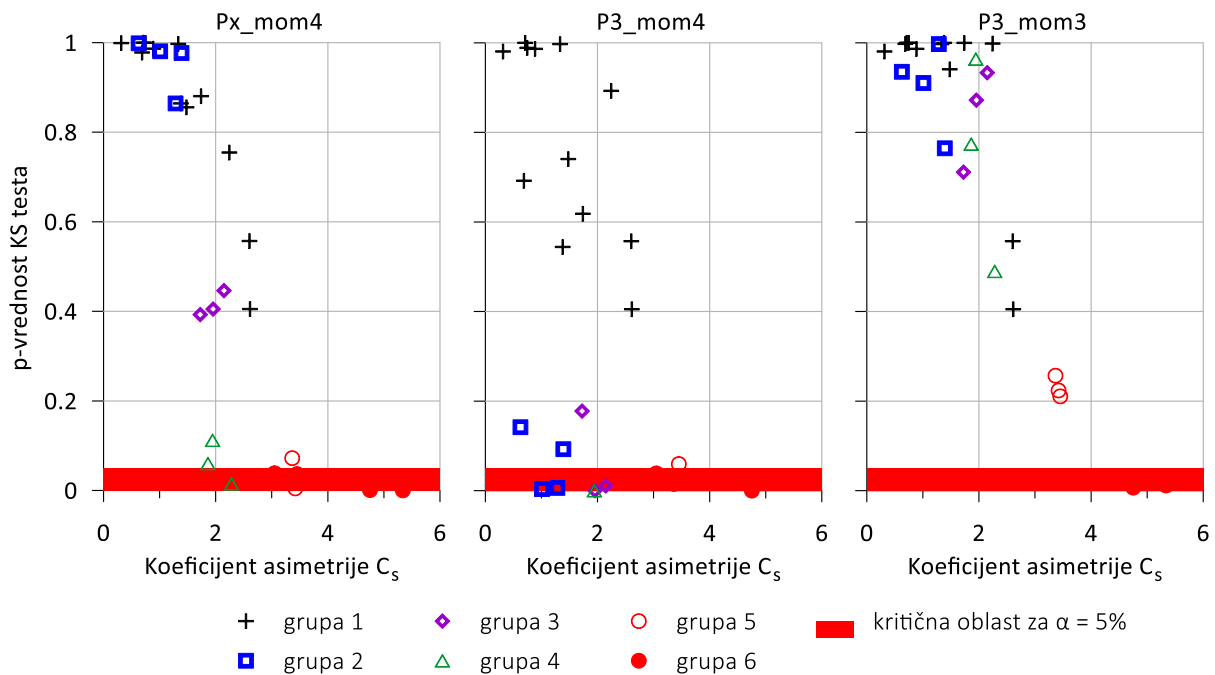
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

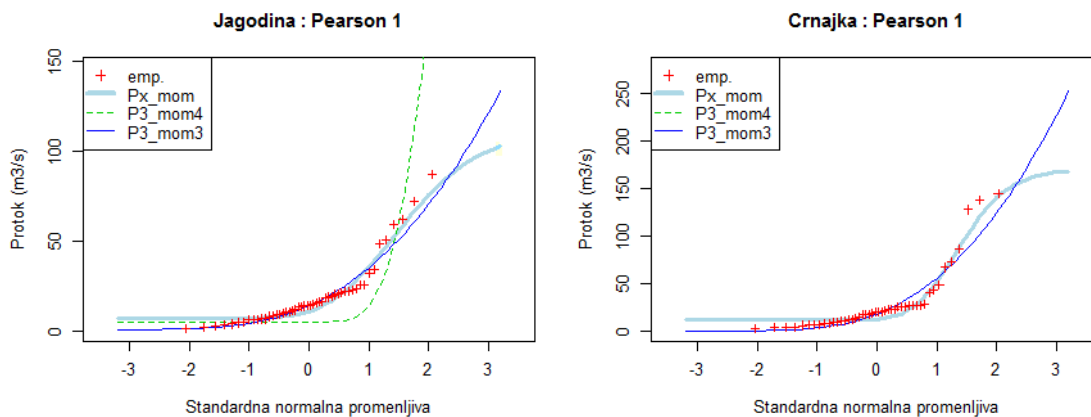
dele, čime se dobija funkcija raspodele oblika slova „S“ i oborenog gornjeg kraja. Takva raspodela nije pogodna za određivanje merodavnih velikih voda. Istovremeno, treći pristup daje razumno slaganje podataka i raspodele III tipa ocenjenjene iz prva tri momenta. Na ovoj slici se takođe može videti da su parametri raspodele III tipa po drugom pristupu nerealni u slučaju stanice Jagodina, dok u slučaju Crnajke nije postojalo rešenje sistema jednačina (2). Slični zaključci važe i za stanice iz grupe 3, kod kojih je slaganje sa tipom I u prvom pristupu bolje nego kod stanica iz grupe 4, kod kojih se po KS testu odbacuje hipoteza o saglasnosti raspodela.

Tabela 2. Rezultati (p -vrednosti) testa saglasnosti Kolmogorov-Smirnova (KS) za tri teorijske Pirsonove raspodele (Px_mom4 : izabrani tip sa ocenama parametara iz sistema jednačina (2), $P3_mom4$: tip III sa parametrima ocenjenim iz sistema jednačina (2), i $P3_mom3$: tip III sa parametrima ocenjenim iz prva tri momenta).

Stanica	C_s	C_k	Tip	p -vrednosti KS testa			Grupa
				Px_mom4	$P3_mom4$	$P3_mom3$	
Dunav/Bezdan	0.75	3.38	1	1.000	0.989	1.000	1
Dunav/Bogojevo	0.71	3.49	1	1.000	1.000	1.000	1
Tisa/Senta	0.69	3.07	1	0.978	0.692	0.998	1
Lim/Brodarevo	1.33	5.72	6	0.997	0.997	0.997	1
Lim/Prijepolje	1.48	5.87	1	0.856	0.740	0.941	1
Beli Timok/Vratarnica	0.89	3.96	1	0.987	0.987	0.987	1
Kolubara/Slovac	0.32	2.55	1	0.999	0.981	0.981	1
Moravica/Arilje	1.74	6.68	1	0.880	0.618	1.000	1
Skrapež/Požega	2.24	10.01	1	0.755	0.893	0.998	1
Veliki Rzav/Arilje	1.38	4.96	1	0.864	0.544	1.000	1
Kosanica/Visoka	2.60	12.85	1	0.557	0.557	0.557	1
Vlasina/Vlasotince	2.61	12.27	1	0.405	0.405	0.405	1
Sava/S. Mitrovica	0.63	2.71	1	0.999	0.142	0.935	2
Kolubara/Valjevo	1.39	4.67	1	0.977	0.093	0.765	2
Obnica/Belo Polje	1.01	3.26	1	0.981	0.004	0.910	2
Visočica/Bračevci	1.28	4.05	1	0.864	0.006	0.997	2
Bjelica/Guča	1.72	6.38	1	0.393	0.178	0.711	3
Rasina/Brus	1.95	6.54	1	0.405	0.000	0.872	3
Dičina/Brđani	2.15	8.05	1	0.446	0.011	0.933	3
Belica/Jagodina	1.94	6.48	1	0.112	0.000	0.964	4
Jablanica/Sedlari	1.86	5.79	1	0.060	NA	0.774	4
Crnajka/Crnajka	2.28	7.54	1	0.015	NA	0.490	4
Studenica/Ušće	3.36	17.96	1	0.072	0.015	0.257	5
Moravica/Ivanjica	3.45	18.97	1	0.037	0.059	0.211	5
Toplica/Magovo	3.42	14.30	1	0.005	NA	0.224	5
Vlasina/Svođe	5.34	34.77	1	0.000	NA	0.011	6
Lužnica/Svođe	4.75	29.78	1	0.001	0.000	0.007	6
Z. Morava/K. Stena	3.05	18.24	6	0.038	0.038	0.024	6



Slika 3. Saglasnost empirijske sa teorijskom raspodelom (p -vrednost KS testa) u zavisnosti od koeficijenta asimetrije.



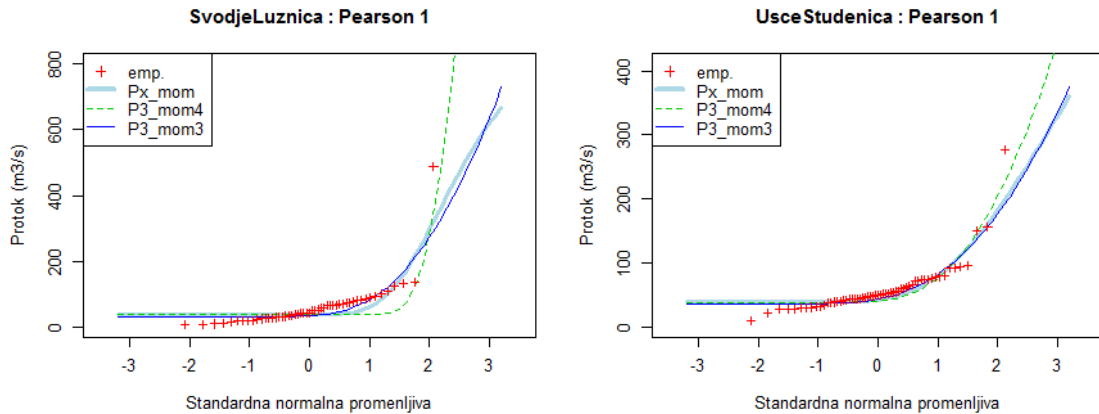
Slika 4. Primeri nizova iz grupe 4 sa koeficijentom asimetrije $C_s \approx 2$ sa izraženo oborenim gornjim krajem raspodele tipa I pod uticajem gornjeg parametra lokacije.

U domenu veoma izražene pozitivne asimetrije na stanicama u grupama 5 i 6, tj. za $C_s > 2$, ni tip I (prvi pristup) ni tip III (treći pristup) po pravilu ne može da da teorijsku raspodelu saglasnu sa empirijskom. U svih šest slučajeva iz ove dve grupe radi se stanicama sa izraženim gornjim izuzecima (Plavšić i sar., 2014). Neke od ovih stanica – a to su stanice iz grupe 5 – ipak „prolaze“ test saglasnosti KS po trećem pristupu (ali ne i test Kramer-fon Mizesa). Dva primera ovih rezultata data su na slici 5.

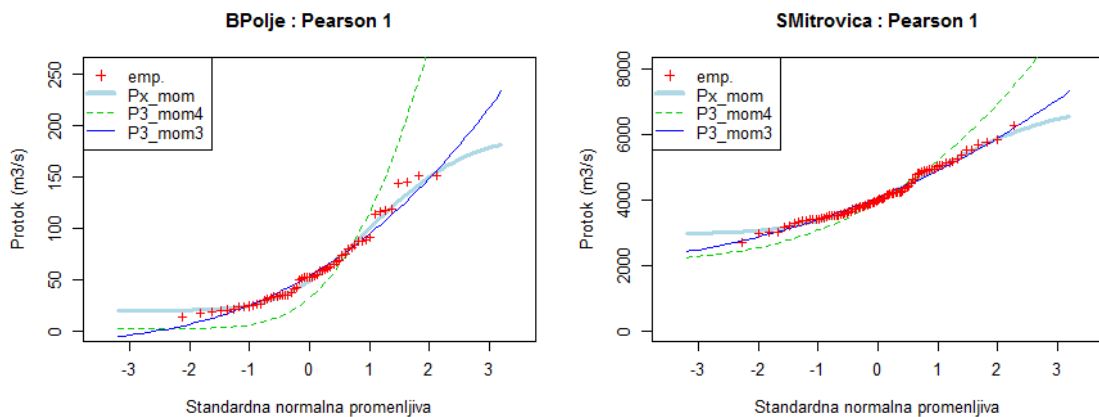
U grupu 2 svrstani su nizovi kod kojih je slaganje empirijske i teorijske raspodele dobro i u prvom i u trećem pristupu, ali veoma loše u drugom pristupu. Iako se radi o stanicama sa umerenom asimetrijom i spljoštenošću, ocena parametara tipa III iz formula (2) daje potpuno neprilagođene rezultate (slika 6).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

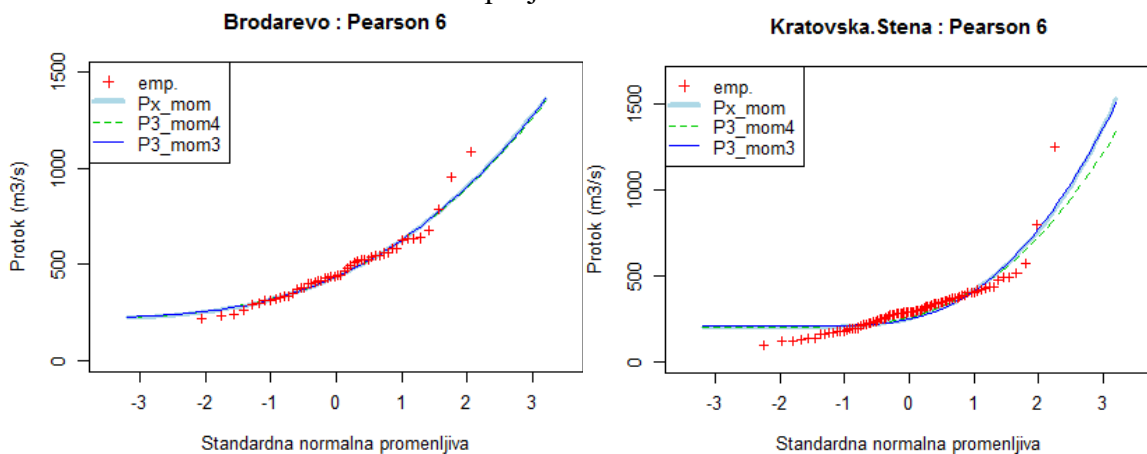
Na slici 7 prikazani su rezultati za dve stanice za koje momenti ukazuju na Pirsonovu raspodelu tipa VI. Podaci sa stanice Brodarevo na Limu imaju izuzetno dobro slaganje sa ovim tipom raspodele, što nije slučaj za stanicu Kratovska Stena na Zapadnoj Moravi na kojoj su koeficijenti asimetrije i spljoštenosti veoma veliki zbog prisustva izuzetaka.



Slika 5. Primeri nizova iz grupa 5 i 6 sa velikom asimetrijom i gornjim izuzecima koje nijedan tip raspodele ne opisuje dobro.



Slika 6. Primeri nizova iz grupe 2 sa lošom ocenom parametara tipa III iz prva četiri empirijska momenta.



Slika 7. Nizovi čiji momenti upućuju na Pirsonovu raspodelu tipa VI.

5 Zaključak

Pirsonov sistem raspodela ima prednost u primeni kada se rade istraživanja vezana za biomedicinu, demografiju, ekologiju, životni vek i slično. Zbog toga su se mnogi naučnici bavili ovom raspodelom i ispitivali raspodele koje se dobijaju za različite modifikacije diferencijalne jednačine (1). Iz toga su proistekle neke nove raspodele koje se koriste u praktičnim primenama. Kao alternativa osnovnom četvoroparametarskom sistemu mogu se koristiti polinomi višeg reda ili određene restrikcije parametara. Kako se parametrizacije modela kvadratnim i kubnim polinomima pokazuju kao suviše komplikovane za upotrebu, najčešće se primenjuju linearni brojlac i kvadratni imenilac.

U ovom radu namera je bila da se ispita primenljivost Pirsonovog sistema raspodela u hidrologiji za analizu nizova maksimalnih godišnjih protoka na rekama u Republici Srbiji. Za analizu su uzeti nizovi sa 28 stanica koji su zadovoljili testove slučajnosti i homogenosti. Razmatrana je primena opšteg četvoroparametarskog Pirsonovog sistema raspodela uz ocenu parametara metodom momenata na osnovu sistema jednačina koji povezuje parametre sa prva četiri momenta. Prema odnosu između momenata, većini stanica odgovara Pirsonova raspodela I tipa, a za dve stanice tipa VI. Raspodela tipa I je ograničena sa gornje strane, što generalno nije povoljno u analizi maksimalnih vrednosti kada se zahteva proračun merodavnih velikih voda male verovatnoće prevazilaženja, odnosno kada je potrebno ekstrapolirati usvojenu teorijsku raspodelu znatno izvan raspona osmotrenih vrednosti.

Rezultati su pokazali da se za nizove sa umerenom asimetrijom mogu dobiti solidni rezultati i uz navedeni pristup za prilagođavanje teorijske raspodele. Međutim, zbog korišćenja četvrtog uzoračkog momenta u tom pristupu i evidentnog unošenja u proračun veće neizvesnosti usled toga, rezultati mogu da budu i veoma loši ne samo za nizove sa većom asimetrijom i spljoštenošću, već i za ne tako asimetrične nizove. Klasičan pristup u hidrologiji, u kome se koristi tip III uz ocenu parametara na osnovu prva tri empirijska momenta, znatno je robusniji i po pravilu daje solidne rezultate osim kod ekstremne asimetrije i u prisustvu izuzetaka.

Analize sprovedene u ovom radu su bile ograničene na ocenu parametara metodom momenata, dok bi za donošenje celovitih zaključaka buduća istraživanja trebalo usmeriti i na metodu maksimalne verodostojnosti. Pored toga, izražena asimetrija hidroloških nizova ustoličila je primenu Pirsonove raspodele III tipa na logaritmovanim nizovima, pa buduća istraživanja svakako treba usmeriti i na primenu Pirsonovog sistema na logaritamski transformisane nizove.

I pored svega, ne može se poreći da je upotreba familije Pirsonovih raspodela za prethodne namene isključena. Treba naglasiti da je potrebno da se pridržava dobrih pravila statističke analize u hidrologiji. Kombinovanjem testiranja, grafičkog predstavljanja, poređenjem sa standardnim raspodelama u upotrebi (ovde je to bila Pirsonova raspodela tipa III), može se steći predstava o upotrebljivosti, dijapazonu primene kao i o specifičnostima softvera koji se koristi u pogledu izbegavanja mogućih pogrešnih zaključaka ako se softver koristi nekritički.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju Republičkom hidrometeorološkom zavodu za stavljanje podataka o maksimalnim godišnjim protocima na raspolaganje.

Literatura

1. Andreev A., Kanto A., Malo P., (2005), *Simple Approach For Distribution Selection In The Pearson System*, Helsinki School of Economics, Helsinki.
2. Lahcene, B. (2013), On Pearson families of distributions and its applications, *African Journal of Mathematics and Computer Science Research*, Vol. 6(5), pp. 108-117.
3. Đorić D., Mališić J., Jevremović V., Nikolić Đorić E., (2007) *Atlas Raspodela*, Građevinski fakultet, Beograd.
4. O'Connor J.J., Robertson E. F. (2003) *Karl Pearson*, elektronsko izdanje; <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/Biographies/Pearson.html>.
5. Becker M., Klossner S. (2015), *Package 'PearsonDS'*, dokumentacija R paketa, <https://cran.r-project.org/web/packages/PearsonDS/index.html>.
6. Kendall M.G. (1946), *The Advanced Theory of Statistics*, Volume 1, Charles Griffin & Company limited, London, 137-145.
7. Johnson N.L., Kotz S., Balakrishnan N. (1970), *Continuous Univariate Distribution*, Volume 1, John Wiley & Sons, INC, New York, 15-24.
8. Blagojević B., Mihailović V., Plavšić J. (2014) Statistička analiza velikih voda na profilima hidroloških stanica: potreba za promenom pristupa, *Vodoprivreda*, 46(1-6): 199-209.
9. Plavšić J., Mihailović V., Blagojević B. (2014) Assessment of methods for outlier detection and treatment in flood frequency analysis. Proc. Mediterranean Meeting on Monitoring, modelling, early warning of extreme events triggered by heavy rainfall, University of Calabria, Cosenza, Italy, 26-28 June 2014. E. Ferrari and P. Versace (eds.), ISBN 978-88-6822-268-0, pp. 181-192.
10. Rao A.R. and Hamed K.H. (2000) *Flood Frequency Analysis*. CRC Press, New York.

Praktični problemi određivanja mjerodavnih velikih voda za potrebe projektovanja sistema odbrane od poplava

Žana Topalović¹
Jasna Plavšić²

APSTRAKT: Određivanje mjerodavnih velikih voda (MVV) za potrebe prakse je oduvijek bio kamen spoticanja inženjerima i istraživačima hidrotehnike širom svijeta. U hidrotehničkoj praksi, MVV različitog ranga pojave su neophodne za projektovanje svih hidrotehničkih sistema. Načina za njihovo određivanje ima mnogo i najvjerovatnije će svaki od njih dati različite vrijednosti. U ovom radu prikazuje se nesigurnost određivanja MVV za različita scenarija na primjeru osmotrenih proticaja vodomjerne stanice (VS) Vrbanja, na rijeci Vrbanji. Na ovoj stanici postoje kontinualna osmatranja dnevnih proticaja u periodu 1926-2014 uz nekoliko godina bez osmatranja u periodu građanskog rata, tačnije za 4 godine: 1991, 1993-1995. Formirani su nizovi maksimalnih proticaja na dva načina: po metodi maksimalnih godišnjih proticaja (jedan maksimum godišnje) i metodi pikova sa promjenljivim baznim proticajem. Pored poređenja metoda uzorkovanja niza za statističku analizu analiziran je i uticaj dužine niza odnosno perioda čiji maksimumi ulaze u analizu. Dobijeni rezultati dokazuju veliku nesigurnost u određivanju mjerodavnog proticaja određenog ranga pojave a naročito za proticaje manjih vjerovatnoća prevazilaženja/većeg povratnog perioda. Pri tom nema praktičnih uputstava koju vrijednost usvojiti kao mjerodavnu a da je obezbjeđena sigurnost i optimalna cijena objekta.

Ključne riječi: statistička analiza, velike vode, funkcija raspodjele

Practical problems of flood frequency estimation for design of flood protection systems

ABSTRACT: Flood frequency estimation (FFE) relevant for the practical design was always stumbling stone for the hydraulic engineers and researchers all over the world. In practice, relevant flood flows of various return periods are necessary input for all designs of hydrotechnical systems. Methods for flood flow estimation are comprehensive and most probably each of them will estimate different values. This paper shows uncertainty of FFE for various scenarios on the case study for observed flows on hydrological station (HS) Vrbanja, on Vrbanja River. There are continuous daily flows observations on this station for the period of 1926-2014 with four years of gap during civil war, namely 1991, 1993-1995. Maximum flows sample for the frequency analysis are sampled on two ways: annual maximum flows (one for each year) and peaks over threshold with various threshold taken. Beside comparison of two sampling methods for flood flow frequency analysis, influence of various sample length is analyzed i.e. different periods of year for which maximum flows are included in estimation. Obtained results show high uncertainty of flood flow frequency analysis, especially for flows with low probability of exceedance/higher return period. At the same time, there is no practical guidance which flow to adopt as relevant for specific design and by that to respect both safety and optimal cost of facility.

Keywords: frequency analysis, flood peak, distribution function

¹ Žana Topalović, dipl.inž.građ, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, Stepe Stepanovica 77/III, Banja Luka, ztopalovic@aggfbl.org

² Prof. dr Jasna Plavšić, dipl.inž.građ., Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 93, Beograd

1 Uvod

Maksimalni proticaji (velike vode) određene vjerovatnoće pojave su veoma važan ulazni podatak za projektovanje gotovo svih hidrotehničkih objekata i sistema poput nasipa, regulacija rijeka, mostova, preliva, propusta itd. Nemoguće je zamisliti da se dimenzionisanje bilo kog od navedenih objekata i mjera izvrši bez provjere istih tih dimenzija na mjerodavni proticaj određene vjerovatnoće pojave. Kod sistema za odbranu od poplava to je uglavnom proticaj povratnog perioda 100 godina, sistemi kišne kanalizacije se dimenzionišu na proticaj povratnog perioda 5-10 godina (ranije 2 godine) dok se npr. propusna moć preliva kod betonskih brana provjerava na proticaj povratnog perioda 1000 godina ili 10.000, ako se radi o nasutoj brani.

Mjerodavne velike vode za projektovanje se uglavnom određuju na jedan od tri načina, u zavisnosti od raspoloživih podataka (Petrović, 2001): statističkom analizom osmotrenih proticaja, statističkom analizom modeliranih proticaja dobijenih iz modela padavine-oticaaj i osmotrenih kiša i transformacijom računskih kiša (dobijenih statističkom analizom osmotrenih kiša) u računске proticaje na osnovu modela padavine-oticaaj. Ovdje se pod statističkom analizom misli na uspostavljanje veze između veličine proticaja (ili visine kiše) i povratnog perioda odnosno vjerovatnoće (ne)prevazilaženja preko neke od definisanih teorijskih funkcija raspodjele. Ovako definisan proticaj se zove kvantil.

Statistička analiza velikih voda se najčešće sprovodi na dva tipa nizova maksimalnih proticaja (Vukmirović, 1990): metodom godišnjih maksimuma i metodom pikova ili prekoračenja. U mnogim radovima porede se rezultati sračunatih kvantila sa ove dvije metode sa zaključcima da iznad povratnog perioda od 10 godina daju veoma slične rezultate (Mkhandi, Opere, & Willems, 2005) ili se daje blaga prednost metodi pikova zbog mogućnosti obuhvatanja više informacija preko unosa svih poplava u uzorak a ne samo jedna godišnje (Fischer & Schumann, 2014; Madsen, Rasmussen, & Rosbjerg, 1997).

Bez obzira kojom metodom računali, činjenica je da se prilikom određivanja velikih voda ne uzima u obzir neizvjesnost odnosno nesigurnost dobijenog rješenja proistekla iz neminovnog niza grešaka koje postoje od mjerenja vodostaja, određivanja odgovarajućeg proticaja pa do metodologije proračuna. Izuzetak su intervali povjerenja koji uzimaju u obzir samo neizvjesnost uzorka iz koga se dobija informacija-kvantil (Merz & Thielen, 2005). Investitori, projektanti i menadžeri uglavnom misle da je hidrologija egzaktna nauka te da dati kvantil je baš taj koji je hidrolog ponudio dok vrijednosti sračunatih kvantila na različite načine zapravo može da se nađe u veoma velikom opsegu (Wright & Kemp, 2007).

Cilj ovog rada je da se pokaže u kom opsegu mogu da se nađu odgovarajuće velike vode sračunate na dva načina i više različitih nizova maksimalnih proticaja. Ovo je pokazano na primjeru osmotrenih proticaja rijeke Vrbanje na istoimenoj stanici iz kojih su formirani nizovi godišnjih maksimuma za kompletan period osmatranja i više pod-perioda različitih dužina i nizovi pikova iznad više različitih baznih proticaja.

2 Metodologija istraživanja

2.1 Osmotreni proticaji na stanici Vrbanja, rijeka Vrbanja

Rijeka Vrbanja je desna pritoka rijeke Vrbas, jedne od nekoliko većih BiH rijeka koje se ulijevaju u Savu. Sliv Vrbanje je izrazito brdovit i planinski, užeg i duguljastog oblika. Zanimljiva karakteristika vodnog režima ovog toka je veoma veliki odnos maksimalnog i srednjeg proticaja pa tako imamo maksimalni osmotreni proticaj od $869\text{m}^3/\text{s}$ za vodotok čiji je srednji višegodišnji proticaj poprilično konstantan u periodu osmatranja i iznosi $15.5\text{m}^3/\text{s}$.

Prvobitna stanica Vrbanja sa limnigrafom je osnovana 1921, a osmatranja dostupna od 1926-e godine. Ova stanica je prestala sa radom 1962 godine od kada se vodostaj mjeri na stanici postavljenoj 4km uzvodno od stare, zbog toga što je prethodna lokacija bila pod usporom rijeke Vrbas. U periodu od 1926-2014 postoji nekoliko godina u kojima ne postoje mjerenja, tačnije za godine 1991, 1993, 1994, 1995. U nekim godinama nedostaju podaci za npr. nekoliko dana u nizu pa do najviše jedan mjesec (1996- 1997, 1999-2001, 2009-2010). Zbog malih prekida u osmotrenim podacima za ove godine, nisu izuzimane iz uzorka.

2.1 Formiranje nizova maksimalnih oticaja za statističku analizu

Kvantili na stanici Vrbanja su dobijeni statističkom analizom nizova osmotrenih maksimalnih proticaja formiranih na dva načina. Prvi način je metoda godišnjih maksimuma gdje su uzorci formirani uzimajući po jedan maksimalni godišnji proticaj. Deset uzoraka različite dužine i za različit period su prilagođena odgovarajućoj teorijskoj raspodjeli. Za sve nizove, troparametarska log-Pirson III raspodjela se najbolje prilagođava osmotrenim maksimumima u odnosu na ostale analizirane raspodjele: normalna i log-normalna, Gumbel, Pearson III i generalna raspodjela ekstremnih vrijednosti-GEV. Ovo je potvrđeno sprovedenim testovima saglasnosti teorijske i empirijske funkcije raspodjele, tačnije testovima Kolmogorov-Smirnov, Kramer-Mizes i testom Anderson-Darling.

U nizu osmotrenih proticaja identifikovane su tri karakteristične godine u osmatranjima od 1926-2014. koje ujedno dijele period osmatranja na tri dijela. To su godina 1961. kad je hidrološka stanica pomjerena 4km uzvodno jer je prethodna bila pod usporom od rijeke Vrbas i 1990. nakon koje su nastali prekidi u osmatranjima u trajanju od nekoliko godina (uslijed građanskog rata) koja je ujedno i završna godina jednog od identifikovanih klimatskih ciklusa. Ostali usvojeni periodi su kraći odnosno sa manjim brojem godina osmatranja (po deset godina manje). Svi uzorci su najmanje dužine $N=29$ i u svima su izostavljene godine 1991, 1993, 1994 i 1995. kada nema osmatranja.

Statistike niza kao i parametri teorijskih raspodjela su sračunati metodom momenata. U tabeli 1 su prikazani usvojeni periodi sa pripadajućim oznakama i glavnim statistikama.

Druga korištena metoda za određivanje kvantila maksimalnih proticaja je metoda pikova u kojoj uzorak čine maksimumi iznad određene granice odnosno baze proticaja X_b . Kod ove metode usvojen je samo jedan period osmatranja 1961-2014 odnosno fiksiran je broj godina osmatranja N dok je mijenjan bazni proticaj X_b iznad koga se vrijednosti maksimuma podvrgavaju statističkoj analizi. Formirano je deset nizova sa različitim baznim proticajima, kao što je dato u tabeli 2. Distribucija ovako formiranih maksimuma je prilagođena dvoparametarskoj Weibull raspodjeli.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 1. Pregled analiziranih uzoraka niza maksimalnih godišnjih proticaja
Table 1. Overview of samples analysed with annual maximum flows method

Oznaka	Period osmatranja	Dužina niza N	Srednja velika voda niza $X_{max, sr}$ (m ³ /s)	Koeficijent varijacije C_v	Koeficijent asimetrije C_s
GM1	1926-1961	35	208	0.53	0.79
GM2	1961-1990	30	185	0.53	0.81
GM3	1926-1990	65	212	0.49	0.64
GM4	1926-2014	84	235	0.63	1.72
GM5	1936-2014	74	243	0.63	1.63
GM6	1946-2014	64	238	0.66	1.75
GM7	1956-2014	54	251	0.65	1.69
GM8	1961-2014	49	234	0.74	1.79
GM9	1971-2014	39	243	0.78	1.64
GM10	1981-2014	29	259	0.79	1.61

Tabela 2. Pregled uzoraka analiziranih metodom pikova
Table 2. Overview of samples analysed with peak over threshold method

Oznaka	Bazni proticaj (m ³ /s)	Ukupan broj pikova M	Srednja vrijednost prekoračenja Z_{sr} (m ³ /s)	Koeficijent varijacije C_v	Koeficijent asimetrije C_s
MP1	50	351	60	1.49	4.27
MP2	80	187	71	1.51	3.59
MP3	90	157	74	1.52	3.40
MP4	100	120	85	1.43	3.10
MP5	120	80	102	1.33	2.68
MP6	130	71	104	1.33	2.58
MP7	140	59	114	1.26	2.42
MP8	150	50	124	1.19	2.32
MP9	170	40	134	1.13	2.24
MP10	200	34	125	1.25	2.13

Na ovaj način, za svaku od metoda određivanja kvantila dobija se po deset teorijskih krivih raspodjela. Za svaku od njih, sračunate su granice intervala povjerenja a zatim i njihove anvelope odnosno zbirna minimalna i maksimalna granična vrijednost za svaki povratni period. Konačno, rezultati obje metode su objedinjeni i čime je definisan opseg mogućih vrijednosti kvantila za karakteristične povratne periode a prema opisanoj metodologiji.

U narednom odjeljku daje se osnovna teorija primijenjene metodologije proračuna.

3 Statistički modeli za određivanje kvantila-maksimalnih proticaja

3.1 Metoda godišnjih maksimuma

Metoda godišnjih maksimuma (GM) podrazumijeva statistički model u kome se teorijskoj funkciji raspodjele prilagođava niz formiran od maksimalnih godišnjih proticaja. Svaki član Q_i ovako formiranog niza Q_1, Q_2, \dots, Q_N , gdje je N broj godina osmatranja, je maksimalni proticaj u i -toj godini osmatranja. Pretpostavlja se da su članovi ovog niza slučajni i međusobno nezavisni, homogeni i da su adekvatni predstavnici populacije što se prije statističkog modeliranja provjerava različitim testovima (Jovanović, 1977; Vukmirović, 1990). Distribucija proticaja Q_i za niz maksimalnih godišnjih proticaja na VS Vrbanja najbolje opisuje troparameterska log-Pearson III raspodjela iz grupe gama raspodjela. Funkcija ove raspodjele je definisana izrazom:

$$F(y) = \int_{\gamma}^y \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \left(\frac{y-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{y-\gamma}{\beta}\right) dy \quad (1)$$

gdje su $\alpha(\alpha > 0), \beta(\beta \neq 0), \gamma$ parametri distribucije, $y = \log x$, $x = Q_i$ a $\Gamma(\alpha)$ gama funkcija:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} u^{\alpha-1} e^{-u} du \quad (2)$$

Inverzne distribucije odnosno proračun kvantila y ne mogu da se definišu eksplicitno izrazima već se koriste numeričke aproksimacije (npr. u kombinaciji sa ugrađenim excel funkcijama) ili preko tabeliranog faktora frekvencije K_T koji zavisi od vjerovatnoće i koeficijenta asimetrije niza (Salas et al., 2014). Ukoliko je ovo posljednje u pitanju, koristi se izraz:

$$\log(x) = y_{sr} + K_T S_y \quad (3)$$

gdje y_{sr} i S_y označavaju srednju vrijednost i standardnu devijaciju logaritmovanog niza, respektivno.

3.2 Metoda pikova

Metoda pikova (MP) ili prekoračenja predstavlja dobru alternativu metodi godišnjih maksimuma jer proširuje opseg informacija o maksimalnim proticajima uzimajući u obzir i ostale maksimalne proticaje u godini, osim onog najvećeg (Fischer & Schumann, 2014). Potencijalni problem može biti određivanje baznog proticaja X_b na osnovu kog se formira niz pikova $Z = x - X_b$, gdje je x osmotren proticaj. U literaturi se može naći nekoliko preporuka

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

za određivanje baznog proticaja, od formiranja serija djelimičnog trajanja gdje je X_b minimalni godišnji maksimum do grafičkog određivanja na dijagramu $X_b - (X_b / Z_{sr})$, gdje je Z_{sr} srednja vrijednost pikova iznad baznog oticaja a proticaj gdje se gubi izrazita linearnost predstavlja ustvari X_b (Beirlant et al., 2005; Caeiro & Gomes, 2014).

Teorijska raspodjela broja pikova u godini se računa prema nekoj od funkcija raspodjele za diskretne promjenljive, a u zavisnosti od dobijenog indeksa disperzije koji se računa iz izraza:

$$I = \frac{N \cdot S_x^2}{M} = \frac{S_x^2}{n_{sr}} \quad (4)$$

gdje je N broj godina osmatranja, M ukupan broj pikova iznad bazne vrijednosti, S_x^2 varijansa broja pikova u godini i n_{sr} srednji broj pikova u godini. Za skoro sve formirane nizove prekoračenja iz osmotrenih podataka Vrbanje indeks disperzije je veći od jedan te je korištena negativna binomna raspodjela sa dva parametra čiji je zakon raspodjele definisan:

$$p_i = P\{X = i\} = \binom{b-1+i}{b-1} p^b (1-p)^i \quad (5)$$

$b = Z_{sr} / (I-1)$ zaokružen na cijeli broj i $p = b / (Z_{sr} + b)$ parametri raspodjele. Za raspodjelu $H(Z)$ visine pikova Z korištena je dvoparametarska Weibull-ova raspodjela definisana sljedećom funkcijom:

$$H(Z) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{Z}{\alpha}\right)^\beta\right\} \quad (6)$$

Parametar raspodjele β se definiše numerički iz izraza $\frac{\Gamma(1+2/\beta)}{\Gamma^2(1+1/\beta)} = 1 + C_{vx}^2$ a α iz izraza

$$\alpha = Z_{sr} / \Gamma(1+1/\beta).$$

Raspodjela godišnjih maksimumi određene vjerovatnoće $F(x)$ dobija se kombinacijom prethodnih raspodjela broja i visine pikova, pa tako imamo inverznu funkciju raspodjele za proračun kvantila prema Weibull-ovoj raspodjeli:

$$Z = X_b + \alpha \left[-\ln(1-H) \right]^{1/\beta} \quad (7)$$

u kojoj se vjerovatnoća neprevazilaženja visine pikova $(1-H)$ dobija iz negativne binomne raspodjele:

$$1-H = (F^{-1/b} - 1) / (1/p - 1) \quad (8)$$

3.3 Standardne greške kvantila i intervali povjerenja

Intervali povjerenja funkcije raspodjele se određuju za veličinu slučajne promjenljive $X(T)$, gdje T označava povratni period, definisanjem gornje (g) i donje (d) granica intervala prema sljedećem:

$$X_{g,d}(T) = X(T) \pm |z_\alpha| S_{x(T)} \quad (9)$$

gdje su $z_\alpha = -z(1-\alpha)$ standardizovana normalna promjenljiva za prag značajnosti α koji odgovara intervalu povjerenja $\beta = 1 - 2\alpha$ a $S_{x(T)}$ je standardna greška kvantila.

Standardna greška kvantila predstavlja kvadratni korijen varijanse kvantila i prema tome se različito određuje u zavisnosti od odabrane teorijske raspodjele. Za log-Pearson III raspodjelu standardna greška kvantila je:

$$S_{y(T)} = \frac{S_y}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + \frac{1}{2} K^2(T)} \quad (10)$$

gdje je $K(T) = \frac{Y(T) - y_{sr}}{S_y}$ faktor frekvencije, imajući na umu da je $Y(T) = \log X(T)$.

Za Weibull-ovu raspodjelu proračun je nešto komplikovaniji. Kompletne izvedene jednačine za intervale povjerenja ove raspodjele su date u (Heo, Salas, & Kim, 2001).

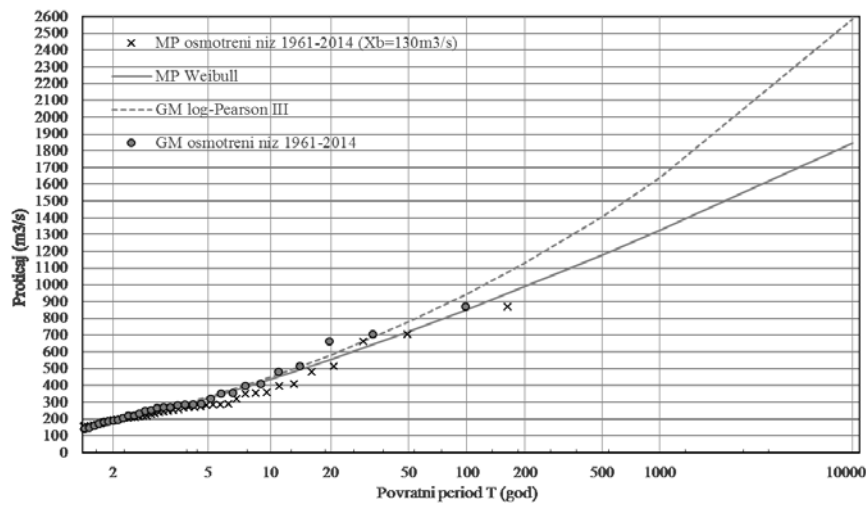
4 Rezultati i diskusija

Za primjer osmotrenih proticaja rijeke Vrbanje obrađene u ovom radu, dobija se nešto veći maksimalni proticaji metodom GM u odnosu na MP. To se vidi na slici 1 koja prikazuje prilagođene teorijske raspodjele za obje metode i za jedan isti period osmatranja.

Niz prikazan na gornjoj slici je niz sa X_b za koji se dobijaju maksimalne vrijednosti kvantila. Pokazalo se da je za $X_b = 130m^3 / s$ i sve analizirane povratne periode ($T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$ i 10.000) maksimalni proticaji se dobijaju iz niza sa upravo tom vrijednošću baznog oticaja. Ovo je značajan pristup u praksi gdje se uvijek ide na stranu sigurnosti i usvaja najnepovoljniji scenario.

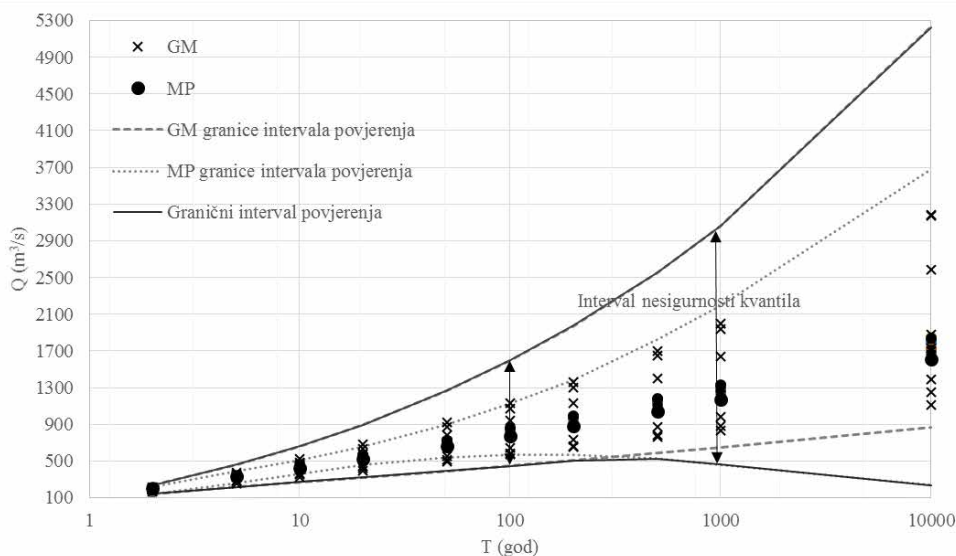
Analizom nizova različite dužine uviđa se velika zavisnost kvantila od dužine niza. I ne samo dužine već i perioda koji je uzet u obzir. Tako npr. nizovi za posljednjih 30 i 40 godina daju maksimalne kvantile. To je najvjerovatnije zbog činjenice da se u tom periodu, tačnije od 1996 do 2014, desilo nekoliko velikih poplava od kojih su tri najveće ikad zabilježene. Ovi izuzeci mnogo doprinose određivanju kvantila, pa tako za niz iste dužine ali dva perioda: 1961-1990 i 1981-2014 kvantili povratnog perioda 100 godina je više nego duplo manji u odnosu na posljednji navedeni period. Parametri log-Pearson III raspodjele su poprilično različiti za pojedini niz ali se primjećuje stabilizuju odnosno teže ka konstantnoj vrijednosti što je veća dužina uzorka.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 1. Dijagram funkcije raspodjele metoda GM i MP za period 1961-2014
Figure 1. Distribution function plot for methods AM and POT for period 1961-2014

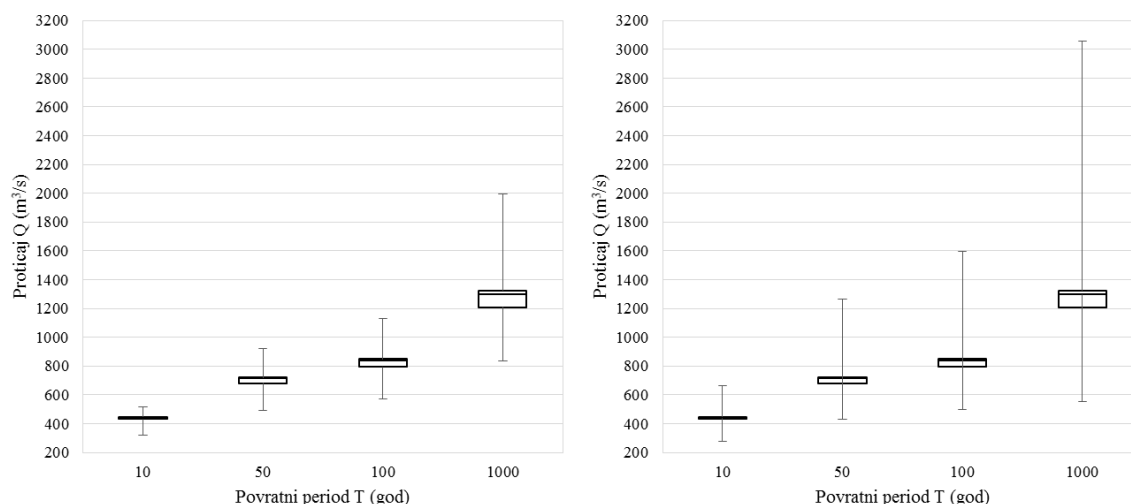
Sumarni rezultati svih formiranih nizova prema obje metode su prikazani na jednom dijagramu vjerovatnoće na slici 1. Svi kvantili sračunati metodom pikova su prikazani jednim simbolom-tačkama a metodom godišnjih maksimuma iksevima. Za svaki povratni period i kvantil od 10 formiranih nizova unutar jedne metode (GM ili MP) sračunata je granica intervala povjerenja vrijednosti $\beta = 0.8$ odnosno praga značajnosti $\alpha = 0.1$ zatim su određene njihove anvelope. Sumarne granice za obje metode su na slici 2 prokazane punim linijama čime je formirana granična gornja i donja linija intervala povjerenja. Sa dijagrama se primjećuje da je kolebanje kvantila mnogo manje prema MP što govori o manjoj osjetljivosti modela na promjene baznog oticaja što nije slučaj sa dužinom nizova u metodi GM prema kojoj, npr. kvantil $T=100god$ može biti bilo koja vrijednost između $573-1131 m^3/s$ u zavisnosti koji niz hidrolog ima na raspolaganju.



Slika 2. Teorijske funkcije raspodjele sa graničnim intervalima povjerenja
Figure 1. Distribution functions with confidence intervals

Prikazane anvelope intervala povjerenja daju poprilično velik opseg mogućih vrijednosti kvantila. Povećanjem povratnog perioda, neizvjesnost kvantila se povećava.

Slika 3 daje zbirne rezultate sračunatih kvantila sa obje metode predstavljene box-and-whiskers dijagramom. Formiran je niz od svih sračunatih kvantila za odgovarajući povratni period za koji je određena medijana, vrijednosti obezbjeđene 25% i 75% te minimalna i maksimalna vrijednost. Granice pravougaonika upravo predstavljaju, redom odozdo na gore, vrijednost proticaja obezbjeđenosti 25%, medijanu i obezbjeđenosti 75%. Krajevi vertikalnih linija su minimalna i maksimalna vrijednost od svih određenih kvantila.



Slika 3. *Box-and-whiskers* dijagrami za kvantile određene po GM i MP metodi (lijevo) i sa uključenim intervalima povjerenja (desno)

Figure 3. Box-and-whiskers plot for quantiles determined by AM and POT (left) and with confidence interval inclusion (right)

Ovakvim prikazom kao na slici 3 bolje se uviđa raspon sračunatih kvantila. Logično, uvođenjem samo jedne neizvjesnosti uslijed greške teorije raspodjele, što su zapravo intervali povjerenja, raspon se znatno povećava (slika 3 desno). Ako bi se uračunala nesigurnost izlaznog podatka iz analize vjerovatnoće pojave maksimalnih proticaja uslijed ostalih grešaka (mjerjenje, metoda formiranja niza, funkcija raspodjele i ocjena parametara itd.) ovaj raspon bi bez sumnje bio još veći.

5 Zaključci i budući rad

Postoji mnogo mogućih izvora grešaka i njima shodne neizvjesnosti sračunatih kvantila (Merz & Thielen, 2005): greške u mjerjenju (vodostaja za vrijeme velikih voda, kriva protoka iz koje se na osnovu izmjerenih vodostaja dobija proticaj), u određivanju parametara i izboru statističkog modela-funkcije raspodjele, načinu formiranja uzorka za analizu i pretpostavki o slučajnosti hidrološke veličine itd. Neizvjesnost uzorka iz koga se na kraju dobija informacija o maksimalnom proticaju određene vjerovatnoće pojave se uglavnom uzima u obzir kroz određivanje intervala povjerenja.

Zahvaljujući neizvjesnosti koja potiče iz raznih izvora, sračunati kvantili $X(T)$ se mogu definisati kao slučajna promjenljiva koja prati neku raspodjelu te ima srednju vrijednost i standardnu devijaciju. U ovom radu je uzeta u obzir neizvjesnost uzorka - niza kroz proračun sa dvije metode, godišnji maksimumi i metoda pikova, zatim promjenom dužine i perioda godina osmatranja odnosno različitih baznih proticaja za metodu pikova. Za povratni period od 100 godina, srednja vrijednost niza je $828\text{m}^3/\text{s}$. Mogući usvojeni kvantil za projektovanje sistema od poplava je oko $\pm 35\%$ u odnosu na srednju vrijednost, pri analiziranoj neizvjesnosti uzoraka i metodologije proračuna.

Proširenje analize je svakako moguće, npr.: variranjem dužine niza i za metodu pikova, analiziranjem još nekih izvora grešaka poput odabira statističkog modela i načina određivanja parametara modela. Ono što je neophodno utvrditi je rizik koji neizvjesnost nosi u smislu vjerovatnoće rušenja projektovanog sistema u kombinaciji sa tehno-ekonomskom analizom opravdanosti građenja istog pod tim rizikom za šta najčešće nema dovoljno ni sredstava ni vremena u praktičnoj primjeni.

Literatura

1. Beirlant, J., Goegebeur, Y., Teugels, J., Segers, J., De Waal, D., & Ferro, C. (2005). *Statistics of Extremes: Theory and Applications*. (D. J. Balding, P. Bloomfield, N. A. C. Cressie, N. I. Fisher, I. M. Johnstone, J. B. Kadane, ... D. Kendall, Eds.) Wiley series in probability and statistics (Vol. 47). West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
<http://doi.org/10.1198/tech.2005.s297>
2. Caeiro, F., & Gomes, M. I. (2014). Threshold Selection in Extreme Value analysis, 2014, 1–23.
3. Fischer, S., & Schumann, A. (2014). Comparison between classical annual maxima and Peak over Threshold approach concerning robustness. Retrieved from https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/33522/1/DP_2614_SFB823_Fischer_Schumann.pdf
4. Heo, J. H., Salas, J. D., & Kim, K. D. (2001). Estimation of confidence intervals of quantiles for the Weibull distribution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15(4), 284–309. <http://doi.org/10.1007/s004770100071>
5. Jovanović, S. (1977). *Primena metoda matematičke statistike u hidrologiji*. Beograd: Građevinski fakultet.
6. Madsen, H., Rasmussen, P. F., & Rosbjerg, D. (1997). Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events: 1. At site modeling. *Water Resources Research*, 33(4), 747–757.
<http://doi.org/10.1029/96WR03849>
7. Merz, B., & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309, 114–132.
<http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.015>
8. Mkhanda, S., Opere, A., & Willems, P. (2005). Comparison between annual maximum and peaks over threshold models for flood frequency prediction. *International Conference of UNESCO Flanders FIT FRIEND/Nile Project - "Towards a Better Cooperation,"* 1, 1–15. Retrieved from http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Cairo/pdf/COMPARISON_BETWEEN_ANNUAL_MAXIMUM.pdf
9. Petrović, J. (2001). *Uvod u hidrologiju, skripta - neobjavljeno*. Beograd.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

10. Salas, J. D., Govindaraju, R. S., Anderson, M., Arabi, M., Frances, F., Suarez, W., ... Green, T. R. (2014). Introduction to hydrology. In C. T. Yang & L. K. Wang (Eds.), *Handbook of Environmental Engineering 15: Modern water resources engineering* (pp. 61–94). New York: Humana Press, Springer Science+Business. <http://doi.org/10.1007/978-1-62703-595-8>
11. Vukmirović, V. (1990). *Analiza verovatnoće pojave hidroloških veličina*. Beograd: Građevinski fakultet, Naučna Knjiga.
12. Wright, C., & Kemp, D. (2007). Flow Estimation for Flood Management Understanding the Uncertainty . In *5th Flood Management Conference Warrnambool* (pp. 1–8). Warrnambool. Retrieved from <http://brownhillck.org/wp-content/uploads/2011/11/Wright-and-Kemp-Understanding-the-Uncertainty.pdf>

Neki aspekti pri neparametarskom generisanju hidroloških serija podataka

Đurica Marković¹
Jasna Plavšić²
Siniša Ilić¹

APSTRAKT: Neparametarska kernel raspodela je veoma koristan alat u generisanju hidroloških nizova jer omogućava logičniju interpolaciju verovatnoća u rasponu osmotrenih podataka. Za jedan niz, neparametarska raspodela zavisi od izabrane širine jezgra kernel funkcije i postoji veliki broj metoda za njeno određivanje. U zavisnosti od primenjenog metoda rezultati se mogu razlikovati. S druge strane, logaritamska transformacija podataka o padavinama i proticajima, koji imaju značajnu asimetriju, predstavlja jednostavnu transformaciju koja se uspešno koristi pri generisanju za podatke sa velikom rasponom vrednosti, naročito u zoni maksimuma, čime se smanjuje asimetrija i podaci približno „normalizuju“. U ovom radu su razmatrani ovi aspekti neparametarskog generisanja hidroloških nizova na primeru nedeljnih protoka na više hidroloških stanica u Kanadi. Posebno je razmatrana primena obrazaca za širinu jezgra kernel funkcije, a pokazano je i kakve koristi donosi logaritamska transformacija nizova.

Ključne reči: neparametarska raspodela, širina jezgra, logaritamska transformacija

Some aspects of non-parametric hydrologic data generation

ABSTRACT: The non-parametric kernel distribution is a very useful tool in generating hydrological series because it allows a more logical interpolation of probabilities in the range of the observed data. For a particular series, a non-parametric distribution depends on the selected bandwidth of the kernel functions and there are a number of methods for its determination. Depending on the applied method results may vary. On the other hand, the logarithmic transformation of the rainfall and streamflow data that can be significantly skewed is a simple transformation, which is successfully used in generating data with a large range of values, especially at the upper tail, thus reducing the skewness and normalizing the data. This paper considers these aspects of the non-parametric generation of hydrologic series and illustrates them using the weekly streamflow series at multiple stations in Canada. Application of different formulae for the kernel bandwidth is particularly discussed, and the benefits of the logarithmic transformation are shown.

Keywords: non-parametric distribution, bandwidth, logarithmic transformation

¹ Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Fakultet tehničkih nauka, Kneza Miloša 7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, djurica.markovic@pr.ac.rs

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 11120 Beograd, Srbija, jplavsic@grf.bg.ac.rs

1 Uvodna razmatranja

Generisanje hidroloških vremenskih serija se koristi za formiranje dugačkih serija podataka koje će imati ekstremnije uslove od onih koji se mogu naći u osmotrenim nizovima. Na ovaj način se omogućava određena obezbeđenost u procesu projektovanja vodoprivrednih objekata i sistema jer se ovako uzimaju u obzir i veoma važne ekstremne pojave. Pored projektovanja, generisane serije se koriste i za potrebe definisanja ciljeva i njihovih provera u procesu upravljanja vodoprivrednim objektima i sistemima. U tim sistemima su pored ekstremnih podataka, značajni i podaci o dugotrajnim sušnijim periodima kada se proveravaju upravljačke odluke.

Za razne potrebe u vodoprivredi mogu se definisati potrebe za određenim vremenskim korakom za koji se vrši generisanje. Tako, npr. za praćenje kvaliteta vode ili pri ekološkim razmatranjima, pri pojavi poplavnih talasa (naročito na manjim slivovima) i sl, serije dnevnih podataka imaju suštinski značaj. Nedeljni ili desetodnevni podaci mogu biti značajni u energetici. Mesečni vremenski korak se najčešće koristi za potrebe definisanja kapaciteta akumulacije. Generalno, za različite nivoe planiranja koriste se različiti vremenski intervali. Ukoliko se zahteva optimalno upravljanje nad nekom akumulacijom ili sistemom akumulacija za potrebe energetike (tj. korišćenja vodnih snaga) optimalne odluke su rezultat procesa koji sadrži delove modela sa različitim vremenskim okvirima. Tako se za dugoročno planiranje koriste godišnji ili mesečni podaci, na osnovu kojih se donosi strateška ili taktička politika upravljanja sistemom. Kao rezultat donetih dugoročnih odluka, daju se granični uslovi za niže nivoe planiranja – za srednjoročne i kratkoročne vremenske okvire, za koje se najčešće koriste od nedeljnih do dnevnih podataka. Na kraju, za upravljanje u realnom vremenu koriste se časovni podaci i na osnovu njih se donose odluke o raspodeli, opterećenju postrojenja i sl.

U ovom radu su prikazani postupci koji doprinose dobrom krajnjem rezultatu u postupku generisanja hidroloških veličina. Ovi postupci su korišćeni u istraživanjima koja su sprovedena za potrebe izrade doktorske disertacije [1] i prikazana u radovima [2–4]. Potrebno je napomenuti i da je sam postupak generisanja hidroloških serija samo jedan deo metoda za generisanje koji je korišćen u istraživanjima a koji je predložio u svojim radovima Nesa Ilich [5–7]. Na kraju, ove značajnosti su testirane pri modeliranju mesečnih, nedeljnih i dnevnih podataka o proticajima i mesečnih i nedeljnih podataka o padavinama na dva seta podataka sliva reke Oldman u Kanadi i sliva reke Studenica u Srbiji.

2 Primena logaritamske transformacije prilikom generisanja hidroloških serija

Transformacija podataka je često korišćena tehnika za normalizaciju podataka, kada raspodele osmotrenih podataka imaju izraženu asimetriju i odstupanje od normalne raspodele kao i kod „eliminacije“ izuzetaka u nizovima. Normalizacija podataka se koristi i prilikom analize i testiranja jer se testovi uglavnom zasnivaju na pretpostavci da podaci pripadaju normalnoj raspodeli.

Transformacije podataka se koriste da bi se kod podataka postiglo da [8]:

- Postanu simetričniji (da se umanja asimetrija),
- Postanu linearniji,
- Postanu konstantniji u varijansi (da se umanje odstupanja).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

Neke od najčešće korišćenih transformacija podataka jesu logaritamska transformacija, transformacija stepenovanjem podataka, transformacija Wilson-Hilferty-ja i Box-Cox-ova transformacija.

Logaritamska transformacija se može pisati u opštem obliku: $y_i = \log(x_i - c)$ gde je x_i podatak iz originalnog niza a c parametar ograničenja sa donje strane, gde za $c = 0$ dobijamo jednostavnu transformaciju.

Slično, transformacija stepenovanjem ima opšti oblik $y_i = (x_i - c)^b$ gde je b parametar i obično je $b < 1$ (najčešće $\frac{1}{2}$ ili $\frac{1}{3}$).

Box-Cox-ova transformacija [9] ima sledeći oblik

$$y_i = \begin{cases} \frac{(x_i^\lambda - 1)}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln(x_i) & \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

gde je λ parametar koje se procenjuje tako da asimetrija novog niza y_i postane 0.

Logaritamska transformacija podataka se često koristi pri modeliranju hidroloških serija. Ova transformacija je dobro poznata u hidrologiji i u ovom radu će se samo izneti prednosti koje je donosila njena primena prilikom postupka generisanja hidroloških podataka.

Kao što je već navedeno, razlozi za primenu logaritamske transformacije podataka se javljaju kada se u podacima javljaju npr.: izražena asimetrija udesno ili je raspon varijacije podataka veliki. Logaritamska transformacija transformiše podatke tako da velike vrednosti umanjuje više a manje vrednosti umanjuje za manji procenat. Ovo se može prikazati na jednostavnom primeru logaritmovanja brojeva npr. 2 i 50 i poređenjem njihovog odnosa. Prirodni logaritam broja 2 je broj 0,69315 a broja 50 je broj 3,91202. Odnos broja 2 i njegovog logaritma je broj 2,8854 a odnos broja 50 i njegovog logaritma je broj 12,78111, što znači da je 4,43 puta više umanjeno broj 50 od broja 2.

U odnosu na dati primer, može se zaključiti da se podaci sa izraženom asimetrijom ublažavaju na taj način da se njihova raspodela približava normalnoj raspodeli jer se dug rep raspodele npr. u zoni velikih voda znatno umanjuje, čime se i težište raspodele pomera iz asimetričnog oblika ka normalnoj raspodeli, odnosno srednja vrednost uzorka se približava medijani uzorka.

Na osnovu istog primera, može se primetiti da logaritamska transformacija smanjuje i opseg raspoloživih podataka. Uobičajeno je da se za podatke sa velikim rasponom varijacije smatraju oni kod kojih je odnos $\frac{x_{max}}{x_{min}} > 10$. Takođe, kao posledica smanjenog raspona varijacije podataka imamo i smanjenu varijansu uzorka, odnosno, manju standardna devijaciju.

Iz gore navedenih razloga se u uzorcima dodatno umanjuju i uticaji izuzetaka na njihove raspodele. Izuzeci koji su obeleženi u podacima, raznim testovima za označavanje izuzetaka, često se istim tim testovima ne prepoznaju kada se primene na logaritamski transformisane nizove.

Primena logaritamske transformacije u postupku generisanja padavina je, takođe, značajna kao i kod generisanja proticaja sa značajnom razlikom da je kod padavina transformacija u obliku: $y = \ln(x + 1)$, jer se u ovom slučaju javljaju podaci sa vrednošću jednakom 0 (kod dnevnih i nedeljnih podataka, a u sušnijim regionima i kod mesečnih podataka u periodima suše), za koje logaritam kao funkcija nema vrednosti.

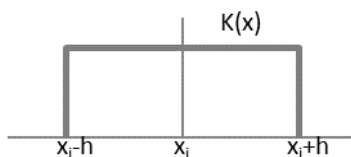
3 Određivanje neparametarske funkcije raspodele i izbor širine jezgra

U poslednjoj dekadi prošlog veka započela je česta primena neparametarskih metoda pri modeliranju vremenskih serija, sa razvojem matematičkih procedura i metoda a naročito intenzivnim razvojem mogućnosti računara i alata koji se koriste za izvršavanje tih proračuna. U istraživačkim radovima su predstavljene mnogobrojne metode. Prilikom istraživanja u radovima [1, 2, 4] korišćen je samo metod ocene funkcije gustine raspodele pomoću funkcije jezgra tzv. kernel metode. Prednost ovog pristupa u odnosu na klasične parametarske raspodele je da se on može automatizovati, dok je za izbor parametarske raspodele skoro uvek potrebna i subjektivna procena.

Ocena gustine raspodele pomoću funkcije-jezgra ili neparametarska funkcija gustine raspodele $f_n(x)$ iz uzorka $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ veličine n data je izrazom

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (2)$$

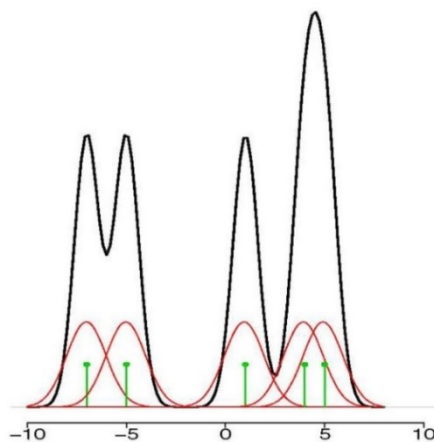
gde je $K(\cdot)$ funkcija jezgra centrirana u odnosu na podatak x_i , dok je h širina intervala koji određuje prostiranje individualnih funkcija jezgra oko osmotrene tačke, što je prikazano na slici 1. na primeru pravougaonog jezgra.



Slika 1. Prikaz pravougaonog jezgra u odnosu na podatak x_i i širina opsega h

Na slici 2 je prikazana aproksimacija gustine raspodele na osnovu Gausovog jezgra za individualne podatke. Neparametarska funkcija gustine u stvari predstavlja konvoluciju individualnih funkcija jezgara i data je izrazom:

$$F_n(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t-x_i}{h}\right) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K^* \left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (3)$$



Slika 2. Aproksimacija neparametarske funkcije gustine na osnovu jezgara individualnih podataka za Gausovo jezgro [10]

U literaturi se može naći da neparametarska funkcija raspodele ne zavisi mnogo od izbora jezgra i da su razlike neznatne, u zavisnosti od jezgra, već da glavni uticaj na oblik funkcije daje vrednost širine intervala h [11, 12]. Tako će se u ovom radu samo spomenuti da postoji više različitih tipova jezgra, među kojima je Gausovo jezgro čest i popularan izbor [13] a da se funkcije najčešće korišćenih jezgara u metodi ocene gustine raspodele pomoću funkcije jezgra mogu naći u literaturi.

Imajući u vidu da gustina raspodele zavisi od izbora širine intervala h a da je srednje kvadratno odstupanje uvek manje kada je h niže, može se izvesti zaključak da se najbolja funkcija raspodele dobija za najmanju širinu intervala h . Međutim, ovo nije tačno jer se prekomernim smanjivanjem širine intervala h povećava varijansa. Ovaj postupak rezultira time da je potrebno odrediti neku optimalnu širinu intervala koja će imati određeno srednje kvadratno odstupanje a istovremeno neće uvećati varijansu. Optimalno h često se određuje probanjem za više vrednosti širine intervala dok se ne odredi optimalna vrednost. Ovo je primetno i kada se posmatraju funkcija raspodele i gustina raspodele.

Navedeno važi za neparametarske funkcije raspodele sa fiksnim jezgrom. Značajno je napomenuti da se fiksno jezgro najčešće koristi kada se raspolaže sa podacima koji nemaju izraženu asimetriju. Koeficijent asimetrije se na neki način može ublažiti logaritamskom transformacijom podataka. Ukoliko se ni na taj način ne izbegne izrazita asimetričnost podataka primenjuje se funkcija sa promenljivim jezgrom. Promenljivo jezgro ima sledeći smisao: na mestima gde se nalazi veći broj podataka – bliže centralnom delu raspodele, koristi se manja širina intervala, dok se na krajevima raspodele – gde ima mali broj podataka, najčešće po jedan, koristi veća širina intervala i na taj način izbegava osetljivost raspodele na različitu koncentraciju podataka. Međutim, sa druge strane, kod primene promenljivog jezgra javlja se problem određivanja širine intervala h na spomenutim delovima raspodele.

Kao što se može videti iz prethodno izloženog, pri korišćenju neparametarskih funkcija raspodela nije presudna odluka o korišćenju vrste jezgra, već je najbitnije odrediti optimalnu vrednost širine opsega h . Kako od optimalnog izbora širine opsega zavisi i izgled raspodele na krajevima, što je od najvećeg interesa za statističku analizu, u literaturi se može pronaći veliki broj radova sa različitim metodama za izbor optimalnog h . Postoji više grupa metoda za određivanje optimalne širine intervala. Jedna grupa metoda se bazira na razmatranju grešaka kao što su: ISE – integralna kvadratna greška (Integrated Square Error), MISE – integralna srednja kvadratna greška (Mean Integrated Square Error) i AMISE – asimptotska integralna srednja kvadratna greška (Asymptotic Mean Integrated Square Error), i ova grupa metoda ima više teoretski značaj. U drugoj grupi su tzv. brzi i približni („quick and dirty“) metodi, gde spadaju i razna nepisana pravila, a zasnovani su na AMISE metodi. U treću grupu spadaju metode kros-validacije (cross-validation). U četvrtu grupu spadaju metode zamene (plug-in methods). Petu grupu čine „optimalni“ metodi. U šestoj grupi su ostale metode i metode koje predstavljaju neke varijacije ostalih metoda.

Cilj ovog rada nije bio da se prikazuju metodi za određivanje širine intervala već da se daju neke smernice za olakšano korišćenje neparametarske raspodele pomoću kernela, odnosno određivanja intervala funkcije jezgra, pa će se u daljem tekstu spomenuti samo odabrani metodi i obrasci za računanje širine intervala funkcije jezgra h .

Nepisano pravilo Silvermana je metod za sračunavanje vrednosti širine intervala funkcije jezgra na osnovu vrednosti uzorka i dat je u knjizi [14] kao tzv. "rule of thumb":

$$h = 1.06\hat{\sigma}N^{-\frac{1}{5}} \quad (4)$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

gde je $\hat{\sigma}$ minimalna vrednost od veličina: standardna devijacija uzorka i odnosa raspona međukvartila podeljenog sa 1,34 ($\hat{\sigma} = \min(s, \frac{Q_{75\%} - Q_{25\%}}{1.34})$), dok je N obim uzorka tj. broj osmotrenih vrednosti. Treba reći da se ovim obrascem računa optimalno h samo ako je populacija iz normalne raspodele. Za ostale slučajeve se ne dobija vrednost optimalnog h .

Skotovo izmenjeno pravilo Silvermana je u odnosu na prethodni obrazac izvršena zamena samo u vrednosti $\hat{\sigma}$ koju ovde predstavlja standardna devijacija uzorka i dato je u knjizi [15]:

$$h = 1.06\hat{\sigma}N^{-a} \quad (5)$$

gde je a eksponent koji iznosi 1/5.

Ocena funkcije gustine raspodele pomoću jezgra korišćenjem ova dva obrasca dovodi do skoro identičnog rezultata, čime se ovo pojednostavljenje preporučuje za dalje korišćenje.

Optimalna širina intervala h za integralno jezgro funkcije raspodele razlikuje se od optimalne širine za gustinu raspodele. U opštem slučaju se može reći da je širina intervala za funkciju raspodele jednaka

$$h = b \left(\frac{1}{N}\right)^{\frac{2m}{2m+1}} \quad (6)$$

gde je $b > 0$, što određuje širinu intervala h samo u zavisnosti od broja članova uzorka N . Može se pokazati da je odnos optimalnih h za gustinu i funkciju raspodele jednak $N^{1/3} / N^{1/5}$.

Međutim, kako pri određivanju raspodele na osnovu empirijskih podataka treba naći jedinstvenu raspodelu koja će pri generisanju dovesti do dobrog poklapanja i funkcije raspodele i gustine raspodele, a na osnovu velikog broja opita, može se zaključiti da optimalnu širinu intervala treba tražiti prema jednačini (5) sa eksponentom a u rasponu od 1/5 do 1/3 i probanjem odrediti najpovoljniju vrednost za dati uzorak.

Na kraju, treba spomenuti i da logaritamska transformacija podataka daje veoma dobre rezultate u kombinaciji sa neparametarskom ocenom funkcijom jezgra [16].

4 Prikaz rezultata na odabranom primeru

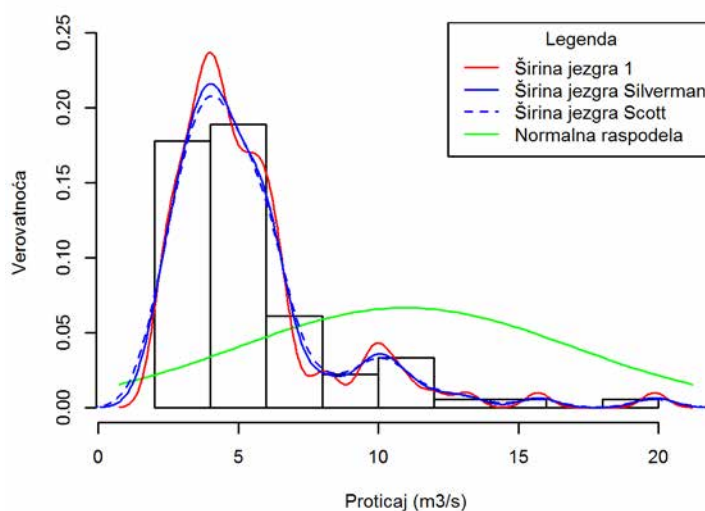
Za prikaz rezultata je odabran primer sa 7 stanica sliva reke Oldman iz Kanade, na nedeljnom nivou, koji predstavljaju rekonstruisane podatke na osnovu potrošnje, zahvatanjima za razne potrebe i sračunatih gubitaka kao što je npr. evaporacija. Time su dobijeni prirodni proticaji u periodu od 1912-2001, što predstavlja niz od 90 godina.

Podaci o proticajima su testirani na homogenost, slučajnost, normalnost, pojavu trenda i pojavu izuzetaka. Rezultati testova su pokazali da podaci pokazuju homogenost, slučajnost i da nema pojave trenda. Prilikom testiranja normalnosti podataka, čiji su rezultati prikazani u tabeli 1, zbog veoma izražene asimetrije, u proseku je oko 4,4% nedeljnih serija pokazivalo normalnost u slučaju kanadskih podataka. Nakon logaritamske transformacije normalnost je pokazalo oko 72% serija podataka, što ukazuje potpunu opravdanost korišćenja logaritamske transformacije za normalizovanje datih serija. Pri testiranju podataka na pojavu izuzetaka u proseku je oko 20% promenljivih ukazalo na pojavu gornjih izuzetaka.

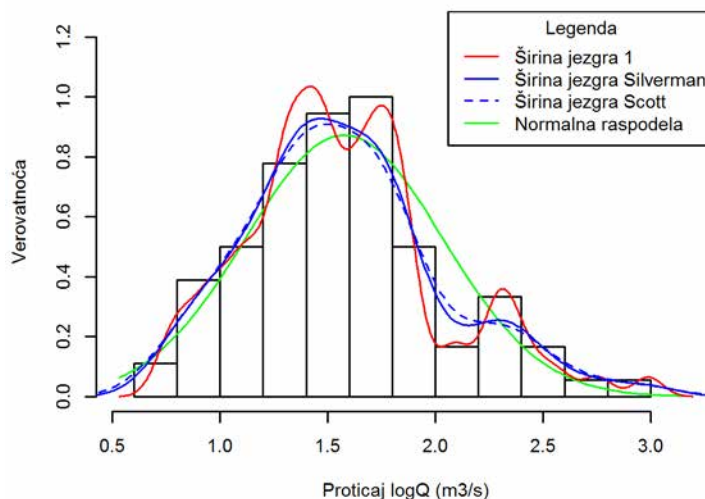
17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 1. Testiranje normalnosti nedeljnih protoka: broj serija od ukupno 52 serije i odgovarajući procenat za koje se hipoteza o normalnosti može prihvatiti na pragu značajnosti od 2%

Podaci	C5AE27	GSTDAM	C5AD32	C5AD41	G5AD26	C5AA24	C5AD07
Originalni	4	2	5	3	1	0	1
Logaritmovani	41	40	37	37	38	29	39
Originalni	7.7%	3.8%	9.6%	5.8%	1.9%	0.0%	1.9%
Logaritmovani	78.8%	76.9%	71.2%	71.2%	73.1%	55.8%	75.0%



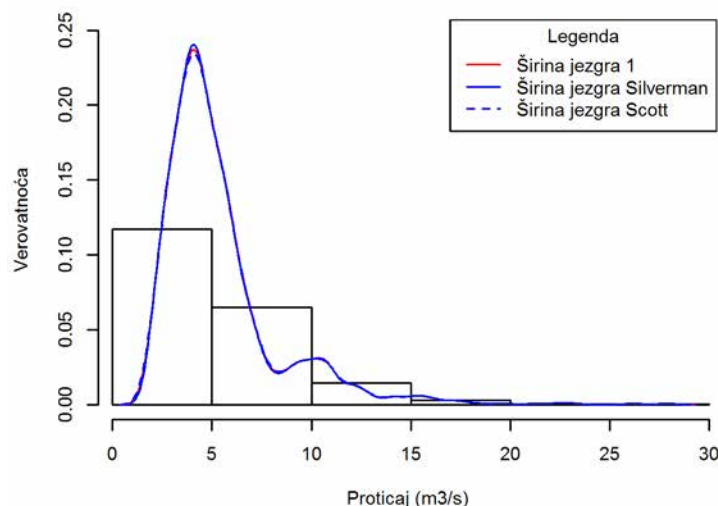
Slika 3. Prikaz histograma i funkcija gustine raspodele za različite širine jezgra i normalne raspodele za 3. nedelju na stanici C5AE27



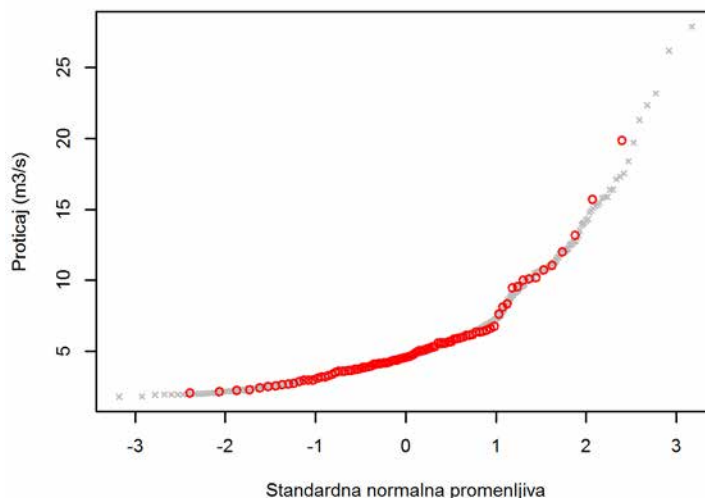
Slika 4. Prikaz histograma i funkcija gustine raspodele za različite širine jezgra i normalne raspodele za 3. nedelju na stanici C5AE27 na logaritamski transformisanim podacima

Na slikama 3 i 4 je prikazana serija podataka za treću nedelju na stanici C5AE27 pomoću histograma i neparameterske gustine raspodele pomoću funkcije jezgra uz korišćenje tri različite širine intervala sa realnim podacima i logaritmovanim podacima. Na istim slikama je iscrtana i normalna raspodela za parametre date serije. Na slici 3, gde su realni podaci, vidi se izrazita asimetrija raspodele a za sračunate parametre normalna raspodela uopšte ne odgovara empirijskoj raspodeli. Međutim, kada pogledamo sliku 4, gde su dati isti dijagrami kao i na slici 3 za logaritmovane podatke, vidi se da je normalna raspodela u priličnoj saglasnosti sa neparametarskim raspodelama ocenjenim pomoću funkcije jezgra i histogramom. Ovo je očigledan primer uspešne primene logaritamske transformacije podataka i potvrde razloga njene upotrebe.

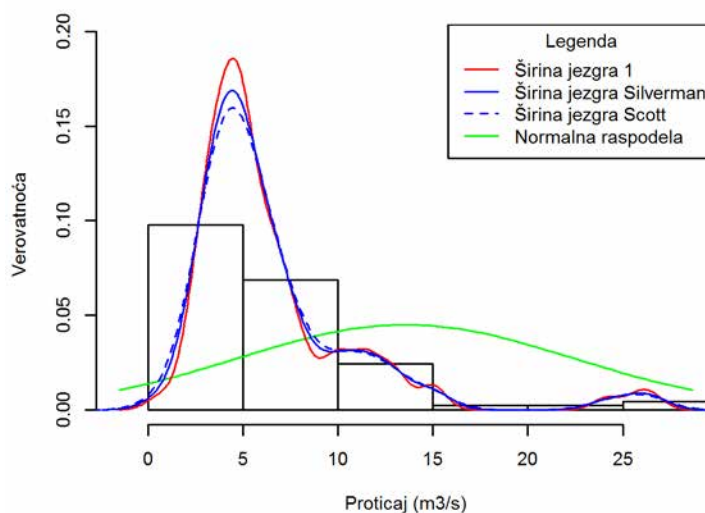
Na slikama 3 i 4. su pored histograma prikazane gustine raspodele korišćenjem različitim obrascima za širinu jezgra: 1. širina jezgra sračunata prema obrascu $h = 1.06\hat{\sigma}N^{-\frac{1}{3}}$, pre svega rukovodeći se što manjim odstupanjem neparametarske raspodele od empirijske raspodele, imajući u vidu uslove koje generisanje hidroloških veličina treba da zadovolji; 2. širina jezgra po Silvermanu je sračunata prema obrascu koji je dat u prethodnom poglavlju; 3. obrazac za širinu jezgra po Skotu je, takođe, naveden u prethodnom poglavlju. Na priloženim slikama se vide izvesne razlike u funkciji gustine raspodele ocenjenim sa širinom jezgra sračunatom sa različitim obrascima. Ove razlike su veoma male i jedino utiču na izglađenost funkcije i ta razlika je uočljivija kod transformisanih podataka. Međutim, kada se pogledaju rezultati generisanja, na osnovu serija generisanih za sva tri korišćena obrasca za širinu jezgra, koji su prikazani na slici 5, praktično ne postoje razlike u funkcijama gustine raspodele. Razlike se mogu videti u delu vrha funkcije gustine raspodele, gde su rezultati dobijeni korišćenjem obrasca (1) između linija gustina raspodele prema obrascima Silvermana i Skota. Odgovarajuće funkcije raspodele su prikazane na slici 6. Na osnovu ovih rezultata, može se zaključiti i da su oni podjednako dobri nezavisno od navedenih obrazaca. Ovde, svakako, imaju uticaja i slučajni broj prilikom generisanja podataka kao i mehanizam zadovoljenja uslova pri generisanju hidroloških veličina.



Slika 5. Prikaz histograma i funkcija gustine raspodele za različite širine jezgra i normalne raspodele za 3. nedelju na stanici C5AE27 na generisanim serijama podataka



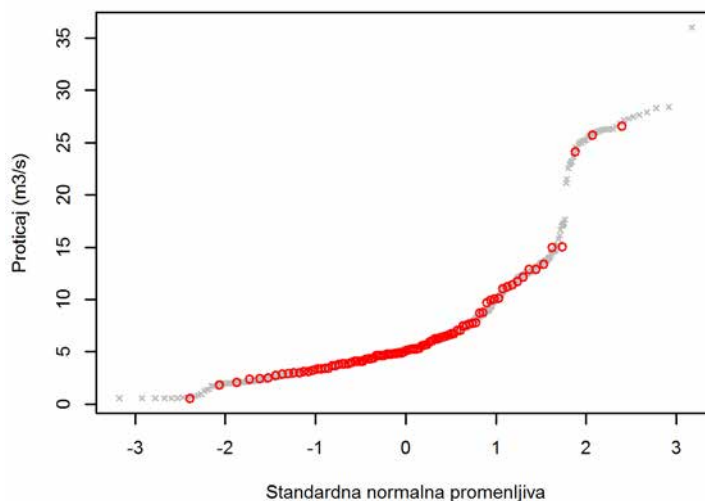
Slika 6. Prikaz funkcije raspodele osmotrenih i generisanih serija podataka za 3. nedelju na stanici C5AE27



Slika 7. Prikaz histograma i funkcija gustine raspodele za različite širine jezgra i normalne raspodele za 12. nedelju na stanici C5AE27

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, pri izboru obrasca za širinu jezgra može se praviti kompromis između veće „izglađenosti“ funkcije raspodele i prilagođenosti funkcije raspodele empirijskim podacima. Na slikama 7 i 8 je dat prikaz funkcije raspodele osmotrenih i generisanih podataka i ocena funkcije gustine raspodele na osmotrenim podacima za karakterističnu 12. nedelju na stanici C5AE27. Ocena funkcije neparametarske gustine raspodele pomoću jezgra oko vrednosti proticaja od 20 m³/s je jednaka 0 jer na tom delu nema osmotrenih podataka. Ovo se odražava i na raspodelu generisanih serija podataka, što se vidi na slici 8 gde nema generisanih podataka između četvrtog i trećeg najvećeg osmotrenog podatka. To je posledica manje širine jezgra i većeg rastojanja između osmotrenih tačaka na delu gornjih ekstrema. Ovo bi se moglo prevazići većom širinom jezgra ali bi se u tom slučaju

povećale razlike neparametarske raspodele od empirijske. Ovo je, možda, i poseban slučaj uz pojavu tri gornja izuzetka u podacima, mada se na slici 8. vidi da generisani podaci odlično prate raspodelu empirijske raspodele, čime se u generisanim podacima u potpunosti održavaju osnovne statistike osmotrenih podataka.



Slika 8. Prikaz funkcije raspodele osmotrenih i generisanih serija podataka za 12. nedelju na stanici C5AE27

5 Zaključak

Ovaj rad je imao za cilj da se zapažanja uočena pri istraživanju, koje se bavilo neparametarskim generisanjem stohastičkih hidroloških vremenskih serija, prenesu kao preporuka pri generisanju hidroloških veličina.

Logaritamska transformacija je jedna od često korišćenih transformacija podataka u hidrologiji. U spomenutom istraživanju uspešno je korišćena ova transformacija, gde je u velikom broju izvršeno generisanje serija sa istim uslovima uz i bez korišćenja transformacije podataka, pri čemu su dobijani bolji rezultati sa logaritamski transformisanim podacima iz razloga navedenih u poglavlju 2 prikazanih kroz rezultate u poglavlju 4. Samo korišćenje log-transformacije je bilo i uslovljeno obrascem za sračunavanje širine intervala jezgra, koji podrazumeva da je populacija iz normalne raspodele.

Širina jezgra neparametarske funkcije raspodele je kao parametar značajniji od oblika i izbora samog jezgra. Pri generisanju treba koristiti obrazac za sračunavanje širine jezgra prema jednačini (5) sa eksponentom a u granicama od $1/5$ do $1/3$, jer su najbolji rezultati generisanih serija u navedenom istraživanju dobijeni uz širinu jezgra sračunatim sa $a = 1/3$.

Literatura

1. Marković, Đ. (2015). *Neparametarsko generisanje stohastičkih hidroloških vremenskih serija. Doktorska disertacija*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

2. Marković, Đ., Plavšić, J., Ilich, N., & Ilić, S. (2015). *Non-parametric Stochastic Generation of Streamflow Series at Multiple Locations*. *Water Resources Management*, 29(13), 4787–4801. doi:10.1007/s11269-015-1090-z
3. Marković, Đ., Plavšić, J., Stanić, M., & Sekulić, G. (2011). *Neparametarske funkcije raspodele u hidrologiji*. *Vodoprivreda*, 43(249-251), 13–22.
4. Marković, Đ., Plavšić, J., Stanić, M., & Sekulić, G. (2012). *Stohastičko generisanje logaritamski transformisanih hidroloških serija na više hidroloških stanica*. Savetovanje SDHI i SDH (1–14). Donji Milanovac.
5. Ilich, N., & Despotovic, J. (2008). *A simple method for effective multi-site generation of stochastic hydrologic time series*. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(2), 265–279. doi:10.1007/s00477-007-0113-6
6. Ilich, N. (2009). *A matching algorithm for generation of statistically dependent random variables with arbitrary marginals*. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 468–478.
7. Ilich, N. (2013). *An effective three-step algorithm for multi-site generation of stochastic weekly hydrological time series*. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 85–98. doi:10.1080/02626667.2013.822643
8. Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey; Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation* (Techniques., Vol. 36). U. S. Geological Survey. doi:10.2307/1269385
9. Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). *An Analysis of Transformations*. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 26(2), 211–252.
10. Wasserman, L. (2006). *All of Nonparametric Statistics*. Design (Springer T., Vol. 102). Springer. doi:10.1016/j.peva.2007.06.006
11. Adamowski, K. (1987). *Nonparametric techniques for analysis of hydrological events*. *Water for the Future: Hydrology in Perspective* (67–76). Rome, Italy: IAHS Publication no. 164.
12. Labatiuk, C., & Adamowski, K. (1987). *Application of Nonparametric Density Estimation to Computation Flood Magnitude/Frequency*. *Advances in the Statistical Sciences: Stochastic Hydrology*, 37, 161–180. doi:10.1007/978-94-009-4792-4_10
13. Sharma, A., Tarboton, D. G., & Lall, U. (1997). *Streamflow simulation: A nonparametric approach*. *Water Resources Research*, 33(2), 291. doi:10.1029/96WR02839
14. Silverman, B. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall (Vol. 37). doi:10.2307/2347507
15. Scott, D. (1992). *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*.
16. Rajagopalan, B., Salas, J. D., & Lall, U. (2010). *Stochastic Methods for Modeling Precipitation and Streamflow*. In B. Sivakumar & R. Berndtsson (Eds.), *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Primena modifikovane TIPS metode za dugoročne projekcije serija godišnjih proticaja

Milan Stojković¹
Stevan Prohaska²
Jasna Plavšić³

APSTRAKT: U ovom radu prezentovan je modifikovani TIPS (*Tendency, Intermittency, Periodicity and Stochasticity*) model za modeliranje dugoročnih hidroloških promena. Ovaj model baziran je na TIPS metodi [4], koja je modifikovana na način da se koriste godišnje serije umesto dnevnih serija. Dugoročne promene vodnih resursa opisane su putem linearnog trenda i makroperiodične komponente. Ostatak vremenske serije predstavlja stohastička komponenta. Model je primenjen za sliv reke Lim na hidrološkoj stanici Prijepolje za period 1931–2012. Osim toga, model je korišćen za dugoročne projekcije godišnjih proticaja. Dugoročne projekcije za blisku (2012–2040), dalju (2041–2070) i daleku (2071–2100) budućnost određene su na osnovu dugoročne statističke zavisnosti vremenske serije godišnjih proticaja. Rezultati sugerišu da višegodišnja periodičnost proticaja može imati značajan uticaj na dostupnost vodnih resursa. Osim toga, dobijeni rezultati su upoređeni sa dugoročnim projekcijama godišnjih proticaja dobijenim korišćenjem SDTS modela [3] u skladu sa A1B i A2 klimatskim scenarijom.

Ključne reči: TIPS metoda, dugoročne projekcije, višegodišnja periodičnost

Application of the modified TIPS method for long-term hydrological projection of mean annual flows

ABSTRACT: A modified TIPS (*Tendency, Intermittency, Periodicity and Stochasticity*) model for modelling long-term hydrological changes is presented in this paper. This model is based on the TIPS method [4] which is modified in such a way that annual time scale is used instead of daily. The long-term changes in annual discharge are described by a linear trend and multi-decadal cycles which make the deterministic component. The remainder of the time series is the stochastic component. The model is applied for modelling annual flows at Prijepolje hydrological station at Lim River for observed period from 1931 to 2012. Furthermore, the model is then used for long-time projection of annual flows. The long term projections for near (2013–2040), further (2041–2070) and distant (2071–2100) future are obtained by using the captured long-term dependence of annual flows. The results suggest that the multi-decadal periodicity can have a significant contribution on availability of the water resource in the future. Also, the obtained results are compared with long-term annual projection given by SDTS model [3] according to A1B and A2 climate scenarios.

Keywords: TIPS method, long-term hydrological projection, multi-annual periodicity

¹ Milan Stojković, dipl. građ. inž., istraživač saradnik, Jaroslav Černi, Beograd, milan.stojkovic@jcerni.co.rs

² Dr Stevan Prohaska, redovni profesor, Jaroslav Černi, Beograd

³ Dr Jasna Plavšić, vanredni profesor, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd

1 Uvod

Uticaj klimatskih promena na vodne resurse je očigledan. On se pre svega ogleda u promeni unutargodišnje raspodele proticaja u slivu. Takve promene su direktna posledica povećanja globalne temperature i direktno utiču na stanje zaliha vode u slivu [1]. Klimatske promene utiču i na ekstremne vrednosti proticaja pri čemu su u ekstremnim proticajima prisutni trendovi i višegodišnje periodične promene kao posledica različitih atmosferskih cirkulacija [2]. Međutim, doprinos prirodnih faktora na dugoročne promene u vodnim resursima, s jedne strane, i doprinos klimatskih promena, s druge strane, nije najbolje izučen. Istraživanje sprovedeno u ovom radu ima za cilj da utvrdi doprinos prirodnih faktora, tj. višegodišnje periodičnosti proticaja na dugoročne projekcije proticaja u slivu. Osim toga, cilj rada je da se rezultati dugoročnih projekcija godišnjih proticaja, dobijenih korišćenjem dugoročne statističke zavisnosti vremenskih serija, uporede sa rezultatima dugoročnih projekcija koji su dobijene korišćenjem različitih klimatskih scenarija [3].

2 Modifikovani TIPS (Tendency, Intermittency, Periodicity, Stochasticity) model

2.1 Modeliranje serija mesečnih proticaja tokom perioda osmatranja

Dekompozicija vremenske serije vrši se na osnovu postulata stohastičke hidrologije odvajanjem determinističke i stohastičke komponente [4]. Determinističku komponentu čine komponenta trenda i višegodišnja makroperiodična komponenta. Stohastička komponenta se sastoji od periodičnosti velikih frekvencija, dok ostatak predstavlja slučajna komponenta. Princip dekompozicije izložen je u sledećem izrazu baziranom na TIPS metodi za modeliranje vremenskih serija [4]:

$$Q(t) = Q_{DET}(t) + Q_{STOH}(t) + \varepsilon(t) = [Q_T(t) + Q_P(t)] + Q_{STOH}(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

gde je $Q(t)$ nestacionarna hidrološka serija, $Q_{DET}(t)$ je deterministička komponenta serije koja se sastoji iz trenda $Q_T(t)$ i makroperiodične komponente $Q_P(t)$, $Q_{STOH}(t)$ je stacionarna stohastička komponenta serije, dok je $\varepsilon(t)$ slučajna vremenska serija. Originalni pristup je modifikovan, pa se umesto dnevnih serija koriste srednje godišnje i sezonske serije proticaja s ciljem da se modelira dugogodišnja makroperiodična komponenta.

U tabeli 1 prikazan je način dekomponovanja vremenske serije godišnjih proticaja na determinističku, stohastičku i slučajnu komponentu. Osim toga, prikazane su korišćene metode za modeliranje komponentnih delova, vremenske serije za njihovu ocenu kao i vremenska diskretizacija koja je korišćena prilikom modeliranja.

Agregacijom modelirane determinističke $Q_{DET}(t)$ i stohastičke komponente $Q_{STOCH}(t)$ na istom vremenskom koraku dobija se ukupna modelirana vrednost vremenske serije srednjih godišnjih proticaja po modifikovanoj TIPS metodi:

Tabela 1. Dekompozicija vremenskih serija mesečnih proticaja korišćenjem modifikovane TIPS metode

Table 1. Decomposition of monthly discharge time series using modified TIPS method

Komponenta hidrološke mesečne serije proticaja:		Korišćene metode:	Vremenske serije za ocenu komponentata:	Vremenska skala:
Deterministička komponenta Q_{DET}	Linarni trend Q_T	Kendall i Stuart test	Godišnji proticaji $Q(t)$	godišnja
	Makroperiodična komponenta Q_P	LOESS metoda, Furijeova transformacija	Reziduali prve vrste: $Q'(t) = Q(t) - Q_{T_w}(t)$	godišnja
Stohastička komponenta Q_{STOCH}		AR(p) model	Reziduali druge vrste: $Q''(t) = Q(t) - Q_T(t) - Q_P(t)$	godišnja
Slučajna komponenta (greška modeliranja) $\varepsilon(t)$		Testovi normalnosti: Jarque-Bera, PPCC test	Greška modeliranja: $\varepsilon(t) = Q(t) - [Q_{DET} + Q_{STOCH}]$	godišnja

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= Q_{DET}(t) + Q_{STOCH}(t) = Q_T(t) + Q_P(t) + Q_{STOCH}(t) = \\
 &= \left[\hat{\alpha} + \hat{\beta}t \right] + \left[\sum_{i=1}^q \left(\hat{a}_i \sin(2\pi \hat{f}_i t) + \hat{b}_i \cos((2\pi \hat{f}_i t)) \right) + \right. \\
 &\quad \left. \hat{\sigma}_{STOCH} \left[\hat{\phi}_1 x_{t-1} + \hat{\phi}_2 x_{t-2} + \dots + \hat{\phi}_p x_{t-p} + a_t + \hat{\theta}_1 a_{t-1} + \hat{\theta}_2 a_{t-2} + \dots + \hat{\theta}_q a_{t-q} \right] \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

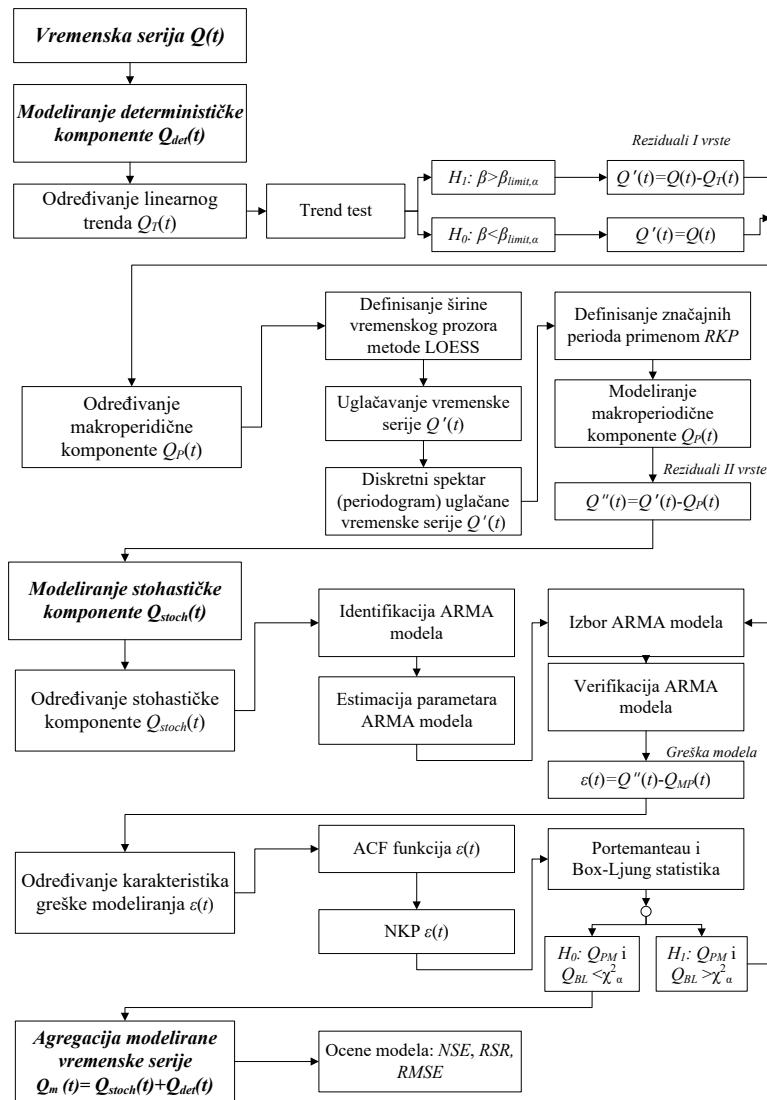
$$t = 1, 2, \dots, N.$$

Komponente u formuli (2) su sledeće: t – vremenski korak, α i β – parametri regresione jednačine, a_i i b_i – Furijeovi koeficijenti, q – broj značajnih harmonika, f_i – frekvencija, N - ukupan broj članova vremenske serije, σ_{STOCH} – odstupanje stohastičke komponente, x_t – standardizovana vrednost stohastičke komponente, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ – autoregresionni parametri, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta$ – parametri pokretnih sredina, a_t – slučajna vremenska serija. Prikaz modifikovanog TIPS modela dat je u obliku sheme koja je prikazana na slici 1.

2.2 Dugoročne projekcije godišnjih proticaja

Projekcije determinističke komponente $Q_{DET}(t)$, tj. komponente trenda $Q_T(t)$ i makroperiodičnosti $Q_P(t)$, utvrđuju se primenom ekstrapolacije. Identifikacija linearnog trenda vrši se u okviru istorijskog vremenskog intervala $t = 1, 2, \dots, N$. Ukoliko se utvrdi da je trend značajan, treba izvršiti modeliranje trenda. Za budući period $t = N+1, N+2, \dots, L$ trend se određuje ekstrapolacijom uz pretpostavku da se parametri regresione jednačine linearnog trenda određuju tokom istorijskog perioda.

Metoda ekstrapolacije primenjena je i za određivanje kratkoročnih projekcija dugogodišnje makroperiodične komponente vremenske serije $Q(t)$. Ekstrapolacija periodične komponente $Q_P(t)$ za period $t = N+1, N+2, \dots, N+L$ izvršena je primenom ocenjenih amplituda značajni talasi a_i i b_i na niskim frekvencijama tokom osmatranja.



Slika 1. Shema modifikovanog TIPS modela za kratkoročne projekcije godišnjih i sezonskih proticaja

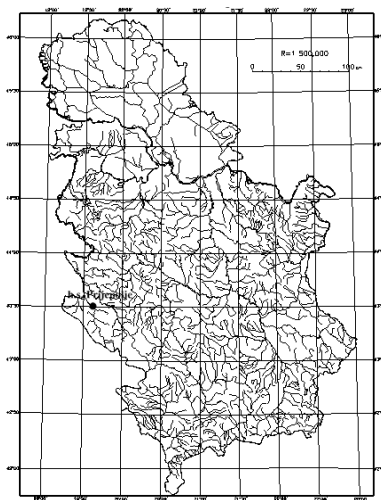
Figure 1. Scheme of modified TIPS model for short-term projections of annual and seasonal discharge

Prognoza stohastičke komponente $Q_{STOCH}(t)$ za budući period od L godina ($t = N+1, N+2, \dots, N+L$) vršena je korišćenjem $AR(p)$ modela i njihovih autoregresionih parametara $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ ocenjenih tokom perioda osmatranja. Da bi se $AR(p)$ modeli primenili za dugoročnu projekciju stohastičke komponente, vršeno je generisanje slučajne vremenske serije a_t . Data vremenska serija generisana je do kraja 21. veka sa uzoračkom varijansom $Var(a_t)$ i matematičkim očekivanjem $E(a_t)$, koji odgovaraju ocenjenim vrednostima razmatrane vremenske serije $Q_{STOCH}(t)$. Prilikom generisanja slučajne serije a_t zanemaren je uticaj serijske korelacije koju poseduje stohastička komponenta.

Kratkoročne projekcije srednjih godišnjih proticaja vrše se agregacijom komponente trenda, višegodišnje makroperiodičnosti i stohastičke mikroperiodične komponente za period $t+1, t+2, \dots, t+L$.

3 Podaci

Studija je sprovedena na slivu reke Lim na hidrološkoj stanici Prijepolje (slika 2) sa dostupnim hidrološkim podacima za period 1931–2012. Godišnje serije proticaja preuzete su od Hidrometeorološkog zavoda Srbije.



Slika 2. Lokacija hidrološke stanice Prijepolje sa hidrografskom mrežom Srbije
Figure 2. Location of hydrological station Prijepolje with hydrograph net of Serbia

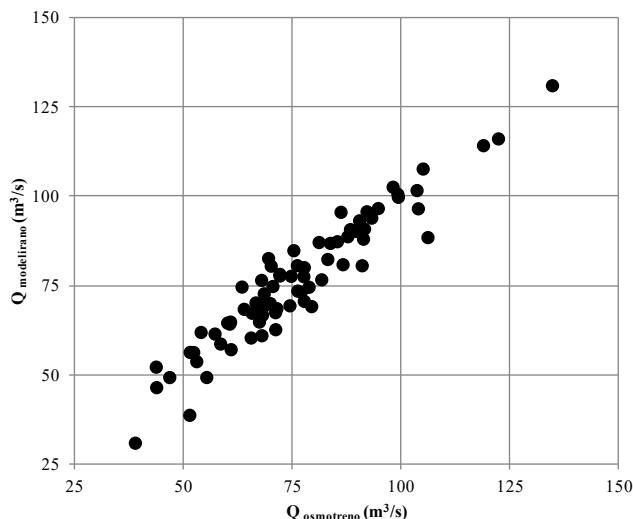
4 Rezultati

4.1 Modeliranje godišnjih proticaja (1931–2012)

Modelirani srednji sezonski i godišnji proticaji prema modifikovanoj TIPS metodi dobijeni su agregacijom determinističke i stohastičke komponente na istom vremenskom koraku prema formuli (1). Razmatrane komponente ocenjene su za period 1931–2012. pri čemu je utvrđeno da linearni trend srednjih godišnjih proticaja na stanici Prijepolje nije značajan na pragu značajnosti $\alpha=0.05$. Reziduali prve vrste srednjih godišnjih proticaja su zatim uglačani metodom Loess radi lakše identifikacije makroperiodične komponente. Primenom Fourier-ove transformacije utvrđeno je da su značajne makroperiode od 20.5, 8.2, 9.1, 13.7 i 10.3 godina. Stohastička komponenta modelirana je AR(7) modelom pri čemu je greška modeliranja te komponente slučajna serija i pripada normalnoj raspodeli na pragu poverenja $\alpha=0.05$.

Upoređivanjem modeliranih sa osmotrenim vremenskim serijama dobijene su ocene efikasnosti modifikovanog TIPS modela. Ocena efikasnosti modela iskazuje se pomoću

funkcija NSE (*Nash–Sutcliffe efficiency*) koji u slučaju godišnjih serije na stanici Prijepolje iznosi 0.809. Na osnovu toga se zaključuje da je serija dobro modelirana. Na slici 3 prikazani su osmotreni i modelirani srednji godišnji proticaji na stanici Prijepolje.



Slika 3. Osmotreni i modelirani srednji godišnji proticaji na stanici Prijepolje (reka Lim) za period 1931–2012

Figure 3. Observed and modeled mean annual discharge at the station Prijepolje (the Lim River) for the period 1931–2012

Prilikom ocene modela analizirano je učešće svake pojedinačne komponente u varijansi osnovne serije. Na osnovu rezultata zaključuje se da komponenta linearnog trenda nema učešće u ukupnoj varijansi serije (trend nije značajan). Makroperiodična komponenta beleži učešće u ukupnoj varijansi u rasponu od 44.1% dok je u slučaju stohastičke komponente učešće od 29.7% od ukupne varijanse. Učešće neobjašnjene varijanse ili greške modeliranja iznosi 26.2%.

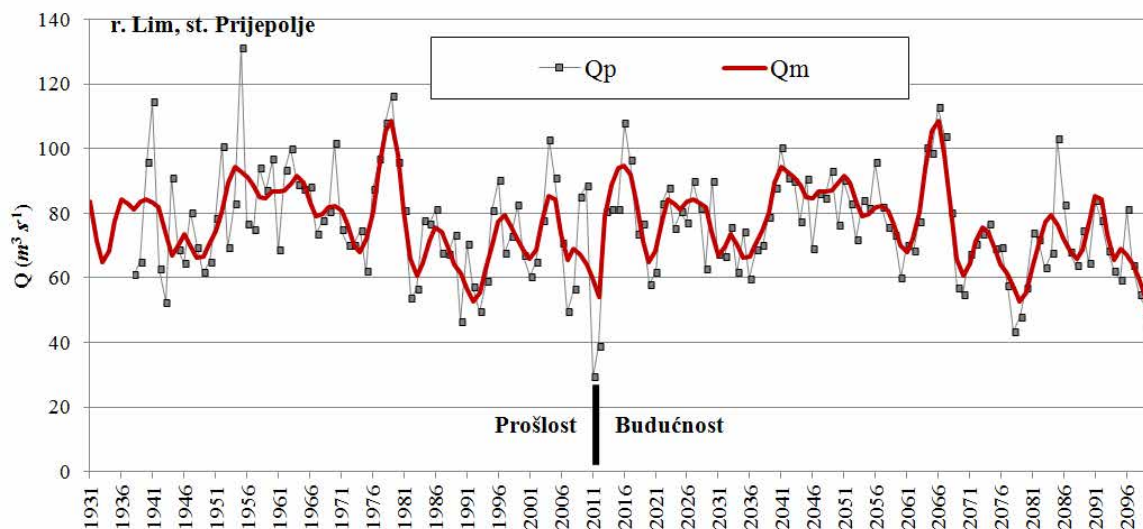
Naredni korak pre korišćenja modifikovanog TIPS modela predstavlja verifikacija rezultata modela. Verifikacija rezultata sastoji se iz upoređivanja statističkih parametara osmotrenih godišnjih i sezonskih proticaja sa modeliranim proticajima. Tako se vrši upoređivanje kvartila osmotrenih i modeliranih srednjih godišnjih proticaja, kao i njihove ACF (*autocorrelation function*). Analizom osmotrenih i modeliranih kvartila utvrđuje se da je postignuto zadovoljavajuće slaganje. Veće slaganje postiže se za kumulativnu verovatnoću od 50%, nego u slučaju 25% i 75%. ACF funkcija je pokazala zadovoljavajuće slaganje između modeliranih i osmotrenih serija.

4.2 Dugoročne projekcije godišnjih proticaja (2013–2100)

Kada su određeni matematički modeli komponentnih delova (jednačina 1) serija godišnjih proticaja pristupa se njihovoj ekstrapolaciji za period do kraja 21. veka. Na slici 4 prikazani su modelirani srednji godišnji proticaji Q_m za period 1931–2012. i dugoročne projekcije

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

godišnjih proticaja za period 2013–2100. na stanici Prijepolje. Osim njih, prikazana je i makroperiodična komponenta Q_p za iste vremenske intervale.



Slika 4. Modelirani srednji godišnji proticaji Q_m (1931–2012), dugoročne projekcije srednjih godišnjih proticaja (2013–2100) i makroperiodična komponenta Q_p na stanici Prijepolje
Figure 4. The modeled annual discharges Q_m (1931–2012), long-term projections of average annual discharges (2013–2100) and macroperiodical component Q_p at the station Prijepolje

Rezultati dugoročnih projekcija srednjih godišnjih proticaja na profilu stanice Prijepolje sagledani su u odnosu na modelirane proticaje tokom referentnog perioda 1961–1990. Osim toga, rezultati dobijeni primenom modifikovanog TIPS modela upoređeni su sa vrednostima dugoročnih godišnjih projekcija dobijenim korišćenjem SDTS modela [3]. Treba napomenuti da su rezultati SDTS modela određeni u skladu sa klimatskim scenarijima A1B i A2. U tabeli 2 prikazane su relativne promene medijana dugoročnih projekcija godišnjih proticaja tokom bliske (2012–2040), dalje (2041–2070) i daleke (2071–2100) budućnosti dobijenih korišćenjem modifikovanog TIPS i SDTS modela na profilu stanice Prijepolje.

Tabela 2. Relativne promene medijane dugoročnih projekcija godišnjih proticaja tokom bliske (2012–2040), dalje (2041–2070) i daleke (2071–2100) budućnosti u odnosu na referentni period (1961–1990) na stanici Prijepolje: modifikovani TIPS model i SDTS model
Table 2. Relative changes of annual discharge long-term projections median during the near (2012–2040), further (2041–2070) and far (2071–2100) future concerning the reference period (1961–1990) at the station Prijepolje: modified TIPS model and SDTS model

Periodi:	modifikovani TIPS model	SDTS model	
	Q	Q A1B	Q A2
2013–2040	-2.4%	-6.9%	+5.1%
2041–2070	+6.1%	-12.4%	-1.1%
2071–2100	-13.8%	-18.4%	-22.4%

Rezultati iz tabele 2 upućuju da se tokom perioda bliske budućnosti (2013–2040) očekuje smanjenje godišnjih proticaja od -2.4% u odnosu na referentni period (1961–2012) po modifikovanom TIPS modelu. Nasuprot tome, rezultati SDTS modela upućuju na moguću promenu proticaja od -6.9% do +5.1% po klimatskim scenarijima A1B i A2. Dalja budućnost (2041–2070) pokazuje oprečne rezultate razmatranih modela. Daleka budućnost (2071–2100) upućuje na značajno smanjenje serija godišnjih proticaja, a rezultati razmatranih modela su međusobno saglasni. Očekivano smanjenje proticaja veće je u slučaju SDTS modela (18.4%–22.4%) u odnosu na modifikovani TIPS model i iznosi -13.8% u odnosu na referentni period (1961–1990). Takvo smanjenje proticaja otvara pitanje doprinosa prirodnih fenomena, kao što su dugoročne periodične promene, na smanjenje vodnih resursa u 21. veku.

5 Zaključak

U ovom radu prikazan je modifikovani TIPS (*Tendency, Intermittency, Periodicity and Stochasticity*) model za modeliranje dugoročnih hidroloških promena. Ovaj model baziran je na TIPS metodi [4], koja je modifikovana s ciljem lakše identifikacije dugoročnih promena u vodnim resursima. Polazi se od pretpostavke da se vremenska serija godišnjih proticaja deli na deterministički i stohastički deo. Deterministički deo se sastoji od linearnog trenda i makroperiodične komponente, a njime se predstavljaju dugoročne promene u seriji godišnjih proticaja. Stohastičkim delom predstavljaju se visokofrekventne promene u seriji godišnjih proticaja. Model je primenjen u slivu reke Lim na stanici Prijepolje s ciljem da se odrede dugoročne projekcije godišnjih proticaja na osnovu utvrđene dugoročne statističke zavisnosti serije proticaja. Dugoročne projekcije su sagledane za blisku (2012–2040), dalju (2041–2070) i daleku (2071–2100) budućnost. Period bliske budućnosti upućuje na smanjenje godišnjih proticaja od 2.4% u odnosu na referentni period (1961–1990). Tokom dalje budućnosti očekuje se povećanje proticaja od 6.1%, dok se značajno smanjenje proticaja očekuje tokom daleke budućnosti u iznosu od 13.8%. Na osnovu rezultata dugoročnih projekcija dobijenih za daleku budućnost (2071–2100) zaključuje se da višegodišnja periodičnost može imati veliki uticaj na buduća smanjenja proticaja u slivu. Dugoročnu varijabilnost godišnjih proticaja treba uzeti u obzir prilikom planiranja u vodoprivredi da bi se ocenili vodni resursi sliva. Istovremeno, potrebno je razmatrati upotrebu hidroloških modela baziranih na korišćenju dugoročnih projekcija parametara klimatološkog modeliranja u slivu s ciljem određivanja uticaja projektovane emisije gasova staklene bašte na vodne resurse.

Literatura

1. Simonović, S.P., (2013), *Floods in a Changing Climate, Risk Management*, Part of International Hydrology Series, Cambridge University Press, New York, USA.
2. Salas JD., Obeysekera J., (2014), *Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events*, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19 (3): 554-568.
3. Stojković M., Plavšić J., Prohaska S., Despotović J., Pavlović D., (2015), *Novi metodološki okvir SDTS (Stochastic Decomposition Time Series) za dugoročne projekcije mesečnih proticaja u uslovima klimatskih promena*, 17. Savetovanje SDHI i SHD, Vršac, 5–6. oktobar, Srbija.
4. Yevjevich, V., (1984), *Structure of Daily Hydrologic Series*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, U.S.A.

A maximum entropy spectral analysis of precipitation for the territory of Serbia

Mladen Milanovic¹
Milan Gocic²
Slavisa Trajkovic³

ABSTRACT: Precipitation is one of the climate parameters, which changes significantly affect the state of the climate. Changes in precipitation over time even more encouraged their research, especially when we consider their importance for hydraulic structures. In this paper, annual precipitation was analyzed through the maximum entropy spectrum on the territory of Serbia for the period from 1946 to 2012. Determination of maximum entropy spectrum was conducted over Burg method. The autocorrelation spectral analysis was presented, while the Levinson-Burg algorithm was applied to determine the Lagrange multipliers.

Keywords: precipitation, Burg method, autocorrelation, Levinson-Burg algorithm, Lagrange multipliers, Serbia.

Analiza maksimalne entropije spektra padavina na teritoriji Srbije

APSTRAKT: Padavine predstavljaju jedan od klimatskih parametara, čije promene značajno utiču na stanje klime. Promene padavina tokom vremena još više podstiču na njihovo proučavanje posebno kada se uzme u obzir njihov značaj za hidrotehničke objekte. U radu su posmatrane godišnje padavine pomoću maksimalne entropije spektra na teritoriji Srbije za vremenski period od 1946. do 2012. godine. Proračun maksimalne entropije spektra je sproveden korišćenjem Burgove metode. Prikazana je autokorelacija spektralne analize, dok je Levinson-Burgov algoritam primenjen za određivanje Lagranžovih multiplikatora.

Ključne reči: padavine, Burgova metoda, autokorelacija, Levinson-Burgov algoritam, Lagranžovi multiplikatori, Srbija.

¹ Mladen Milanovic, MSc, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, A. Medvedeva 14, Nis, Serbia, e-mail: mmsmladen@gmail.com

² Dr Milan Gocic, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, A. Medvedeva 14, Nis, Serbia

³ Prof. Dr Slavisa Trajkovic, University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, A. Medvedeva 14, Nis, Serbia

1 Introduction

Precipitation represents the principal parameter of the hydrological cycle. Since precipitation has uneven spatial and temporal distribution it can easily cause hydrological hazards such as floods and droughts. Due to the impact of precipitation on the state of the climate and hydrological regimes, the model development for its monitoring is a very important task [8]. Time series models are used to describe the principle and reveal the causes in behavior of precipitation, as well as to predict the future state of precipitation.

Spectral analysis is used to detect periodicity in time series data [12]. The main goal in spectral analysis is to determine of the spectrum and to extent the spectrum beyond the length of data. The main techniques of spectral analysis can be classified into two categories: the methods based on discrete Fourier transformations and methods based on the maximum entropy [10]. Maximum entropy spectral analysis has been widely applied to time series, such as surface air temperature, climatic indices and precipitation [4, 6, 13].

The application of entropy theory for streamflow forecasting was conducted in [2], where the monthly streamflow data from 19 stations in Mississippi, Tennessee, Missouri, Colorado River watershed and Texas-Gulf watershed were observed to test configurational entropy theory. In [11], the behavior of the Shannon entropy and the time generalized q -entropy in rainfall and streamflows were investigated. The precipitation time series for the period 1850-1991 on the territory of Barcelona were investigated by using the spectral analysis in [6]. Annual, seasonal and monthly precipitation series for the Belgrade station over the spectral analysis were analyzed in [13] to illustrate how this method can provide information on climate variability. The results showed that all three applied methods (the autocorrelation, the maximum entropy spectral analysis, the multitaper method) achieved nearly identical results on annual level. Analysis of precipitation time series for the city of Nis through Fourier transformations was conducted in [7]. The results showed that there are no significant periods of precipitation in Nis for the period 1946-2011.

The paper presents analysis of annual precipitation for the three meteorological stations in Serbia over the period 1946-2012 using the maximum entropy spectrum. Burg entropy is used to determine the maximum entropy spectrum.

2 Study area

The study area is Serbia located in Southeastern Europe. The climate is moderate continental, where January is the coldest month over the year and the warmest is July. The average annual precipitation is 896 mm. In the southwest of the country the greatest amount of precipitation was occurred in the autumn. The wettest month is June, while February and October are the months with the lowest amount of precipitation.

Three sub-regions for different precipitation regimes on the territory of Serbia were identified in [5]. According to these regions, three meteorological stations were selected – Nis, Sombor and Pozega (one for each sub-region). Series of monthly precipitation data were collected for the period of 1946–2012. Geographical descriptions and statistical parameters of annual precipitation time series of the meteorological stations used in the study are summarized in Table 1.

Table 1. Geographical descriptions and statistical parameters of annual precipitation time series of the meteorological stations used in the study

Tabela 1. Geografski položaj i statistički parametri godišnjih padavina za meteorološke stanice koje su korišćene u radu

Station name	Longitude (E)	Latitude (N)	Elevation (m a.s.l.)	Mean (mm)	Standard deviation (mm)	Coefficient of variation (%)
Nis	21°54'	43°20'	204	578.8	110.5	19.1
Pozega	20°02'	43°50'	310	746.7	134.2	18.0
Sombor	19°05'	45°47'	87	588.2	129.1	21.9

3 Methodology

In order to apply maximum entropy of spectral analysis on precipitation, it is necessary to conduct a series of preliminary steps i.e. the determination of autocovariance and autocorrelation of precipitation and the estimation of Lagrange multipliers using the Levinson-Burg algorithm.

The maximum entropy spectrum was conducted using the Burg entropy as [1, 3, 12]:

$$H(\omega) = \int_{-W}^W \log[S(\omega)]d\omega \quad (1)$$

where ω is the frequency, W is the band width, and $S(\omega)$ is the power spectrum at frequency ω .

Levinson-Burg algorithm is used for determining Burg entropy, and it is defined with the help of a matrix for $N + 1$ equations:

$$\begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_{-1} & \cdot & \cdot & \rho_{-N} \\ \rho_1 & \rho_0 & \cdot & \cdot & \rho_{1-N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{N-1} & \rho_{N-2} & \cdot & \rho_0 & \cdot \\ \rho_N & \rho_{N-1} & \cdot & \cdot & \rho_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \\ \cdot \\ b_{N-1} \\ 1 \end{bmatrix} + C_N \begin{bmatrix} 0 \\ b_{N-1}^* \\ \cdot \\ b_1^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{N-1} \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ \Delta_N \end{bmatrix} + C_N \begin{bmatrix} \Delta_n^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where the values of b_1^*, \dots, b_{N-1}^* and Δ_n^* denotes the conjugate reverse of b_1, \dots, b_{N-1} and Δ_n , ρ_0, \dots, ρ_N are autocorrelation and

$$\Delta_N = \sum_{n=0}^{N-1} \rho_{N-n} b_n \quad (3)$$

$$C_N = -\frac{A_N}{P_{N-1}} \quad (4)$$

$$P_N = P_{N-1} (1 - |C_N|^2) \quad (5)$$

where $b_0 = 1$, P_N is one step ahead prediction error power and C_N is the coefficient of filter. The N th order prediction filter is obtained from C_N and the $N-1$ the order filter as:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{N-1} \\ a_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{N-1} \\ 0 \end{pmatrix} + C_N \begin{pmatrix} 0 \\ b_{N-1}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ b_1^* \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

The maximum entropy spectrum can be expressed as:

$$S(f) = \frac{P_N}{\left| 1 + \sum_{k=1}^N a_k \exp(-2\pi ikf) \right|^2} \quad (7)$$

where f is the Nyquist frequency and a_1, \dots, a_N are Lagrange multipliers.

4 Results and discussion

The mean annual precipitation for three selected stations for the period 1946-2012 is shown in Figure 1. The highest amount of precipitation for Nis station was recorded in 1955 (794 mm), and the lowest value of precipitation was recorded in 1946 (306 mm). The lowest mean annual precipitation for Sombor was in 2000 with value of 277.5 mm. The highest value of precipitation for Pozega was 1052 mm and that was recorded in 1989. The average values of precipitation for the observed period for Nis and Sombor stations were approximately the same 578.8 and 588.2 mm, respectively.

Figure 2 shows the autocorrelation values with 95 % confidence interval determined by using the mean annual precipitation values with a time lag of 16 years. According to the values of autocorrelation coefficients for $k = 1, \dots, 15$, it can be concluded that observed time series are stationary and time independent for all three stations. At Sombor station, there is the periodic component of six years (steps), while there are not periodic components for other stations.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

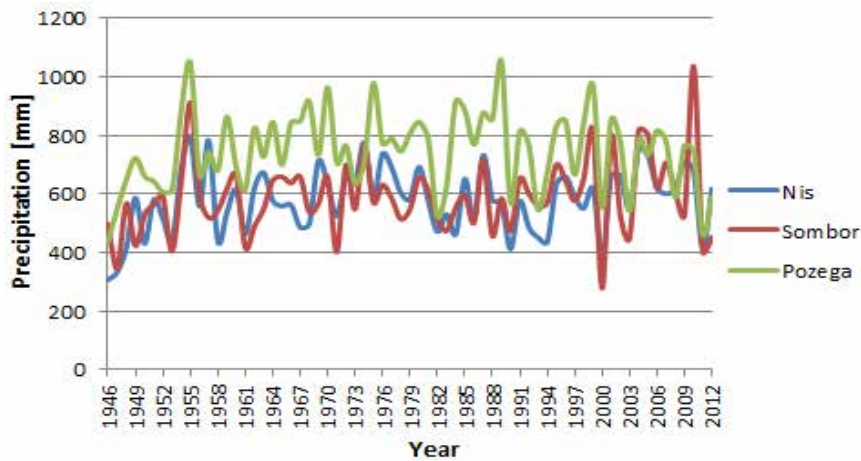


Figure 1. Mean annual precipitation for Nis, Sombor and Pozeza over the period 1946-2012

Slika 1. Prosečne godišnje padavine za Niš, Sombor i Požegu za period od 1946-2012

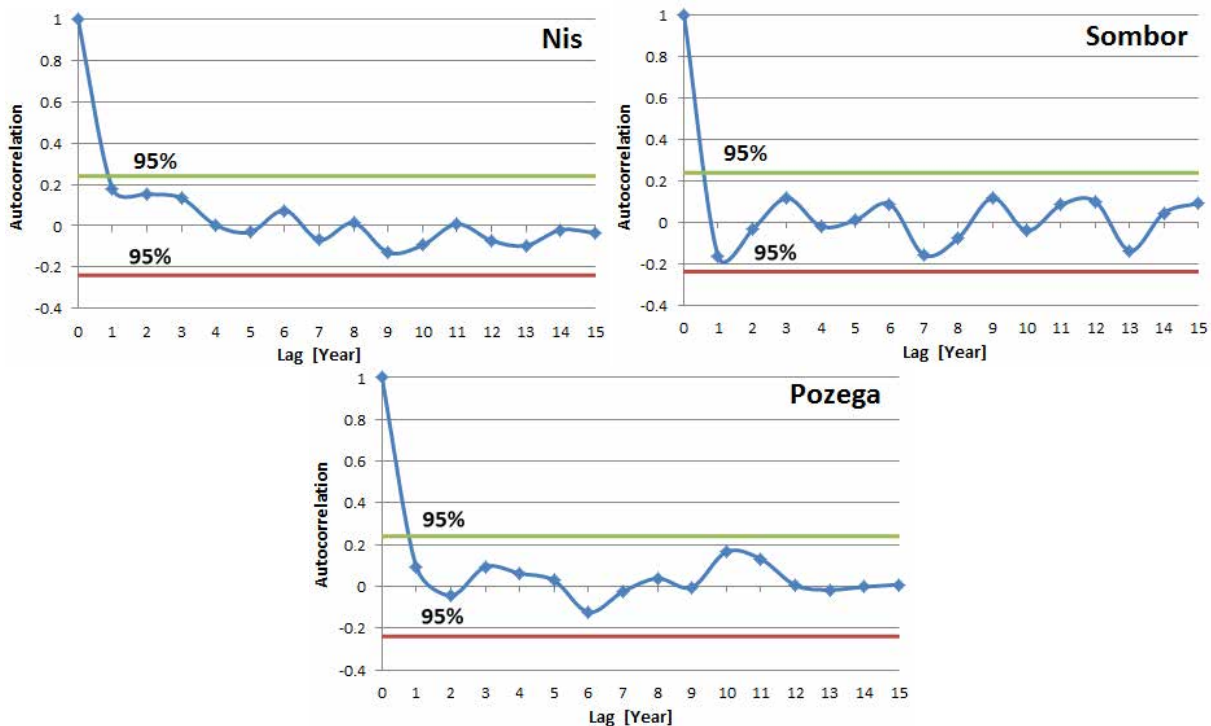


Figure 2. Autocorrelation for Nis, Sombor and Pozeza stations

Slika 2. Autokorelacija za stanice Niš, Sombor i Požegu

The analysis of significance for autocorrelation coefficients was conducted in this paper. For that purpose two hypothesis were tested:

$$\begin{aligned}
 H_0 : r_k &= 0 \\
 H_a : r_k &\neq 0
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

The results showed that for all three stations the coefficients of autocorrelation for $k = 1, \dots, 15$ at $\alpha = 5\%$ were not significantly different from zero, i.e. the hypothesis $H_0 : r_k = 0$ is accepted. Only for the autocorrelation value for $k = 0$ for all stations at $\alpha = 5\%$ is significantly different from zero, i.e. the hypothesis $H_a : r_k \neq 0$ is accepted.

The values of maximum entropy spectrum for Nis, Sombor and Pozega for the period 1946-2012 are shown in Figure 3.

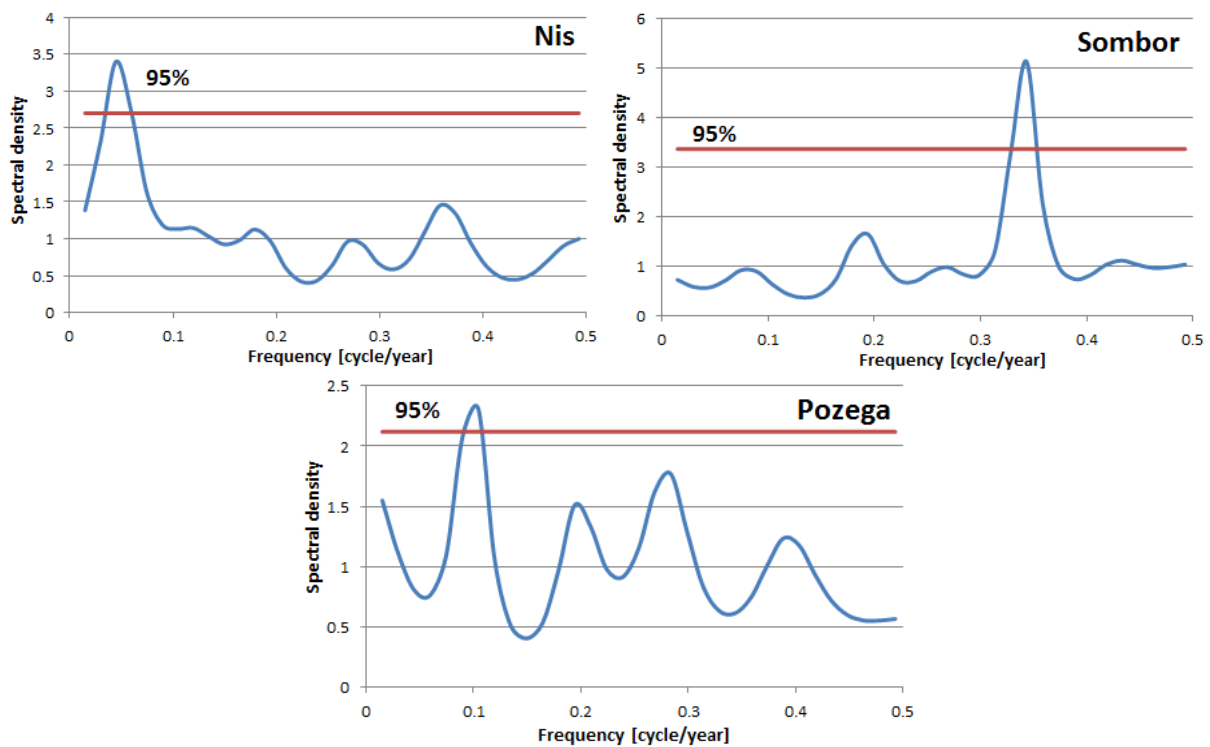


Figure 3. Maximum entropy spectrum
Slika 3. Maksimalna entropija spektra

One peak of curve of spectral density is identified above the 95% confidence level at all three stations. The peak is especially dominant at Sombor station. Peak corresponds to the period from 16.7 to 29.4 years for Nis. The maximum peak is at 22.3 years. For Sombor station, the maximum peak is at 2.9 years and the peak coverage the period from 2.8 to 3 years. For Pozega, the peak corresponds to the period from 9.1 to 10.9 years, with the maximum value during the period of 9.6 years.

5 Conclusions

Maximum entropy spectrum is computed using Burg method for mean annual precipitation time series collected from three meteorological stations (Nis, Sombor and Pozega) in Serbia over the period 1946-2012. The paper includes the analysis of autocorrelation coefficients and the analysis of spectral density.

The analysis of autocorrelation shows periodic component only at the Sombor station. Also, the analysis shows that the coefficients of autocorrelation are not significantly different from zero for all observed stations.

Spectral density analysis shows that all three stations have one peak above 95% confidence level. The peak for Sombor station has the highest value of spectral density (5.123) compared to other peaks at other stations.

Since there have been several methods for spectral analysis of time series, the future work will be oriented at obtaining better results where we will use parallel different methods. Also, further study in this area will be focused on detailed spectral analysis of climatic parameters in Serbia by using time series for monthly, seasonal and annual data.

Acknowledgement

The research presented in the paper is funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia (Grant No. TR 37003).

References

1. Burg, J.P., (1967), Maximum entropy spectral analysis, 37th Ann. Inter. Meet. of the Society for the Exploration of Geophysics, Oklahoma City, pp 34-41.
2. Cui, H., Singh, V.P., (2015), Configurational entropy theory for streamflow forecasting, *Jour. of Hydr.*, Vol. 521, pp 1-17.
3. Cui, H., Singh, V.P., (2015), Maximum entropy spectral analysis for streamflow forecasting, *Physica A*, doi: 10.1016/j.physa.2015.08.060
4. Ghil, M., et al., (2002), Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. of Geoph.*, Vol. 40 (1), pp 1-41.
5. Gocic, M., Trajkovic, S., (2014), Spatio-temporal patterns of precipitation in Serbia, *Theor. and App. Clim.*, Vol. 117 (3-4), pp 419-431.
6. Hasanean, H. M., (2001), Fluctuations of surface air temperature in the eastern Mediterranean, *Theor. and App. Clim.*, Vol. 68, pp 75– 87.
7. Milanovic, M., Gocic, M., Velimirovic, L., Trajkovic, S., (2014), Application of Fourier transforms for representing time series of precipitation for the territory of Nis, *Nauka + praksa*, (17), pp 19-24. (in Serbian)
8. Padmanabhan, G., Ramachandra Rao, A., (1986), Maximum entropy spectra of some rainfall and river flow time series from southern and central India, *Theor. and App. Clim.*, Vol. 37 (1-2), pp 63-73.
9. Rencher, A., (2002), *Methods of Multivariate Analysis*, second edition, John Wiley & Sons Inc. Publication, Brigham Young University.
10. Rodriguez, R., Llasat, M., Wheeler, D., (1999), Analysis of the Barcelona precipitation series 1850–1991, *Inter. Jour. of Clim.*, Vol. 19, pp 787-801.
11. Salas, H.D., Poveda, G., (2015), Scaling of entropy and multi-scaling of the time generalized q-entropy in rainfall and streamflows, *Physica A*, Vol. 423, pp 11-26.
12. Singh, V.P., (2013), *Entropy theory and its application in environmental and water engineering*, John Wiley and Sons.
13. Tomic, I., Unkasevic, M., (2005), Analysis of precipitation series for Belgrade, *Theor. and App. Clim.*, Vol. 80, pp 67-77.

IN MEMORIAM
КОСТА ЂОНИН (1922–2012)

Радомир Капор¹



Коста Ђонин је рођен у Вршцу 17. јула 1922. године, где је завршио основну школу и гимназију. У младости је имао две велике пасије: ваздухопловство и музику. Касније, ваздухопловство је напустио, али му је музика била веома важна целог живота. По завршетку другог светског рата, 1946. године, уписао се на Грађевински факултет Универзитета у Београду. Дипломирао је 1951. године и запослио се у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“, у коме је провео цео свој радни век, до пензионисања 1987. године. Докторат, који је започео у Греноблу (Француска) одбранио је 1966. године. У периоду 1970. –1985. био је професор на предмету Хидрологија, на Грађевинско архитектонском факултету Универзитета у Нишу. Преминуо је 31. децембра 2012. године, у Београду.

Коста Ђонин је у току своје дуге каријере учествовао у многим хидротехничким пројектима. То је делимично последица тадашњих „златних“ времена хидротехнике на овим просторима, али свакако и његових врло великих способности и разноликих интересовања. Већ на почетку каријере, др Ђонин је основао групу за теренска мерења. На

¹ Проф. др Радомир Капор, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра бр. 73, 11000 Београд, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

основу претходних искустава у лабораторијским мерењима, са солидном мерном опремом, група је под његовим вођством утврђивала хидрауличке, електричне и друге карактеристике, пре свега хидроенергетских објеката, али и свих других хидротехничких објеката. Циљ мерења је увек био да се обезбеди оптимални рад објеката. Током мерења су откривани и разни недостатци, који су били узроци слабијег рада објеката, у виду „заборављених“ феномена, грешака у пројектовању и извођењу. Др Ђонин је први уочавао те недостатке, некада и одмах отклањао, или би до бољег решења долазио после хидрауличких моделских испитивања у лабораторији под Авалом. У објашњењу откљонених недостатака показивао је максималну колегијалност и разумевање за грешке других, без злурадости и тријумфализма. Такво понашање му је донело поштовање колега. Са групом за теренска мерења радио је на: Х.Е. „Кокин Брод“, Х.Е. „Вруток“, црпна станица „Жабал“, Х.Е. „Потпећ“, Х.Е. „Бајина Башта“, Х.Е. „Гранчарево“, Х.Е. „Горица“, Х.Е. „Дубровник“, Х.Е. „Глобочица“, Х.Е. „Врбен“, Х.Е. „Ђердап I“, Х.Е. „Врле“, Х.Е. „Рама“, Х.Е. „Увац“, Х.Е. „Перућица“, Х.Е. „Завој“, Х.Е. „Равен“, и водовима у Београду, Љубињу, Житомислићу, Читлуку, Грузи, Врсару и источној Македонији.

Заједно са Проф. Крсмановићем, са Машинског факултета у Београду, Проф. Ђонин је учествовао у хидрауличким моделским испитивањима турбина за „Ђердап I“, у Лењинграду. Дао је и велики допринос и у другим, изузетно обимним, моделским испитивањима за Х.Е. „Ђердап I“, која су се обављала у нашој земљи.

Иако је цео радни век провео у Хидрауличкој лабораторији под Авалом др Ђонин је само кратко време био на челу ове лабораторије. Директорски посао није му одговарао, али је зато био неоспорни лидер, суштински и формални, групе за теренска мерења. Рад ове групе подразумевао је велике напоре, дуже радно време, уз лоше услове за рад. Смештај на терену је понекад био у хотелу, али чешће на другим местима, са много мање комфора. Својим оптимизмом, личним примером и вољом, покретао је чланове групе да ефикасно превазиђу све проблеме. Последњи одлазак на терен био му је пут на Х. Е. „Увац“ 2001. године.

Др Ђонин је убрзо по докторирању изабран за научног саветника. Може се рећи да је био „прави“ научни саветник, јер је многим помогао у решавању проблема које су имали. Захваљујући комисијама за пријем извештаја, које су тада у Институту постојале, прегледао је све извештаја који су „излазили“ из Хидрауличке лабораторије под Авалом. Учествовао је у пројектовању и испитивању у лабораторији евакуационих објеката хидроелектрана Зворник, Бајина Башта и Глобочица. Био је и пројектант многих водостана, чији је рад испитивао, како у лабораторији тако и на терену. Тако је радио на водостанима за хидроелектране: Вруток, Јабланицу, Јајце I, Овчар Бању, Бистрицу, Перућицу, Дубровник, Кокин Брод, Глобочицу и реверзибилну Бајину Башту. Посебно је интересантно његово решење о спајању два водостана на два упоредна тунела, на Јабланици (које је подржао чувени француски академик Есканд) и коморе за уклањање ваздуха на највећем водостану у бившој Југославији, за реверзибилну хидроелектрану на Бајиној Башти. У току своје каријере објавио је значајан број научних радова, на саветовањима у земљи и свету. Био је заслужни члан Југословенског друштва за хидрауличка истраживања.

Др Ђонин је дао огroman допринос нашој хидротехници. Свим који су са њим сарађивали остаће у сећању по свом пријатељском односу и неизмерном урођеном оптимизму.

IN MEMORIAM
СТЕВАН БРУК (1923–2014)

Стеван Прохаска¹
Миодраг Јовановић²



Дана 12. августа 2014. године преминуо је Стеван Брук, истакнути стручњак из области хидротехнике и светски познат експерт из области речне хидраулике и теорије речних наноса. Рођен је у Сомбору 1923. године, дипломирао је на Грађевинском одсеку Техничког факултета у Загребу (1951.), а докторирао на Грађевинском факултету у Београду (1962.). Од 1952. до 1988. г. у Институту за водопривреду „Јарослав Черни“ радио је као истраживач у Хидрауличкој лабораторији и водио Одељење за уређење водних токова, а био је и заменик генералног директора Института.

У периодима 1963.–1969. и 1981.–1989. био је професор на грађевинским факултетима у Београду, Нишу и Суботици, где је предавао хидраулику са хидрологијом, хидротехнику, регулацију река и пловне путеве. На последипломским студијама на Грађевинском факултету у Београду држао је наставу из предмета Статистичка теорија турбуленције и Транспорт зрнастих материја. Написао је предавања за ове предмете.

¹ Проф. др Стеван Прохаска, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Улица Јарослава Черног 80, 11226 Пиносава, Београд, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

² Проф. др Миодраг Јовановић, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Бул. краља Александра бр. 73, 11000 Београд, mjovanov@grf.bg.ac.rs

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Држао је наставу на последипломским студијама и на Машинском факултету и Рударско-геолошком факултету у Београду, као и на факултетима у Загребу, Сарајеву и Љубљани.

Научни и стручни опус професора Брука обухвата експерименталну и теоријску хидраулику и реологију мешавина флуида и зрнастих материјала. Објавио је преко 120 научних и стручних радова, објављених у страним и домаћим часописима, на међународним конгресима и домаћим научним скуповима. Стекао је светску репутацију у области речне хидраулике и теорије речног наноса. Држао је уводна предавања из области речне хидраулике и морфологије на већем броју међународних конференција, као и предавања по позиву у Индији (1973.), Тунису (1990.), Немачкој (1992.), Холандији (1994.) и Судану (2006.). Обављао је функцију председника Југословенског друштва за хидраулику (1982.–1986.) и њен је заслужни члан од 1990. г. Био је члан управног одбора Међународног друштва за хидрауличка истраживања – IAHR (1977.–1981.) и њен је почасни члан од 1987. г. Био је доживотни члан Америчког друштва грађевинских инжењера (ASCE). Био је члан уредништва међународне Енциклопедије за системе одржања живота (Encyclopedia of Life Support Systems – EOLSS).

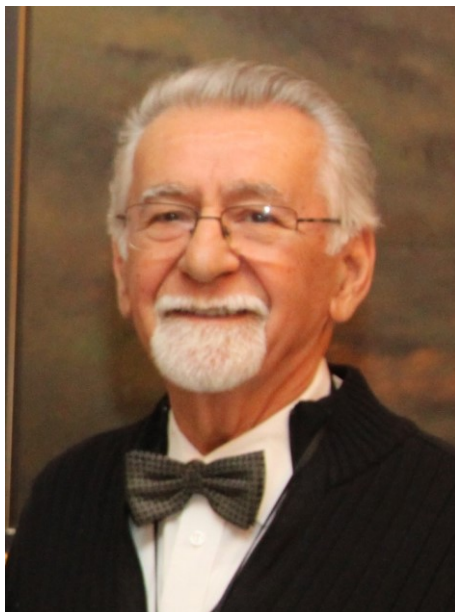
Као експерт UNESCO-а учествовао је у формирању Хидрауличке лабораторије у Пном Пену (Камбоџа, 1969.–1970.) и Техничког факултета у Кампали (Уганда, 1971.–1976.). Био је дугогодишњи саветник Сектора за науку UNESCO-а у Паризу и организатор курсева UNESCO-а из области хидротехнике у Холандији, Енглеској и Аустралији. Учествовао је у организацији и настави Међународног курса из водопривредног инжењерства за инжењере из земаља у развоју који су UNESCO и холандска влада држали у Београду (1980.–1991).

Као истакнути стручњак био је ангажован у пројектовању и експлоатацији хидротехничких пројеката у земљи (хидроенергетски и пловидбени системи „Ђердап“ и Дунав–Тиса–Дунав) и у иностранству (Алжир, Судан, Индонезија, Бангладеш, Узбекистан). Од посебног значаја су фундаментална истраживања режима речног наноса на Дунаву у зони утицаја акумулације „Ђердап I“, којима је годинама руководио.

Они који су познавали Стевана Брука и имали привилегију да сарађују са њим памтиће га као тихог, племенитог човека, увек весеког духа и пуног оптимизма. Његова доброта је просто пленила, а његова лепа рач, савет и подршка били су велики подстрек у развоју генерација младих инжењера хидротехнике.

IN MEMORIAM MILORAD MILORADOV (1933–2015)

Srđan Kolaković¹
Radomir Folić²



Iznenada je, 29. juna 2015. godine, preminuo Prof. dr Milorad Miloradov, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu u penziji.

Milorad Miloradov rođen je 12. 06. 1933. godine u Rumenki kod Novog Sada. Gimnaziju je završio u Novom Sadu 1952. godine. Diplomirao je na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1958. godine, na istom Fakultetu je magistrirao 1967. godine, a doktorsku disertaciju odbranio je 1977. godine.

Nakon diplomiranja, 1958. godine, zaposlio se u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, u Hidrauličkoj laboratoriji. Kada je formirano Odeljenje za uređenje vodnih tokova 1962. godine, dr Miloradov je imenovan za pomoćnika Načelnika odeljenja, a od 1966. i za Načelnika istog odeljenja. Od 1972. godine bio je na dužnosti pomoćnika, a od 1974. do 1976. godine zamenika generalnog direktora Instituta. U periodu od 1976. do 1985. godine M. Miloradov je bio na dužnosti Generalnog direktora Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Paralelno sa radom u Institutu od 1967. do 1986. godine radi kao docent, vanredni i redovni profesor na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu. Od 1986. godine prelazi na Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu kao redovni profesor, na kome je radio do 1. oktobra 1998. kada je penzionisan.

¹ Prof. dr Srđan Kolaković, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, kolak@uns.ac.rs

² Prof. emeritus Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, folic@uns.ac.rs

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Poznat kao veoma sistematičan i aktivan u svim oblicima rada značajno je doprineo snažnom razvoju Instituta „Jaroslav Černi“ stvarajući uslove za usavršavanje i razvoj kadrova i materijalne osnove (prostor i laboratorije). U Institutu je, pored rukovođenja, značajan doprinos dao razvoju naučno istraživačkog rada i stručnog rada u širokoj oblasti vodoprivrede. To je bilo zapaženo i u akademskoj zajednici, pa je, paralelno sa radom u Institutu, angažovan i u univerzitetskoj nastavi, gde je uspešno koristio svoje bogato iskustvo.

Delatnost dr M. Miloradova u oblasti naučnoistraživačkog rada ogleda se u preko 160 publikovanih radova, u zemlji i inostranstvu, osam knjiga i monografija i realizaciji više desetina značajnijih studija, istraživanja i projekata. Ova naučna delatnost može se grupisati u četiri osnovne oblasti:

1. Uređenje rečnih tokova i rečne hidraulike.
2. Vodoprivreda i vodoprivredno planiranje.
3. Zaštita životne sredine, posebno u oblasti zaštite voda.
4. Informacioni sistemi i njihova primena u vodoprivredi i zaštiti životne sredine.

Radovi iz oblasti *uređenja rečnih tokova i rečne hidraulike* odnose se na praktično sva područja te naučne grane: matematičke modele za proračune deformacije rečnih korita u prirodnim uslovima i pod dejstvom rečnih regulacionih građevina, proračune pronosa nanosa u rekama, funkcionalnost i stabilnost regulacionih građevina, i na kraju, promena u rečnim akumulacijama kao što je Dunav uzvodno od Đerdapa. U radovima iz ove oblasti korišćena je savremena metodologija eksperimentalnog i analitičkog istraživanja: fizički modeli, istraživanja na terenu, stohastička analiza morfoloških parametara i matematičko modeliranje rečnih tokova.

U nastavku svojih istraživanja dr. Miloradov se posvetio i *oblasti vodoprivrede*. U radovima iz ove oblasti obuhvatio je široku problematiku razvoja i vrednovanja kompleksnih vodoprivrednih sistema – do razvoja matematičkih modela upravljanja u realnom vremenu i obrade vodoprivrednog bilansa na lokalnom i globalnom nivou. Ističu se radovi na izradi „Programa za obradu globalnog vodnog bilansa“ i „Uputstva za obradu procene vodnih resursa“ koje je dr. Miloradov realizovao kao ekspert UNESCO i FAO.

Aktivno radi i na rešavanju problema zaštite životne sredine sa zapaženim delom u delu „Metodologije za izradu integralnog katastra zagađivača životne sredine“ (1995.). U ovoj monografiji obrađen je teorijski pristup, a zatim je razrađeno praktično uputstvo za obradu integralnog katastra zagađivača životne sredine kao osnova za optimalno upravljanje zaštitom životne sredine. Radovi dr. Miloradova sa saradnicima na savremenim informacionim tehnologijama u oblasti Vodoprivrede i zaštite životne sredine predstavljaju pionirske poduhvate u našoj zemlji. Dr Miloradov je u Institutu „Jaroslav Černi“ aktivno učestvovao u koordinaciji i planiranju naučno-istraživačkog rada u Srbiji i u SFRJ. U tom periodu dr Miloradov je bio rukovodilac više naučno-istraživačkih projekata:

- Poplavni talasi i deformacija korita kod meandrirajućih tokova složenog poprečnog preseka.
- Studija regulacionih građevina.
- Istraživanje hidropotencijala u SR Srbiji.
- Studija izvodljivosti na GIS-u zasnovanog integralnog katastra koncentrisanih i rasutih izvora zagađivanja i primene višekriterijumske analize pri planiranju zaštite voda.

Poslednjih godina dr M. Miloradov se bavio projektovanjem sanacije, remedijacije i zatvaranja deponija otpada u Srbiji i projektovanjem sistema za upravljanje otpadom i sanitarnim

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

deponijama. Sa saradnicima je realizovao pet glavnih projekata Regionalnih centara za upravljanjem komunalnim čvrstim otpadom.

Veoma aktivan je i u pedagoškom radu. Od 1964. do 1967. godine radio je kao honorarni asistent na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Od 1967. do 1986. godine na Građevinskom fakultetu u Nišu radi kao docent, a zatim kao vanredni i redovni profesor na predmetima: „Uređenje vodotoka“ i „Vodoprivreda i regionalno planiranje“. U tom periodu bio je mentor više diplomskih radova. Od 1974. do 1976. godine držao je predavanja na magistrarskim studijama Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, a u periodu 1975.-1983. godine je bio angažovan na održavanju posle diplomске nastave na Građevinskom fakultetu u Zagrebu iz predmeta „Hidraulika prirodnih vodotoka“. Pored pomenutog, na međunarodnom kursu iz vodoprivrednog inženjerstva u periodu 1981.-1990. godine, dr Miloradov održava nastavu iz dva predmeta: Water Resources Management and Planning, i River Engineering Structures i na Seminaru „Erozija, bujični tokovi i rečni nanos“ koji je organizovao Jugoslovenski komitet za međunarodni hidrološki program.

Od 1986. godine dr Miloradov radi na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu gde početkom 1991. godine formira Univerzitetski centar za obrazovanje u oblasti inženjerstva zaštite životne sredine na nivou magistrarskih i doktorskih studija, a 1992. godine njegovim angažovanjem utemeljen je TEMPUS centar Univerziteta u Novom Sadu, kojim je on rukovodio. Do uvođenja sankcija našoj zemlji Centar je saradivao sa Univerzitetom Vaheningeg (Holandija) i Univerzitetom iz Londona. Na istom je predavao predmet „Sistemi zaštite životne sredine“ i bio je mentor za više kandidata pri izradi magistrarskih radova i jednog kandidata za izradu doktorske disertacije. U tom periodu, kao gostujući profesor, boravio je na Univerzitetu Winipeg u Manitobi, i Građevinskom fakultetu WITS Univerziteta u Johannesburgu, Južna Afrika. Pomenuti centar je bio osnova za formiranje studijskog programa „Inženjerstvo zaštite životne sredine“ na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

Uvažavajući značaj naučnih i stručnih udruženja, dr M. Miloradov aktivno učestvuje u radu jugoslovenskih i međunarodnih društava. Bio je član ili predsednik: Committee on Stochastic Methods in Hydraulics IAHR; Radne grupe za pripremu sistemskih analiza u vodoprivredi Komiteta za probleme voda Evropske ekonomske komisije; Section on Water Management Practice – IAHR; predsednik Jugoslovenskog društva za zaštitu voda; predsednik Saveza građevinskih inženjera i tehničara Jugoslavije (od 1983. do 1988. godine) i predsednik Jugoslovenske Komisije za standardizaciju u oblasti geografskih informacionih sistema „Geomatics“ Saveznog zavoda za standardizaciju.

Rezultati ukupnog rada dr M. Miloradova su vrednovani i potvrđeni njegovim izborom za dopisnog člana Vojvođanske akademije i umetnosti 2004. godine. Za redovnog člana ove akademije izabran je 2010. godine.

Iz prikaza izuzetno bogate stručne, naučne, nastavne i organizacione delatnosti vidi se da prof. dr Milorad Miloradov u oblasti vodoprivrede, a naročito u oblasti hidrotehničkog inženjerstva i inženjerstva zaštite životne sredine spada u red vodećih ličnosti koji je stekao ugled na samo u našoj zemlji, već i u inostranstvu. Po rezultatima njegovog rada biće upamćen kao izuzetno plodan istraživač, stručnjak i pedagog koji je ostavio neizbrisiv trag po čemu će biti upamćen među stručnjacima vodoprivrede i šire građevinarstva, kao i u akademskoj zajednici. Smrt profesora Miloradova je veliki gubitak ne samo za porodicu već i za sve nas koji smo ga poznavali i radili sa njim.

Indeks autora

- Aivazoglou, Maria 434
Anđelić, Mihailo 293
Antonić, Vojislav 766, 804
- Babić, Branislav 622
Babić-Mladenović, Marina 716, 738, 755, 766, 793
Bartoš-Divac, Vladislava 676, 688, 716, 775, 804
Batinić, Božidar 146
Benišek, Miroslav 215
Blagojević, Borislava 341, 871
Bogdan, Ivan 390
Božić, Jelena 404
Božić, Mile 404
Branisavljević, Nemanja 482
Budinski, Ljubomir 585, 639, 665
- Chen, Albert 65
- Ćosić, Marija 390
- Čotrić, Jelena 748
- Damjanović, Vanja 18, 726, 785
Damnjanović, Marijana 183, 264
Dašić, Tina 509
Despotović, Jovan 379, 500, 826
Dimkić, Dejan 357, 414
Drašković, Dalibor 167
Drobnjak, Aleksandar 372
- Đorđević, Dejana 30, 87, 124, 135
Djordjević, Slobodan 65
Đukić, Aleksandar 500
Đukić, Dragan 676, 688
Đurđević, Vladimir 424
Đurović, Nevenka 390
- Gabrić, Ognjen 550, 558, 568
Gocic, Milan 932
Gregorić, Enike 390
Guidolin, Michel 65
- Horvat, Mirjana 550, 558
Horvat, Zoltan 550, 558
- Ilić, Aleksandra 341, 424, 860
Ilić, Siniša 913
Ivetić, Damjan 97, 202
Ivetić, Marko 110, 598, 610
Ivetić, Milan 598
Ivković, Marija 293, 848
- Jaćimović, Nenad 97, 500, 509
Janković, Dragan 816
Jeftenić, Goran 585, 639, 665
Jevremović, Vesna 887
Jordanović, Dejan 631
Josipović, Jovana 272
Jovanović, Miodrag 1
- Kapor, Radomir 52, 183, 230, 244, 254, 264
Knežević, Zoran 775, 793
Kolaković, Slobodan 585, 639, 665
Kolaković, Srđan 42
Kolarov, Vasiljka 716, 738, 755
Kračunov, Sanja 404
Krsmanović, Aleksandra 610
Krunić, Boris 785
Kuo, Han Jung 493
Kuzmanović, Vladan 254, 272
- Liu, Xi 493
Lučić, Milena 52, 87, 230, 244
- Maksimović, Čedo 434, 493
Malešev, Milan 18, 726, 775, 785
Marinković, Nataša 158
Marjanović, Srđan 838
Marković, Đurica 913
Marques, Alfeu Sá 434
Mašić, Borislav 470, 651
Mihailović, Vladislava 871
Mijic, Ana 434, 493
Milanovic, Mladen 932
Milašinović, Miloš 202
Milić, Sanja 500
Milićević, Dragan 860
Milojević, Mileta 372
Milovanović, Bojan 254, 272
Milovanović, Irina 748
Mladenović, Nikola 52, 230, 244

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

- Muhić, Filip 124, 135, 313
- Nađ, Julijana 848
Nedeljković, Andrija 482
Nikolić, Goran 404
Ninković, Dragana 804
- Ochoa, Susana 434
- Pajić, Predrag 357
Pavlović, Dragutin 146, 379, 500, 537, 887
Pavlović, Miloš 390
Petković, Slobodan 18
Petrović, Aleksandar 313
Pina, Rui 434
Plavšić, Jasna 110, 313, 325, 379, 443, 470,
500, 520, 568, 826, 887, 902, 913, 924
Popović-Milijić, Ana 610
Potić, Olivera 860
Prodanović, Dušan 97, 202, 577, 622
Prohaska, Stevan 284, 341, 357, 379, 424,
676, 688, 701, 924
Puzović, Renata 748
- Radičević, Marija 887
Randelović, Anja 146
Rosić, Nikola 87
Rudić, Željka 357, 404
- Salvai, Andrea 651
Savić, Dragan 65
Savić, Ljubodrag 52, 87, 183, 230, 244, 254,
264, 273
- Sekulić, Aleksandar 482
Simões, Nuno 434
Srđić, Tamara 598
Stanić, Filip 135
Stanić, Miloš 443, 470, 500, 509, 520, 622
Stanković, Bojan 357
Starinac, Danica 183, 264
Stefanović, Milutin 372
Stipić, Filip 651
Stipić, Matija 42, 585, 639, 651, 665
Stojković, Milan 379, 924
Stojnić, Ivan 30, 124, 135
Stričević, Ružica 390
- Todorović, Andrijana 313, 325, 443, 500, 520
Todorović, Nedeljko 676, 688
Topalović, Žana 110, 826, 902
Trajković, Slavisa 932
Tripković, Vesna 341, 424
- Varga, Bela 42
Vasilić, Željko 443, 520, 622
Vojt, Predrag 183, 254, 264, 537, 577
Vujović, Duško 509
Vujović, Svetlana 585, 639, 665
- Zindović, Budo 183, 254, 577
Živanović, Vanja 500
Zlatanović, Nikola 458, 701, 748
- Žugić, Dragiša 183, 264