

# ZBORNIK RADOVA

**18. naučnog savetovanja  
Srpskog društva za hidraulička istraživanja  
Srpskog društva za hidrologiju  
Niš 2018.**



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

## **ZBORNİK RADOVA**

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

Niš, 25-26. oktobar 2018.

Priredili:  
MARKO IVETIĆ  
RADOMIR KAPOR  
JASNA PLAVŠIĆ

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet  
Beograd

Zbornik radova 18. naučnog savetovanja  
Srpskog društva za hidraulička istraživanja i  
Srpskog društva za hidrologiju  
Niš, 25-26. oktobar 2018.

Elektronsko izdanje na CD-u

*Urednici*

Marko Ivetić, Radomir Kapor, Jasna Plavšić

*Izdavač*

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, 2019.

*Za izdavača*

Prof. dr Vladan Kuzmanović, dekan

*Produkcija CD izdanja*

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd

*Dizajn i priprema*

Nenad Jaćimović i Jasna Plavšić

*Tiraž*

120 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 (18 ; 2018 ; Ниш)

Zbornik radova 18. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja  
i Srpskog društva za hidrologiju, Niš, 25-26. oktobar 2018. [Elektronski izvor] /  
priredili Marko Ivetić, Radomir Kapor, Jasna Plavšić. - Beograd : Univerzitet,  
Građevinski fakultet, 2019 (Beograd : Univerzitet, Građevinski fakultet). - 1 elektronski  
optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemski zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp.  
i engl. jeziku. - Tiraž 120. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts ; Apstrakti.

ISBN 978-86-7518-204-7

1. Српско друштво за хидрологију (Београд). Научно саветовање (18 ; 2018 ; Ниш)

a) Хидротехника -- Зборници b) Хидродинамика -- Зборници  
v) Хидраулика -- Зборници

COBISS.SR-ID 278467596

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

## Sadržaj

Naučni odbor savetovanja .....	vii
Organizacioni odbor savetovanja .....	vii
Predgovor .....	ix
O numeričkom modeliranju recirkulacionog strujanja na ulazu u zaliv.....	1
<i>Miodrag Jovanović</i>	
Procena hidrauličke hrapavosti betonskih kanizacionih cevi primenom laserskog skeniranja .....	13
<i>Nikola Stanić, François H.L.R. Clemens, Jeroen G. Langeveld</i>	
Adverse-slope stilling basins: machine learning approach to estimation of hydraulic jump features.....	31
<i>Robert Ljubičić, Budo Zindović, Ljubodrag Savić</i>	
Analiza uticaja kompleksnosti 1D modela tečenja na postupak asimilacije podataka zasnovane na primeni PID regulatora – preliminarni rezultati .....	44
<i>Miloš Milašinović, Budo Zindović, Nikola Rosić, Dušan Prodanović</i>	
Preračunavanje stepena korisnosti sa testiranog modela na glavno izvođenje hidraulične turbine .....	56
<i>Miroslav Benišek</i>	
U susret monografiji „Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica“ .....	71
<i>Stevan Prohaska, Aleksandra Ilić, Vladislava Bartoš-Divac, Milena Jelovac, Samir Čatović, Srđan Marjanović</i>	
Analiza srednjih voda u Srbiji na osnovu kartiranih klimatoloških podataka u periodu 1961-2010 .....	75
<i>Jovan Blagojević, Jasna Plavšić, Samir Čatović, Andrijana Todorović</i>	
Krive trajanja protoka kao sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV-light modela neizučenog sliva.....	88
<i>Petar Praštalo, Borislava Blagojević, Žana Topalović</i>	
Analiza suše za područje leskovačke kotline .....	100
<i>Dženita Idrizović, Enika Gregorić, Vesna Počuča, Gordana Matović</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja evakuacionih objekata HE „Riga“ .....	112
<i>Danica Starinac, Predrag Vojt, Dimitrije Mladenović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja složenog brzotoka brane Subela .....	125
<i>Danica Starinac, Predrag Vojt, Dimitrije Mladenović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Hidraulička modelska ispitivanja PK preliva – primer brane Tarzout .....	135
<i>Dimitrije Mladenović, Danica Starinac, Predrag Vojt, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić</i>	
Kritički osvrt na rezultate sa fizičkih modela.....	147
<i>Božidar Batinić</i>	
Утицај комплексности модела на хидролошке симулације .....	153
<i>Андријана Тодоровић, Јасна Плавишић</i>	

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Teorijski hidrogrami velikih voda – tema i dilema .....	166
<i>Stevan Prohaska, Aleksandra Ilić</i>	
Primena radarskih slika u hidrološkoj rekonstrukciji poplave na reci Bjelici marta 2016. godine.....	177
<i>Nikola Zlatanović, Vanja Damjanović, Stevan Prohaska</i>	
Disaster risk reduction management and resilience – Flood Resilience Index (FRI) as communication tool .....	185
<i>Jelena Batica, Philipe Gourbesville</i>	
Development of real-time flood forecasting and warning system for the Sava River basin .....	202
<i>Klaas-Jan van Heeringen, Hanneke Schuurmans, Mihailo Anđelić, Victor Simončić, Imra Hodzic, Sabina Hadziahmetovic</i>	
Sava-FFWS: integrisana platforma za unapređenje sistema za hidrološku prognozu na slivu reke Save, primena u RHMZ.....	215
<i>Marija Ivković, Samir Čatović, Srđan Marjanović, Predrag Živadinović, Vida Despotović</i>	
Praćenje promene saliniteta vode u nezasićenom zemljištu i stanja ekosistema kao odgovor na depolderovanje Rammegorsa .....	224
<i>Nikola Stanić, Perry G.B. de Louw</i>	
Nagnuti oštroični preliv za merenje hidrograma oticaja .....	238
<i>Lajoš Hovanj</i>	
Bezkontaktno merenje protoka u otvorenim tokovima .....	250
<i>Predrag Vojt, Dušan Prodanović, Jasna Plavšić</i>	
Laboratorijsko određivanje merne neodređenosti ravnih EM senzora.....	259
<i>Damjan Ivetić, Dušan Prodanović, Luka Stojadinović</i>	
Analiza primene akustičnih metoda za merenje suspendovanog nanosa .....	272
<i>Predrag Vojt, Nevena Cvijanović, Dimitrije Mladenović, Mladen Kostić, Nikola Rosić, Mira Ivljanin</i>	
Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko Polje – Fatničko polje .....	285
<i>Damjan Ivetić, Dušan Prodanović, Mile Cvitkovic</i>	
Koincidencija velikih voda na ušću reke Tise u Dunav primenom modela PROIL i KOPULA metode .....	303
<i>Aleksandra Ilić, Stevan Prohaska, Boris Pokorni</i>	
Uticaj dužine osmotrenih nizova na stohastičko generisanje vremenskih serija na više hidroloških stanica .....	317
<i>Đurica Marković, Jasna Plavšić</i>	
Modeliranje vremenskih serija godišnjih i mesečnih protoka na reci Savi kod Sremske Mitrovice.....	331
<i>Ranka Erić, Jasna Plavšić, Vesna Đukić</i>	
Statistička analiza trajanja leda na Dunavu kod hidrološke stanice Bezdán .....	348
<i>Ognjen Gabrić, Jasna Plavšić</i>	
Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora.....	357
<i>Luka Stojadinović, Damjan Ivetić, Dušan Prodanović</i>	
Анализа ублажавања поплавних таласа у акумулацији Мохарач .....	373
<i>Марија Миловановић, Андријана Тодоровић, Роберт Љубичић, Јасна Плавишић</i>	

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Управљање акумулацијама Врба и Клиње у периоду наиласка великих вода.....	385
<i>Тамара Судар, Тина Дашић</i>	
Analiza uticaja merenja potrošnje vode za piće na specifičnu potrošnju u domaćinstvima.....	399
<i>Ognjen Govedarica, Dragan Savić, Aleksandar Đukić, Branislav Babić</i>	
U susret 60. godišnjici regionalne saradnje eksperata podunavskih zemalja u oblasti hidrologije u okviru programa IHP UNESCO .....	412
<i>Stevan Prohaska</i>	
Uvođenje „pametnih komponenti“ u instalacije vodovoda i kanalizacije „pametnih gradova budućnosti“ .....	417
<i>Denisa Đorđević, Željka Ostojić</i>	
Efekti primene savremenih sistema za smanjenje kišnog oticaja na primeru naselja Vojlovica, Pančevo .....	433
<i>Lazar Anđelić, Dušan Prodanović, Nenad Jaćimović, Damjan Ivetić</i>	
Simultaneous collection of flow, sediment, and selected water-sediment-quality field data on the Danube stretch at Belgrade .....	450
<i>Miodrag Spasojević, Mileta Bojović, Bojan Palmar, Milica Nadeždić, Miroslav Tanasković</i>	
Monitoring i modelisanje tečenja, sedimenta, morfodinamike i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih pritoka u Srbiji.....	464
<i>Miodrag Spasojević, Zlatan Kovačević, Aleksandar Ostojić, Zoran Marinković, Dušan Krstić</i>	
Modeliranje transporta zagađujuće materije u poroznoj sredini primenom Cellular Automata principa – preliminarni rezultati .....	480
<i>Miloš Milašinović, Anja Randelović, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović</i>	
Analiza transporta nanosa u kanalima Dunav – Tisa – Dunav .....	489
<i>Vesna Đukić, Ranka Erić</i>	
Примена модела размене количине кретања за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока .....	507
<i>Дејана Ђорђевић, Марија Ивковић, Иван Стојнић</i>	
Komparativna analiza primene vodostana i sinhronih regulatora turbina u cilju zaštite hidroelektrana pri prelaznim režimima .....	517
<i>Aleksandar Petković, Ivan Božić, Jovan Ilić</i>	
Прорачун силовитог течења у тунелу са хоризонталном кружном кривином.....	530
<i>Милена Лучић, Радомир Капор, Љубодраг Савић</i>	
Хидрауличка анализа пропусне моћи колектора испод флотацијског јаловишта „Veliki Krivelj“ .....	539
<i>Nevena Anđelić, Marko Ivetić</i>	
Меродавни хидродинамички утицаји на бочне зидове слапишта .....	553
<i>Бојан Миловановић, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић, Предраг Војт, Будо Зиндовић</i>	
Меродавни хидродинамички утицаји на дно слапишта .....	564
<i>Бојан Миловановић, Владан Кузмановић, Љубодраг Савић, Предраг Војт, Будо Зиндовић</i>	
Утицај регенерације инфилтрационих базена на нивоу подземних вода: примјер изворишта Novoselija .....	576
<i>Milan Jakšić, Nenad Jaćimović, Dragan Gligorić</i>	
Preparation of a monitoring system on the Palic and Ludas Lakes.....	588
<i>Zoltan Horvat, Mirjana Horvat, Ognjen Gabrić, Biljana Isic</i>	

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Uređenje dela Rokovog potoka u Petrovaradinu.....	600
<i>Igor Radović, Srđan Kolaković, Goran Jeftenić, Andrea Salvai</i>	
Primeri analize hidrauličkog udara u vodovodnim sistemima primenom softverskog paketa AFT Impulse.....	608
<i>Danilo Stipić, Ljubomir Budinski</i>	
Crpne stanice u kanalizacionim sistemima .....	620
<i>Matija Stipić, Slobodan Tašin</i>	
Analiza uzroka pojave vode u podrumskim prostorijama objekta u Nišu.....	631
<i>Dragan Radivojević, Borislava Blagojević, Aleksandra Ilić</i>	
Hidrotehnički objekti u ekstremnim uslovima – primeri ponašanja i neke pouke kroz praksu.....	643
<i>Goran Radović</i>	
Домаћа мобилна опрема за одбрану од поплава и управљање поплавама .....	654
<i>Раде Милутиновић</i>	
Studija obezbeđenja vodnih resursa na slivu reke Cheliff (Alžir) .....	666
<i>Jovana Anđelić, Miloš Ivetić</i>	
The Nile Water, Food and Energy Nexus Model.....	682
<i>Hamdy Elsayed, Slobodan Djordjević, Dragan Savić</i>	
Експериментално одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова.....	693
<i>Филип Станић, Pierre Delage, Yu-Jun Cui</i>	
IN MEMORIAM: Vojislav Vukmirović (1933–2017) .....	713
<i>Dragutin Pavlović</i>	
Indeks autora .....	717

## **Naučni odbor savetovanja**

Prof. dr Marko Ivetić (Predsednik)  
Prof. dr Dragan Arandelović  
Doc. dr Borislava Blagojević  
Prof. dr Jovan Despotović  
Prof. dr Slobodan Đorđević  
Prof. dr Aleksandar Gajić  
Doc. dr Lajoš Hovanj  
Prof. dr Nenad Jaćimović  
Mr Dragan Janković  
Prof. dr Miodrag Jovanović  
Prof. dr Zoran Kapelan  
Prof. dr Radomir Kapor  
Prof. dr Srđan Kolaković  
Prof. dr Čedo Maksimović  
Prof. dr Ana Mijić  
Prof. dr Zorana Naunović  
Prof. dr Miloš Nedeljković  
Prof. dr Sava Petković  
Prof. dr Slobodan Petković  
Prof. dr Jasna Plavšić  
Prof. dr Dubravka Pokrajac  
Prof. dr Dušan Prodanović  
Prof. dr Stevan Prohaska  
Doc. dr Zoran Radić  
Prof. dr Ratko Ristić  
Prof. dr Dragan Savić  
Prof. dr Ljubodrag Savić  
Prof. dr Miodrag Spasojević  
Mr Slavimir Stevanović  
Dr Mladen Todorović  
Prof. dr Zoran Vojinović

## **Organizacioni odbor savetovanja**

Prof. dr Marko Ivetić  
Prof. dr Jasna Plavšić  
Prof. dr Nenad Jaćimović  
Doc. dr Borislava Blagojević  
Doc. dr Dragan Radivojević  
Doc. dr Andrijana Todorović  
Doc. dr Anja Randelović



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

## Predgovor

Poštovane kolegice i kolege,

Pred Vama je zbornik radova sa 18. naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja i Srpskog društva za hidrologiju održanog u Nišu 25. i 26. oktobra 2019. godine. Kao i na prethodna dva savetovanja, zbornik izdajemo samo 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 damo fleksibilnije rokove za dostavljanje radova, kao i da prihvatimo i radove sa većim brojem strana nego što je to bio ranije slučaj.

Zajednička organizacija Savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH) ponovo je doprinela ne samo da se prikaže veći broj radova, već i da se prošire oblasti interesovanja. Za razliku od ranijih savetovanja, sada je bilo uočljivo veliko preklapanje tematskih oblasti koje su unapred bile definisane pa je programski odbor imao nemoguć zadatak da radove razvrsta po tim oblastima. Kao rezultat, zbornik nije podeljen po tematskim oblastima, već su svi radovi deo jedne celine.

Pored bazičnih tema iz oblasti hidraulike kao što je rečna hidraulika i hidraulika hidrotehničkih objekata, odnosno tradicionalnih tema inženjerske hidrologije kao što je ocena velikih ili srednjih voda, veliki broj radova bio je inspirisan praktičnim problemima. Na taj način Savetovanje je ispunilo svoj cilj da obezbedi prožimanje nauke i prakse, kao i razmatranje važnih problema u domaćoj hidrotehnici i vodoprivredi.

Broj pristiglih radova je i ovog puta bio značajan (oko 60), iako manji u odnosu na prethodno savetovanje 2015. godine kada je bilo oko 80 radova i kada je najveći broj njih bio vezan za tekuće naučno istraživačke projekte Ministarstva nauke. Zbog izostanka novog ciklusa naučnih projekata očigledno je smanjenje intenziteta publikovanja naučnih radova fokusiranih na određene teme.

Posebno nam je drago što smo za ovo Savetovanje animirali najmlađe kolege – studente osnovnih i master studija – u pisanju radova koji su proistekli iz njihovih kvalifikacionih radova. Po prvi put je uvedena „studentska sesija“ i dodeljene su nagrade za najbolje studentske radove. Takođe, u zborniku ćete naći i rezultate istraživanja studenata doktorskih studija i mladih istraživača koji su skoro doktorirali. Značajno učešće mladih zato uliva nadu da će se u ovim oblastima ostvariti kontinuitet i napredak.

U periodu od prethodnog savetovanja do sada, napustio nas je prof. Vojislav Vukmirović, dugogodišnji član SDHI i SDH. Na njegov veliki doprinos istraživanjima u oblasti nanosa i hidrologije podsetili su nas njegovi bliski saradnici na Savetovanju i kroz kratak tekst u ovom zborniku.

Kao predsednici dva društva zahvaljujemo se kolegama Nenadu Jaćimoviću, Draganu Radivojeviću i Borislavi Blagojeviću na značajnom doprinosu u organizovanju i realizaciji ovog savetovanja. Zbog svega ovoga se nadamo da će ovaj zbornik mnogima biti zanimljivo štivo za čitanje.

Beograd, oktobar 2018.

Prof. dr Marko Ivetić  
Predsednik SDHI

Dr Jasna Plavšić  
Predsednik SDH



18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.  
Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia

## **ZBORNİK RADOVA**

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

Niš, 25-26. oktobar 2018.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

## O numeričkom modeliranju recirkulacionog strujanja na ulazu u zaliv

Miodrag Jovanović<sup>1</sup>

APSTRAKT: Hidraulička analiza recirkulacionog strujanja na ulazu u zaliv prikazana je na primeru reke Save i Čukaričkog zaliva u Beogradu. U jednom ranijem radu prikazani su rezultati numeričke simulacije ovog strujanja primenom 2D modela i način na koji su ti rezultati korišćeni u projektu uredjenja obale. U ovom radu je načinjen korak dalje u izučavanju recirkulacionog strujanja pomoću 2D i 3D modela, u pravcu ispitivanja onih hidrauličkih veličina (kinetičke energije, vrtložnosti i dr.), koje mogu dodatno da okarakterišu strujno polje. Posebno je ispitan uticaj na rezultate proračuna konvencionalnog modela turbulencije sa konstantnom turbulentnom viskoznošću i modela velikih vrtloga (LES). Sve ovo ima praktične implikacije, jer od recirkulacionog strujanja zavisi zasipanje ulaza u zaliv, a primenom numeričkih modela mogu se efikasno proveriti inženjerska rešenja za smanjenje zasipanja i troškova bagerovanja.

Ključne reči: recirkulacioni tokovi, zasipanje zaliva, numerički 2D i 3D modeli

## On numerical modelling of bay entrance recirculating flows

ABSTRACT: Hydraulic analysis of the recirculating flows on the bay entrances is demonstrated by a case study pertaining to the Čukarički Bay on the Sava River in Belgrade. In an earlier paper the results of numerical simulation of such a flow, obtained by a 2D model, were presented, and it was shown how these results were implemented in a river training project. This paper makes a step further in studying recirculating flows by 2D and 3D models, by investigating those hydraulic quantities (kinetic energy, vorticity, etc.) which can additionally characterise the flow field. Also were investigated results of the conventional, constant eddy viscosity turbulence model, as opposed to the large eddy (LES) model. All this has practical implications, as the recirculation flow is related to the siltation potential at the bay entrance, while the numerical models can be used to efficiently evaluate engineering design solutions for diminishing siltation and dredging costs.

Keywords: recirculating flows, siltation in river bays, numerical 2D and 3D models

### 1 Uvod

Ulaz u rečni zaliv ili lučki bazen predstavlja diskontinuitet obale koji izaziva skretanje strujnica i pojavu recirkulacionog strujanja. Ovo strujanje karakteriše postepena disipacija kinetičke energije, što ima za posledicu taloženje suspendovanog nanosa na ulazu u zaliv. Ne postoji mogućnost da se taloženje u potpunosti spreči, samo se mogu razmatrati mere za usporavanje taloženja, odnosno smanjenje učestalosti bagerovanja.

U okviru projekta uredjenja obale reke Save na ulazu u Čukarički zaliv, posebno oko pilona mosta na Adi (Slika 1), Građevinski fakultet iz Beograda je 2011. godine izradio hidrauličku studiju koja se bavila problemom zasipanja ovog zaliva [7]. Kao jedno od mogućih rešenja [12] razmatrano je postavljanje na ulazu niske poprečne građevine sa kotom krune ispod nivoa male vode (Slika 2), kako bi se pri dnu korita, gde je koncentracija nanosa po dubini najveća, bar delimično “nadomestila”

---

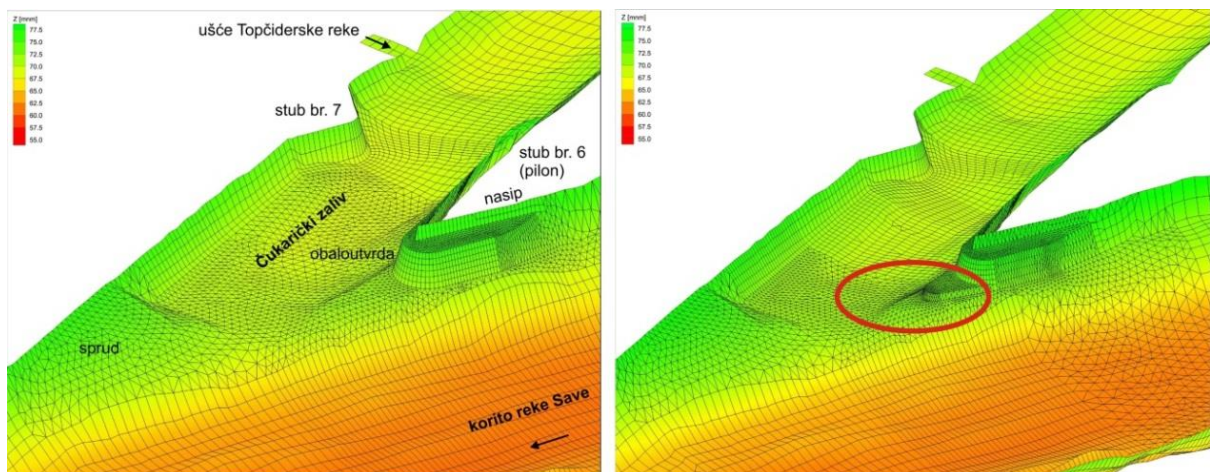
<sup>1</sup> Dr Miodrag Jovanović, Građevinski fakultet Beograd, redovni profesor u penziji, [mjovanov@grf.bg.ac.rs](mailto:mjovanov@grf.bg.ac.rs)

nedostajuća kontura obale. Konstruktivni elementi ove građevine (položaj, dužina i kota krune) optimizovani su numeričkim simulacijama strujnog polja pomoću kalibrisanog računskog 2D modela<sup>2</sup>.



Slika 1. Računska oblast i batimetrija; dno uzlaza u Zaliv je 8 m iznad talvega reke Save [7].

Figure 1. Computational domain and bathymetry; the Bay bottom is 8 m above the river Sava thalweg [7].



Slika 2. Stanje korita pre uređenja obale (Varijanta "0") i stanje nakon regulacije sa kratkom, niskom poprečnom građevinom – pragom, na jednom delu ulaza u Zaliv (Varijanta "R") [7].

Figure 2. State of the river bed before and after the shore arrangement works which introduced a low sill at one part of the entrance bottom of the Bay (Variants "0" and "R") [7].

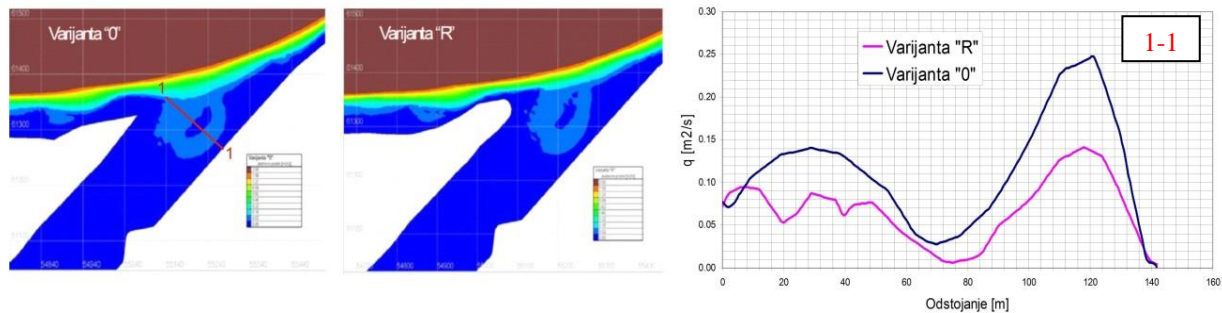
Kako se nije raspolagalo ulaznim tovarom nanosa u zavisnosti od protoka u reci, direktna simulacija zasipanja zaliva nije bila moguća, već je analiza sprovedena u kvalitativnom smislu (Slike 3 i 4). Zaključeno je da prisustvo poprečne građevine ima pozitivne efekte na smanjenje zasipaja ulaza u Zaliv. Smatrajući da je sprovedena analiza dovoljna na inženjerskom nivou, pristupilo se projektovanju ove građevine i ona je realizovana u sklopu radova na uređenju obale [7].

Posle uređenja obale na ulazu u Čukarički zaliv ispitivanje recirkulacionog toka nije obustavljeno. Ova tema je (doduše sa zadržkom od nekoliko godina) ponovo aktuelizovana sa ciljem da se recirkulacioni tok bolje izuči kroz niz hidrauličkih parametara koji ranije nisu korišćeni. Pri tome, nije namera da se potvrdi celishodnost rešenja sa poprečnom građevinom (što bi bilo bespredmetno, jer je građevina već izgrađena), već da se kroz nove proračune pomoću 2D i 3D modela detaljnije

<sup>2</sup> Rezultati proračuna prikazani u ovom radu dobijeni su pomoću softverskog sistema Telemac2D i Telemac3D [3,11], a kalibracija 2D modela obavljena je merenjima strujnog polja na reci Savi pomoću ADCP uređaja [7].

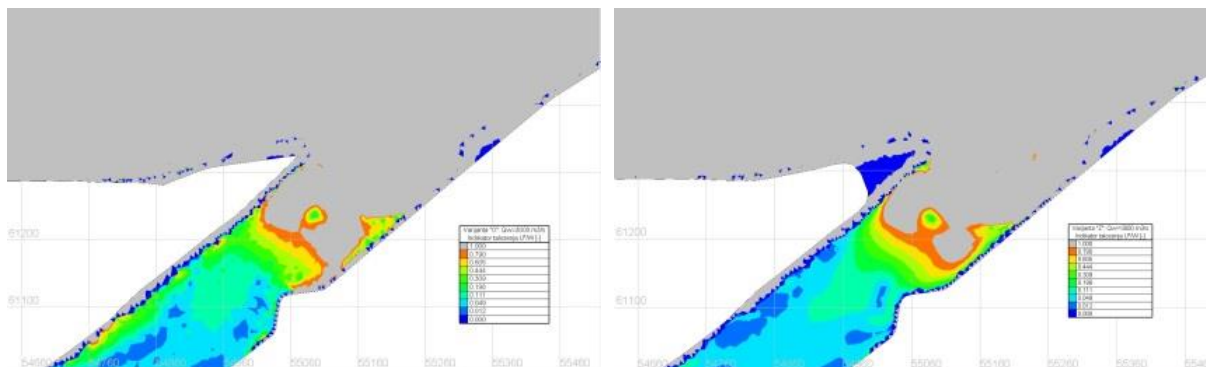
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

ispita priroda ovog recirkulacionog strujanja. To je sprovedeno na "O-toj" geometriji ulaza u Zaliv, numeričkom simulacijom ustaljenog tečenja pri izabranom protoku velike vode  $Q_{vv}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ovaj protok, zastupljenosti 10% i prosečnog trajanja 36 dana/god, izabran je kao merodavan jer potpuno ispunjava glavno korito, kada su transport nanosa i morfološke promene u koritu najveći. Rezultati novog ispitivanja prikazuju se u nastavku.



Slika 3. Raspored jediničnog protoka u recirkulacionoj zoni pri protoku merodavne velike vode  $Q_{vv}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ; protok u recirkulacionom toku je najmanji u sredini preseka 1-1 gde se nalazi centar vrtloga; desna grana sa najvećim protokom odgovara delu vrtloga koji uvlači vodu iz reke u Zaliv, dok se leva grana odnosi na strujanje ka reci; smanjenje dotoka u varijanti sa pragom („R”) iznosi 44% [7].

Figure 3. Distribution of the unit discharge across the recirculation zone for a chosen high river discharge of  $Q_{vv}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ; the minimum flow in section 1-1 corresponds to the vortex center; to its right is the maximum incoming discharge (from the river into the Bay), while to the left is the return flow towards the river; introduction of the sill results in a reduction of the incoming unit discharge of 44% [7].



Slika 4. Raspored vrednosti odnosa smičuće brzine toka i brzine tonjenja čestica  $V^*/W$ , kao indikatora taloženja suspendovanog nanosa; prikazana je samo oblast u kojoj se može očekivati taloženje nanosa ( $V^*/W < 1$ ); sa poprečnom građevinom na ulazu u Zaliv (desno), veće vrednosti parametra  $V^*/W$ , koje zahvataju veću površinu, ukazuju na manje potencijalno zasipanje [7].

Figure 4. Values of the ratio of the shear and settling velocities  $V^*/W$ , as a parameter for indicating the possibility of suspended sediment settlement; only the region where settlement can be expected is shown ( $V^*/W < 1$ ); overall, higher  $V^*/W$  values at larger space in the alternative with the sill (right) indicate lower potential settling of sediment [7].

## 2 Proračuni ravanskog (2D) strujanja

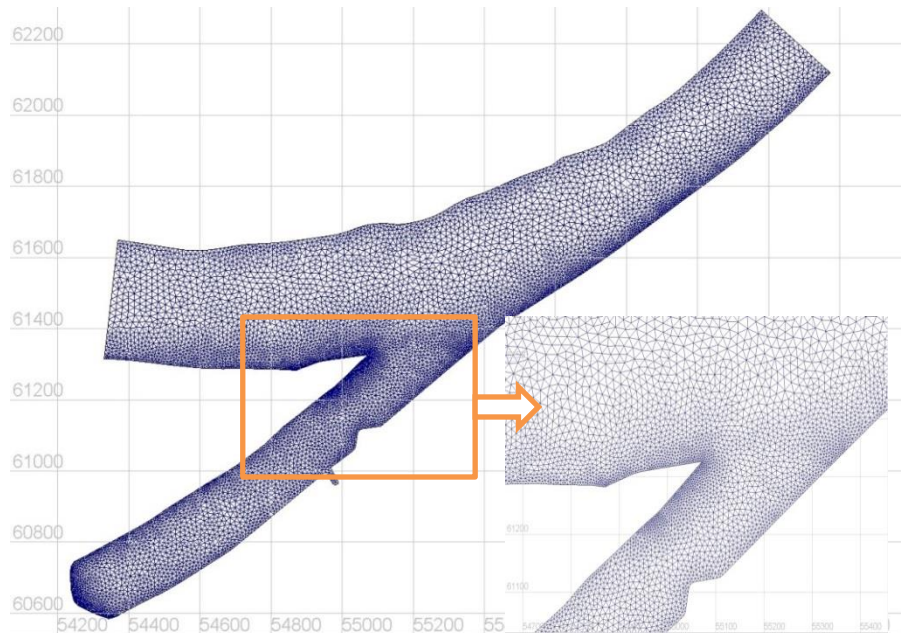
Dinamika ravanskog (2D) strujanja u rekama može se analizirati pomoću raznih numeričkih modela [1, 2, 3, 4, 9]. Pomoću ovih modela najčešće se rešavaju San Venanove jednačine u kojima figurišu dubina i dve komponente brzine osrednjene po dubini. Rešenje je trenutni raspored dubine i brzine u horizontalnoj ravni. Numeričko rešavanje zahteva diskretizaciju računске oblasti, koja je u



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

ovom slučaju obavljena metodom konačnih elemenata - MKE (Slika 5), a računski postupak je zasnovan na tehnici etapnog rešavanja (eng. „fractional step method”) [3, 5, 6, 9, 11]. Kako su San Venanove jednačine izvedene osrednjavanjem po dubini vremenski osrednjenih Navie Stoksovih (Rejnoldsovih) jednačina, može se reći da ovaj model spada u kategoriju tzv. RANS modela (eng. “Reynolds Averaged Navier Stokes”) [1].



Slika 5. Računska mreža 2D modela koja se sastoji od 16356 trougaona elementa i 8732 čvora; prosečna dužina elemenata je 6,5 m, a prosečna površina elementa, oko 50 m<sup>2</sup> [7].

Figure 5. Computational mesh of 2D model, consisting of 16356 triangular elements and 8732 nodes; the average length of elements is 6,5 m, and the average element area, around 50 m<sup>2</sup> [7].

Jedan od ciljeva ispitivanja je bio je da se uporede rezultati koje daje model zasnovan na vremenskom osrednjavanju (RANS) i rezultati koje daje model zasnovan na prostornom osrednjavanju Navie Stoksovih jednačina (LES).

U prvom slučaju, za modeliranje turbulencije korišćen je najjednostavniji model konstantne vrtložne (turbulentne) viskoznosti, zasnovan na Businesskovoju analogiji sa molekularnom viskoznošću [9], bez dopunskih jednačina (eng. „zero equation model”). U ovom radu će biti označen kao „Model 0”.

U drugom slučaju, primenjena je metoda „velikih vrtloga” LES (eng. „Large Eddy Simulation”) [2, 3, 4, 10]. Polazeći od činjenice da se turbulentna struktura toka sastoji od mnoštva vremenskih i prostornih razmera (velikih i malih vrtloga), model LES razdvaja velike vrtloge koji su srazmerni veličini rečnog korita, od malih vrtloga, koji čine anizotropni deo turbulentne strukture u kojoj dolazi do prigušenja fluktuacija i rasipanja kinetička energije glavnog toka. Granica između velikih i malih vrtloga određena je prostornim korakom računске mreže  $\zeta$  (u ovom slučaju je  $\zeta \approx 6,5$  m). Za prostorno osrednjavanje (filtriranje) osnovnih jednačina koriste se razne „fildarske fukcije” [2, 3, 4, 10], pri čemu širina filtra odgovara najmanjem vrtlogu koji se rešenjem može dobiti. Mali vrtlozi, čije su dimenzije ispod računске rezolucije (skraćeno SGS od engl. „SubGrid Scale”) moraju se modelirati jer nisu obuhvaćeni osnovnim rešenjem. Radi se o modeliranju tzv. SGS Rejnoldsovih napona u dinamičkoj jednačini, koji se javljaju kao posledica prostornog osrednjavanja (filtriranja).

Po modelu Smagorinskog [1, 2, 3], turbulentna viskoznost je definisana po analogiji sa dužinom mešanja jednakoj veličini vrtloga manjih od veličine trougaonih elemenata računске mreže:

$$v_t = (C_s \cdot \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}, \quad (1)$$

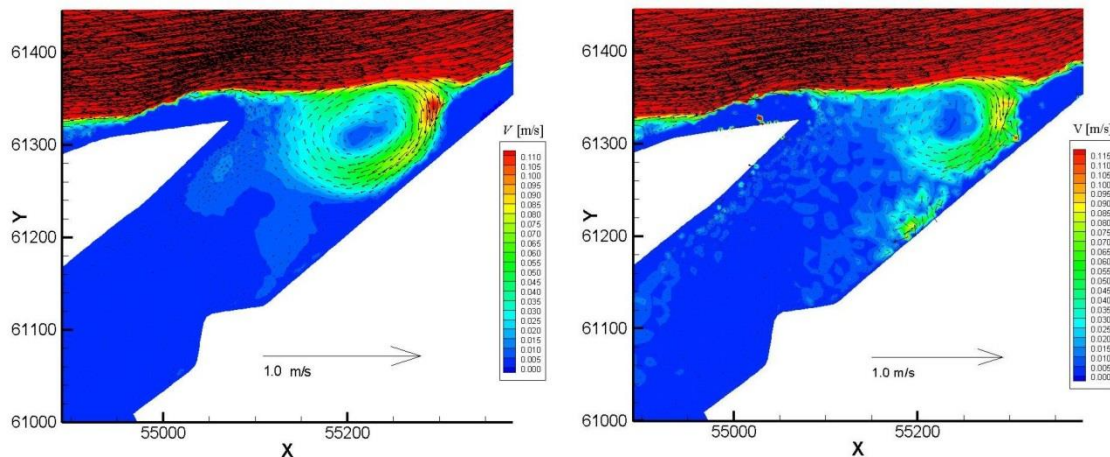
gde je tenzor brzine deformacije:

$$\bar{S}_{ij} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2). \quad (2)$$

Vrednosti konstante Smagorinskog su predmet procene i u većini slučajeva iznose  $C_s = 0,16 - 0,20$  [1, 2]. Treba takođe napomenuti da model Smagorinskog podrazumeva da su na nivou malih vrtloga produkcija turbulentne kinetičke energije i brzina njene disipacije u ravnoteži. U ovom radu model Smagorinskog biće označen kao „Model LES”.

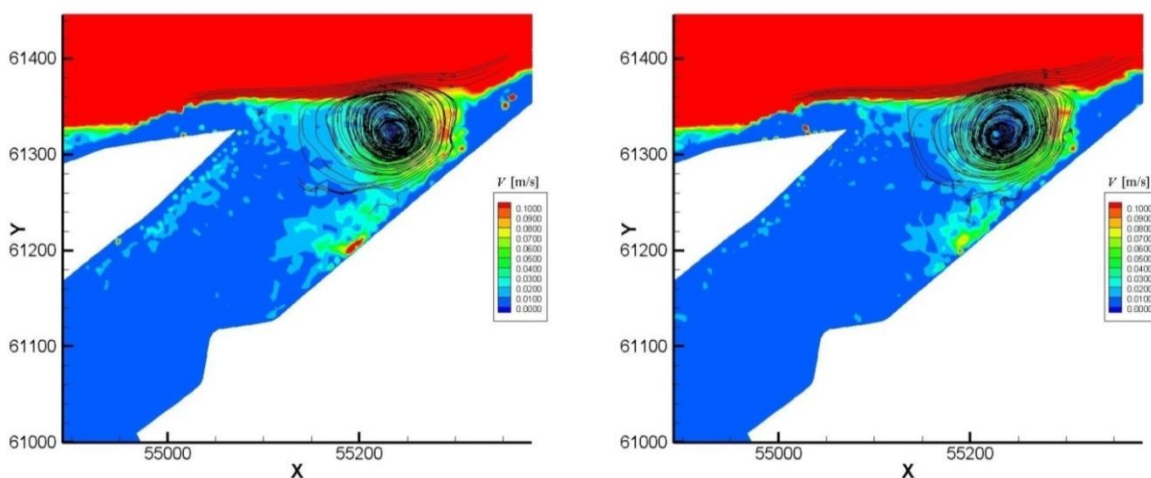
### 2.1 Vektorsko polje brzine

Na Slici 6 uporedno je prikazano vektorsko polje brzine dobijeno pomoću Modela 0 i modela LES pri protoku  $Q_{vv}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na istoj slici uporedo je prikazan i raspored intenziteta brzine u vrtložnom toku. Na Slici 7 prikazane su strujnice.



Slika 6. Vektorsko polje brzine i intenzitet brzine (do 0,115 m/s); levo: Model 0; desno: Model LES.

Figure 6. Velocity vector field and intensity of velocity (up to 0,115 m/s); left: Model 0; right: Model LES.



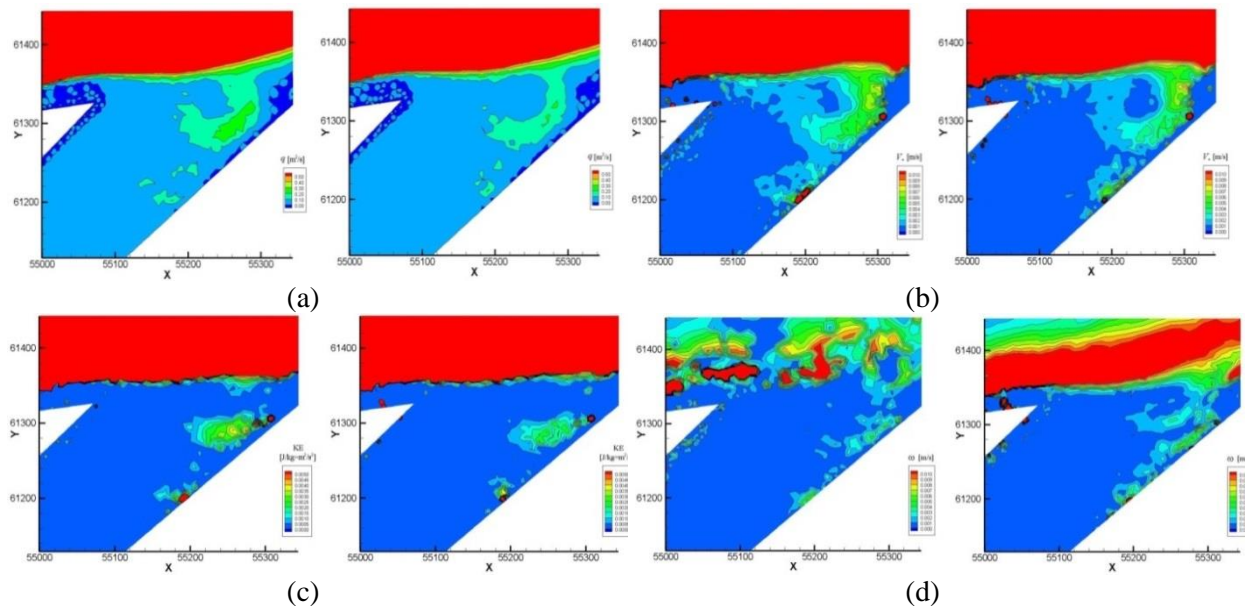
Slika 7. Strujnice i intenzitet brzine (do 0,1 m/s); levo: Model 0; desno: Model LES.

Figure 7. Streamlines and intensity of velocity (up to 0,1 m/s); left: Model 0; right: Model LES.

Može se zaključiti da su brzine u recirkulacionom toku veoma male; najveća lokalna brzina javlja se na početku ulazne grane u Zaliv i po oba modela iznosi oko 0,1 m/s. Kružne strujnice koje daju oba modela veoma su slične.

## 2.2 Skalarna polja

Na Slici 8 prikazana su skalarna polja koja proizilaze iz polja brzine. To su polja jediničnog protoka  $q$  [ $m^2/s$ ], smičuće brzine  $V^*$  [ $m/s$ ], kinetičke energije po jedinici mase KE [ $J/kg=m^2/s^2$ ] i vrtložnosti (intenziteta rotora brzine)  $\omega$  [ $m/s$ ].



Slika 8. Skalarna polja sračunata pomoću Model 0 i Modela LES; (a) jedinični protok; (b) smičuća brzina; (c) kinetička energija po jedinici mase i (d) vrtložnost.

Figure 8. Scalar fields calculated by Model 0 and Model LES; (a) unit discharge; (b) shear velocity; (c) kinetic energy per unit mass, and (d) vorticity.

Smisao prikaza intenziteta i prostornog rasporeda navedenih hidrauličkih skalarnih veličina je u tome što su sve povezane sa režimom nanosa i morfodinamikom rečnog korita. Jedinični protok ukazuje na intenzitet uvlačenja vode i suspendovanog nanosa iz rečnog toka u Zaliv. Smičuća brzina ukazuje na pokretanje vučenog nanosa, kao i na taloženje suspendovanog nanosa (kao što je opisano na Slici 4), dok su intenzitet i raspored kinetičke energije i vrtložnosti takođe indikatori brzine taloženja nanosa posredstvom recirkulacionog strujanja. Što je veća kinetička energija toka po jedinici mase, to je sporije taloženje suspendovanog nanosa. Kao mera *lokalne* rotacije fluidnih delića, vrtložnost nema veze sa globalnom recirkulacijom, već upućuje na energetski status fluidnih delića. Naime, ako pri kretanju fluidnih delića po kružnoj putanji postoji i njihova lokalna rotacija (u svakoj tački strujnog polja), onda tok sadrži više energije nego u slučaju kada se delići kreću bez lokalne rotacije. Na taj način i vrtložnost, o kojoj će još biti reči u nastavku, utiče na brzinu taloženja suspendovanih čestica.

U celini, može se zaključiti da u ovom slučaju oba pristupa u modeliranju turbulencije daju slične rezultate. Jedno tumačenje je da se radi o sporom recirkulacionom strujanju nametnutom geometrijom strujne oblasti, sa dominantnim uticajem trenja. To znači da turbulencija u horizontalnoj ravni ima sekundarnu ulogu, pa razni modeli turbulencije daju slične rezultate, što je i ranije zapaženo kod velikih reka [9]. Drugo moguće objašnjenje je da je u ovom slučaju gustina prostornog filtra isuviše velika da bi SGS komponenta u modelu LES došla do značajnijeg izražaja.

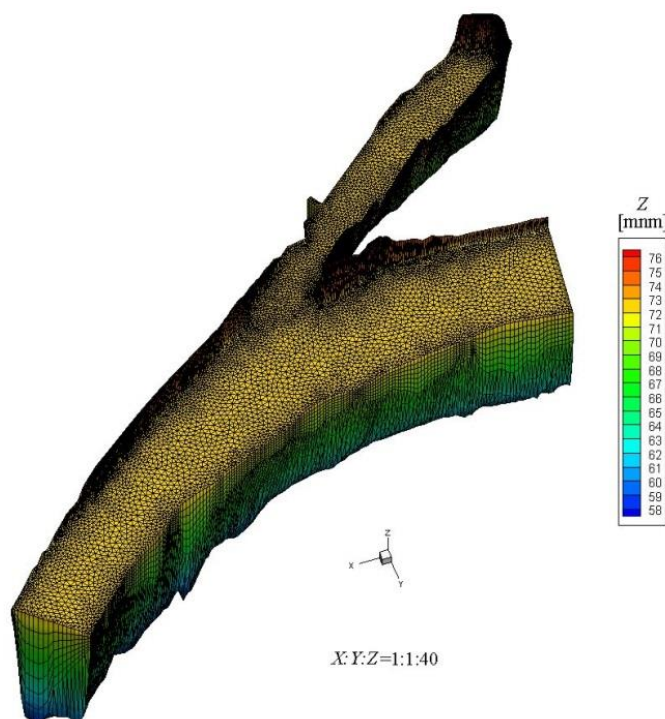
### 3 Proračuni prostornog (3D) strujanja

Poznato je da se prostorno (3D) strujanje opisuje Navie Stoksovim jednačinama održanja mase i količine kretanja [1, 2, 3, 9]. Ovde je za proračun ovog strujanja korišćena metoda konačnih elemenata. Prostorni element je u obliku prizme, sa osnovom trougaonog oblika i vertikalnim stranicama, sa ukupno 6 čvorova (Slika 9). Vertikalna projekcija 3D računске mreže je 2D mreža trougaonih linearnih elemenata (Slika 5). Problem promenljivosti računskog domena u vertikalnom pravcu rešen je „sigma transformacijom“ – korišćenjem topografiji prilagodljivog koordinatnog sistema, pri čemu se nepravilna fizička oblast transformiše u fiksnu računsku oblast pravilne konfiguracije [6]. Kao kod 2D modela, razdvajanjem diferencijalnih operatora, osnovne jednačine se etapno rešavaju [3, 6, 9, 11].

Na Slikama 10-14 prikazani su rezultati numeričke simulacije prostornog 3D recirkulacionog strujanja. Vektori brzine na Slici 10 pokazuju opadanje brzine po dubini recirkulacionog toka i ukazuju na postojanje još jednog, sekundarnog vrtloga, koji se ne nazire kod 2D modela. Strujnice na istoj slici daju tačan položaj jezgra recirkulacionog strujanja, gde putanje fluidnih delića postaju veoma nepravilne u odnosu na pravilne kružne trajektorije po obodu recirkulacione oblasti. Slika 11 ilustruje velike mogućnosti koje pruža 3D model u smislu da se strujno polje može izdvojiti i analizirati na bilo kojoj zahtevanoj dubini. Slika 12 ilustruje mogućnost izučavanja promene skarnih polja po dubini toka (prikazana su polja kinetičke energije i intenziteta vrtložnosti). Konačno, Slike 13 i 14 daju dopunsko tumačenje vrtložnosti kao prostornog parametra strujnog polja.

Poznato je da je, po definiciji, vrtložnost 3D vektorskog polja, rotor brzine  $V(u, v, w)$ :

$$\vec{\omega} = \text{rot } \vec{V} = \nabla \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (3)$$



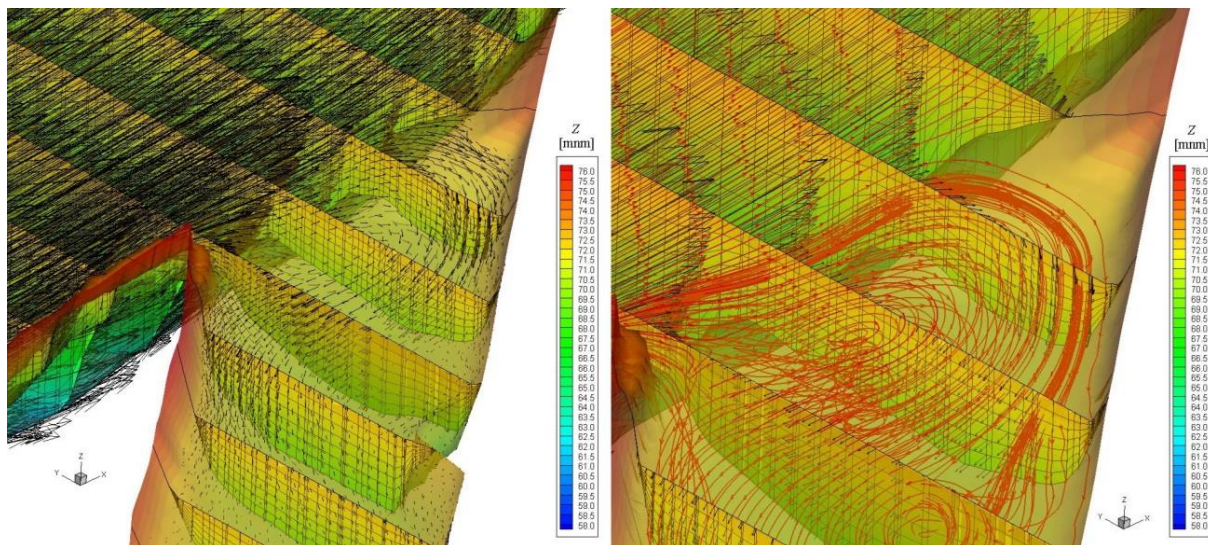
Slika 9. Računska mreža 3D modela obuhvata 8 ravni po dubini i sastoji se od 8 mreža sa Slike 5, što znači da računска mreža 3D modela ima ukupno oko 70000 čvorova.

Figure 9. Computational mesh of the 3D model comprise 8 planes over depth and consists of 8 meshes shown in Figure 5, thus the 3D model mesh has a total of around 70000 nodes.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

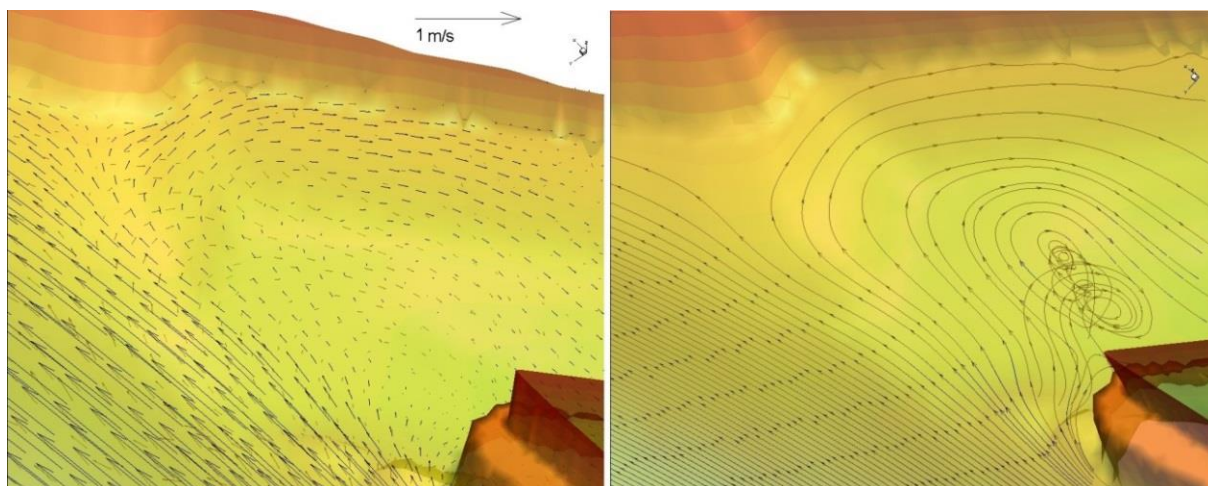
Već je rečeno da je to indikator obrtanja fluidnog delića u svakoj tački strujnog polja i da po intenzitetu odgovara dvostrukoj ugaonoj brzini (za smer obrtanja koristi se „pravilo desne ruke”).

Na Slici 13 prikazani su: vektorsko polje vrtložnosti sa intenzitetom vrtložnosti i helikoidnost. Kao što vektori brzine tangiraju strujnice, tako vektori vrtložnosti (radi bolje vidljivosti, ovde su svi iste dužine) tangiraju linije vrtložnosti. Te linije predstavljaju lokalne osovine rotacije fluidnih delića u svakoj tački. Linije vrtložnosti formiraju cevi vrtložnosti. Na osnovu Stoksove teoreme, cirkulacija oko proizvoljne zatvorene konture jednaka je fluksu vrtložnosti kroz površinu unutar te konture i predstavlja „jačinu” tako formiranje vrtložne cevi, što se takođe može koristiti kao indikator vrtložne strukture toka<sup>3</sup>.



Slika 10. Numerička simulacija 3D recirkulacionog strujanja: vektori brzine i strujnice

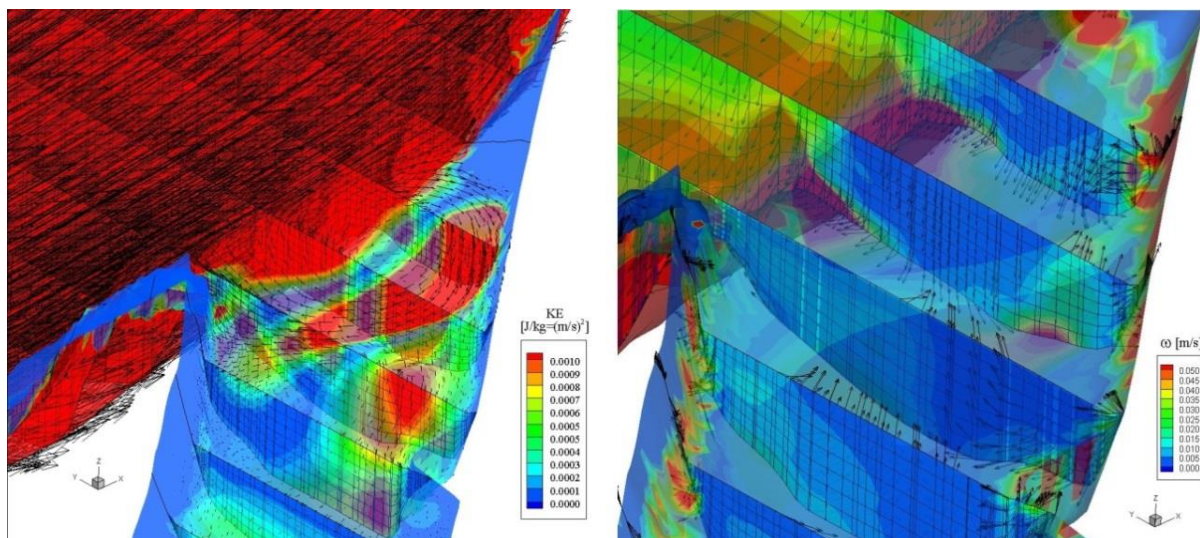
Figure 10. Numerical simulation of the 3D recirculating flow: velocity vectors and streamlines.



Slika 11. Numerička simulacija 3D recirkulacionog strujanja: brzine i strujnice na 1 m ispod površine

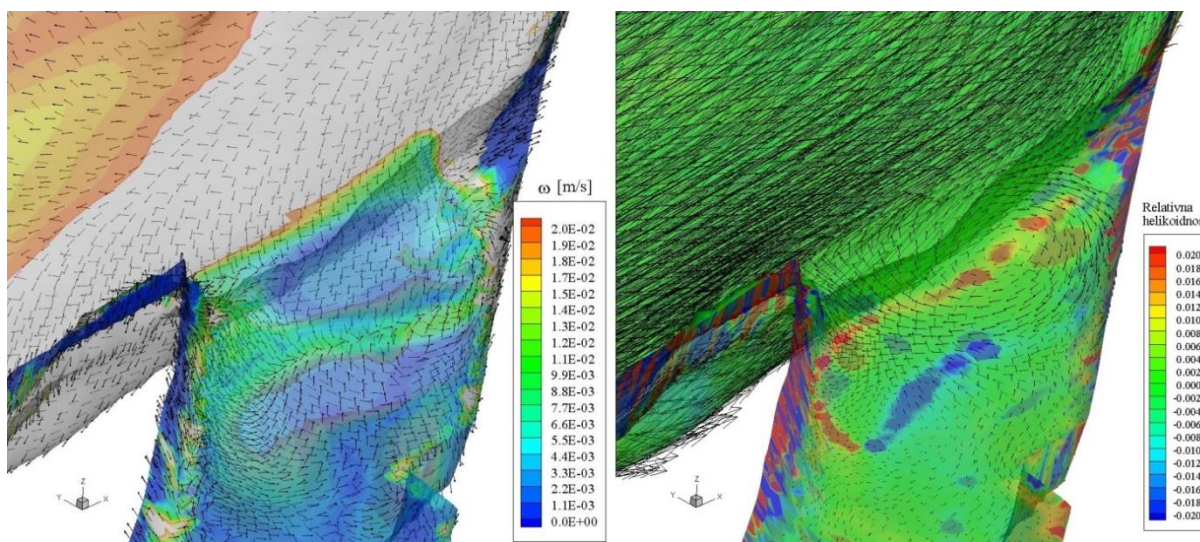
Figure 11. Numerical simulation of the 3D recirculating flow: velocity and streamlines 1 m below surface.

<sup>3</sup> Tema vrtložnosti i cirkulacije je obrađena u velikom broju članaka i udžbenika iz mehanike fluida, a fizička interpretacija ovih pojmova može se videti u filmskim prikazima eksperimenata, na primer: <http://web.mit.edu/hml/ncfmf/09VOR.pdf>.



Slika 12. Numerička simulacija 3D recirkulacionog strujanja: kinetička energija i intenzitet vrtložnosti.

Figure 12. Numerical simulation of the 3D recirculating flow: kinetic energy and vorticity magnitude.



Slika 13. Vrtložnost i relativna helikoidnost u recirkulacionom strujanju.

Figure 13. Vorticity and relative helicity in the recirculating flow.

Kao dodatni indikator 3D polja može se koristiti skalarni proizvod vektora brzine i vektora vrtložnosti - skalarna veličina „helikoidnost“. Fizičko značenje helikoidnosti postaje jasnije kada se normalizuje i prikaže u vidu „relativne helikoidnosti“:

$$H_r = \frac{\vec{\omega} \cdot \vec{V}}{|\omega||V|} = \cos \alpha_{\omega,V} . \quad (4)$$

Vidi se da ova veličina predstavlja kosinus ugla koga zaklapaju vektori brzine i vrtložnosti, tako da se vrednosti  $H_r$  kreću između -1 i +1. Relativna helikoidnost predstavlja indikator orijentacije vektorskog polja brzine u odnosu na vektorsko polje vrtložnosti. Što je vrednost  $H_r$  bliža  $\pm 1$ , to više vektori  $\vec{\omega}$  i  $\vec{V}$  teže da budu paralelni ( $\alpha_{\omega,V} \rightarrow 0^\circ$ ), a to je slučaj u blizini jezgra vrtloga usmerenih u pravcu glavnog toka (na primer vrtloga koji iza sebe ostavljaju brodovi ili automobili). Imajući ovo u vidu, raspored veličine  $H_r$  daje efektan način lociranja prostorne strukture toka. Ako se vektorsko polje brzine preklopi preko skalarnog polja  $H_r$  (Slika 13), dobija se mogućnost sagledavanja gde strujanje ima naglašeno prostorni (3D) karakter, a gde se može smatrati da je ravansko (2D). U

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

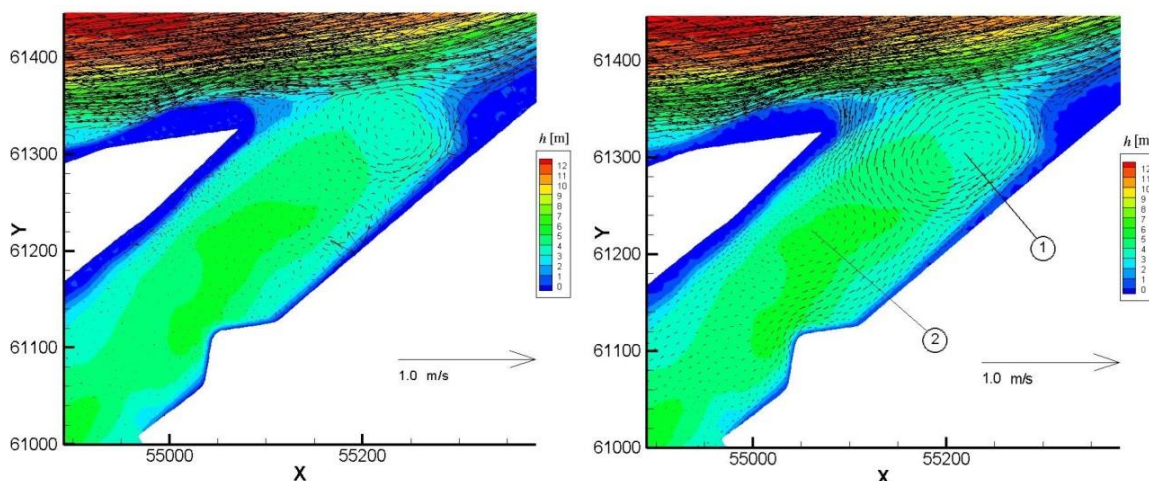
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

konkretnom slučaju se uočava da su vrednosti relativne helikoidnosti male, što znači da su vektori  $\vec{\omega}$  i  $\vec{V}$  međusobno skoro ortogonalni, što upućuje na zaključak da se dato recirkulaciono strujanje može dobro opisati pomoću 2D modela (odnosno da 3D model možda i nije neophodan).

Izneta konstatacija otvara pitanje da li je to u potpunosti tako i koliko se zapravo razlikuju rezultati 2D i 3D modela? Da bi se dao odgovor na ovo pitanje, rezultati 3D modela su „oboreni“ u horizontalnu ravan kako bi se mogli uporediti sa rezultatima 2D modela. Za to je bilo potrebno da se obavi osrednjavanje po dubini komponenti brzine 3D modela. Integracija po dubini je izvršena trapeznim pravilom na osnovu vrednosti koje su sračunate u 8 računskih ravni 3D modela. Sa tako osrednjenim horizontalnim komponentama brzine sračunata su karakteristična vektorska i skalarna polja recirkulacionog strujanja. Zatim su upoređena sa odgovarajućim poljima koje je dao „izvorni“ 2D model (Slike 14-16). Svi proračuni su urađeni za karakteristični protok  $Q_{vv}=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

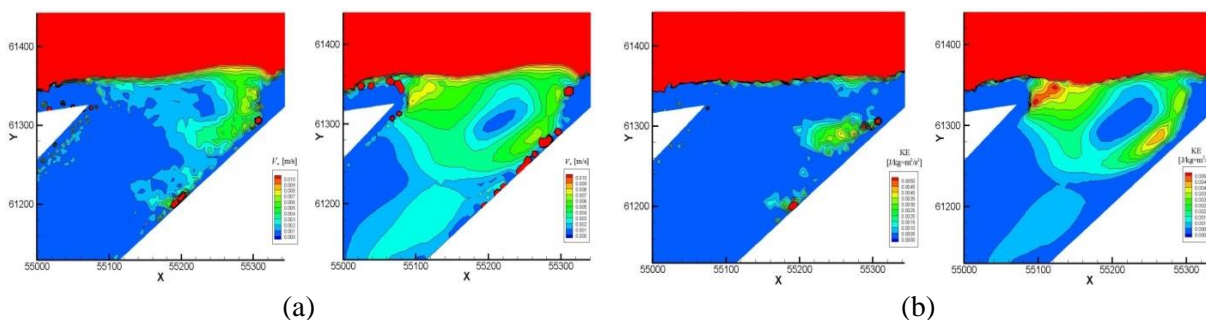
Može se konstatovati da se rezultati ne razlikuju mnogo u brojnim vrednostima, ali se rapored razmatranih veličina veoma razlikuje. Recirkulaciona zona koju daje 3D model je primetno veća i za razliku od 2D modela, pored primarnog vrtloga, nazire se i drugi, sekundarni vrtlog u kontra smeru (Slika 14).

Poređenjem skalarnih polja na Slici 15 može se zapaziti da 3D model daje pravilniji oblik recirkulacione oblasti koja, za razliku od one kod 2D modela, praktično zahvata ceo zaliv po širini, a njen uticaj se širi ka unutrašnjosti Zaliva. Veoma se razlikuju i rasporedi intenziteta vrtložnosti (Slika 16). Treba imati u vidu da u slučaju 2D strujanja, vrtložnost opisuje rotaciju fluidnih delića oko vertikalne ose (što se može pokazati razvojem jednačine (3)).



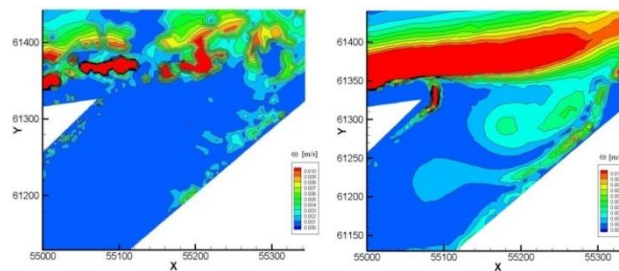
Slika 14. Poređenje vektorskih polja brzine dobijenih pomoću 2D i 3D modela

Figure 14. Comparison of vector velocity fields obtained by the 2D and the 3D model.



Slika 15. Poređenje skarnih polja dobijenih pomoću 2D i 3D modela; (a) smičuća brzina; (b) kinetička energija po jedinici mase.

Figure 15. Comparison of scalar fields obtained by the 2D and the 3D model; (a) shear velocity; (b) kinetic energy per unit mass.



Slika 16. Poređenje rasporeda intenziteta vrtložnosti dobijenih pomoću 2D i 3D modela.

Figure 15. Comparison of vorticity magnitude distributions obtained by the 2D and the 3D model.

Prikazani rezultati donekle relativizuju zaključak izveden iz relativne helikoidnosti da su prostorni efekti datog recirkulacionog toka relativno slabo izraženi, na osnovu čega bi se moglo pretpostaviti da je za numeričku simulaciju ovog strujanja 2D model sasvim dovoljan.

## 4 Zaključci

- 1) Numerički 2D i 3D modeli su moćni alati za rešavanje praktičnih problema koji zahtevaju dobro poznavanje hidrauličkih i morfodinamičkih procesa.
- 2) Pri 2D simulaciji velikih rečnih tokova nije redak slučaj da na rezultate ne utiče mnogo primenjeni model turbulencije, zbog toga što je strujna slika oblikovana geometrijom korita i što trenje ima dominantnu ulogu.
- 3) Kod računskih mreža sa velikim brojem malih elemenata, gustina prostornog filtra može biti isuviše velika da bi SGS komponenta u modelu LES došla da izražaja, tako da se veoma slični rezultati mogu dobiti i jednostavnim modelom turbulencije sa konstantnom vrtložnom viskoznošću.
- 4) Vrtložnost i helikoidnost mogu biti korisni indikatori karaktera recirkulacionih tokova upućujući na zone povećane energije rotirajućih fluidnih delića, kao i zone izrazito prostornog (3D) strujanja.
- 5) Prednost 3D modela u odnosu na 2D model nije samo u tome što daje raspored hidrauličkih vektorskih i skalarnih veličina po dubini toka, već i u tačnijem rasporedu tih veličina u horizontalnoj ravni. Ove prednosti preporučuju 3D modele za proračun i analizu recirkulacionih tokova.

## Literatura

1. Chung, T.J. (2002) *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press.
2. Ferziger, J.H., Perić, M. (1996) *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
3. Hervouet, J-M. (2007) *Hydrodynamics of Free Surface Flows - modelling with the finite element method*, John Wiley & Sons.
4. Ivetić, M. (1989) *Numerical Simulation of Turbulent Flow in Shallow Flow Domains by SCS Modelling*, Doktorska disertacija, Univerzitet Kijoto.
5. Jovanović, M. (2015) *Uticao sistema napera na uzvodno usporavanje toka*, 17. Savetovanje SDHI i SDH, Vršac.
6. Jovanović, M. (2012) *Proračun prelivnih tokova pomoću prostornog (3D) numeričkog modela*, 16. Savetovanje SDHI i SDH, Donji Milanovac.
7. Jovanović, M., Kapor, R., Zindović, B. (2011) *Studija hidrotehničkog uređenja ulaza u Čukarički zaliv u uslovima nastalim izgradnjom novog mosta na reci Savi*, Građevinski fakultet, Beograd.
8. Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B. (2006) *Upgrading Environmental Projects by CFD Modelling*, 23. Conference of the Danube Countries on the Hydrologic Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Belgrade, Serbia.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

9. Jovanović, M. (1998) Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova, Građevinski fakultet Beograd.
10. Kapor, R. (1997) Matematički model tečenja vode u plitkim oblastima strujanja sa osnovnim jednačinama osrednjenim po prostoru, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd.
11. Telemac modelling system (2010), 2D/3D Hydrodynamics, Operating/Reference Manuals.
12. Van Schijndel, S., Kranenburg, C. (1998) Reducing the siltation of a river harbour, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 803-814

## Procena hidrauličke hrapavosti betonskih kanalizacionih cevi primenom laserskog skeniranja

Nikola Stanić<sup>1</sup>, François H.L.R. Clemens<sup>2</sup>, Jeroen G. Langeveld<sup>3</sup>

APSTRAKT: Kada se govori o upravljanju kanalizacionom sistemima, poželjno je da se odluke o rehabilitaciji ili zameni elemenata sistema donose na osnovu stvarnog stanja sistema. Da bi se procenila sposobnost kanalizacionog sistema za otpadne vode obično se koriste hidrodinamički modeli u kojima je hidraulička hrapavost jedan od ključnih parametara. Za nove kanalizacione cevi hrapavost je poznata, ali za stare cevovode sa neujednačenim pogoršanjem stanja duž poprečnog preseka cevi ona se mora proceniti. U ovom radu je opisana, primenjena i diskutovana metoda laserskog skeniranja za tačno, neinvazivno i neintruzivnu procenu hidrauličke hrapavosti betonskih kanalizacionih cevi. Obrada podataka dobijenih skeniranjem je obavljena u dva koraka: (1) prostorna interpolacija sa procenom neizvesnosti, i (2) procena hidrauličke hrapavosti primenom statističke analize. Statističkom analizom je takođe određena minimalna rezolucija skeniranja koja je potrebna za potrebe hidrodinamičkog modeliranja. Rezultati laserskog skeniranja su obećavajući i ova metoda ima potencijala za jednostavno i brzo kvantifikovanje hidrauličke hrapavosti kanalizacionih cevi.

Ključne reči: In-situ merenja; Inspekcija Kanalizacionih sistema; Propusna moć kanalizacionih cevi; Neizvesnost; Optičko skeniranje; Trenje.

## Estimation of hydraulic roughness of concrete sewer pipes by laser scanning

ABSTRACT: In sewer asset management, decision making on rehabilitation or replacement should preferably be based on the actual functionality of a sewer system. In order to judge the ability of a sewer system to transport wastewater, hydrodynamic models are used; in these, hydraulic roughness is one of the key parameters. For new pipes, this is well known, but for aged pipes with uneven deterioration along the cross section, information on the hydraulic roughness is lacking. In this article, the potential of laser scanning methods for accurate, noninvasive, and nonintrusive assessment of the hydraulic roughness of concrete sewer pipes is described, demonstrated, and discussed. Processing of raw scanned data consists of two steps: (1) spatial interpolation with uncertainty analysis, and (2) statistical analysis for estimating the hydraulic roughness. Moreover, a statistical analysis was carried out to determine the minimal scanning resolution required in order to yield results accurate enough for subsequent modeling uses. The results show a promising potential of the laser scanning approach for a simple and fast quantification of the hydraulic roughness in a sewer system.

Keywords: Discharge capacity; Friction factor; *In-situ* measurements; Optical scanning; Sewer inspection; Uncertainty.

---

<sup>1</sup> Dr. Nikola Stanić, lecturer and researcher, HZ University of Applied Sciences, n.stanic@hz.nl

<sup>2</sup> Prof. Dr. Ir. François Clemens, Delft University of Technology, f.h.l.r.clemens@tudelft.nl

<sup>3</sup> Dr. Ir. Jeroen Langeveld, associet professor, Delft University of Technology, j.g.langeveld@tudelft.nl

## 1 Introduction

A sewer system represents a capital investment that has to last for decades; thus, it requires an adequate design and management. Otherwise, unfit sewer systems may lead to severe economic and environmental damages. For the purposes of the sewer system design, numerical models are used to reproduce the flow and pollution transport pattern in the system. User-specified parameters (*e.g.*, hydraulic resistance, pipe diameter, local head-loss coefficients, *etc.*) are essential to the accuracy of the hydraulic simulations made by performing software. The hydraulic resistance, *i.e.*, friction resistance of pipes, is one of many essential factors that needs to be known in transportation of liquids. In order to assess the friction resistance, it is necessary to know the pipe's hydraulic roughness. Straub and Morris (1950) quantified the hydraulic roughness of new concrete pipes. Overall, the hydraulic resistance of new sewer pipes is fairly well understood (*e.g.*, Ackers 1961; Ackers *et al.* 1964).

In practice, there is a lack of reliable information on the actual hydraulic roughness of aged pipes; the roughness will change over time due to, *e.g.*, corrosion processes, joint eccentricity, protruding objects, and subsidence (Bennis *et al.* 2003), *etc.* Increased hydraulic roughness due to aging of the pipe material reduces the flow capacity of the pipe, resulting in decreasing system hydraulic performance (Bennis *et al.* 2003). Furthermore, sewer repairs like sewer relining alter the hydraulic resistance mainly due to a decrease in diameter and, depending on the material used, the hydraulic roughness. Consequently, it is important to know the actual status of the asset-pipes, such as hydraulic roughness and the exact interior geometry, in order to determine whether or not a given pipe has adequate hydraulic capacity. All in all, it is imperative to possess appropriate information of appropriate quality in order to move to a more-rational sewer-management decision process (Stanić *et al.* 2014).

In literature, some attempts to this end are reported. For instance, Romanova *et al.* (2011) developed a novel, noninvasive, and *in-situ* acoustic method and instrumentation to measure the water surface pattern and hence determine the resistance and then the pipe wall roughness. Romanova *et al.* (2011), however, did not measure the actual wall roughness and above all suggested further research. For example, the presence of sediments or other objects can also induce the formation of patterns at the surface; hence, it is hard to state that the actual roughness is always measured using this method. Therefore, it is necessary to define methods that enable collection of this information.

Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) have developed a method for the *in-situ* determination of hydraulic friction loss coefficients of bored tunnels, using highly accurate laser-scan measurements. There is potential in applying this methodology in order to obtain an accurate estimation for the hydraulic condition of sewer pipes; *i.e.*, quantifying physical (wall) roughness, and quantifying the attached and/or settled deposits' roughness.

In literature, there are numerous values for the equivalent roughness of Nikuradse ks, ranging from, *e.g.*,  $k_s = D_{65}$  (Einstein and Barbarossa 1952) to  $k_s = 5.1 \times D_{84}$  (Mahmood 1971). Further, van Rijn (1982) showed that effective roughness of bed forms is dependent of the height and height:length ratio of the bed form. Moreover, Camenen *et al.* (2006) found that for the lower plane-bed regime, the roughness height may only be a function of the grain size. On the other hand, for the upper plane-bed regime, the roughness height is proportional to the Shields parameter to the power 1.7 (Camenen *et al.* 2006).

Furthermore, the shape of a rough surface (*e.g.*, irregular and wavy rough surface or sawtooth rough surface) can influence the hydraulic roughness (Figure 1). Due to its material properties and nature of deterioration, sewer pipe surfaces can be regarded as random and wavy (Figure 2); hence the Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) method is appropriate because it starts from the same assumptions, *i.e.*, that the area between the bed and the top of the roughness crest comprises eddies. As a consequence, spacing has no effect on the amount of energy consumed in the formation and subsequent dissipation of eddies formed at the bed. Consequently, the equivalent roughness may be regarded as the average or representative height of the surface roughness elements only. This is valid for flow at sufficiently high values of the Reynolds number, which is usually the case in sewers. Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) compared four different methods for estimating Manning's coefficient  $n$  in concrete pipes; finally suggesting that Nikuradse's equivalent sand-grain roughness  $k_s$  is assumed to be equal to the so-called mean range height  $h_r$ . In principle, the mean range

height is equivalent to the median grain diameter  $D_{g50}$ . This approach is adopted due to the basic similarity between hydraulic bored tunnels and sewer systems (Figure 2).

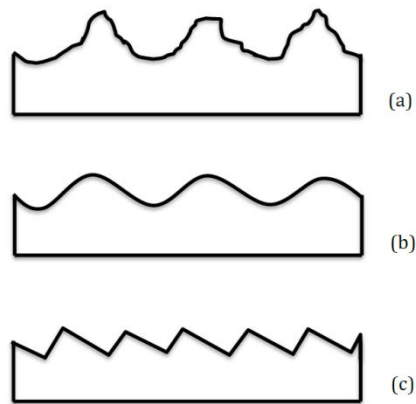


Figure 1. Different types of rough surfaces: (a) irregular; (b) wavy; (c) sawtooth.

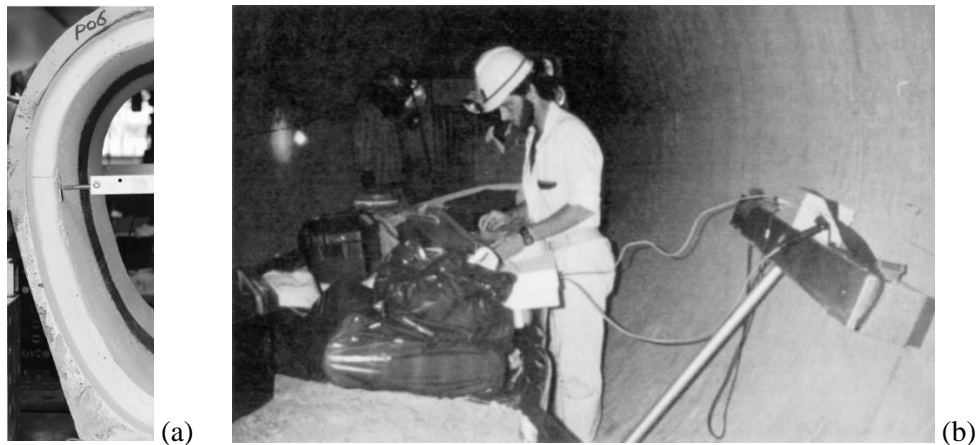


Figure 2. Photo of: (a) the studied sewer pipe from The Hague: P06 (image by N. Stanić); (b) the bored tunnel (image courtesy of Geoffrey G. S. Pegram).

In this article, the potential and uncertainties of laser scanning methods for an accurate, noninvasive, and nonintrusive assessment of the hydraulic roughness of concrete sewer pipes is demonstrated and discussed. The studied concrete sample surfaces were reconstructed by using a geostatistical interpolation technique of kriging on scanned raw-sample data to estimate the physical roughness – Nikuradse’s (1933) equivalent sand-grain roughness  $k_s$ , and consequently the hydraulic roughness – Manning’s coefficient  $n$ . In order to identify the minimum scanning resolution required to obtain an accurate estimate of the hydraulic roughness, sensitivity analysis is performed.

## 2 Material and Methods

### 2.1 Materials

The study was conducted on excavated sewer pipes that were scheduled for replacement according to the municipal sewer rehabilitation plans of The Hague and Breda, Netherlands (two pipes from each municipality). The concrete egg-shaped pipes (400/600 mm, 1 m long) used in this project have been in service in combined sewer systems. The sewer in The Hague, in operation between 1924 and 2013, was located in a domestic housing area around old dunes. The area in Breda used to be partly industrial and partly domestic, and the sewer was in operation between 1952 and 2013. As a

reference, a new pipe (of the same material, shape, and size) from De Hamer factory (Nijmegen, Netherlands), was used to validate known wall roughness of the new pipes [further details can be found in Stanić *et al.* (2017b)]. A high-accuracy Nikon LC60Dx (Nikon Metrology Europe NV, Leuven, Belgium) digital line scanner was used for acquiring the raw data. The Nikon LC60Dx multistylus test accuracy is  $9\ \mu\text{m}$  (according to manufacturer specifications), which represents the 95% uncertainty interval of the scanner ( $\pm 2\sigma$ ) and represents the measuring uncertainty  $\sigma_m$ . The multistylus test [comparable to ISO 10360-5 (ISO 2010)] determines the level of measurement uncertainty when measuring a location using multiple probe head positions. The LC60Dx laser scanner offers an adequate productivity with its 60-mm stripe width and scanning rate of 75 stripes per second, thus attaining a scanning rate of 75,000 points per second (a stripe distance of 0.1 mm and point distance of 0.06 mm). Further, the laser scanner possesses enhanced sensor performance capability allowing effortless scanning of varying or hard-to-scan surface materials. Moreover, it features a filter to avoid capturing of scattered reflection points.

## 2.2 Method validation

For the purpose of validation of the Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) methodology, the physical roughness height was measured on a  $5 \times 10$  cm size sample, made from 5-8-mm-diameter gravel (measured median grain diameter  $D_{g50} = 5.5$  mm). The measured validation sample (Figure 3) represents the actual hydraulically rough field conditions of a floodplain. Details are presented in Ali and Uijttewaal (2013).

## 2.3 Experimental method

Samples of  $5 \times 10$  cm were carefully sawn-out, with minimum damage, using a diamond saw in the concrete laboratory of BAS Research & Technology (Venlo, Netherlands). The samples were taken from the invert, lateral, and crown region of each excavated pipe (example in Figure 4). Only one sample was taken from the new concrete sewer pipe. Strips of sample surfaces were scanned, with a high accuracy Nikon LC60Dx digital line scanner, at regular intervals of 0.1 mm and an average point distance of 0.01 mm (a higher point density than usual practice).

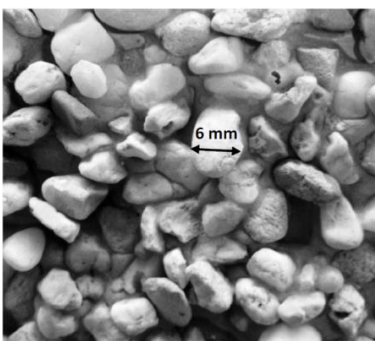


Figure 3. Photo of the validation sample used by Ali and Uijttewaal (2013) (image by N. Stanić).

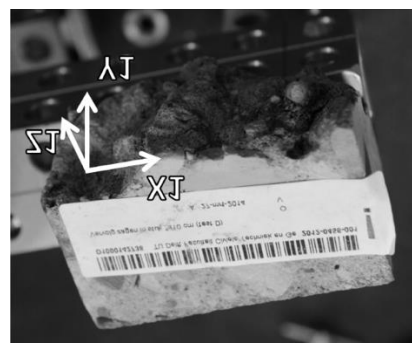


Figure 4. Photo of the sample from The Hague first pipe ( $XI$  and  $YI$  define the position of elevation  $ZI$ ) (image by N. Stanić).

## 3 Data Processing

This section describes the processing of samples of raw-scan data ( $XI$ ,  $YI$ , and  $ZI$ ) carried out in the study. Two sets of analysis were carried out in parallel: (1) on the validation sample; and (2) on the samples from deteriorated sewer pipes. Figure 5 describes the applied data-processing protocol.

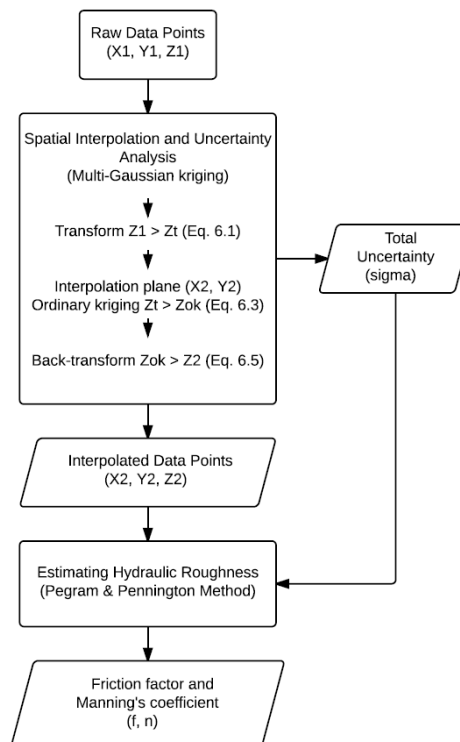


Figure 5. Data processing flowchart.

After all three samples of roughness (from invert, lateral, and crown region) were quantified, an estimate of a single roughness value for the whole sewer pipe was obtained by the Horton-Einstein (1934) equation. Furthermore, in order to determine the minimal scanning resolution required to obtain useful results, analysis was repeated on the validation sample with decreased spatial resolution (sensitivity analysis).

## 4 Spatial Interpolation

Due to an unevenly deteriorated pipe surface, laser light was scattered, resulting in a nonuniform distribution in space. For the purpose of further analysis, however, it is necessary to have equidistant series of points in space. Therefore, the raw data had to be interpolated. A kriging method was applied in spatial interpolation from point measurement to continuous surfaces. The term kriging was introduced in the 1950s by Daniel Krige (1951) and refers to a group of geostatistical interpolation methods. It is a process of a theoretical weighted moving average where the prediction at unobserved location is a linear combination of observations nearby. Further, due to the size of data sets (around 700,000 points per sample) data were analyzed in subsets. Sample edges were excluded from analysis to avoid overestimating of the physical roughness. A few of the sample elevations ( $ZI$ -data) follow the normal distribution (Figure 6) while, all the sample subsets' elevation ( $ZI$ -data) deviates from the normal distribution (Figure 7). Nevertheless, the kriging method is based on Gaussian statistics, assuming that the data follows the Gaussian distribution. Consequently, to symmetrize the distribution of data and to analyze it, multi-Gaussian kriging (MG) was applied (Deutsch and Journel 1998). In this study, the postprocessing was done in open-source R programming language, which has well-developed procedures (packages) for a spatial statistical analysis (Bivand *et al.* 2008; Hengl 2007).

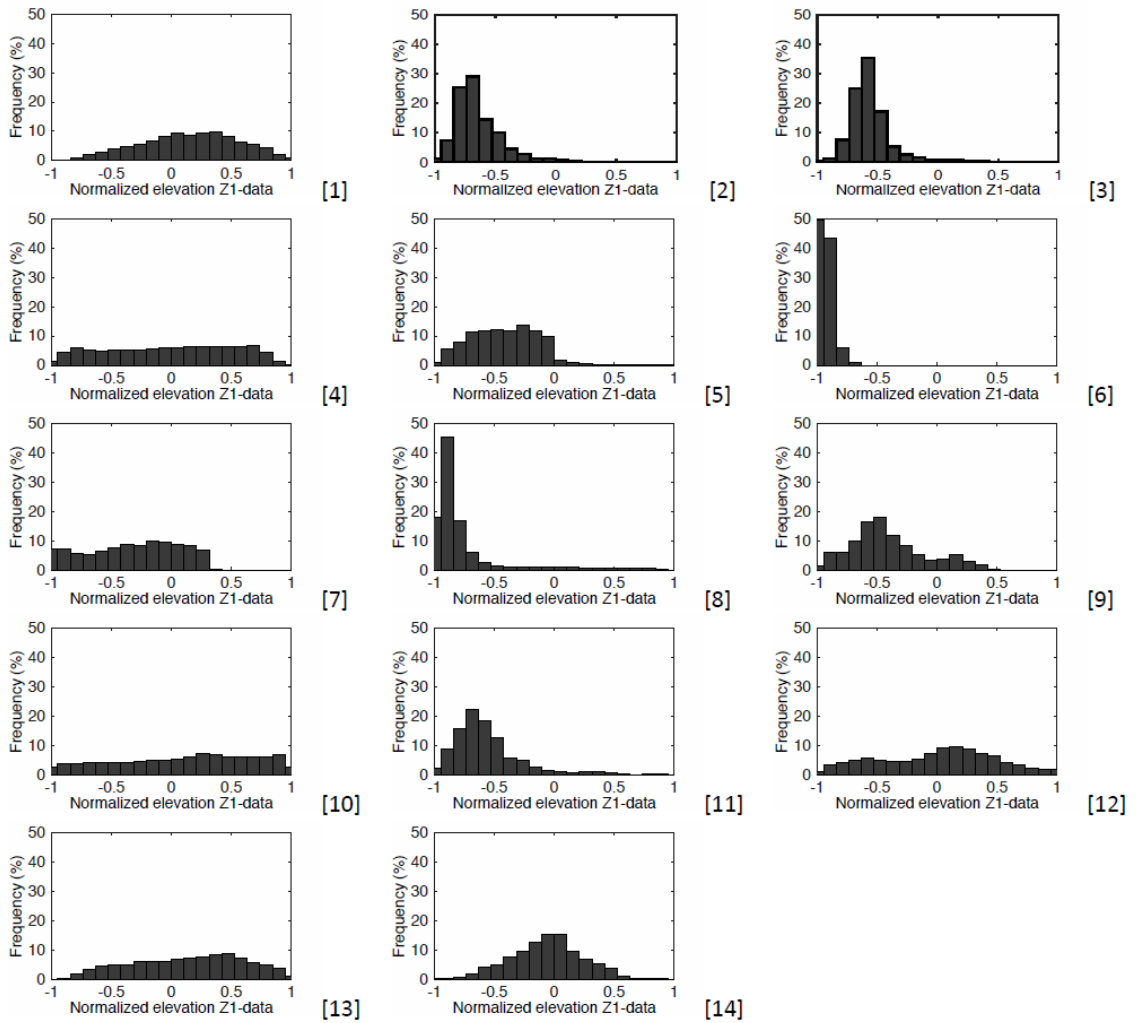


Figure 6. Histogram of elevation of sample: (a-c) Breda first pipe (invert, lateral, and crown); (d-f) Breda second pipe (invert, lateral, and crown); (g-i) The Hague first pipe (invert, lateral, and crown); (j-l) The Hague second pipe (invert, lateral, and crown); (m) new pipe; (n) validation sample; elevation values of samples were normalized to range between -1 and 1 only for the purpose of the consistency in it visualization.

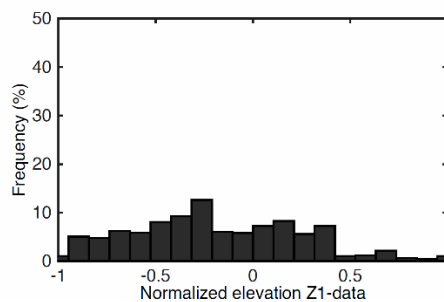


Figure 7. Example of the histogram of elevation for one subset of the validation sample [Fig. 6(n)].

The MG starts with a normal-score transformation of the original  $ZI$ -data into  $Zt$ -values, because prediction performances are usually better if data do not display a strong skewness. Normalscore transform is a graphical transform that can normalize any non-Gaussian data (Eq. 1) (Deutsch and Journel 1998).

$$Zt(u) = G^{-1}\{F[Z1(u)]\} \quad (1)$$

Once the transformation has been performed, the spatial variation of  $Zt$ -values can be quantified using so-called semivariance. The experimental semivariogram for a given lag vector  $h$  is estimated as (Eq. 2)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [Zt(u_{\alpha}) - Zt(u_{\alpha} + h)]^2 \quad (2)$$

When presenting the semivariogram, implicit assumptions of stationarity and isotropy were made. The semivariogram model was fitted to the experimental semivariogram using weighted least-squares fit,  $N/\{\gamma(h)\}^2$ , furthermore providing the input parameters for further kriging analysis (example in Figure 8).

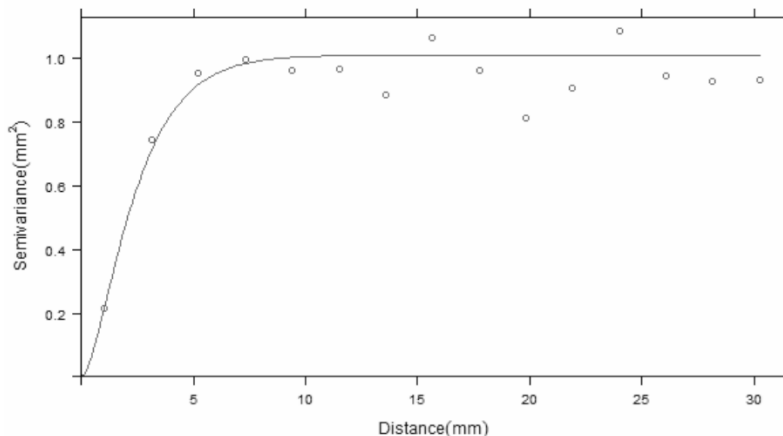


Figure 8. Semivariogram of the section of the sample from The Hague, P08; circles represent the experimental semivariogram and the black line indicates the fitted semivariogram model.

Ordinary kriging (OK) was applied to predict  $\hat{Z}_{OK}(u)$  at unobserved location  $u$  using observation  $u_{\alpha}$  as follows (Eq. 3) (Matheron 1971):

$$\hat{Z}_{OK}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) \cdot Zt(u_{\alpha}) \quad (3)$$

The OK weights  $\lambda_{\alpha}$  are chosen such that  $\sigma^2_E(u) = E[(\hat{y}(u) - y(u))^2]$  is as small as possible, under the unbiased condition  $\sum_{\alpha \setminus \beta=1}^{n(u)} \lambda_{\beta} = 1$ .

Kriging, as a statistical method, makes some assumptions; this particularly refers to the stationary one. A cross-validation prior to the OK was performed to ensure that the assumption can be made. Due to high point density (around 700,000 points per sample) given, an OK estimation was carried out at each sample location using the 24 nearest neighboring points (subjective choice), where nearest is defined by the distance of the spatial locations. The results of the cross-validation are given by standardized errors (Z-score) (Isaaks and Srivastava 1989). The standardized errors,  $Zt_{score}$ , were computed at each location (Eq. 4)

$$Zt_{score}(u) = \frac{\hat{Zt}(u) - Zt(u)}{\sigma_{OK}(u)} \quad (4)$$

If the mean value of Ztscore (Eq. 4) is close to zero and the normalized standard deviation is close to one, the quality of information on local accuracy and of model is satisfied (Isaaks and Srivastava 1989). The OK results were back-transformed to produce the final original spatial distribution map (Deutsch and Journel 1998). A back-transformation  $Z2$  (Eq. 5) is achieved by applying the inverse of the normal score transform introduced in Eq. (1)

$$Z2(u) = F^{-1}\{G[Zt(u)]\} \quad (5)$$

The back-transformation of the normal-score estimate  $\hat{Z}_{OK}(u)$  is sensitive to errors in the interpolation process, especially when extrapolating for small and large values; therefore, the



conditional distribution of the normal variable at any unsampled location was simulated and back-transformed to the original  $Z_2$ -value (Wu *et al.* 2006).

Overall, the ordinary MG approach is straightforward and provides an unbiased estimation (Emery 2006); and is theoretically less accurate than the conditional methods (*e.g.*, indicator kriging). However, if the data are abundant, the results obtained with ordinary kriging are almost identical to results obtained with simple kriging; hence, the results from ordinary MG are close to the optimal conditional expectation (Goovaerts 1997).

## 5 Spatial Uncertainty Analysis

Insight in total elevation ( $Z_2$ ) uncertainty and its propagation through space is crucial for further estimation of the hydraulic roughness. For the purpose of generating best predictions of the elevations, MG is used. For the purpose of the uncertainty propagation analysis, the Monte Carlo method is more appropriate; stochastic spatial simulations using a conditional sequential Gaussian simulation generate multiple possible realities where any of the simulated realities could be the true one (Goovaerts 1997). An empirical approach was used, based on an estimate of the coefficient of determination  $R^2$ , to analyze whether the number of Monte Carlo runs was sufficient to produce stable results (Beekhuizen *et al.* 2011; Oksanen and Sarjakoski 2005). This was done by repeating the Monte Carlo uncertainty propagation analysis and by plotting the results from the first against those of the second analysis ( $Z_{OK1}$  versus  $Z_{OK2}$ ). When there are infinite numbers of Monte Carlo runs, the first and second analysis will possess high linear correlation ( $R^2 = 1$ ). For a finite number of runs, the magnitude of the deviation may be visually inspected to verify whether the Monte Carlo results were sufficiently stable. For this study, 500 runs were adopted, based on a subjective judgment; a strong relationship is confirmed by the  $R^2$  of the data sets of above 0.995 (example in Figure 9). The results of the 500  $Z_{OK}$  runs were back-transformed to obtain the  $Z_2$ . Finally, the spatial uncertainty  $\sigma_i$ , was quantified as the standard deviation of the Monte Carlo simulations.

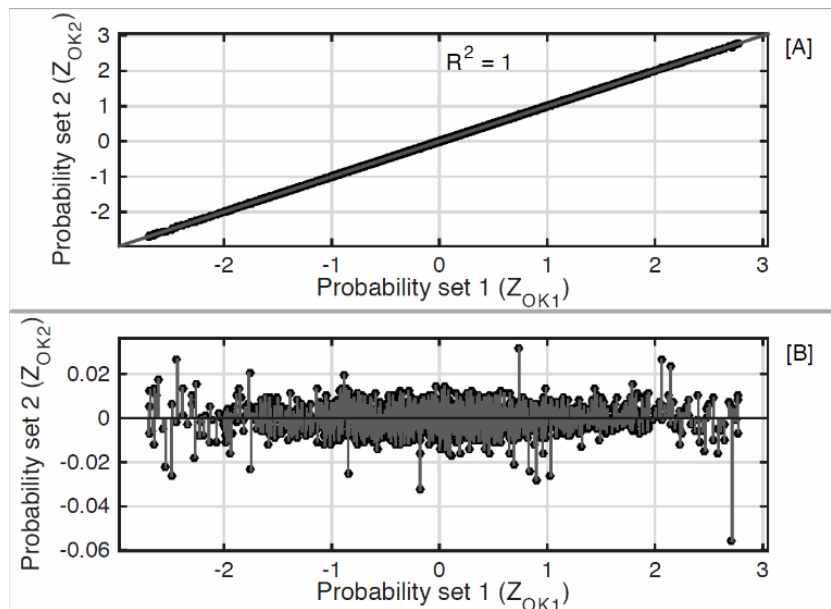


Figure 9. Probabilities of two independent Monte Carlo analyses: (a) scatter plot; (b) residual plot.

## 6 Estimation of Hydraulic Roughness

For this study, the method proposed by Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) for linking hydraulic roughness to measured physical roughness of an irregular surface was adopted. In this analysis, Nikuradse's equivalent sand-grain roughness is assumed to be equal to the so-called mean range height of each roughness profile ( $X2$  and  $Z2$ -data). The mean range height is calculated by averaging the differences between maxima and minima within intervals of the centroidal wavelength of the profile.

When sand-grain roughness  $k_s$  is known, the Darcy–Weisbach friction factor  $f$  can be determined using Colebrook–White (Eq. 6)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{k_s}{3.71D_h} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (6)$$

For hydraulically rough or fully-developed flow at high  $Re$ , Eq. (6) reduces to

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{k_s}{3.71D_h}\right) \quad (7)$$

Furthermore, for a sewer pipe flowing full at high  $Re$ , Manning's coefficient  $n$  and Darcy-Weisbach  $f$  are related by (Eq. 8)

$$n = R_h^{1/6} \sqrt{\frac{f}{8g}} \quad (8)$$

Once the Manning's  $n$  is calculated for samples from the invert, lateral and crown region of excavated pipe the composite roughness is calculated. For the sewer pipe, the following Horton-Einstein (1934) equation is used:

$$n_e = \left(\frac{\sum p_i n_i^{3/2}}{\sum p_i}\right)^{2/3} \quad (9)$$

## 7 Results and Discussion

Results of the geostatistical interpolation technique of kriging can be seen in Figure 10. The interpolation was conducted on the subsets of 0.2 mm width due to the very large spatial data set.

Kriging is a statistical technique that quantifies the error variance at each point and thus its square root is the standard error. Consequently, the total uncertainty  $\sigma_{tot}$ , at the interpolated point is defined as (Eq. 10)

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_i^2} \quad (10)$$

where  $\sigma_i$  = spatial interpolation uncertainty obtained during kriging statistical analysis; and  $\sigma_m$  = measuring error under the assumption the two sources of uncertainty are mutually independent. Further, the sand-grain roughness was calculated using the statistical analysis of roughness as proposed by Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998). The results of the mean sand-grain roughness (assuming  $k_s = h_\lambda$ ) and mean total uncertainty for the all samples are presented in Table 1.

It can be seen from Table 1 that calculated mean range height  $h_\lambda$  of the validation sample is equivalent to the median grain diameter  $D_{g50}$ ; hence confirming the correct estimation of the Pegram and Pennington (1996) and Pennington (1998) method. Furthermore, the experimental results demonstrated the method's consistency by maintaining dependency (relationship) between  $h_\lambda$  and  $\lambda_c$  (centroidal wavelength  $\lambda_c$  is the representative interval between roughness projections of a rough surface). In order to determine the exact value that defines the Nikuradse's equivalent sand roughness for (deteriorated) sewer pipes, further hydraulic experiments need to be conducted.

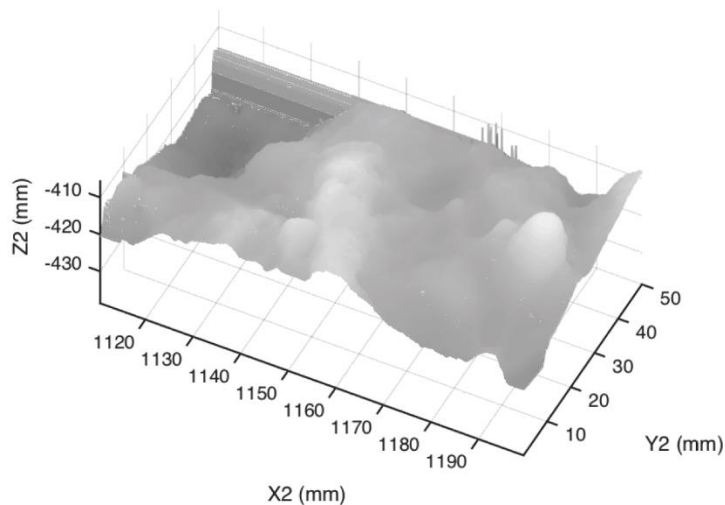


Figure 10. Results obtained by spatial interpolation of the sample from The Hague; photo of this sample can be seen in Fig. 4.

Table 1. The mean sample sand-grain roughness and uncertainty.

Sample	$k_s$ (mm)	$\sigma_{tot}$ (mm)
Validation	$D_{g50} = 5.33$	1.06
New (P01) pipe	0.54	0.07
Breda (P02) pipe		
invert	0.53	0.13
lateral	1.48	0.05
crown	0.95	0.05
Breda (P06) pipe		
invert	0.54	0.03
lateral	0.94	0.04
crown	1.1	0.03
The Hague (P08) pipe		
invert	0.89	0.11
lateral	1.5	0.05
crown	9.93	0.32
The Hague (P10) pipe		
invert	0.76	0.09
lateral	1.44	0.06
crown	12.74	1.62

Hager (1999) suggests that for sewers without specific information, the effective wall roughness  $k_s$  corresponds to an operative roughness of 1.5 mm; including the influence of local losses, *e.g.*, manholes. The results show that the values of the measured roughness can be up to 13 mm, which is considerably above the value adopted in the design (Table 1). Finally, the friction factor  $f$  was calculated from Eq. (4) and compared with friction factor that was determined from hydraulic measurements of Ali and Uijttewaai (2013). The difference between these two friction factors is in order of 1.4% (within the uncertainty range), implying that the applied methodology is consistent with a proved method. It is, however, acknowledged that this is a validation based on one sample only; a more extensive validation would be in place taking into account different surface textures and a wide range of roughnesses.

Results show that the local roughness varies with the location of the samples. The calculated values for the physical roughness of the samples from the invert region resemble the roughness value of the new pipe. The highest roughness values are found in the pipe crown region, making this region important from the perspective of a pipe capacity. Probably due to sulfuric acid attack, carbonation, and other deterioration processes over the years, the pipes investigated show nonuniform deterioration,

resulting in wide range of values for hydraulic roughness. Furthermore, the estimated total uncertainties are small for the calculated roughnesses. The value of the uncertainty depends on the surface characteristics. A higher elevation deviation between the neighboring points in space will generate higher uncertainty in the calculation.

In order to evaluate  $n$  Manning's coefficient for all the pipe samples, Eq. (8) was used; the Manning's coefficient of the whole pipe  $n_e$  is estimated using Eq. (9). The sewer pipe cross section was divided in three regions to determine their hydraulic radiuses  $R_h$  (Figure 11). Table 2 presents the results of the calculations. Results show that the hydraulic roughness for the new pipe is in the expected range. Furthermore, the results suggest that  $n_e$  for pipes of the same origin is in the same order of magnitude, thus implying that it may be possible to estimate the single Manning's coefficient for deteriorated concrete sewer. This is only valid under the assumption that the pipes have deteriorated in the same manner. In reality this is usually not the case. The value of  $n$  is affected not only by the friction factor but also by the hydraulic radius, and therefore by the pipe interior geometry. Information on the exact interior pipe geometry will contribute to a more-accurate estimate of the hydraulic roughness.

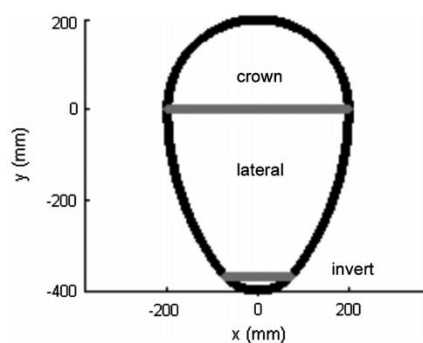


Figure 11. Regions of different roughness of deteriorated concrete sewer pipe.

Table 2. Sample Hydraulic Diameter  $D_h$ , Friction Factor  $f$ , and Manning's  $n$ .

Sample	$k_s$ (mm)	$D_h$ (mm)	$f$	$n$	$n_e$
New (P01) pipe	0.54	464.10	0.0204	0.0114	0.0114
Breda (P02) pipe					
invert	0.53	178.90	0.0319	0.0120	
lateral	1.48	574.72	0.0251	0.0129	0.0124
crown	0.95	400	0.0245	0.0120	
Breda (P06) pipe					
invert	0.54	178.90	0.0185	0.0109	
lateral	0.94	574.72	0.0222	0.0122	0.0121
crown	1.1	400	0.0255	0.0123	
The Hague (P08) pipe					
invert	0.89	178.90	0.0303	0.0117	
lateral	1.5	574.72	0.0261	0.0132	0.0149
crown	9.93	400	0.0527	0.0177	
The Hague (P10) pipe					
invert	0.76	178.90	0.0290	0.0114	
lateral	1.44	574.72	0.0272	0.0135	0.0155
crown	12.74	400	0.0594	0.0187	

Finally, a sensitivity analysis on the validation sample was carried out to determine the minimal scanning resolution required to obtain useful results by decreasing the spatial resolution  $c_i$ . The size of the data subsets remained the same and is 0.2 mm. Figure 12 shows the boxplot of the calculated median grain diameter over the validation sample cross section. With a decrease of the spatial

resolution,  $c_i = V_f = V_i$ , the individual roughness of subset deviation increases. A lack of data points leads to an underestimation of the median with increasing uncertainty. With averaging over the whole width, that effect is diminished. The boxplot indicates that with up to a 5 time decrease in resolution (from 0.01 to 0.05 mm), there is hardly any change in the median values. With the subset width (SW) of 0.2 mm and a reduction of the point density of 100 times, the limit of the application of this method is reached.

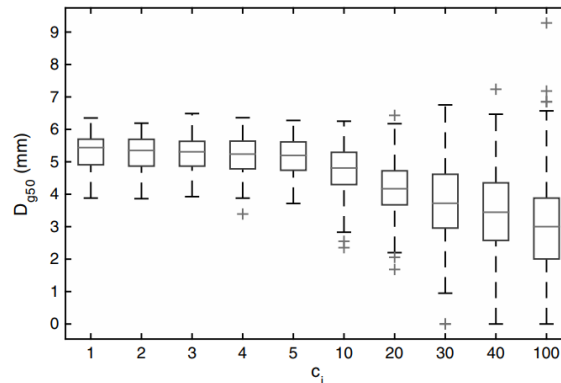


Figure 12. Boxplot of the calculated median grain diameter for the validation sample over the cross section; on each box, the central mark is the median, the edges of the box are the 25th and 75th percentiles, the whiskers extend to the most extreme data points not considered outliers (approximately  $\pm 2.7\sigma$ ), and outliers are plotted individually.

Further sensitivity analysis concentrated on studying the effect of the increase of the data subset width (Figure 13) on the estimation of the median grain diameter  $D_{g50}$  when the spatial resolution is decreased. The obtained results suggest (Table 3) that with an increase of the subset width ( $SW \geq 1$  mm) the estimation of the median grain diameter inclines toward the measured one. The calculation uncertainty does not increase significantly with a decrease of the spatial resolution. This can be explained from the fact that the behavior of the variogram near the origin stays the same with the change of resolution, thus not altering significantly the kriging predictions (Cressie 1988).

Moreover, it is important to maintain a certain level of the point space to generate a representative surface sinusoid roughness by maintaining a certain ratio between spatial resolution and subset width. Table 4 shows the Manning's  $n$  obtained using full spatial resolution ( $SW = 0.2$  mm) and using a resolution decreased 100 times ( $SW = 2$  mm) for Pipe P08 from The Hague. It can be seen that the equivalent Manning's of the pipe are identical. Overall, the result shows that laser scanning techniques with lower resolution, like laser profiling can be applied in practice for *in-situ* measurement of the hydraulic roughness of deteriorated concrete sewer pipes.

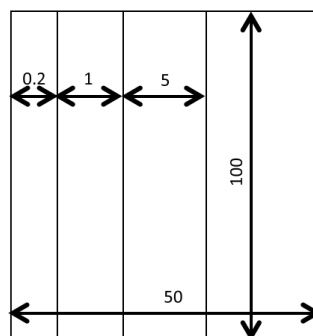


Figure 13. Sample size and subsets in millimeters.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 3. The values of mean grain diameter for different levels of the point space - ratio between spatial resolution and subset width.

	<i>dif</i> (%) [ $\sigma_{tot}$ (mm)]				
	SW = 0.2 mm	SW = 1 mm	SW = 5 mm	SW = 10 mm	SW = 20 mm
$c_i = 1$	3.09 [1.06]				
$c_i = 5$	7.17 [1.35]	6.46 [1.08]			
$c_i = 10$	14.45 [1.53]	7.37 [1.16]	6.99 [1.09]		
$c_i = 40$	39.80 [1.96]	13.90 [1.43]	12.04 [1.24]	9.81 [1.23]	
$c_i = 100$	44.98 [1.95]	25.83 [1.72]	10.62 [1.48]	9.50 [1.46]	6.54 [1.56]

Legend:  $c_i$  – decrease of spatial resolution,  $SW$  - subset width,  $\sigma_{tot}$  - the total uncertainty of the calculated values, *dif* – difference in % between the calculated and measured value of the median grain diameter  $D_{g50} = 5.5$  mm

Table 4. Friction factors and Manning's coefficients - full spatial resolution vs. decreased resolution.

The Hague (P08) pipe									
$c_i = 1, SW = 0.2$ mm					$c_i = 100, SW = 2$ mm				
sample	$k_s$ (mm)	$f$	$n$	$n_e$	sample	$k_s$ (mm)	$f$	$n$	$n_e$
invert	0.89	0.0303	0.0117		invert	0.84	0.0297	0.0116	
lateral	1.50	0.0261	0.0132	0.0149	lateral	1.67	0.0259	0.0132	0.0149
crown	9.93	0.0527	0.0177		crown	10.34	0.0537	0.0178	

When the studied sample resolution is reduced up to 200 and 400 times (distance between points of 2 and 4 mm), it would resemble laser profiler conditions. The examples of this roughness analysis are given in Table 5. The results show that with an increase of the  $SW$  to 5 mm, an almost identical  $n_e$  compared to the full resolution was calculated. This confirms the capacity of the studied method for application in conjunction with a laser profiler technique to determine hydraulic roughness.

This gives an opportunity for an application of the laser profiler technique that is also able to measure the pipe's interior geometry. With pipe deterioration, the pipe geometry changes and thus the hydraulic diameter changes; thereby, pipe geometry becomes important for quantifying the actual hydraulic roughness. Clemens *et al.* (2015) showed that an accuracy level leading to an anticipated 95% confidence interval of about 4-5 mm in profiles up to 600 mm in dimension is feasible. The recent improvement of the technique by Stanić *et al.* (2017a) shows that this accuracy can be increased to about 1-2 mm. For the studied pipe diameter and based on the position of the laser projection source in the pipe, the accuracy of the laser profiler is somewhere between 2 and 4 mm. Wall roughness varies within a cross-section region, being the lowest at the invert region and highest at the crown region. Consequently, with the current accuracy, the technique will yield results with a relatively high uncertainty, especially in the invert and lateral region.

Table 5. Friction  $f$  and Manning's  $n$  for the resolution resembling the resolution of the laser profiler.

The Hague (P08) pipe				
Sample	$k_s$ (mm)	$f$	$n$	$n_e$
invert ( $c_i=200, SW=5$ )	0.89	0.0303	0.0117	
lateral ( $c_i=200, SW=5$ )	1.81	0.0265	0.0133	0.0150
crown ( $c_i=400, SW=5$ )	10.55	0.0542	0.0179	

The largest part of the total uncertainty is associated with the measuring uncertainty. When the surfaces  $k_s > 10$  mm, the interpolation uncertainties may increase significantly if the elevation between the neighboring measured points is high. In conclusion, the measuring accuracy should be, in this case, around 0.5 mm (at least 50% less than  $k_s$ ) for the invert and lateral region ( $k_s \leq 2$  mm); otherwise it could be regarded that the results of the roughness are unreliable. This can be achieved by shifting the

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

laser profiler closer to the scanned surface. In the case of the crown region ( $k_s > 10$  mm), the measuring uncertainty of 3 mm will not yield reliable results. Overall, it is important that the uncertainty of the analysis is limited ( $\sigma_{tot} \leq k_s \times 30\%$ ) in the regions with higher roughness because they most affect the hydraulic resistance. In practice, the initial estimation of the physical roughness can be obtained using laser profiling. From a generated three-dimensional (3D) model of the pipe interior [as discussed in Clemens *et al.* (2015)], using a laser profiler technique, it can be decided whether the scanning should be repeated with the repositioned laser profiler to yield a more-accurate estimation of the roughness.

Table 6. Effect of the friction factor and the hydraulic diameter on the head loss.

Dimensions (mm)	$h_f$ (m)				
	New (P01)	Breda (P02)	Breda (P06)	The Hague (P08)	The Hague (P10)
300/450	0.200	0.232	0.221	0.335	0.363
400/600	0.136	0.158	0.151	0.228	0.247
500/750	0.101	0.118	0.112	0.170	0.184
700/1050	0.065	0.075	0.071	0.108	0.117
1000/1500	0.040	0.047	0.044	0.067	0.073
1200/1800	0.031	0.037	0.035	0.053	0.057
1600/2400	0.021	0.025	0.024	0.036	0.039

Knowing the friction factor  $f$ , pipe hydraulic diameter  $D_h$ , length of the conduit  $L$ , and average flow velocity  $v$ , then the head loss  $h_f$  may be calculated using the Darcy-Weisbach head loss Eq. (11)

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (11)$$

For example, if it is assumed that the sewer section (length between two manholes) is 60 m, the flow velocity is 1 m/s and different egg-shaped pipe dimensions, then the hypothetical head losses can be calculated. In addition, if full pipe flow is assumed, the equivalent friction factor  $f_e$  can be calculated from known  $n_e$  using Eq. (8). The obtained results (Table 6) show that the friction resistance increases with an increase of roughness. However, with an increase of the hydraulic diameter, roughness has a decreasing impact on the estimation of the head-loss values. This can be clearly seen in the Eq. (11).

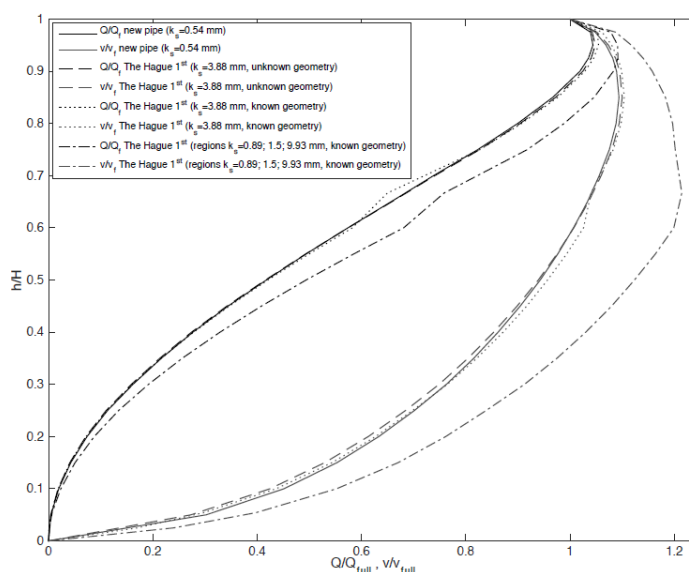


Figure 14. Velocity and discharge in partially filled egg-shaped pipe and the effects of the change of the physical roughness and the interior geometry.

Moreover, Figure 14 shows the relation between water depth in the pipe ( $h/H$ ) and the flow velocity and discharge, respectively ( $v/v_{full}$  and  $Q=Q_{full}$ ). The importance can be seen of knowing both the physical roughness and internal geometry. The pipe's capacity, *i.e.*, water-flow velocity in the pipe, will somewhat change with an increase of the physical roughness  $k_s$  only from 0.54 mm (new pipe) to 3.88 mm [equivalent  $k_s$  for The Hague (P08) pipe obtained from Eqs. (7)-(9)]. When the water depth in pipe is below 60%, the velocity will be slightly lower compared to the velocity in the new pipe. In contrast, it will slightly increase when the water depth in the pipe is above 60%. When adding information on the interior geometry [example from the scanning of The Hague (P08) pipe] to this information, the velocity and discharge in the partially filled pipe will somewhat change again. However, the major change in the pipe's capacity will occur when the calculation considers the roughness for each region, hence demonstrating once again the importance of knowing both parameters.

## 8 Conclusions and Perspective

Laser scanning offers a new and challenging perspective for measuring structural characteristics of a sewer pipe, such as physical roughness. Information on hydraulic roughness will extend and improve the quality of existing system-condition information on which rehabilitation and maintenance decisions can be based. Furthermore, in order to determine the exact value that defines the Nikuradse's equivalent sand roughness for (deteriorated) sewer pipes, further hydraulic experiments have to be conducted.

For the deteriorated concrete pipe surfaces, a low-resolution laser scan is able to measure physical roughness and consequently hydraulic roughness as well. The more the sewer pipe's surfaces are deteriorated, the more the application of a lower-resolution laser becomes feasible. For highly deteriorated regions ( $k_s > 6$  mm), which have the highest influence on hydraulic resistance, it is essential to strive for a lower uncertainty ( $\sigma_{tot} \leq k_s \times 30\%$ ) in the analysis. On the other hand, for the regions with lower roughness, a maximum acceptable uncertainty  $\sigma_{tot,max} \approx k_s \times 50\%$  to avoid unreliability of the results should be sought. This gives an opportunity for laser profiling as a technique for *in-situ* determination of the hydraulic roughness of the sewer pipes. Laser profilers have shown to be capable of measuring the pipe interior and quantify wall losses, with a potentially high enough accuracy (*e.g.*, Clemens *et al.* 2015). The combination of the two methods, *i.e.*, to use the laser profiler to determine the pipe interior geometry as well as to identify representative patches where roughness should be measured, is an opportunity to strengthen laser profiling as a method that may partially replace closed-circuit television (CCTV) inspection as a dominantly applied sewer inspection technique. Therefore, it will provide an input for the hydrodynamic sewer models, thus enabling an accurate estimation of actual hydraulic characteristics and thus may serve as a basis for a sewer asset management based on actual functionality.

It has to be acknowledged that the overall hydraulic losses of a stretch of sewer pipes is determined by more factors than just the wall-roughness of the individual pipes; among others, protruding lateral connections, displaced joints, and local losses at manholes can contribute significantly as well. Potentially laser scanning combined with pattern recognition may provide information on these factors as well. Future research will address these options as well as further experiments into the relationship between the measured mean height using the Pegram and Pennington method and Nikuradse's sand diameter

## Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the funding by (in alphabetical order) ARCADIS, Deltares, Gemeente Almere, Gemeente Breda, Gemeente 's-Gravenhage, Gemeentewerken Rotterdam, Gemeente Utrecht, GMB Rioleringsstechniek, Grontmij, KWR Watercycle Research Institute, Royal



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

HaskoningDHV, Stichting RIONED, STOWA, Tauw, vandervalk+degroot, Waterboard De Dommel, Waternet, and Witteveen+Bos as part of the Urban Drainage Research program. In addition, the authors would like to thank Mathieu Lepot and Johan Post for the fruitful discussions and useful suggestions.

## Notation

*The following symbols are used in this paper:*

$C_{xx}(\phi)$ =sample spectrum ( $\text{m Hz}^{-1}$ );

$c_i$ =decrease of the spatial resolution;

$D_{g50}$ =median grain (m);

$D_h$ =hydraulic diameter (m);

$F$ =cumulative distribution of  $ZI$ ;

$f$ =Darcy–Weisbach friction factor ;

$f_e$ =equivalent Darcy friction factor of the pipe;

$G$ =cumulative Gaussian distribution;

$g$ =gravitational acceleration ( $\text{m/s}^2$ );

$H$ =height of the pipe (m);

$h$ =water depth in the pipe (m);

$h_f$ =Darcy–Weisbach head loss (m);

$h_z$ =mean range height (m);

$k_s$ =Nikuradse's equivalent sand-grain roughness (m);

$L$ =length of the conduit (m);

$N$ =number of data points of the sample spectrum;

$N(h)$ =number of data pairs for given distance;

$n$ =Manning's coefficient;

$n_e$ =equivalent Manning's coefficient of the pipe;

$p_i$ =wetted perimeter in each region  $i$  (m);

$Q$ =discharge in a partially filled pipe ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$Q_{full}$ =full pipe discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$R^2$ =coefficient of determination;

$R_h$ =hydraulic radius (m);

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$R_e$ =Reynolds number;

$t$ =length of series of the sample spectrum;

$V_f$ =full resolution of the validation sample;

$V_i$ =decreased resolution of the validation sample;

$v$ =flow velocity in a partially filled pipe (m/s);

$\bar{v}$  =average flow velocity (m/s);

$v_{full}$ =full pipe velocity (m/s);

$X1, Y1, Z1$ =raw-sample-data coordinates (m);

$X2, Y2, Z2$ =interpolated-sample-data coordinates (m);

$Zok$ =ordinary kriging estimate (m);

$Zt_{score}$ =residual divided by kriging standard error;

$Zt$ =normal-score transformation of  $Z1$  coordinates;

$\Delta$ =sampling interval of the sample spectrum;

$\Phi_c$ =centroid frequency (Hz);

$\phi$ =frequency (Hz);

$\hat{\gamma}(h)$  =semivariance ( $m^2$ );

$\kappa$ =kernel smoothing weight;

$\lambda(u)$ =kriging weight of each observation;

$\lambda_c$ =centroidal wavelength;

$\sigma_r$ =spatial interpolation uncertainty (m);

$\sigma_m$ =measured uncertainty (m); and

$\sigma_{tot}$ =total uncertainty (m).

## References

1. Ackers, P. (1961) The hydraulic resistance of drainage conduits. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 19(3), 307–336.
2. Ackers, P., Crickmore, M. J., and Holmes, M. J. (1964) Effects of use on the hydraulic resistance of drainage conduits. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 28(3), 339–360.
3. Ali, S., and Uijttewaal, W. (2013) Flow resistance of vegetated weirlike obstacles during high water stages. *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000671, 325–330.
4. Beekhuizen, J., Heuvelink, G. B. M., Biesemans, J., and Reusen, I. (2011) Effect of DEM uncertainty on the positional accuracy of airborne imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 49(5), 1567–1577.
5. Bennis, S., Bengassem, J., and Lamarre, P. (2003) Hydraulic performance index of a sewer network. *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:7(504), 504–510.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

6. Bivand, R. S., Pebesma, E. J., Gómez-Rubio, V., and Pebesma, E. J. (2008) *Applied spatial data analysis with R*, Springer, New York.
7. Camenen, B., Bayram, A., and Larson, M. (2006) Equivalent roughness height for plane bed under steady flow. *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1146), 1146–1158.
8. Clemens, F. H. L. R., Stanić, N., Van der Schoot, W., Langeveld, J. G., and Lepot, M. (2015) Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 11(9), 1218–1239.
9. Cressie, N. (1988) Spatial prediction and ordinary kriging. *Math. Geol.*, 20(4), 405–421.
10. Deutsch, C. V., and Journel, A. G. (1998) *GSLIB: Geostatistical software library and user's manual*, Oxford University Press, New York.
11. Einstein, H. A. (1934) Der hydraulische oder profil-radius [The hydraulic or cross section radius]. *Schweizerische Bauzeitung*, 103(8), 89–91 (in German).
12. Einstein, H. A., and Barbarossa, N. L. (1952) River channel roughness *Trans. ASCE*, 117, 1121–1146.
13. Emery, X. (2006) Ordinary multiGaussian kriging for mapping conditional probabilities of soil properties. *Geoderma*, 132(1), 75–88.
14. Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press, New York.
15. Hager, W. H. (1999) *Wastewater hydraulics*, Springer, Berlin.
16. Hamilton, J. D. (1994) *Time series analysis*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
17. Hengl, T. (2007) *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*. Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy.
18. Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989) *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
19. ISO. (2010) Geometrical product specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)—Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems. *ISO 10360-5*, Geneva.
20. Krige, D. G. (1951) A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. Chem. Metall. Min. Soc. South Afr.*, 52(6), 119–139.
21. Mahmood, K. (1971) Water management. *Technical Rep. No. 11*, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
22. Matheron, G. (1971) The theory of regionalized variables and its applications. *Ecole nationale supérieure des mines de Paris*, Paris.
23. Nikuradse, J. (1933) Strömungsgesetze in rauhen Röhren [Laws of flow in rough pipes]. *VDI-Forschungsheft* (in German).
24. Oksanen, J., and Sarjakoski, T. (2005) Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Comput. Geosci.*, 31(8), 1015–1027.
25. Pegram, G. G. S., and Pennington, M. S. (1996) A method for estimating the hydraulic roughness of unlined bored tunnels. *WRC Rep. No. 579/1/96*, Univ. of Natal, Johannesburg, South Africa.
26. Pennington, M. S. (1998) Hydraulic roughness of bored tunnels. *IPENZ Trans.*, 25(1), 1–13.
27. Romanova, A., Tait, S., and Horoshenkov, K. V. (2011) Using rapid, non intrusive methods to measure hydraulic roughness in partially filled pipes. *Proc., 12th Int. Conf. on Urban Drainage*, UNESCO, France.
28. Stanić, N., Langeveld, J. G., and Clemens, F. H. L. R. (2014) Hazard and operability (HAZOP) analysis for identification of information requirements for sewer asset management. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 10(11), 1345–1356.
29. Stanić, N., Lepot, M., Catieau, M., Langeveld, J. G., and Clemens, F. H. L. R. (2017a) A technology for sewer pipe inspection (part 1): Design, calibration, corrections and potential application of a laser profiler. *Autom. Constr.*, 75(1), 91–107.
30. Stanić, N., Langeveld, J. G., Salet, T., and Clemens, F. H. L. R. (2017b) Relating the structural strength of concrete sewer pipes and material properties retrieved from core samples. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 13(5), 637–651.
31. Straub, L. G., and Morris, H. M. (1950) Hydraulic tests on concrete culvert pipes. *St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory*, Univ. of Minnesota, Minneapolis.
32. van Rijn, L. C. (1982) Equivalent roughness of alluvial bed. *J. Hydraul. Eng.*, 108(HY10), 1215–1218.
33. Wu, J., Norvell, W., and Welch, R. (2006) Kriging on highly skewed data for DTPA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon. *Geoderma*, 134(1), 187–199.

## Adverse-slope stilling basins: machine learning approach to estimation of hydraulic jump features

Robert Ljubičić<sup>1</sup>, Budo Zindović<sup>2</sup>, Ljubodrag Savić<sup>3</sup>

**ABSTRACT:** Stilling basins are the most commonly used energy dissipating structure for large dams, due to their high operating reliability under a wide range of inflow conditions. However, unsatisfactory tailwater conditions, primarily low tailwater level, can necessitate the use of additional structural solutions for the stabilization of the occurring hydraulic jump. A possible solution to this issue is the use of the adverse-sloped basins, which use the weight of the water in the jump for jump stabilization. Adverse-slope basin design had attracted the interest of engineers and researchers in the last decade as a simple method for the reduction of the required tailwater depth and basin length. To this date, a number of analytical and empirical methods for the estimation of features of such jumps are developed. However, the applicability of these methods is hindered by their diverse accuracy and/or complexity. Based on the experimental measurements on a stepped spillway model, a multilayer perceptron model (MLP) was trained for the estimation of jump characteristics. An accuracy and sensitivity analyses were also performed for each used method. It was demonstrated that machine learning techniques can potentially provide significantly better results than certain analytical and empirical methods. This allows a simpler, faster, yet accurate analysis of the occurring hydraulic conditions in the early stages of design.

**Keywords:** stilling basin, hydraulic jump, machine learning techniques, hydraulic model

## Umirujući bazeni negativnih nagiba: primena mašinskog učenja u proceni karakteristika hidrauličkog skoka

**APSTRAKT:** Visoka operativna pouzdanost umirujućih bazena pri velikom opsegu protoka ih je učinila najčešće korišćenim disipatorima energije kod prelivnih brana. Međutim, nepovoljni granični uslovi, a na prvom mestu nedovoljna dubina u nizvodnom kanalu, mogu zahtevati primenu posebnih hidrotehničkih rešenja za umirenje hidrauličkog skoka koji u ovakvim bazenima nastaje. Jedno potencijalno rešenje ovog problema predstavljaju umirujući bazeni sa negativnim nagibom dna, koji angažuju silu težine vode za stabilizaciju hidrauličkog skoka. Ovakav tip umirujućih bazena privukao je interesovanje inženjera i istraživača u protekloj deceniji kao jednostavan metod za snižavanje potrebne nizvodne dubine i skraćenje samog bazena. Danas postoji značajan broj analitičkih i empirijskih metoda za procenu karakteristika ovakvih hidrauličkih skokova, ali je njihova tačnost raznolika a primenljivost ograničena usled velike hidrauličke kompleksnosti koju nije moguće obuhvatiti jednostavnim izrazima. Na osnovu laboratorijskih merenja na modelu sa stepenastim brzotokom, predložena je i analiziran model višeslojnih neuralnih mreža za predviđanje karakteristika skoka na osnovu datog skupa ulaznih parametara. Za predloženu metodu obavljene su analize tačnosti i osetljivosti modela. Pokazano je da tehnike mašinskog učenja mogu dati značajno bolje rezultate od analitičkih i empirijskih metoda, što omogućava jednostavniju, bržu, ali pouzdanu analizu ovakvog tipa hidrotehničkih konstrukcija u preliminarnim fazama projektovanja.

**Ključne reči:** umirujući bazen, hidraulički skok, tehnike mašinskog učenja, hidraulički model

<sup>1</sup> Robert Ljubičić, mast. inž. građ., Građevinski fakultet u Beogradu, rljubicic@grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Doc. dr Budo Zindović, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet u Beogradu, bzindovic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Prof. dr Ljubodrag Savić, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet u Beogradu, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

## 1 Introduction

Hydraulic jumps present a multi-decade engineering research endeavour. The complexity of the jump's turbulent processes makes the analytical approach very challenging, except for simple jump configurations.

A pioneering result of the hydraulic jump research is the Bélanger's equation (Chanson, 2009) – a simple relation which connects geometric and hydraulic characteristics of the upstream and downstream sections of the jump for a prismatic, rectangular and horizontal channel. In cases where one of the aforementioned conditions is not met, the engineering experience has shown that the Bélanger's equation can provide inadequate results. In order to alleviate this issue, it is very common to use (in part or fully) empirical relations. Kindsvater (Kindsvater, 1944) conducted a series of experimental research for jumps occurring partly or entirely in sloped channels. Similar experiments were later conducted by Rajaratnam (Rajaratnam, 1966). A systematic research on the hydraulic jump behaviour in stilling basins was conducted by Bradley and Peterka (Peterka, 1958), which produced a number of stilling basin design recommendations. Recent research involved increasingly complex jump configurations: at positive and negative steps (Hager & Bretz, 1986; I. Ohtsu & Yasuda, 1987), in positive and/or adverse sloped channels (Beirami & Chamani, 2006, 2010; Carollo, Ferro, & Pampalona, 2011; Defina & Susin, 2003; Hager, 1988; Ljubičić et al., 2018; McCorquodale & Mohamed, 1994; B. I. Ohtsu & Yasuda, 1991; Palermo & Pagliara, 2017; F. Yazdandoost & Bateni, 2009), in non-prismatic channels (Hassanpour, Dalir, Farsadizadeh, & Gualtieri, 2017; Kateb, Debabeche, & Riguet, 2015), etc.

Machine learning techniques are becoming increasingly appealing method for dealing with complex engineering problems due to their ability to adequately describe non-linear relations (Demuth, 2000). These methods have been successfully applied for a number of hydrologic and hydraulic problems: water system control (Lobrecht & Solomatine, 2002), hydrologic cycle modelling (Hsu and Soroshian, 1995; Riad, Mania, Bouchaou, & Najjar, 2004; Smith & Eli, 1995), sediment transport modelling (Bhattacharya, Price, & Solomatine, 2007; Yitian & Gu, 2003), erosion process modelling (Kambekar & Deo, 2003; Liriano & Day, 2001), estimation of potential evapotranspiration (Torres, Walker, & McKee, 2011), stepped spillway energy dissipation (Roushangar, Akhgar, Salmasi, & Shiri, 2014), and even hydraulic jump characteristics (F. Y. Yazdandoost, Bateni, & Fazeli, 2007). All of the aforementioned engineering problems are multivariate and non-linear. Machine learning techniques offer an efficient and effective way for their solving, in cases where a dataset large enough exists for training purposes.

This paper analyses the capability of a commonly used machine learning technique called *artificial neural network* (ANN), for the estimation of the hydraulic characteristics of adverse-sloped hydraulic jumps. In previous experimental research (Ljubičić et al., 2018), both analytical and empirical relations have been used to characterize this type of hydraulic jumps. Now, the relation between sets of input and output features is modelled using both simple linear regression and ANN, and results have been compared with (Ljubičić et al., 2018). For ANN, six different training algorithms and 12 different network configurations have been examined to find the most practical network size and training algorithm. Results have shown that ANN can adequately and accurately estimate characteristics of adverse-sloped hydraulic jumps, and provide better agreement with measured data than the linear regression (Ljubičić et al., 2018).

## 2 Materials and methods

### 2.1 Analytical/Empirical model

Based on scale-model experimental measurements of depth, velocity, and air concentration, a momentum based analytical/empirical (A/E) model was presented in (Ljubičić et al., 2018) to

characterize adverse-sloped hydraulic jumps for stepped spillways. Experiments covered range of stilling basin apron slopes between  $0^\circ$  and  $7.5^\circ$ , and inflow Froude numbers from 7.3 to 9.6.

Three essential features were estimated: sequent depth, the length of hydraulic jump roller, and the relative energy loss. A general schematic of the adverse-slope hydraulic jump is presented in Figure 1.

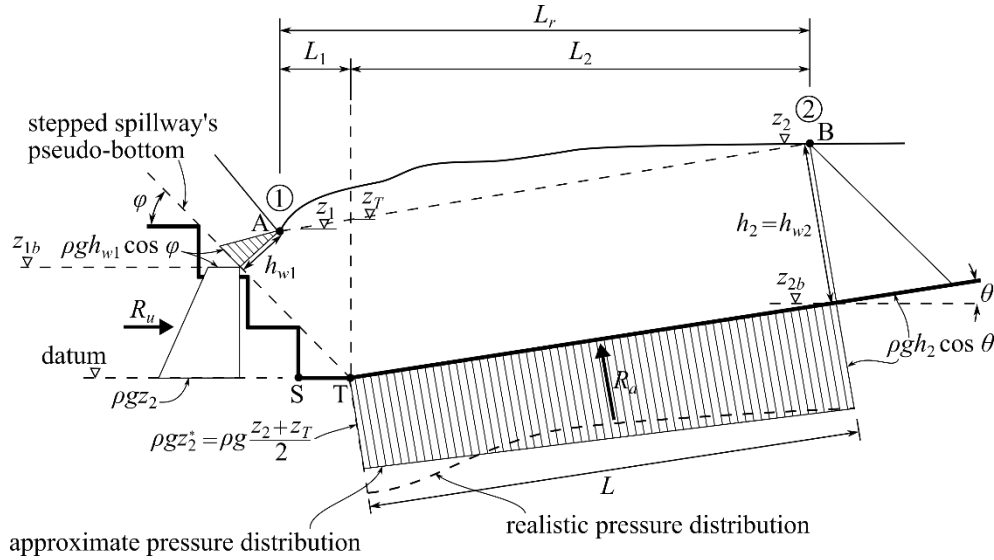


Figure 1. Schematic of an adverse-slope hydraulic jump for stepped spillways

Slika 1. Dijagram sila na hidraulički skok u umirujućem bazenu sa negativnim nagibom dna

Based on the notation in Figure 1, a general relation for the estimation of the jump features, in non-dimensional form, can be written as:

$$\left( \frac{h_2}{h_1}, \frac{L_r}{h_1}, \eta \right) = f \left( Fr_1, \frac{z_{1b}}{h_1}, \theta \right), \quad (1)$$

where  $h_1$  and  $h_2$  are clear-water depths downstream and upstream of the jump roller (sections 1 and 2, respectively),  $L_r$  is the horizontal length of the roller,  $\eta$  is the relative energy loss ( $\eta = (E_1 - E_2)/E_1$ , where  $E$  represents the total energy head at a given section),  $Fr_1$  is the inflow Froude number ( $Fr_1 = v_1/(g \times h_1 \times \cos \varphi)^{0.5}$ , where  $v_1$  is the mean flow velocity at section 1,  $g$  is the gravitational acceleration and  $\varphi$  is the spillway angle relative to the horizontal),  $z_{1b}$  is the pseudo-bottom elevation at section 1, and  $\theta$  is the apron angle relative to the horizontal.

A set of analytical and/or empirical expressions was obtained to describe the general hydraulic behaviour of the adverse-slope jumps for stepped spillways:

1. For the estimation of the sequent depth ratio,  $D = h_2/h_1$ :

$$1 - D^2 C^2 + D_1(1 + D_2) - D_L(DC + D_2^*) \sin \theta - 2Fr_1^2 \left( \beta_2 \frac{C}{D} - \beta_1 \right) = 0, \quad (2)$$

where  $C = \cos \theta / \cos \varphi$ ,  $D_1 = z_{1b}/(h_1 \times \cos \varphi)$ ,  $D_2 = z_2/(h_1 \times \cos \varphi)$ ,  $D_L = L/(h_1 \times \cos \varphi)$ ,  $L = (L_r - L_1)/\cos \theta + h_2 \times \tan \theta$ ,  $D_2^* = z_2^*/(h_1 \times \cos \varphi)$ ,  $z_2^* = (z_T + z_2)/2$ .

2. For the estimation of the relative roller length,  $L_r/h_1$ :

$$\frac{L_r}{h_1} = a \left( \frac{z_{1b}}{h_1} + 35.7 \right)^{1.1} \times Fr_1^{0.4}, \quad (3)$$

where  $a = 0.2131 \times (\tan \theta)^{-0.15}$  if  $\theta > 0^\circ$ , and  $a = 0.3580$  if  $\theta = 0^\circ$ .

3. For the estimation of the relative energy loss,  $\eta$ :

$$\eta = b \left( \frac{z_{1b}}{h_1} \right)^{-0.10} \times Fr_1 + 0.336, \quad (4)$$

where  $b = 0.0280 \times (\tan \theta)^{-0.09}$  if  $\theta > 0^\circ$ , and  $b = 0.0395$  if  $\theta = 0^\circ$ .

Using Equations (2) – (4), it is possible to accurately estimate the features of the adverse-slope jumps for stepped spillways for the range of apron angles and inflow Froude numbers covered by Ljubičić et al. (2018). These results were later compared with predictions from MLP network and also with linear regression model, to determine the ability of the ANNs to adequately predict the features of such hydraulic jumps.

## 2.2 Linear regression model

For many engineering problems, linear regression models (LRMs) can be used for establishing empirical expressions for model predictions due to their simplicity. However, linear expressions carry little to no information on the underlying physical processes. Similar to ANN models, LRMs do not usually convey any knowledge on hydraulic behaviour of the jump. Despite this restriction, LRMs can in some cases outperform A/E models in terms of prediction quality, if the underlying relationships are linear or close-to-linear. In this chapter, based on experimental data from (Ljubičić et al., 2018), we have presented a simple linear regression model to compare its effectiveness with the A/E model and MLP model.

Based on Equation (1) we have used a simple LRM general expression for the estimation of jump features:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} h_2 \\ h_1 \\ L_r \\ h_1 \\ \eta \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} Fr_1 \\ \tan \theta \\ \frac{z_{1b}}{h_1} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} -1,419 \\ 24,341 \\ 36,274 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.168 & -29.320 & 0.611 \\ 2.328 & -71.330 & 1.093 \\ 3.371 & -31.317 & -0.580 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where  $\mathbf{Y}$  and  $\mathbf{X}$  are the output and input vectors, respectively,  $\mathbf{A}_0$  contains the intercept values for linear regression, and  $\mathbf{A}$  contains the linear coefficients. The LRM presented in Equation (5) can be further improved by introducing interaction terms for the input variables, but this modification contradicts the primary advantage of LRM – simplicity.

## 2.3 MLP network

In this chapter we have analysed the possibility of using a multilayer perceptron (MLP) model for prediction of features of the adverse-slope hydraulic jumps for stepped spillways. Optimal network size has been determined using cross-validation, and six different network training models have been tested to obtain the best agreement with observed data.

The most commonly used neural network model is *multilayer perceptron* (MLP). A single *perceptron* is a mathematical representation of the biological neuron, capable of receiving information and, based on that input information, providing a response which is further relayed through the network. In theory, a sufficiently large and complex MLP network can describe any non-linear relation between a given set of input and output data (Demuth, 2000). A schematic of the most commonly used ANN, the *feed-forward MLP network*, is presented in Figure 2.

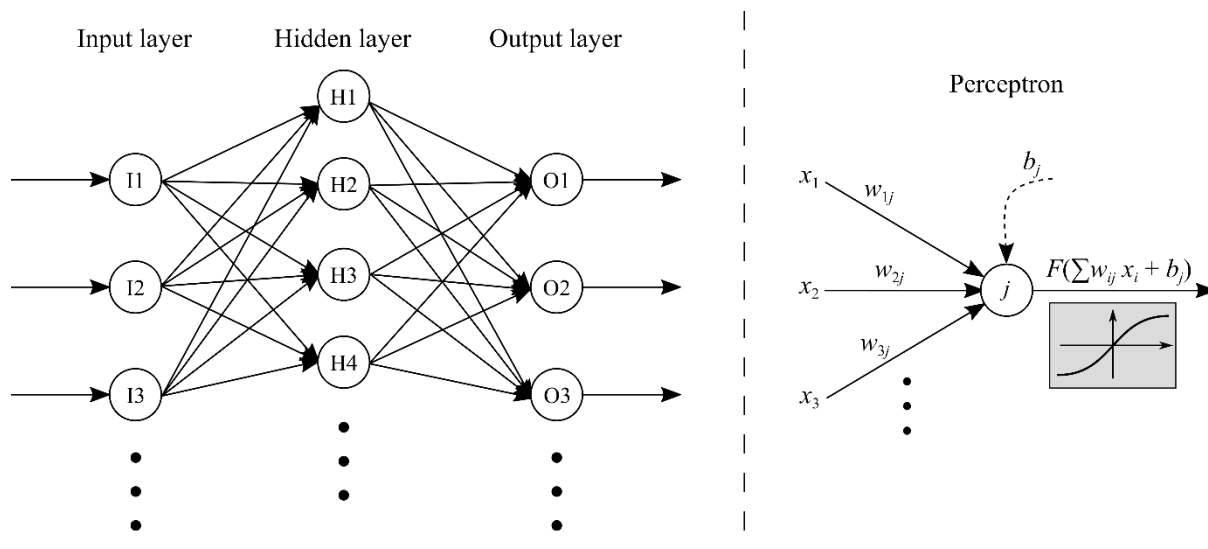


Figure 2. (a) Schematic of a simple feed-forward network, (b) single perceptron with weights and bias

Slika 2. (a) Šema jednostavne feed-forward mreže, (b) perceptron sa težinskim koeficijentima i koeficijentom pristrasnosti

Figure 2a shows that the MLP network contains several distinct layers consisting of a number of nodes. A simple MLP configuration contains 3 layers: (1) *input layer*, which houses a node for each input feature, (2) *hidden layer*, and (3) *output layer*, which, again, has a node for each output feature. Each node at a given layer is connected to all the nodes in the previous and the following layer, but not with nodes of the same layer. However, only nodes that mathematically process information from previous layer(s) can be considered perceptrons – hidden and output layer nodes. Each perceptron gathers information from previous layer nodes,  $x_i$ , multiplied by the weight of the given connection,  $w_{ij}$ , and processes the result through a chosen neural transfer function  $F$  (Figure 2b). Then it can relay the response information  $F(\sum w_{ij} x_i + b_j)$  to the next layer, where  $b_j$  is the bias of a given neuron. Responses of the output layer nodes are the targeted output features.

Principle on which individual perceptrons process information from nodes in previous layer depends on the choice of the neural transfer function. Since the idea behind the perceptron is the emulation of a biological neuron, it should provide a response only if the input information has enough intensity (strength). The output information is usually limited to the range  $[0, 1]$  or  $[-1, 1]$ . For that purpose, several transfer functions can be used, as presented in Figure 3. In general, any monotone, non-descending, and continually differentiable function can be used as a transfer function. The most commonly used functions are the logistic sigmoid (*logsig*) and the hyperbolic tangent sigmoid (*tansig*) for the hidden layer and a linear function for the output layer (Demuth, 2000). Input and output data are usually normalized (to a predetermined frame  $[a, b]$ ) or standardized (using statistical indicators such as mean value and standard deviation), since this can significantly improve the performance of the ANN and reduce the training time (Hagan, Demuth, & Beale, 1995).

No analytical method exists for determining the optimal network size and configuration. Since an MLP network can contain any number of hidden nodes and any number of hidden layers, certain amount of network optimization is required. Other issue with MLP is the overfitting problem which can occur when the number of nodes and/or hidden layers increases and can ostensibly show better agreement between predicted and observed data. However, this does not guarantee that, once the ANN has been trained and weights and biases have been determined, such network would provide adequate results for a set of new input data – i.e. network is very sensitive to variations in input data (a so called high-variance state). To alleviate this issue, a N-times K-fold cross-validation (CV) process has been applied for each candidate network size and each candidate training algorithm. Each element of the input and corresponding output dataset was arbitrarily assigned to one of the K sets of the approximately same size. One of the K sets was reserved for testing, while the remaining (K-1) sets



are used for network training. Entire process was repeated  $K$  times, with different set used for testing in each iteration. The average score of  $K$  train/test iterations represents an average score of the CV process for a given network configuration. This strategy ensures that the entire dataset is used for both training and testing, thus reducing the possible training/testing partition bias. Since even the network training and dataset partitioning are governed by pseudo-random processes (generation of partitioning indices is pseudo-random, as well as network weights and bias initialization), the CV algorithm was repeated a total of  $N$  times, each time using different partitioning indices. This additionally reduces the chances of the network overfitting. Results of the CV process can be used to determine optimal network size and training algorithm.

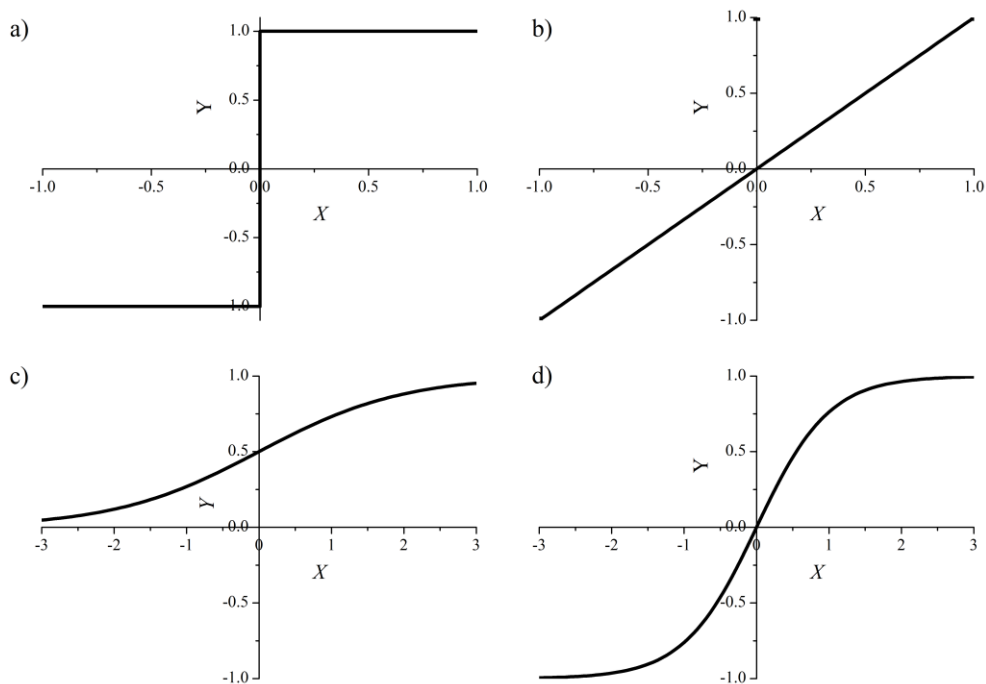


Figure 3. Commonly used MLP transfer functions: (a) step, (b) linear, (c) logistic sigmoid, and (d) hyperbolic tangent sigmoid function

Slika 3. Često korišćene MLP transfer funkcije: (a) stepenasta, (b) linearna, (c) sigmoidna – logistička, (d) sigmoidna – hiperbolički tangens

In this study, 6 backpropagation training algorithms have been tested:

1. BR – Bayesian regularization backpropagation (MacKay, 1992; Mahapatra & Sood, 2012; Titterington, 2004)
2. LM – Levenberg-Marquardt backpropagation (Kayri, 2016; Marquardt, 1963)
3. BFG – Quasi-Newton backpropagation (Battiti, 1992)
4. RP – Resilient backpropagation (Riedmiller & Braun, 1993)
5. GDM – Gradient descent with momentum backpropagation (Hagan et al., 1995)
6. SCG – Scaled conjugate gradient backpropagation (Møller, 1993)

Details on specific training algorithms were not presented in this paper. Instead, we presented only the comparison of the training results. For training algorithm comparison, we have used 3 criteria: coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean-square-error ( $RMSE$ ), and execution time. Coefficient of determination,  $R^2$ , was calculated as:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_f N_t} (x_{obs,i} - x_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^{N_f N_t} (x_{obs,i} - \bar{x}_{obs})^2}, \quad (7)$$

where  $N_f$  is the total number of output features (= 3),  $N_t$  is the total number of experimental tests (= 104),  $x_{obs}$  and  $x_{pred}$  are the observed and the predicted values, respectively, and  $\bar{x}_{obs}$  is the mean observed value of a given output variable. Root mean-square-error (*RMSE*) was defined as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_f N_t} \sum_{i=1}^{N_f N_t} (x_{obs,i} - x_{pred,i})^2}. \quad (8)$$

Equations (7) and (8) indicate that the  $R^2$  and the *RMSE* were calculated across all three output features, which enables a fair estimation of the average model performance.

A simple 2-layer network was considered with only one hidden layer for MLP network with 3 to 15 hidden neurons. Based on relations established in Equation (1), 3 input and 3 output nodes were used. Inputs and outputs were not standardized or normalized prior to network training. To avoid network overfitting, we performed a 10-times 10-fold CV for each training algorithm and each hidden layer size. Average  $R^2$  and *RMSE* values after CV were presented in Figures 4 and 5. A detailed comparison of the performance of chosen training algorithms was presented in Table 1.

According to the results presented in Figures 4 and 5, different training algorithms exhibit significantly diverse behaviour. Bayesian regularization backpropagation algorithm has achieved the highest  $R^2$  value, the lowest *RMSE* and the lowest training time. Aside from that, unlike the other algorithms used, BR exhibited a continuous increase in performance with the increase of the hidden layer size. This is due to the fact that regularization technique in BR algorithm works to ensure the reduction the network variance to avoid overfitting, which allows for a better predictive model even for a large number of hidden nodes. The best results for most algorithms were achieved for 8-node sized hidden layer. However, since a performance/complexity trade-off should also be considered, we have instead decided on a 6-node hidden layer, which provides good results for both BR, LM, and BFG algorithms. Once the network size (3-6-3) has been decided, we have trained an MLP network on the entire dataset using BR training algorithm. Weights and biases for the chosen network configuration are presented in tables 2-4.

Table 1. Comparison of prediction scores from different algorithms for network training (6-node hidden layer)

Tabela 1. Poređenje tačnosti različitih algoritama za treniranje neuralne mreže (6 neurona u skrivenom sloju)

Algorithm	Training time [s]	Max. $R^2$	Min. RMSE
BR	1280	0.9997	0.3616
LM	6430	0.9996	0.4275
BFG	8250	0.9996	0.4339
RP	3780	0.9996	0.4099
GDM	4190	0.9991	0.6337
SCG	5070	0.9996	0.4003

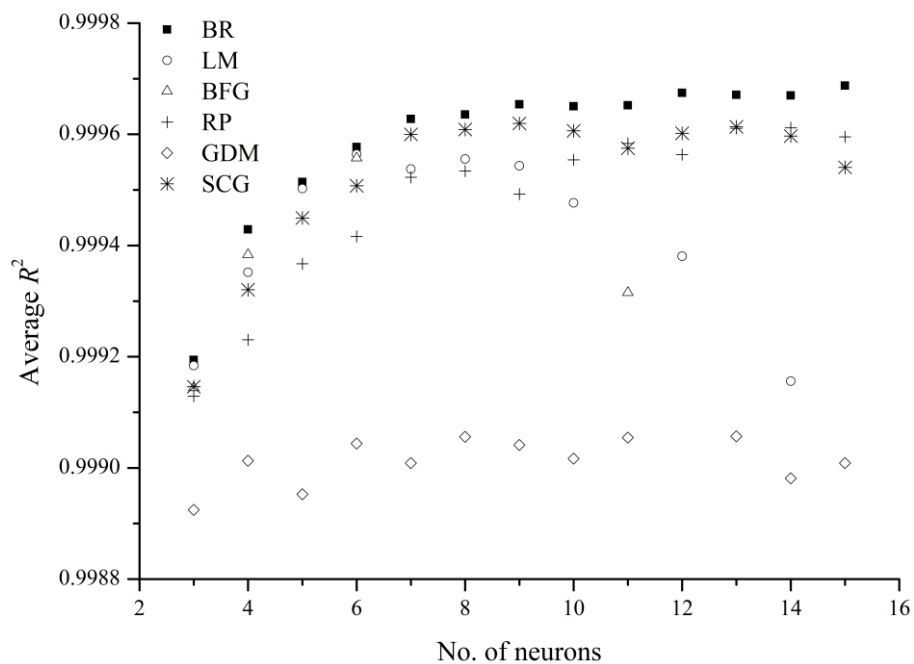


Figure 4. Average  $R^2$  from 10-times 10-fold cross-validation for different training algorithms  
 Slika 4. Prosečan  $R^2$  nakon ponovljene unakrsne validacije za različite algoritme za treniranje mreže

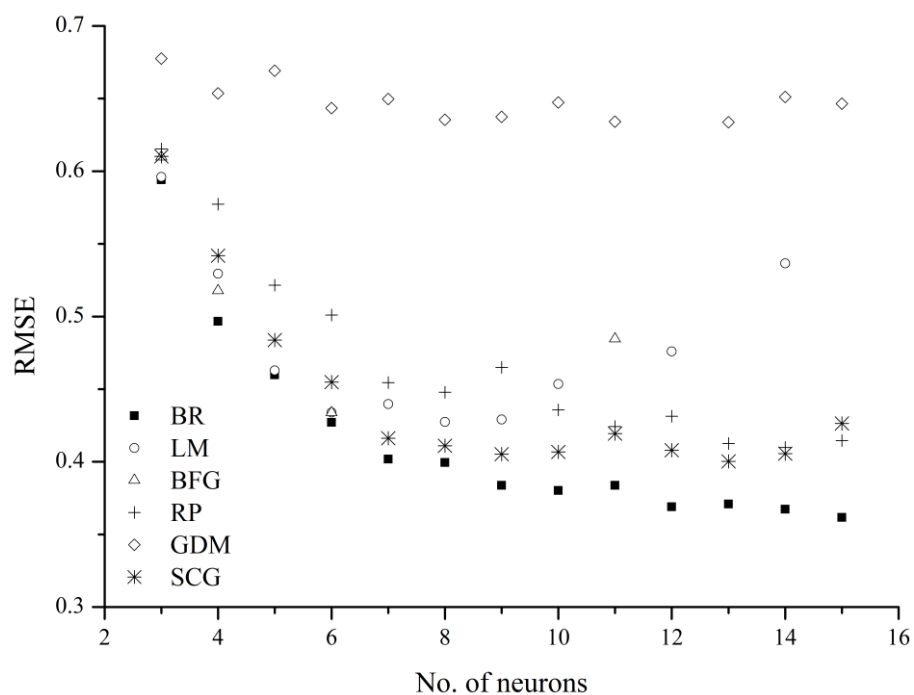


Figure 5.  $RMSE$  from 10-times 10-fold cross-validation for different training algorithms  
 Slika 5.  $RMSE$  nakon ponovljene unakrsne validacije za različite algoritme za treniranje mreže

Table 2. Hidden layer weight matrix

Tabela 2. Matrica težinskih koeficijenata za skriveni sloj

From To	I1	I2	I3
H1	-0.99595	1.79094	0.94666
H2	-0.10815	0.37991	-0.58254
H3	-0.39861	0.17890	0.06767
H4	-0.22887	1.63598	1.47688
H5	-0.88068	-0.84217	1.81345
H6	0.54601	-0.88523	-1.69177

Table 3. Output layer weight matrix

Tabela 3. Matrica težinskih koeficijenata za izlazni sloj

From To	H1	H2	H3	H4	H5	H6
O1	-0.04472	-1.06520	-0.50568	-0.05602	-0.03382	-0.12307
O2	0.41393	0.61817	-2.71297	-0.71391	0.63720	-0.59522
O3	-0.22970	0.28375	-1.50474	0.26630	0.07854	0.35364

Table 4. Bias vector

Tabela 4. Vektor koeficijenata pristrasnosti

Node	Bias
H1	1.29835
H2	0.08658
H3	-0.06233
H4	0.54848
H5	0.65845
H6	-0.03699
O1	-0.00132
O2	-0.46968
O3	-0.15158

### 3 Results and discussion

We have compared the results obtained using A/E methods from (Ljubičić et al., 2018), linear regression model described in Chapter 2.2, and MLP model described in Chapter 2.3. Figures 6-8 compare the observed and predicted values of the sequent depth ratio ( $D = h_2/h_1$ ), relative roller length ( $L_r/h_1$ ), and relative energy loss ( $\eta$ ) for the three prediction methods. The training and validation were performed using the entire dataset, just as with the A/E and the linear regression model.

Figure 6 shows that all three methods provide highly accurate estimations for sequent depth ratio,  $D$ , across the entire dataset. However, it is worth noting that A/E method relies on the prior estimation of the relative roller length  $L_r/h_1$ , and, hence, the accurate prediction of  $D$  is highly dependent on the accurate prediction of  $L_r$ . Linear regression method and MLP methods for estimating  $D$  are independent of the estimation of  $L_r$ . All three methods have achieved a high  $R^2$  value ( $\geq 0.990$ ).

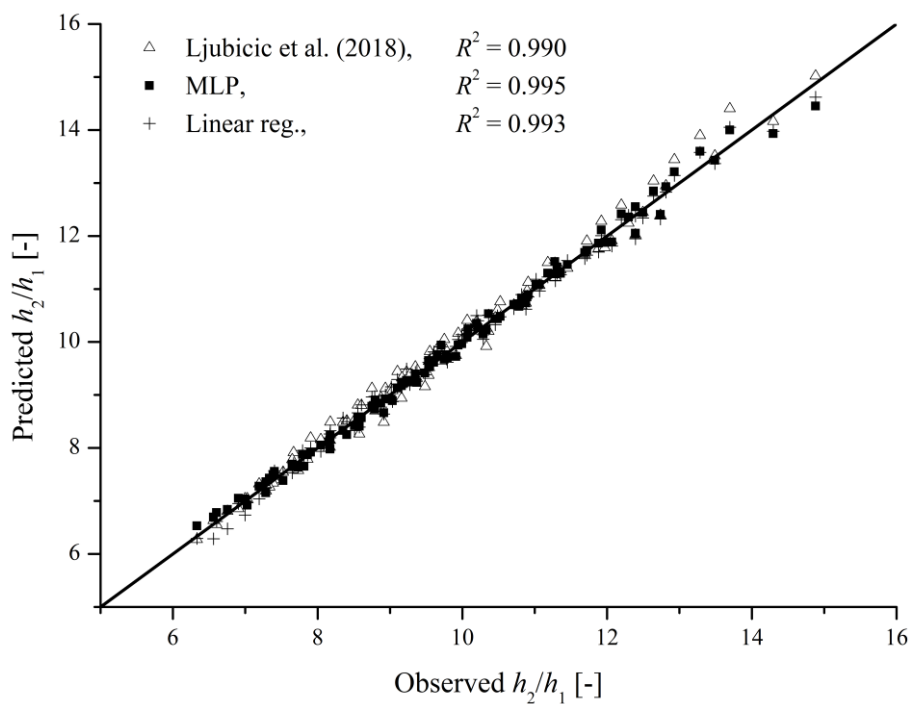


Figure 6. Comparison of results: predicting sequent depth ration  $D = h_2/h_1$   
 Slika 6. Poređenje rezultata: procena odnosa spregnutih dubina  $D = h_2/h_1$

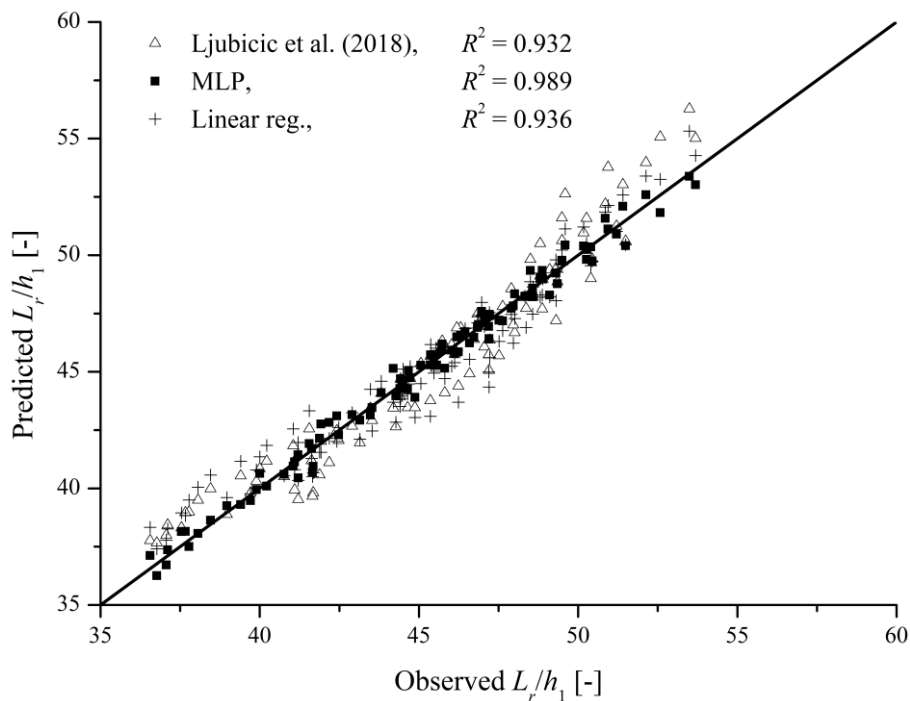


Figure 7. Comparison of results: predicting relative roller length  $L_r/h_1$   
 Slika 7. Poređenje rezultata: procena relativne dužine skoka  $L_r/h_1$

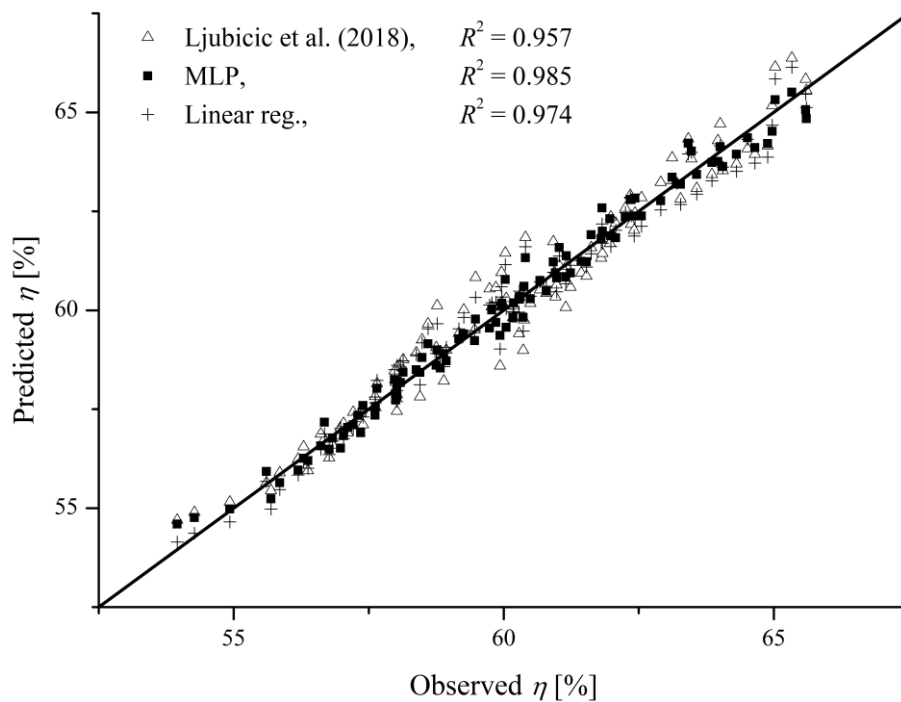


Figure 8. Comparison of results: predicting relative energy loss  $\eta$

Slika 8. Poređenje rezultata: procena relativnog gubitka energije  $\eta$

Figure 7 shows the comparison between the three estimation methods for predicting the relative roller length  $L_r/h_1$ . In (Ljubičić et al., 2018) it was shown that the relation between the relative roller length  $L_r/h_1$  and the input parameters ( $Fr_1$ ,  $z_{1b}/h_1$ ,  $\theta$ ) is highly non-linear. The use of simple A/E expressions for estimating  $L_r/h_1$  does not provide such high correlation as with the estimation of the sequent depth ratio ( $R^2 = 0.932$ ). Linear regression model does not improve on the results obtained through A/E methods ( $R^2 = 0.936$ ). However, the MLP method significantly improves the estimation of the relative roller length since it is far less sensitive to the nonlinearity of the relationship between  $L_r/h_1$  and the input parameters. This confirms the hypothesis postulated in the Chapters 1 and 2.3, stating that the ANN methods can prove to be highly accurate in predicting non-linear and multivariate relations.

Finally, Figure 8 shows the comparison of results for the estimation of the relative energy loss in the jump,  $\eta$ . The nonlinearity of the relationship between  $\eta$  and the input parameters falls between the nonlinearities of the relations for  $D$  and  $L_r/h_1$ . This is confirmed by the results in Figure 8 and the  $R^2$  values for each method. Again, the MLP method ( $R^2 = 0.985$ ) overcomes the nonlinearity better than the A/E approach ( $R^2 = 0.957$ ) or the linear regression method ( $R^2 = 0.974$ ).

## 4 Conclusion

Presented results indicate that the use of the ML approach could be justified in cases when the relation between input and output parameters is proven to be highly nonlinear or difficult to adequately describe using simple expressions. The intrinsic ability of the ML approach is to overcome severe nonlinearities that are harder to describe using traditional algebraic expressions. Because of that, ML models could find their use in the preliminary search for viable solutions. However, one should always be aware of the common pitfall of the ML – it can “find” logic in highly complex systems, even in cases where there is none (like overfitting white noise), due to the fact that ML is not a physical analysis tool, but rather a data analysis tool. Simply put, it cares not about the physical

meaning of the data. So, while it is tempting to reach for ML due to its accuracy, in order for the ML to take the precedence over simple expressions, the gain in accuracy should be high enough to outweigh the loss of the physical meaning.

In the current study, this is true only in the case of the estimation of the relative length of the jump roller  $L_r/h_1$ . By combining the ML techniques and the A/E approach, a hybrid model can be constructed that uses ML to overcome non-linear relations between parameters, and A/E approach to preserve the information about the occurring physical mechanisms.

The authors could argue that the ML is the Heisenberg's cat of the data analysis – it is neither a bad tool, nor an ideal one, while probably being both at the same time in a state of adequacy-inadequacy superposition. It is up to the researcher not to be a priori charmed by the beauty of its accuracy, but aware of its capabilities and when to use it. In that context, future research should focus on determining the role and capabilities of the ML in hydraulic engineering, and additional measurements are due in order to further validate the performance of the proposed model.

## Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Serbia (grants TR37009 and TR37010).

## References

- Battiti, R. (1992). First- and Second-Order Methods for Learning: Between Steepest Descent and Newton's Method. *Neural Computation*, 4(2), 141–166. <https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.2.141>
- Beirami, M. K., & Chamani, M. R. (2006). Hydraulic Jumps in Sloping Channels: Sequent Depth Ratio. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10), 1061–1068. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:10\(1061\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:10(1061))
- Beirami, M. K., & Chamani, M. R. (2010). Hydraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), 535–543. <https://doi.org/10.1139/L09-175>
- Bhattacharya, B., Price, R. K., & Solomatine, D. P. (2007). Machine Learning Approach to Modeling Sediment Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(4), 440–450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:4\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:4(440))
- Carollo, F. G., Ferro, V., & Pampaloni, V. (2011). Sequent Depth Ratio of a B-Jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 651–658. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000342](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000342)
- Chanson, H. (2009). Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 159–163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(159))
- Defina, A., & Susin, F. M. (2003). Stability of a stationary hydraulic jump in an upward sloping channel. *Physics of Fluids*, 15(12), 3883–3885. <https://doi.org/10.1063/1.1624839>
- Demuth, H. (2000). *Neural Network Toolbox™ 6 User's Guide*. Network (Vol. 9). <https://doi.org/10.1007/s005210070003>
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1995). Neural Network Design. *Boston Massachusetts PWS*, 2, 734. <https://doi.org/10.1007/1-84628-303-5>
- Hager, W. H. (1988). B-jump in sloping channel. *Journal of Hydraulic Research*, 26(5), 539–558. <https://doi.org/10.1080/00221688809499192>
- Hager, W. H., & Bretz, N. V. (1986). Ressauts hydrauliques par-dessus des marches positives et negatives. *Journal of Hydraulic Research*, 24(4), 237–253. <https://doi.org/10.1080/00221688609499303>
- Hassanpour, N., Dalir, A. H., Farsadizadeh, D., & Gualtieri, C. (2017). An experimental study of hydraulic jump in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water (Switzerland)*, 9(12), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w9120945>
- Hsu and Soroshian. (1995). Artificial Neural Network Modeling of the Rainfall-Runoff Process. *Water Resources Research*, 31(10), 2517. <https://doi.org/10.1029/95WR01955>
- Kambekar, A. R., & Deo, M. C. (2003). Estimation of pile group scour using neural networks. *Applied Ocean Research*, 25(4), 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2003.06.001>

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Kateb, S., Debabeche, M., & Riguet, F. (2015). Hydraulic Jump in a Sloped Trapezoidal Channel. *Energy Procedia*, 74, 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.591>
- Kayri, M. (2016). Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data. *Mathematical and Computational Applications*, 21(2), 20. <https://doi.org/10.3390/mca21020020>
- Kindsvater, C. E. (1944). *The Hydraulic Jump in Sloping Channels*. TRANSACTIONS ASCE PAPER.
- Liriano, S. L., & Day, R. A. (2001). Prediction of scour depth at culvert outlets using neural networks, 231–238.
- Ljubičić, R., Zindović, B., Vojt, P., Pavlović, D., Kapor, R., Savić, L., ... Savić, L. (2018). Hydraulic Jumps in Adverse-Slope Stilling Basins for Stepped Spillways. *Water*, 10(4), 460. <https://doi.org/10.3390/w10040460>
- Lobrecht, A. H., & Solomatine, D. P. (2002). Machine learning in real-time control of water systems. *Urban Water*, 4(3), 283–289. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00023-7)
- MacKay, D. J. C. (1992). Bayesian Interpolation. *Neural Computation*, 4(3), 415–447. <https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.3.415>
- Mahapatra, S. S., & Sood, A. K. (2012). Bayesian regularization-based Levenberg-Marquardt neural model combined with BFOA for improving surface finish of FDM processed part. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9–12), 1223–1235. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3675-x>
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
- McCorquodale, J. A., & Mohamed, M. S. (1994). Hydraulic jumps on adverse slopes: Ressauts hydrauliques dans des canaux en contre-pente. *Journal of Hydraulic Research*, 32(1), 119–130. <https://doi.org/10.1080/00221689409498793>
- Møller, M. F. (1993). A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural Networks*, 6(4), 525–533. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(05\)80056-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(05)80056-5)
- Ohtsu, B. I., & Yasuda, Y. (1991). Hydraulic Jump In Sloping Channels, 117(7), 905–921.
- Ohtsu, I., & Yasuda, Y. (1987). Hydraulic Jumps At Positive And Negative Steps. *Journal of Hydraulic Research*, 25(3), 407–413. <https://doi.org/10.1080/00221688709499279>
- Palermo, M., & Pagliara, S. (2017). A Review Of Hydraulic Jump Properties On Both Smooth And Rough Beds In Sloping And Adverse Channels. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, 16(1), 91–105. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.1.91>
- Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Water Resources Technical Publication*, (25), 240.
- Rajaratnam, N. (1966). The Hydraulic Jump in Sloping Channels. *Irrigation and Power*, 23(2), 137–149.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., & Najjar, Y. (2004). Rainfall-runoff model using an artificial neural network approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(7–8), 839–846. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.10.012>
- Riedmiller, M., & Braun, H. (1993). A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings, 1993-Janua*, 586–591. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1993.298623>
- Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F., & Shiri, J. (2014). Modeling energy dissipation over stepped spillways using machine learning approaches. *Journal of Hydrology*, 508, 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.053>
- Smith, J., & Eli, R. N. (1995). Neural-Network Models of Rainfall-Runoff Process. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(6), 499–508. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:6\(499\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:6(499))
- Titterton, D. M. (2004). Bayesian Methods for Neural Networks and Related Models. *Statistical Science*, 19(1), 128–139. <https://doi.org/10.1214/088342304000000099>
- Torres, A. F., Walker, W. R., & McKee, M. (2011). Forecasting daily potential evapotranspiration using machine learning and limited climatic data. *Agricultural Water Management*, 98(4), 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.012>
- Yazdandoost, F., & Bateni, S. M. (2009). Hydraulics of B-F and F jumps in adverse-slope stilling basins. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 162(5), 321–327. <https://doi.org/10.1680/wama.2009.162.5.321>
- Yazdandoost, F. Y., Bateni, S. M., & Fazeli, M. (2007). B-Jump: Roller length, sequent depth, and relative energy loss using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 529–537. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521788>
- Yitian, L., & Gu, R. R. (2003). Modeling flow and sediment transport in a river system using an artificial neural network. *Environmental Management*, 31(1), 122–134. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2862-9>



## **Analiza uticaja kompleksnosti 1D modela tečenja na postupak asimilacije podataka zasnovane na primeni PID regulatora – preliminarni rezultati**

Miloš Milašinović<sup>1</sup>, Budo Zindović<sup>2</sup>, Nikola Rosić<sup>3</sup>, Dušan Prodanović<sup>4</sup>

APSTRAKT: Upravljanje vodoprivrednim sistemima, posebno upravljanje rizicima od poplava, se zasniva na podacima koji su dobijeni različitim vrstama prognoza. Prognoziraju se promene nivoa na određenim rečnim deonicama, vrednosti oticaja sa slivova, dotoci u akumulacije, itd. Najčešće, ovakve prognoze zasnivaju se na hidrološko-hidrauličkim modelima, koji su prethodno kalibrisani koristeći izabrane vremenske serije iz prošlosti. Međutim, čak i tako kalibrisani modeli u kasnijim fazama eksploatacije ne mogu uvek predvideti pomenute veličine sa dovoljnom tačnošću. Razlozi za to su različiti, od nepoznavanja početnih i graničnih uslova do neodređenosti u ulaznim podacima. Stoga, prognoze bazirane na modelu se unapređuju uključivanjem i merenih podataka o stanju sistema kroz proces asimilacije. Cilj asimilacije je da rezultate dobijene prethodno kalibrisanim modelom koriguje i približi podacima koji su izmereni, uvažavajući neodređenosti i računatih i merenih podataka. Na taj način poboljšava se početna tačka od koje se vrše prognoze, tj. model se pokreće za neki kraći period u kome se raspolaže merenjima, koriguje se stanje dobijeno modelom i tako korigovano stanje se koristi kao početni uslov za kratkoročne prognoze u kojima model radi nezavisno. U ovom radu analizira se asimilaciona metoda za 1D modele tečenja u rekama, zasnovana na PID regulatoru kojim se stanje sistema (nivoi u rekama) ne podešava direktno već posredno, dodavanjem ili oduzimanjem fiktivnih protoka u čvorovima u kojima postoje merenja nivoa. Analizira se uticaj kompleksnosti hidrodinamičkog modela, poredeći modele tri nivoa kompleksnosti, na asimilaciju koja se zasniva na PID regulatoru.

Ključne reči: Prognoza, hidrološko-hidraulički model, asimilacija podataka, PID regulator

## **Analysis of the 1D hydrodynamic model complexity influence on PID-controller based data assimilation – preliminary results**

ABSTRACT: Managing water systems, especially flood risks management is based on data obtained by different forecasts. State variables, such as water levels on certain river sections, catchment runoff, reservoir inflows are used for forecasting. Forecasts are often based on hydrological-hydrodynamic models, which have been previously calibrated using selected time series from the past. However, even calibrated models in later exploitation phases can produce solutions without satisfying accuracy. The reasons for this are numerous, from uncertainty in the initial and boundary conditions to uncertainty in the input data and uncertainty in riverbed geometry. The aim of the assimilation is to correct the results obtained from the previously calibrated model by coupling it with observed data. In this way, forecast starting point is improved. Model is run for a short period which includes observed data, the state obtained by the model is corrected, and the corrected state is used as an initial state for short-term forecasting by using model independently. Assimilation method based on the PID controller for 1D river hydrodynamic models is analysed in this paper. This method adjusts the state in the hydrodynamic models according to the measurements indirectly by adding or subtracting the discharge in the junction/sections where water level is measured. The influence of the hydrodynamic model complexity is analysed, comparing the three models to assimilation based on the PID controller.

Keywords: Forecasting, hydrological-hydrodynamic model, data assimilation, PID controller

<sup>1</sup> Miloš Milašinović, mast. inž. građ., Građevinski fakultet Beograd, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Dr Budo Zindović, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet Beograd, arandelovic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dr Nikola Rosić, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet Beograd, njacimovic@grf.bg.ac.rs

<sup>4</sup> Dr Dušan Prodanović, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet Beograd, dprodanovic@grf.bg.ac.rs

## 1 Uvod

Upravljanje vodoprivrednim sistemima, posebno upravljanje rizicima od poplava zahteva različite vrste prognoza, od prognoza dotoka u razmatrani sistem, prognoze promene nivoa, prognoze meteoroloških uslova, itd. Proces prognoze može se vršiti na nekoliko načina. Tradicionalni postupak prognoze podrazumeva primenu odgovarajućih hidroloških i hidrodinamičkih modela kalibrisanih prema nekim izabranim vremenskim serijama iz prošlosti. Na taj način, parametri modela se podešavaju sa ciljem da se rezultati simulacija u određenoj meri poklope sa izmerenim vrednostima kontrolnih veličina, npr. protoka i nivoa. Tako kalibrisan model kasnije se koristi za simulaciju odgovora sistema na poremećaje koji nastaju nekim novim ulazom u sistem. Međutim, prognoze zasnovane samo na modelima često ne daju zadovoljavajuće rezultate u kasnijim fazama eksploatacije. Razlozi za to mogu se naći u nepouzdanosti podataka kojima se raspolaže i koji su korišćeni za kalibraciju, u nepouzdanosti graničnih i početnih uslova, promeni geometrije rečne deonice, itd. Konkretno, za kalibraciju linijskog modela tečenja potrebno je poznavati ulazne podatke, poznavati nivoa duž deonice za koju se formira model, kao i poznavanje graničnih i početnih uslova. Nažalost, od svih podataka jedino se podaci o merenim nivoima mogu uzeti sa nekom većom sigurnošću. Zbog toga, u cilju poboljšanja prognoze, često se koristi postupak asimilacije podataka, koja kombinuje rezultate simulacija dobijenih prethodno kalibrisanim modelom i merene podatke kontrolnih veličina. Na taj način, dajući određeno poverenje i merenim podacima i podacima iz modela, postupkom asimilacije, poboljšava se prognoza. Ovakva dva vida prognoze, zasnovana samo na modelu ili na kombinaciji model/mereni podaci spadaju u grupu prognostičkih metoda koje se baziraju na modelu (eng. *model-driven forecasting*). Za razliku od ovog pristupa, postoje metode koje se baziraju samo na merenim podacima i uspostavljanju veštačkih, nelinearnih veza između merenih podataka (*data driven models*) koji u sebi nemaju nikakvu eksplicitnu fizičku povezanost između merenih podataka, za razliku od *model-driven* metoda.

Postoje različite metode koje se koriste za asimilaciju podataka. Većina poznatih metoda asimilacije podataka zasniva se na primeni određenih statističkih operacija nad podacima dobijenim modelom i izmerenim podacima. Najrasprostranjenija metoda za asimilaciju podataka naziva se Ensemble Kalman filter (EnKF) koja vrši korekciju modela prema merenjima, ponderišući neodređenosti (eng. *uncertainty, error*) podatka dobijenog modelom i izmerenog podatka (Evensen 2003). Pomenuta metoda, sa različitim modifikacijama, često se koristi za potrebe prognoza u hidrotehničkim i vodoprivrednim analizama. Barthélémy *u ostali*, 2017, Habert *u ostali*, 2016 koriste EnKF metodu za potrebe predikcije poplava, kombinujući ovu metodu sa linijskim modelom neustaljenog tečenja MASCARET (Goutal i Maurel 2002). Primena MIKE 11 i MIKE 21 hidrauličkih modela asimilacije podataka za prognozu poplava razvijena je od strane (Madsen, Hartnack, i Sørensen 2006). Primena EnKF metode za korekciju stanja u linijskom hidrauličkom modelu u realnom vremenu bila je predmet istraživanja sprovedenog od strane (Jean-Baptiste i ostali 2011). Česta je primena i u asimilaciji hidroloških modela. (Clark i ostali 2008) koriste asimilaciju podataka za korekciju stanja dobijenih hidrološkim modelom na osnovu izmerenih vrednosti protoka. Asimilacija hidrološko-hidrauličkog modela na osnovu radarskih snimaka za prognozu protoka na Amazonu korišćena je u (Paiva i ostali 2013). Pored primene u asimilaciji hidrološko-hidrauličkih modela koji se tiču površinskih voda, metode asimilacije, pre svega EnKF vrlo često se primenjuju i u oblasti podzemnih voda (Hendricks Franssen i Kinzelbach 2008a; Cheng i ostali 2009; Xue 2015; Hendricks Franssen i Kinzelbach 2008b) kao i u oblasti modeliranja transporta zagađujućih materija (Kabir, Appiah Assumaning, i Chang 2017; Addai i ostali 2016; Rajib i ostali 2017; Chang, Chowhan, i Latif 2012).

Asimilacione metode koje se zasnivaju na statističkoj obradi rezultata iz modela, dobijenih višestrukim ponavljanjem simulacija pomoću modela, često zahtevaju dosta vremena za proračun. Stoga, često se pribegava i alternativnim metodama asimilacije, kao što su primena različitih evolucionih optimizacionih algoritama ili primena PID regulatora u cilju redukovanja vremena potrebnog za proračune. Postupak primene PID regulatora kao asimilacione metode (Rosić, Jaćimović, i ostali 2017; Rosić, Prodanović, i ostali 2017) razvijena je za potrebe asimilacije izmerenih nivoa

na vodomernim stanicama na Dunavu i hidrodinamičkog modela razvijenog u FEQ modelu (Franz i Melching 1997).

Ovaj rad analizira uticaj kompleksnosti linijskog modela tečenja na asimilacionu metodu zasnovanu na primeni PID regulatora. Cilj je uporediti uticaj primene jednostavnog hidrodinamičkog modela zasnovanog na principu Cellular Automata, uticaj modela difuzionog talasa i uticaj punog modela dinamičkog talasa FEQ.

## 2 Metodologija

### 2.1 Primena PI(D) regulatora u procesu asimilacije podataka

PID (Proportional-Integral-Derivative controller) regulator predstavlja matematički aparat sa povratnom spregom (izlaz iz sistema utiče na naredne ulaze u sistem) koji se koristi u kontrolnoj teoriji dinamičkih sistema (Karl Astrom 2002). PID regulator kontinualno računa vrednost greške  $e$  (eng. error) kao razliku između trenutne, izmerene, vrednosti procesne promenljive (eng. Process variable)  $I$  neke referentne vrednosti koju bi trebalo dostići (setpoint). Svrha primene PID regulatora je da tokom vremena simulacije smanjuje grešku preko kontrolne promenljive  $u$  (eng. Control variable). Opšti oblik PID regulatora dat je jednačinom (1).

$$u(t) = P \cdot e(t) + I \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt + D \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

gde je  $P$  proporcionalni koeficijent,  $I$  integralni koeficijent i  $D$  derivativni koeficijent. Prvi element PID regulatora uzima u obzir samo trenutnu vrednost greške i vrednost kontrolne promenljive u prilagodjava trenutnoj vrednosti greške. Korišćenje samo ovog elementa u kontrolnoj teoriji primenljivo je samo na neke izuzetno spore procese. Uglavnom je potrebno vrednost kontrolne promenljive prilagoditi i na prethodne vrednosti greške. Stoga se koristi drugi (integralni) element PID regulatora. U nekim slučajevima u kojima promene stanja izuzetno brzo nastupaju, uvodi se treći (derivativni) član PID regulatora koji zavisi od brzine promene greške. U zavisnosti od toga koji elementi PID kontrole se koriste, razlikuju se P (Proportional) regulator, PI (Proportional-Integrative) regulator, itd.

Primenjen na hidrodinamički model, PID regulator koristi samo proporcionalni i integrativni koeficijent (u nastavku PI regulator). Ideja je da se postupak asimilacije podataka PI kontrolerom obavlja uvođenjem unutrašnjeg graničnog uslova u hidrodinamički model. Taj unutrašnji granični uslov prikazan je u vidu fiktivnog dotoka koji se dodaje ili oduzima u čvorovima modela u kojima postoji merenje nivoa vode. Generalno, ovakav postupak može se prikazati jednačinama (2) i (3).

$$e(t) = Z_{mer}(t) - Z_{model}(t) \quad (2)$$

$$Q_{PI} = P \cdot e(t) + I \cdot \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (3)$$

gde je  $Z_{mer}(t)$  izmerena vrednost nivoa u trenutku  $t$ ,  $Z_{model}(t)$  vrednost nivoa dobijena modelom u trenutku  $t$  a  $Q_{PI}$  vrednost protoka koji se u zavisnosti od vrednosti greške  $e(t)$  oduzima ili dodaje u čvoru u kom postoji merenje nivoa.

Oblik jednačina (2) i (3) podrazumeva da je vremenski interval sa kojim se vrši merenje nivoa vode jednak vremenskom koraku koji se koristi u modelu, tj. u svakom vremenskom trenutku u kom se pomoću modela računaju nivoi vode postoje i izmereni podaci. U praksi, to najčešće nije slučaj, već se merenja vrše na većem vremenskom intervalu nego što je vremenska diskretizacija u modelu. Stoga je potrebno korigovati jednačinu 2. Korigovani oblik predstavljen je jednačinama (5) i (5).

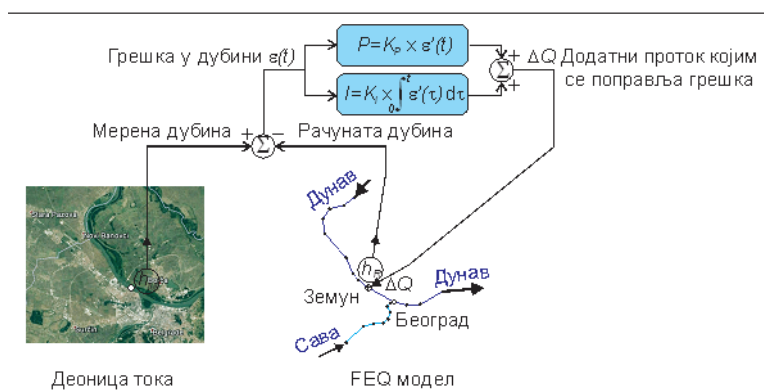
$$e(t) = [Z_{obs}(t_{obs}) - Z_{model}(t)] \cdot C \quad (4)$$

$$C = \begin{cases} 1 & t = t_{obs} \\ \frac{t - t_{obs}^{prev}}{t_{obs}^{next} - t_{obs}^{prev}} & t \neq t_{obs} \end{cases} \quad (5)$$

$C$  predstavlja koeficijent korekcije kojim se greška između merenih nivoa i nivoa dobijenih modelom koriguje u zavisnosti od toga koliko je vremena prošlo od poslednjeg merenja.  $t$  predstavlja trenutno vreme u simulaciji,  $t_{obs}^{prev}$  prethodni vremenski trenutak u kom postoji merenje nivoa a  $t_{obs}^{next}$  naredni trenutak u kom postoji merenje nivoa.

Svrha dodavanja fiktivnog dotoka u numerički model linijskog neustaljenog tečenja je korekcija stanja (nivoa) koji bi se dobio primenom modela nezavisno od merenih podataka. Na taj način, prethodno kalibrisani model se “doteruje” do stanja (pod stanjem se podrazumeva nivo) koje se u određenoj meri poklapa sa izmerenim podacima i omogućava se bolja polazna osnova za prognoze pomoću modela kada nema merenih podataka.

Korekcijom stanja dobijenog hidrodinamičkim modelom postavlja se pitanje kolika je kompleksnost modela neophodna. Stoga, ovaj rad analizira tri modela, različitog nivoa kompleksnosti u kombinaciji sa asimilacijom podataka zasnovanoj na prethodno opisanom algoritmu PI regulatora.



Slika 1. Shematski prikaz asimilacije merenja i rezultata modela neustaljenog tečenja primenom PI regulatora (preuzeto iz (Rosić, Prodanović, и остали 2017))

Figure 1. PI controller based data assimilation method

## 2.2 Cellular Automata 1D model tečenja

Jedan od najjednostavnijih modela tečenja zasniva se na primeni Cellular Automata (CA) principa (Wolfram 1998). CA princip zasniva se na podeli računskog prostora na ćelije, pri čemu svaku ćeliju definišu tri svojstva: stanje, susedstvo i pravila interakcije sa susedstvom. Stanje se definiše pomoću izabrane promenljive (nivoa). Susedstvo predstavlja ćelije sa kojima svaka ćelija vrši interakciju preko pravila interakcije (razmena protoka). Kao produkt interakcije ćelija menja se stanje svake ćelije. Korsiteći opisani postupak, Dottori и Todini, 2010, 2011 su razvili model tečenja zasnovan na CA pristupu koji se koristi za pretežno difuzione probleme. U ovom modelu stanje ćelije definiše se kao nivo vode  $Z$  (ili dubina  $h$ ), dok se pravila interakcije između susednih ćelija opisuju Šezi-Maningovom jednačinom (jednačina (7)). Promena stanja u ćeliji vrši se pomoću jednačine kontinuiteta (jednačina (7)). Shematski prikaz susedstva u CA modelu dat je na slici 2a.

$$Q_{ij}^n = \text{sign}(Z_i^{n-1} - Z_j^{n-1}) \cdot \frac{d_{ij}}{n} \cdot (h_i^n - h_j^n)^{5/3} \cdot \sqrt{\frac{|Z_i^{n-1} - Z_j^{n-1}|}{\Delta x}} \quad (6)$$

$$Z_i^n = Z_i^{n-1} - \Delta t \cdot \frac{\sum_{j=1}^4 Q_{ij}^{n-1} + Q_{PI,i}^{n-1}}{A_i} \quad (7)$$

$Z_i^{n-1}$  predstavlja nivo vode u razmatranoj ćeliji u prethodnom vremenskom trenutku,  $Z_i^n$  je dubina vode u razmatranoj ćeliji  $i$  u  $n$ -tom vremenskom trenutku,  $Z_j^{n-1}$  je dubina vode u susednoj ćeliji u prethodnom vremenskom trenutku ( $j=1,2,3,4$ ).  $h$  označava dubinu vode u odgovarajućoj ćeliji i odgovarajućem vremenskom trenutku.  $Q_{ij}^n$  predstavlja protok između susednih ćelija  $i$  i  $j$ ,  $d_{ij}$  širinu kontaktne ivice između susednih ćelija,  $n$  hrapavost po Maningu,  $\Delta x$  i  $\Delta t$  predstavljaju prostornu u vremesku distretizaciju, respektivno.  $A_i$  predstavlja površinu razmatrane ćelije dok je  $Q_{PI,i}$  fiktivni protok definisan jednačinom (3) kojim se koriguje stanje ćelije  $i$ .

### 2.3 Model difuzionog talasa

Sledeći model testiran u kombinaciji sa asimilacijom podataka primenom PI regulatora je model difuzionog talasa (Ivetić 2000). Originalno, model difuzionog talasa rešava Sen-Venanove jednačine sa zanemarenjem uticaja inercijalnog člana, tj. zadržava uticaj sila pritiska, težine i trenja. Kako bi se rešavali i problemi povratnog tečenja, originalni oblik modela difuzionog talasa je dopunjen članom koji predstavlja lokalnu komponentu ubrzanja. Na taj način matematički model neustaljenog tečenja definiše se jednačinama (9) i (9):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (8)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + I_d + \frac{n^2}{A^2 R^{4/3}} Q|Q| = 0 \quad (9)$$

Član  $q$  u jednačini predstavlja bočni dotok koji je posledica dodavanja fiktivnog dotoka sračunatog primenom PI regulatora. Primenom eksplicitne numeričke sheme (slika 2b) matematički model se prevodi u numerički koji je korišćen u ovom radu. Numerički model dat je jednačinama (12), (12) i (12):

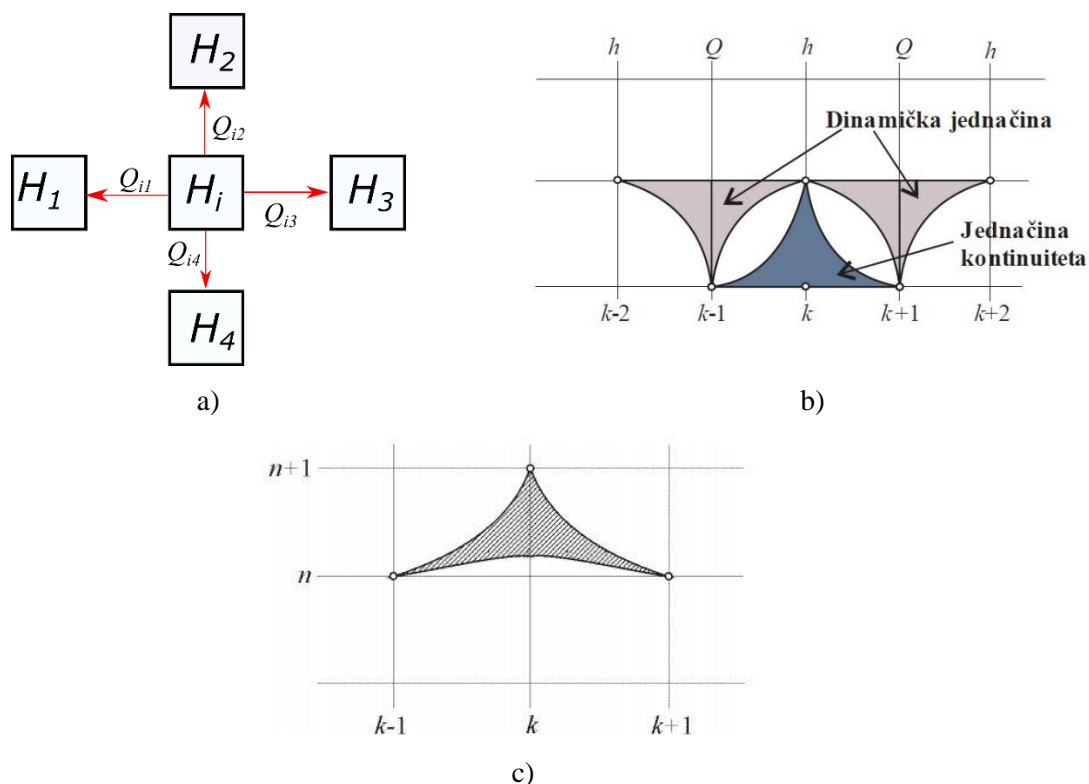
$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} + \Delta t \cdot \frac{Q_{PI,k-1}^n}{B\Delta x} \quad (10)$$

$$Q_{k+1}^{n+1} = \frac{\frac{Q_{k+1}^n}{g \left( \frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + I_d - \frac{h_{k+2}^{n+1} - h_k^{n+1}}{\Delta x}}{\frac{1}{g \left( \frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right) \Delta t} + K |Q_{k+1}^n|} + Q_{PI,k+1}^{n+1} \quad (11)$$

$$K = \frac{n^2}{\left( \frac{A_{k+2}^{n+1} + A_k^{n+1}}{2} \right)^2 \left( \frac{R_{k+2}^{n+1} + R_k^{n+1}}{2} \right)^{4/3}} \quad (12)$$

Veličina  $B$  predstavlja šitrinu vodenog ogledala,  $g$  gravitaciono ubrzanje a  $R$  hidraulički radijus. Bočni dotok  $q$ , definisan u jednačini (8), predstavljen je kao raspodeljeni dotok dobijen pomoću PI regulatora

po deonici dužine  $\Delta x$  i širine vodnog ogledala  $B$ . Potrebno je naglasiti da je uticaj količine kretanja koju unosi neki bočni dotok u dinamičku jednačinu u ovom modelu zanemaren.



Slika 2. a) Susjedstvo u Cellular Automata modelu; b) Numerička shema za diskretizaciju jednačina difuzionog talasa; c) Numerička shema Lax-Wendroff (preuzeto iz )

Figure 2. a) Cellular Automata neighbourhood; b) Numerical scheme for diffusion wave equations discretization; c) Numerical scheme Lax-Wendroff

## 2.4 Model dinamičkog talasa – numerička shema Lax-Wendroff

Poslednji model neustaljenog tečenja testiran u kombinaciji sa asimilacijom merenih nivoa pomoću PI regulatora je pun model dinamičkog talasa, koji ne zanemaruje nijedan član u dinamičkoj jednačini. Pune Sen-Venanove jednačine dinamičkog talasa su:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (g \cdot A \cdot h) - g \cdot A \cdot I_d + g \cdot n^2 \frac{Q \cdot |Q|}{A \cdot R^{4/3}} = 0 \quad (14)$$

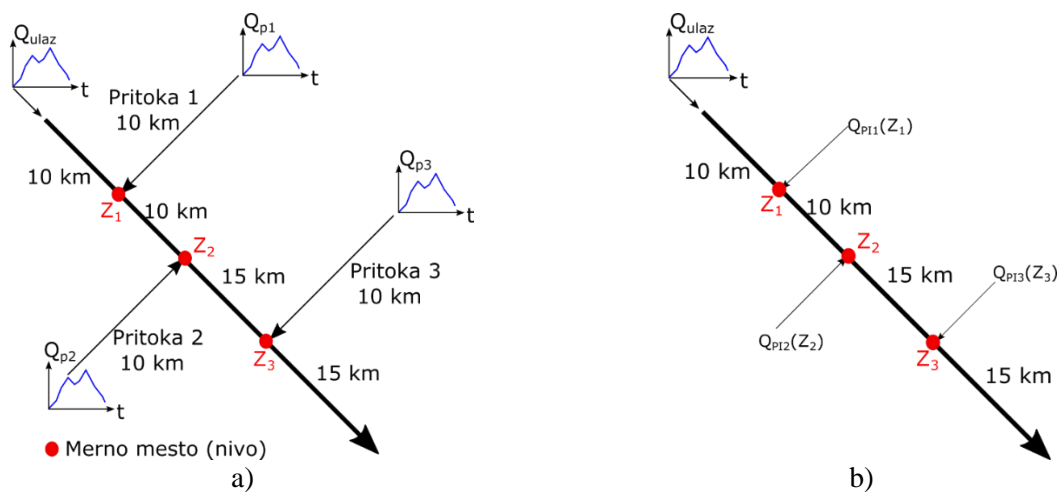
Za diskretizaciju matematičkog modela dinamičkog talasa korišćena je eksplicitna numerička shema Lax-Wendroff (Lax i Wendroff 1960). U numeričkom modelu dinamičkog talasa dodati su i članovi koji prikazuju dotok sa strane definisan PI regulatorom:

$$h_k^{n+1} = h_k^n - \frac{\Delta t}{B} \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} + \frac{Q_{pi,k}^n}{B\Delta x} \Delta t \quad (15)$$

$$Q_k^{n+1} = Q_k^n - \Delta t \left( 2 \frac{Q_k^n}{A_k^n} \cdot \frac{Q_{k+1}^n - Q_{k-1}^n}{2\Delta x} - \left( \frac{Q_k^n}{A_k^n} \right)^2 \cdot \frac{A_{k+1}^n - A_{k-1}^n}{2\Delta x} - g A_k^n I_d + g n^2 \frac{Q_k^n |Q_k^n|}{A_k^n (R_k^n)^{4/3}} \right) + Q_{pi,k}^{n+1} \quad (16)$$

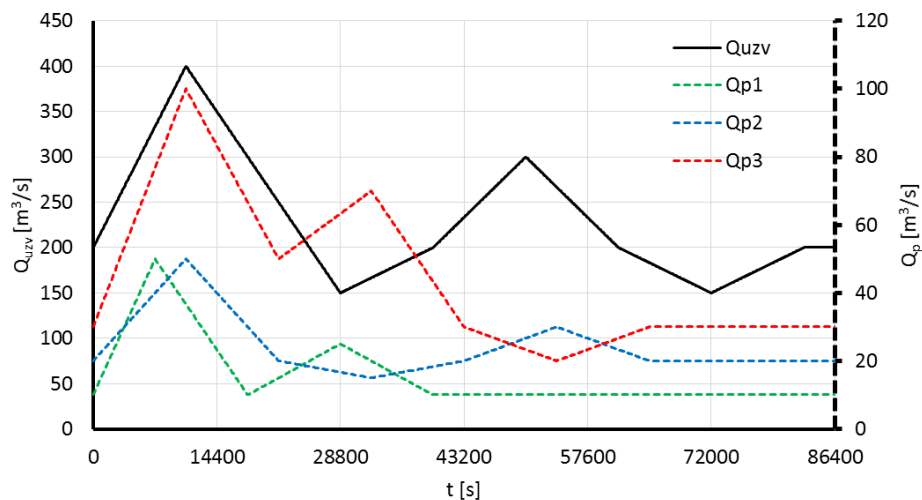
### 3 Numerički primer

Testiranje je obavljeno na jednostavnom primeru neustaljenog tečenja u dugačkom kanalu pravougaonog poprečnog preseka (slika ). Dužina kanala je 50 km a širina 250 m. Podužni nagib dna je konstantan i iznosi 1‰. Hrapavost po Maningu iznosi  $0,03 \text{ m}^{-1/3}$ s. Prostorna diskretizacija, u zavisnosti od modela usvojena je na 125 i 250 m, a prema CFL uslovu stabilnosti usvajan je i vremenski korak. Pošto se testiranje predložene asimilacione metode vrši na veštački generisanom primeru, potrebno je nekako generisati i „merene“ vrednosti nivoa (*true state*). Kako bi se generisali podaci prema kojima se vrši asimilacija, kreiran je model u programskom paketu HEC RAS. Model se sastoji od razmatranog glavnog kanala (karakteristike prethodno opisane) i tri pritoke pravougaonog poprečnog preseka (slika 3a). Sve tri pritoke su dužine 10 km. Na uzvodnoj granici glavnog toka i na uzvodnim krajevima pritoka zadati su sintetički hidrogrami (slika 4). Kao nizvodni granični uslov na glavnom toku figuriše normalna dubina. Transformacijom talasa u opisanoj rečnoj mreži, u HEC RAS okruženju, i eksportovanjem nivoa na ušćima pritoka (usvojena kao lokacije na kojima postoji merenje nivoa) dobijaju se „mereni“ podaci potrebni za proces asimilacije. Generisani mereni podaci su sa vremenskim razmakom od 60 s, dok je vremenski korak, u zavisnosti od izabranog modela tečenja 5 do 10 s.



Slika 3. a) Rečna mreža koja služi za generisanje „merenih“ podataka; b) Glavni tok sa PI regulatorima na mernim mestima

Figure 3. a) River system used for generating “observed“ data; b) PI controllers at “observation“ points



Slika 4. Hidrogrami na uzvodnim krajevima rečne mreže koji se koriste za generisanje „merenih“ podataka

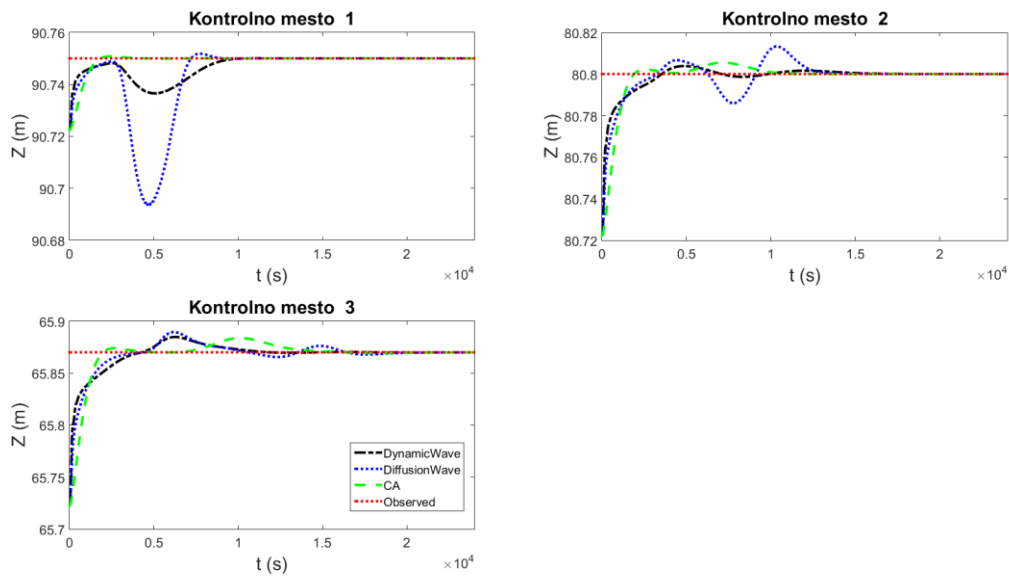
Figure 4. Synthetic hydrographs at the upstream boundaries used for generating the “observed“ data

Za proces asimilacije pretpostavlja se da su dotoci sa pritoka nepoznati, pa se na mestima ušća, koja su ujedno i merna mesta, postavljaju PI regulatori kojima se dodaje/oduzima fiktivni dotok u cilju korekcije stanja dobijenog nekim od opisanih modela. Pretpostavlja se da su poznati samo podaci na uzvodnoj deonici glavnog toka, tj. da je poznat samo ulazni hidrogram na glavnom toku. Pretpostavlja se da je primenom PI regulatora moguće delimično rekonstruisati talase koji u glavni tok pristižu sa pritoka. Testiranje se obavlja za dva slučaja. Prvi slučaj je dostizanje ustaljenog tečenja (vrednosti proticaja pri ustaljenom režimu odgovaraju početnim uslovima neustaljenog tečenja). Drugi slučaj je analiza rada PI kontrolera pri neustaljenim uslovima.

## 4 Rezultati i diskusija

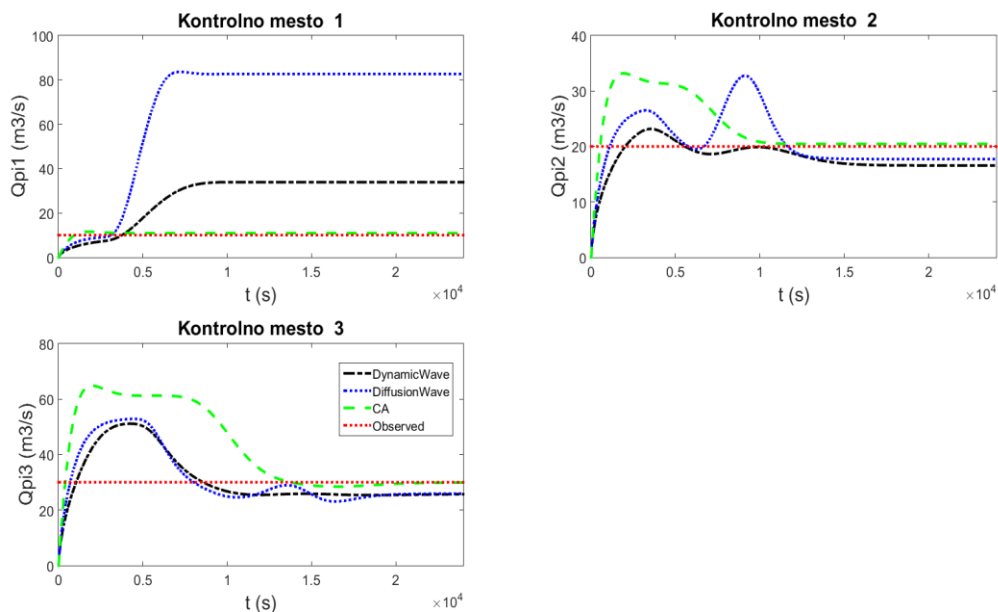
Slika 5 prikazuje promenu nivoa na “mernim” mestima obeleženim na slici 3 za slučaj dostizanja ustaljenog tečenja. Sva tri hidrodinamička modela (Cellular Automata model, difuzioni talas I dinamički talas) imaju isti početni uslov, koji se razlikuje od početne merene vrednosti (koja se u ovom slučaju ne menja vremenom). PI regulatori na mestima “merenih” nivoa, tj. na mestima nepoznatih protoka sa pritoka imaju iste vrednosti parametara,  $P=10$  i  $I=1$ . Slika 6. Prikazuje promenu protoka koji dodaje/oduzima svaki od PI regulatora sa težnjom da se približi “stvarnom” stanju. Na slici 5 može se videti da sva tri modela podjednako dobro dostižu ustaljeno stanje. Na kontrolnom mestu 1, ustaljeno stanje najbrže se uspostavlja kada se koristi najjednostavniji hidrodinamički model, tj. oscilacije nivoa pri radu PI kontrolera su najmanje. Na ostala dva mesta sva tri modela podjednako brzo dostižu ustaljeno stanje (razlika nivoa manja od 5 mm) ali su oscilacije u postupku asimilacije i na ova dva kontrolna mesta (kontrolna mesta 2 i 3) najmanje kada se koristi najjednostavniji hidrodinamički model.





Slika 5. Asimilacija nivoa na tri merne lokacije primenom PI regulatora ( $P=10, I=1$ ) – slučaj dostizanja ustaljenog tečenja

Figure 5. Water level data assimilation at three observation points using PI controller ( $P=10, I=1$ ) – reaching steady state

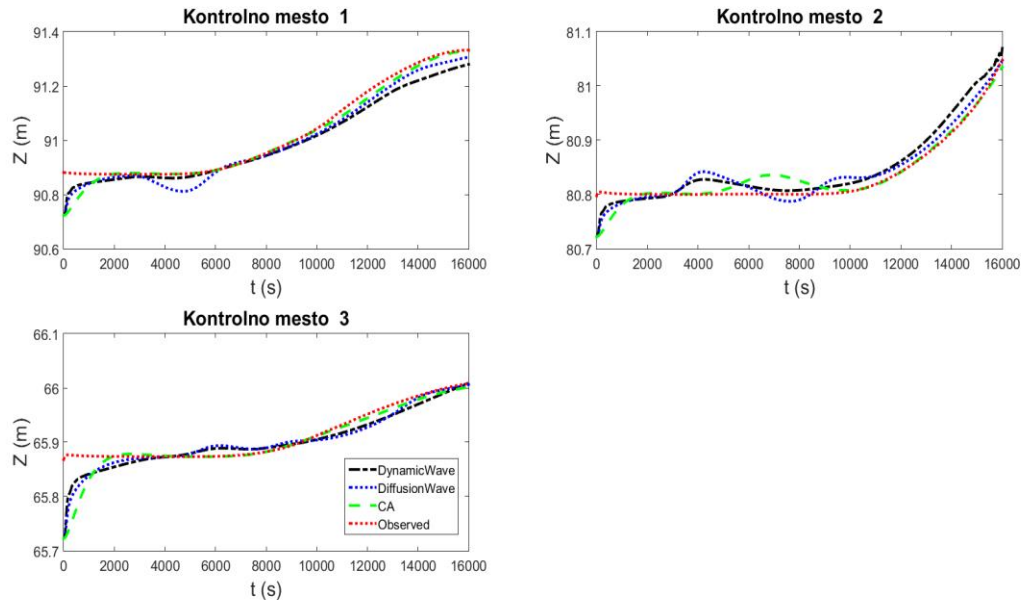


Slika 6. Vrednosti protoka koji se dodaju/oduzimaju preko PI regulatora na mernim mestima ( $P=10, I=1$ ) – dostizanje ustaljenog tečenja

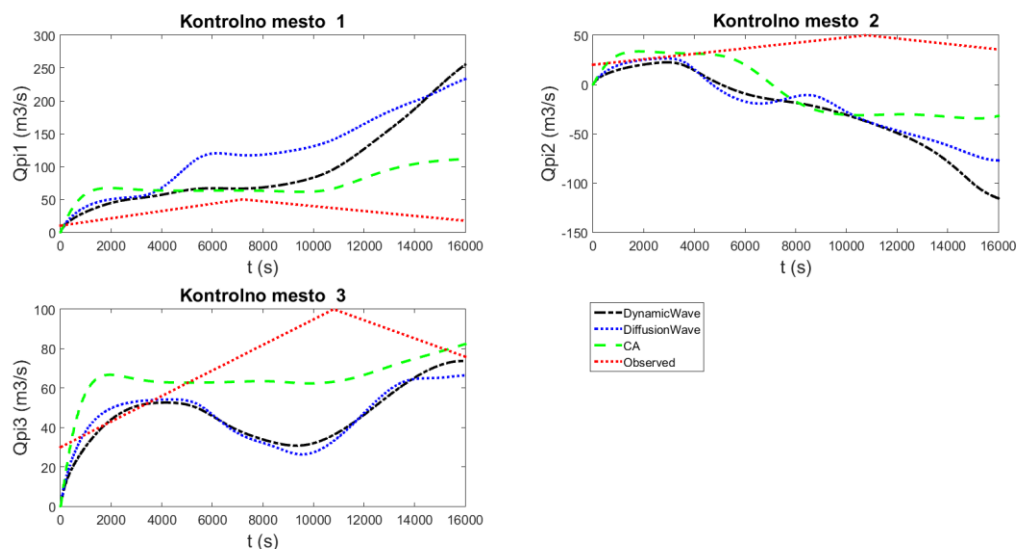
Figure 6. Discharge being added/subtracted by using PI controller at the observation points ( $P=10, I=1$ ) – reaching steady state

Na slikama 7 i 8 prikazan je isti postupak (promena nivoa u postupku asimilacije) kada se nivo kome se teži pomoći PI regulatora menja vremenom. Prikazan je samo manji period asimilacije u odnosu na ukupno trajanje ulaznih hidrograma (slika 4) kojima se generiše neustaljeno stanje. Na slici

7 ponovo se uočava dobar trend pri asimilaciji, korićenjem sva tri modela, mada treba napomenuti da i u ovom slučaju najjednostavniji model ima najmanje oscilacije u odnosu na vrednosti nivoa koje se usvajaju kao “merene”.



Slika 7. Asimilacija nivoa na tri merne lokacije primenom PI regulatora ( $P=10, I=1$ ) – neustaljeno tečenje  
 Figure 7. Water level data assimilation at three observation points using PI controller ( $P=10, I=1$ ) – unsteady state



Slika 8. Vrednosti protoka koji se dodaju/oduzimaju preko PI regulatora na mernim mestima ( $P=10, I=1$ ) – neustaljeno tečenje  
 Figure 8. Discharge being added/subtracted by using PI controller at the observation points ( $P=10, I=1$ ) – unsteady state

Pored svega, potrebno je naglasiti da su u oba slučaja asimilacije (dostizanje ustaljenog stanja i neustaljeno stanje) korišćeni “merni” podaci sa vremenskim razmakom od 60 s, dok su vremenski koraci korišćeni u hidrodinamičkim modelima manji. U slučaju najjednostavnijeg modela, proračun je bio stabilan ukoliko nije usvajan vremenski korak veći od 10 s. Primena difuzionog talasa uslovljavala

je izbor vremenskog koraka sa maksimalnom vrednošću od 5 s, dok je u slučaju najsloženijeg modela (dinamički talas) to ograničenje iznosilo 2 s.

## 5 Zaključak

U radu se prikazuje potencijalno korišćenje PI regulatora za prevazilaženje česte nekonzistentnosti između rezultata pojedinih hidrauličkih veličina dobijenih modelom sa izmerenim podacima tih istih veličina, čak i u slučaju prethodno dobro kalibrisanih modela. Standardne metode asimilacije modela sa merenim podacima (Ensemble Kalman Filter, Particle Filter) daju dobre rezultate, ali često narušavaju neka fizička ograničenja koja se podrazumevaju modelom (npr. jednačina kontinuiteta često nije ispoštovana). opisana metoda asimilacije primenom PI regulatora ima za cilj da prevaziđe prethodno pomenuti problem koji imaju standardne metode asimilacije. Međutim, treba napomenuti da ova metoda ima ograničenje u tome što uvodi pretpostavku da je glavni uzrok neslaganja modela i merenja nepoznavanje početnih i graničnih uslova.

U radu je i prikazana analiza uticaja kompleksnosti hidrodinamičkog modela uparenog sa PI regulatorom za asimilaciju. U preliminarnim rezultatima vidi se da primena relativno jednostavnijih hidrodinamičkih modela može dati zadovoljavajuće rezultate u pogledu dostizanja traženog stanja u sistemu. Čak se primenom jednostavnijih modela može povećati vremenski korak čime se može ubrzati vreme potrebno za proračun.

Buduća istraživanja trebalo bi da obuhvate detaljniju analizu problematike izložene u radu, na dodatnim numeričkim primerima i na realnim rečnim sistemima. Pored dodatnih primera, potrebno je ispitati i međusobni uticaj PI kontrolera, tj. prostornu i vremensku spregu više PI regulatora, uvodjenjem dodatnih veza kojima rad jednog PI regulatora direktno utiče na rad nekog drugog PI regulatora.

## Literatura

- Addai, Elvis Boamah, Shoou-Yuh Chang, Godwin Appiah Assumaning, и Amirul Islam Rajib. 2016. „Groundwater Contaminant Transport Modeling Using Multiple Adaptive Data Assimilation Techniques“. *Advances in Water Resource and Protection* 3 (0): 1. <https://doi.org/10.14355/awrp.2016.03.001>.
- Barthélémy, S., S. Ricci, M. C. Rochoux, E. Le Pape, и O. Thual. 2017. „Ensemble-based data assimilation for operational flood forecasting – On the merits of state estimation for 1D hydrodynamic forecasting through the example of the “Adour Maritime” river“. *Journal of Hydrology* 552: 210–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.017>.
- Chang, Shoou-Yuh, Tushar Chowhan, и Sikdar Latif. 2012. „State and Parameter Estimation with an SIR Particle Filter in a Three-Dimensional Groundwater Pollutant Transport Model“. *Journal of Environmental Engineering* 138 (11): 1114–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000584).
- Cheng, Wei Chen, Donald R. Kendall, Mario Putti, и William W.G. Yeh. 2009. „A nudging data assimilation algorithm for the identification of groundwater pumping“. *Water Resources Research* 45 (8): 1–13. <https://doi.org/10.1029/2008WR007602>.
- Clark, Martyn P., David E. Rupp, Ross A. Woods, Xiaogu Zheng, Richard P. Ibbitt, Andrew G. Slater, Jochen Schmidt, и Michael J. Uddstrom. 2008. „Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model“. *Advances in Water Resources* 31 (10): 1309–24. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.06.005>.
- Dottori, F., и E. Todini. 2011. „Developments of a flood inundation model based on the cellular automata approach: Testing different methods to improve model performance“. *Physics and Chemistry of the Earth* 36 (7–8). Elsevier Ltd: 266–80. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.02.004>.
- Dottori, F, и E Todini. 2010. „A 2D Flood Inundation Model Based on Cellular Automata Approach“. *XVIII International Conference on Water Resources*, изд. 2: 1–8.
- Evensen, Geir. 2003. „The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation“. *Ocean Dynamics* 53 (4): 343–67. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9>.
- Franz, Delbert D, и Charles S Melching. 1997. „Full Equations (FEQ) Model for the Solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Control Structures“. *Water-Resources Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/wri964240>.
- Goutal, N, и F Maurel. 2002. „A finite volume solver for 1D shallow water equations applies to an actual river“. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 19 (January 2001): 1–19.
- Habert, J., S. Ricci, E. Le Pape, O. Thual, A. Piacentini, N. Goutal, G. Jonville, и M. Rochoux. 2016. „Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1D hydraulic model in the context of operational flood forecasting“. *Journal of Hydrology* 532. Elsevier B.V.: 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.023>.
- Hendricks Franssen, H. J., и W. Kinzelbach. 2008a. „Real-time groundwater flow modeling with the Ensemble Kalman Filter: Joint estimation of states and parameters and the filter inbreeding problem“. *Water Resources Research* 44 (9): 1–21. <https://doi.org/10.1029/2007WR006505>.
- . 2008b. „Real-time groundwater flow modeling with the Ensemble Kalman Filter: Joint estimation of states and parameters and the filter inbreeding problem“. *Water Resources Research* 44 (9). <https://doi.org/10.1029/2007WR006505>.
- Ivetić, Marko V. 2000. „Računska hidraulika - Otvoreni tokovi“. *Građevinski fakultet*.
- Jean-Baptiste, Nelly, Pierre Olivier Malaterre, Christophe Dorée, и Jacques Sau. 2011. „Data assimilation for real-time estimation of hydraulic states and unmeasured perturbations in a 1D hydrodynamic model“. *Mathematics and Computers in Simulation* 81 (10). International Association for Mathematics and Computers in Simulation (IMACS): 2201–14. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.12.021>.
- Kabir, Sk Faisal, Godwin Appiah Assumaning, и Shoou Yuh Chang. 2017. „Efficiency of using 4DVar, 3DVar and EnKF data assimilation methods in groundwater contaminant transport modelling“. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 8189 (August). Taylor & Francis: 1–17. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1304273>.
- Karl Astrom, Johan. 2002. „PID Control“. *Control System Design*. <https://doi.org/10.1007/1-84628-148-2>.
- Lax, Peter D., и B Wendroff. 1960. „Systems of conservation laws“. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13 (2): 217–37. <https://doi.org/10.1002/cpa.3160130205>.
- Madsen, Henrik, Johan Hartnack, и Jacob V T Sørensen. 2006. „Data Assimilation in a Flood Modelling System Using the Ensemble Kalman Filter“. *XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR-XVI)* 16: 1–8.
- Paiva, R. C.D., W. Collischonn, M. P. Bonnet, L. G.G. De Gonçalves, S. Calmant, A. Getirana, и J. Santos Da Silva. 2013. „Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon“. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (7): 2929–46. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2929-2013>.
- Rajib, Amirul Islam, Godwin Appiah Assumaning, Shoou-Yuh Chang, и Elvis Boamah Addai. 2017. „Use of Multiple Data Assimilation Techniques in Groundwater Contaminant Transport Modeling“. *Water Environment Research* 89 (11): 1952–60. <https://doi.org/10.2175/106143017X15051465918930>.
- Rosić, Nikola, Nenad Jaćimović, Dušan Prodanović, и Boban Stojanović. 2017. „Data assimilation for operational reservoir management on the Danube river“. *7th International Conference on Information Society and Technology ICIST 2017*, 210–13.
- Rosić, Nikola, Dušan Prodanović, Boban Stojanović, и Dragana Obradović. 2017. „ASIMILACIJA RAČUNSKOG MODELA DUNAVA OD NOVOG SADA DO HE, Đ ERDAP 1“. *Vodoprivreda* 49 (288): 253–61.
- Wolfram, Stephen. 1998. „Cellular automata as models of complexity“. *Nonlinear Physics for Beginners: Fractals, Chaos, Solitons, Pattern Formation, Cellular Automata, Complex Systems* 311 (5985): 197. <https://doi.org/10.1038/311419a0>.
- Xue, Liang. 2015. „Application of the Multimodel Ensemble Kalman Filter Method in Groundwater System“. *Water* 7 (2): 528–45. <https://doi.org/10.3390/w7020528>.

## Preračunavanje stepena korisnosti sa testiranog modela na glavno izvođenje hidraulične turbine

Miroslav Benišek<sup>1</sup>

APSTRAKT: Ispitivanjem modela hidraulične turbine, koji je geometrijski sličan sa projektovanim glavnim izvođenjem turbine i izrađen u određenoj razmeri, dobijaju se željeni parametri: jedinična brzina obrtanja  $n_{11m}$ , jedinični protok  $Q_{11m}$ , jedinična snaga  $P_{11m}$ , položaji lopatica obrtnog kola  $\varphi_m$  (za turbine dvojne regulacije) i lopatica sprovodnog aparata  $\alpha_m$ , kavitacijski koeficijenti  $\sigma_m$  i hidraulički stepeni korisnosti  $\eta_{hm}$ . U ovom radu posebna pažnja se posvećuje preračunavanju hidrauličkog stepena korisnosti modela  $\eta_{hm}$  na hidraulički stepen korisnosti glavnog izvođenja – prototipa  $\eta_{hp}$ . Neispunjenje totalne mehaničke sličnosti dovodi do razlike hidrauličkih stepena korisnosti prototipa i modela u sličnim režimima rada – ova činjenica se naziva *efektom razmere*. Od prve ideje rešavanja problema preračunavanja, u radu se daje hronološki sled formula za preračunavanje, počevši od prve iz 1909 godine, pa do danas primenljivih. Daje se postupak izvođenja značajnijih formula. Takođe se analiziraju formule koje daju dobre rezultate u oblasti optimalnih stepena korisnosti i formule koje su primenljive u celoj oblasti univerzalne karakteristike modela i prototipa. Između ostalih data je i formula naših autora, koja je primenljiva u celoj oblasti univerzalnih karakteristika cevni turbina. Prikazan je i primer preračunavanja jedne univerzalne karakteristike modela na prototip.

Ključne reči: hidraulični stepen korisnosti, preračunavanje, model, prototip.

## Efficiency scale-up calculation from tested model to prototype

ABSTRACT: On the basis of the tested model turbine, which has geometrical similarity with prototype, the next performances (parameters) are obtained: unit rotational speeds  $n_{11m}$ , unit discharges  $Q_{11m}$ , unit powers  $P_{11m}$ , runner blade angles  $\varphi_m$ , guide vane angles  $\alpha_m$ , cavitation coefficients  $\sigma_m$ , and hydraulic efficiencies  $\eta_{hm}$ . In this paper the special attention is paid to the scale-up calculation of the model hydraulic efficiencies  $\eta_{hm}$  to the prototype hydraulic efficiencies  $\eta_{hp}$ , for the similar operating. Unfeasible of the total mechanical similarity conditions, causes by the differences between model and prototype, hydraulic efficiencies at similar operating points – this fact as the "scale effect" is known. From the first step, problem scale up solution at 1909 year until to the contemporary applicable formulas here are given. Also the derivation procedures of the important formulas are shown. Formulas which are applicable in the whole region of the universal diagram are analyzed. Among others the improved formula by our authors is presented. The results of the scale-up calculation for the tube turbine is shown.

Keywords: Hydraulic efficiency, scale-up calculation, model turbine, prototype turbine

---

<sup>1</sup> Dr Miroslav Benišek, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, mbenisek@mas.bg.ac.rs

## 1 Uvod

Hidraulički stepen korisnosti predstavlja pokazatelj dobrote energetske razmene u obrtnom kolu turbine i brojno je jednak odnosu između specifičnog strujnog rada obrtnog kola  $Y_k$  i specifičnog strujnog rada turbine  $Y$  ( $\eta_h = Y_k/Y$ ) [1]. Hidraulički stepen korisnosti  $\eta_h$  zavisi od karakterističnih veličina turbine i može se izraziti u obliku opšte funkcionalne zavisnosti korišćenjem  $\pi$  teoreme [5] kao:

$$\eta_h = F(Sh, Fr, Eu, Re, \delta/D_1, s/D_1), \quad (1)$$

gde su:  $Sh, Fr, Eu$  i  $Re$  – karakteristični brojevi mehaničke sličnosti (videti u [1]),  $D$  – apsolutna hrapavost protočnih površina,  $s$  – veličina procepa obrtnog kola i  $D_1$  – prečnik kola turbine.

U slučaju potpune (idealne) mehaničke sličnosti modela i glavnog izvođenja izraz (1) mora da bude identičan za odgovarajuće pogonske tačke oba sistema (model – prototip).

Potpunu mehaničku sličnost modela i glavnog izvođenja, nemoguće je ostvariti. Na prvi pogled zadovoljenje geometrijskog uslova sličnosti je lako ostvariti, međutim to nije tako. Vrednosti prevodnog koeficijenta procepa  $\lambda_{lp} = s_p/s_m$ , definisanih za procepe između obrtnih delova (kola) i nepokretnih delova (kućišta) za model i glavno izvođenje, nisu jednaki:

$$(\lambda_{lp})_m > (\lambda_{lp})_p \Rightarrow \frac{s_p}{D_{1p}} < \frac{s_m}{D_{1m}}. \quad (2)$$

Zatim, prečnik kola  $D_{1p}$  prototipa turbine može biti i trideset puta veći od prečnika kola  $D_{1m}$  modela turbine, dok se mašinskom ručnom obradom protočnih površina modela i prototipova može postići apsolutna hrapavost  $\Delta_m \approx \Delta_p$ . Prethodna činjenica ukazuje na veću relativnu hrapavost modela od relativne hrapavosti prototipa:

$$\delta_m > \delta_p \Rightarrow \left(\frac{\Delta}{D_1}\right)_m > \left(\frac{\Delta}{D_1}\right)_p. \quad (3)$$

Rejnoldsovi brojevi modela i prototipa nisu jednaki [1].

Sve unapred navedene činjenice ukazuju da se pri analizi sličnosti turbina mora računati samo sa delimičnom sličnošću, što za posledicu ima i nejednakost bezdimenzijskih hidrauličkih gubitaka modela i prototipa turbine  $\varepsilon_{hm} \neq \varepsilon_{hp}$ , odnosno prema izrazu  $\eta_h = 1 - \varepsilon_h$  i nejednakost hidrauličkih stepena korisnosti  $\eta_{hm} \neq \eta_{hp}$ .

Kako je relativna hrapavost modela veća od relativne hrapavosti prototipa, prema izrazu (3), i kako je  $Re_p > Re_m$  to sledi da je:

$$\eta_{hp} > \eta_{hm} \Rightarrow \eta_{hp} = \eta_{hm} + \Delta \eta_h, \quad (4)$$

gde je  $\Delta \eta_h$  – popravka hidrauličnog stepena korisnosti u odnosu na model.

Uvećanje hidrauličnog stepena korisnosti  $\eta_{hp}$  glavnog izvođenja turbine u odnosu na hidraulični stepen korisnosti  $\eta_{hm}$  modela u sličnim režimima rada, naziva se "*efektom razmere*".

Savremeni razvoj hidrauličnih turbina usko je vezan za problem "*efekta razmere*" jer se eksperimentalna istraživanja turbina i njihovih karakteristika vrše na modelima koji su po dimenzijama mnogo manji od glavnog izvođenja. Izmerene energetske i kavitacione karakteristike modela razlikuju se u sličnim režimima rada od izmerenih karakteristika glavnog izvođenja. Ova činjenica ukazuje da je potrebno preračunavati dobijene karakteristike modela radi dobijanja protočnih i eksploatacionih karakteristika glavnih izvođenja turbina pre njihove realizacije.

Osnovni cilj istraživanja "efekta razmere" sastoji se u određivanju adekvatnog postupka preračunavanja stepena korisnosti sa modela na glavno izvođenje. Zadovoljavajući postupak trebalo bi da ostvari maksimalnu apsolutnu grešku u stepenu korisnosti od 0,1% u svim pogonskim tačkama turbi-

ne. Međutim, ovakva tačnost još nije postignuta predloženim rešenjima, pa se istraživanja "efekta razmere" istrajno nastavljaju, kako bi se izbegla skupa merenja na hidroelektranama prilikom garancijskih ispitivanja.

## 2 Teorijska istraživanja postupaka za preračunavanje stepena korisnosti modela na prototip

Prva teorijska istraživanja u ovoj oblasti započinju *Kamerer (Camerer)* 1909. god., *Mudi (Moody)* 1925. god., *Štauffer (Stauffer)* 1925. god. i drugi [1].

Formule za preračunavanje, koje su proistekle iz prvih istraživanja, dale su zadovoljavajuća podsticajna rešenja naročito u oblasti optimalne pogonske tačke turbina. Prve formule za preračunavanje stepena korisnosti turbine uzimale su u obzir samo gubitke na trenje zanemarujući pri tom sve ostale hidraulične gubitke. Ove formule, po svojoj strukturi, spadaju u grupu jednostavnijih i nazivaju se *formule za preračunavanje I grupe*.

Pošlo se od pretpostavke da hidraulični gubici u turbini imaju karakter gubitaka trenja  $Y_{ght}$  u pravim kanalima, pa je prema formuli *Darsi-Vajsba* (*Darcy-Weisbach*) [1, 5]:

$$Y_{ght} = \lambda \frac{l}{4 R_h} \frac{\bar{c}^2}{2}, \quad (5)$$

gde su:  $\lambda$  – koeficijent trenja,  $l$  – dužina kanala,  $R_h$  – hidraulični radijus  $R_h = A/O$  ( $A$  – površina poprečnog preseka kroz koju fluid struji i  $O$  – obim okvašene površine) i  $\bar{c}$  – srednja brzina strujanja u kanalu.

Bezdimenzijski hidraulički gubici trenja u cevi  $\epsilon_{ht}$ , saglasno izrazu (5), su:

$$\epsilon_{ht} = \frac{Y_{ght}}{Y} = \lambda \frac{l}{4 R_h} \frac{\bar{c}^2}{2 Y}, \quad (6)$$

a hidraulični stepen korisnosti  $\eta_h$ , kada u turbini postoje samo hidraulični gubici od trenja  $Y_{gt}$ , je:

$$\eta_h = \frac{Y_k}{Y} = \frac{Y - Y_k}{Y} = 1 - \epsilon_{ht}, \quad (7)$$

Na Slici 1 prikazana je grafička predstava stepena korisnosti modela i glavnog izvođenja kada se u razmatranje uzimaju samo gubici na trenje.

Odnos bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka modela i glavnog izvođenja je sada:

$$\frac{(\epsilon_{ht})_p}{(\epsilon_{ht})_m} = \frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}}. \quad (8)$$

Za model i glavno izvođenje koji ispunjavaju uslove sličnosti je:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = \frac{\lambda_p \frac{l_p}{4 R_{hp}} \frac{\bar{c}_p^2}{2 Y_p}}{\lambda_m \frac{l_m}{4 R_{hm}} \frac{\bar{c}_m^2}{2 Y_p}} = \frac{\lambda_p}{\lambda_m}, \quad (9)$$

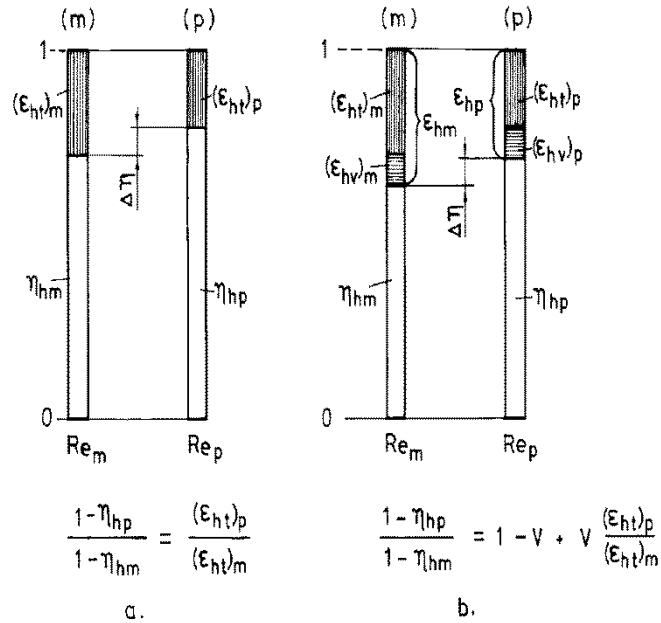
što znači da se bezdimenzijski hidraulični gubici prototipa i modela odnose kao koeficijenti trenja i da se problem preračunavanja svodi na nalaženje odnosa  $\lambda_p/\lambda_m$  i njegove zavisnosti od uticajnih faktora. U opštem slučaju koeficijent trenja  $\lambda$  zavisi od Re broja i relativne hrapavosti  $\delta$  tako da je:

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{f(Re_p, \delta_p)}{f(Re_m, \delta_m)}, \quad (10)$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

gde se  $Re$  broj, u ovom slučaju, definiše izrazom  $Re = D\sqrt{2Y}/\nu$ , pri čemu su:  $D$  – prečnik turbine,  $Y$  – jedinični strujni rad i  $\nu$  – kinematska viskoznost.



Slika 1. Struktura gubitaka u turbini pri preračunavanju stepena korisnosti.

Figure 1. Loss turbine's structure at efficiency scale-up.

Zavisno od izraza  $\lambda = f(Re, \delta)$ , odnosno od karakteristične oblasti u kojoj se posmatra strujanje u modelu i prototipu kola i od modela otpora trenja koji se primenjuje (cev, ravna ploča i dr.) dobijaju se različiti oblici izraza (10).

Najčešće, zbog kvaliteta obrade površina protočnog trakta turbina, koriste se izrazi za treću oblast hidraulički glatkog strujanja tako da formula za preračunavanje (9) dobija opšti oblik:

$$\frac{1 - \eta_p}{1 - \eta_m} = \left(\frac{D_{1m}}{D_{1p}}\right)^n \left(\frac{H_m}{H_p}\right)^m, \quad (11)$$

Formule za preračunavanje *grupe I* izvedene su za rad turbine u oblasti sa optimalnim stepenom korisnosti kada ostali gubici u odnosu na trenje imaju manji uticaj. Formule *grupe I* su uglavnom izvedene za Fransisove turbine i imaju više značaja kao jednostavniji prilazi problemu preračunavanja. Navedene formule daju veće vrednosti  $\eta_{ht}$  u odnosu na izmerene vrednosti na prototipu. U ostalim pogonskim tačkama van optimuma uzima se povećanje stepena korisnosti  $\Delta\eta_h$  određeno u optimumu. Sračunate vrednosti  $\Delta\eta_h$  pomoću formula *grupe I* treba smatrati samo orijentacionim.

Težnja da se nađu bolja rešenja, veća tačnost u preračunavanju kao i mogućnost primene formule na celu oblast rada turbine, zahtevala je da se ukupni hidraulični gubici u turbini razmatraju kao zbir gubitaka na trenje i vihornih gubitaka. Vihorni gubici imaju karakter lokalnih gubitaka kao što su odlepljivanje struje, udarni gubici, vrtloženje, skretanje struje i dr. Prema tome može se napisati:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{ht} + \varepsilon_{hv}, \quad (12)$$

gde su:  $\varepsilon_h$ ,  $\varepsilon_{ht}$  i  $\varepsilon_{hv}$  – bezdimenzijski hidraulični gubici: ukupni, na trenje i vihorni.

Hidraulički stepen korisnosti turbine tada glasi:



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$\eta_h = 1 - \varepsilon_h = 1 - \varepsilon_{ht} - \varepsilon_{hv} . \quad (13)$$

Povećanje  $\Delta \eta_h$  hidrauličkog stepena korisnosti prototipa ( $p$ ) u odnosu na model ( $m$ ) (videti Slika 1) može se saglasno (13) napisati u obliku:

$$\begin{aligned} \Delta \eta_h &= \eta_p - \eta_m = (1 - \eta_m) - (1 - \eta_p) = (\varepsilon_h)_m - (\varepsilon_h)_p = \\ &= (\varepsilon_{ht})_m + (\varepsilon_{hv})_m - (\varepsilon_{ht})_p + (\varepsilon_{hv})_p . \end{aligned} \quad (14)$$

Usvajajući da su bezdimenzijski vihorni gubici nepromenjivi, to jest da je  $(\varepsilon_{hv})_m = (\varepsilon_{hv})_p$ , dobija se:

$$\Delta \eta_h = (\varepsilon_{ht})_m - (\varepsilon_{ht})_p . \quad (15)$$

Ako se sa  $V$  označi odnos bezdimenzijskih hidrauličkih gubitaka usled trenja i ukupnih bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka modela:

$$V = \frac{(\varepsilon_{ht})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \frac{(\varepsilon_{ht})_m}{1 - \eta_{hm}} , \quad (16)$$

tada je obzirom na (2.11), (2.12) i (2.5):

$$\Delta \eta_h = (\varepsilon_{ht})_m \left[ 1 - \frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_m} \right] = V (1 - \eta_{hm}) \left( 4 - \frac{\lambda_p}{\lambda_m} \right) , \quad (17)$$

Prethodni izraz može se prikazati i u obliku:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = (1 - V) + V \frac{\lambda_p}{\lambda_m} , \quad (18)$$

gde  $(1 - V)$  predstavlja odnos bezdimenzijskih hidrauličnih vihornih gubitaka prema ukupnim bezdimenzijskim hidrauličnim gubicima modela prema izraz:

$$1 - V = 1 - \frac{(\varepsilon_{ht})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \frac{(\varepsilon_h)_m - (\varepsilon_{ht})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \frac{(\varepsilon_{hv})_m}{(\varepsilon_h)_m} , \quad (19)$$

U većini formula za preračunavanje, koje su nazvane *formulama za preračunavanje grupe II*, uzi-ma se koeficijent trenja u oblasti hidraulički glatkog strujanja u cevi  $\lambda = C/Re^{1/n}$ , tako da se izraz za preračunavanje (17) može napisati u obliku:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = (1 - V) + V \left( \frac{Re_m}{Re_p} \right)^{1/n} , \quad (20)$$

Veličina  $V$  naziva se *koeficijentom prerspodele gubitaka*.

U tabeli 1 dat je pregled nekih izvedenih formula za preračunavanje *grupe II*, oblika (20).

Sama struktura formula za preračunavanje *grupe II* ukazuje da se samo gubici trenja preračunavaju pri prelasku sa modela na glavno izvođenje, dok vihorni gubici ostaju neizmenjeni. Formule *grupe II* dale su poboljšanje postupka preračunavanja, ali samo u oblasti optimalnih stepena korisnosti, dok u oblasti van optimuma ove formule daju nerealno visoke vrednosti.

Odstupanja u vrednostima  $V$  i  $n$  kod pojedinih autora nastala su zbog specifičnog posmatranja i primene formula na određene tipove turbina. Tako su formule 1, 2 i 4 uglavnom primenjivane na Francisove, a formule 1 i 3 za Kaplanove i cevne turbine.

Tabela 1. Formule za preračunavanje grupe II

Table 1. Scale-up formulas for type II.

redni broj	Autor	Godina	$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = \frac{\varepsilon_{hp}}{\varepsilon_{hm}} = (1 - V) + V \left(\frac{Re_m}{Re_p}\right)^{1/n}$
1	Akeret	1930.	$0,5 + 0,5 (Re_m/Re_p)^{0,2}$
2	Kanaan	1945.	$0,5 + 0,5 (Re_m/Re_p)^{0,25}$
3	Haton	1954.	$0,3 + 0,7 (Re_m/Re_p)^{0,2}$
4	Etinberg	1930.	$0,5 + 0,5 (Re_m/Re_p)^{1/6}$

Čistjakov (Чистаяков) (1972) [6] je istraživao ukupne bezdimenzijske gubitke u optimalnim tačkama rada Kaplanovih i Fransisovih turbina. Kada se vrednosti  $\varepsilon_h$  za modele i prototipove turbina, određene na osnovu eksperimenata, prikažu u zavisnosti od  $Re$  broja dobija se dijagramska zavisnost prikazana na Slici 2. Rejnoldsovi brojevi su definisani izrazom  $Re = \bar{c}_m D_1/\nu$ . Srednja brzina  $\bar{c}_m$  se određuje za Kaplanove i Fransisove turbine pomoću izraza:

$$c_m = \frac{4 Q}{\pi (D_1^2 - d_g^2)} \quad c_m = \frac{4 Q}{\pi D_1^2} \quad , \quad (21)$$

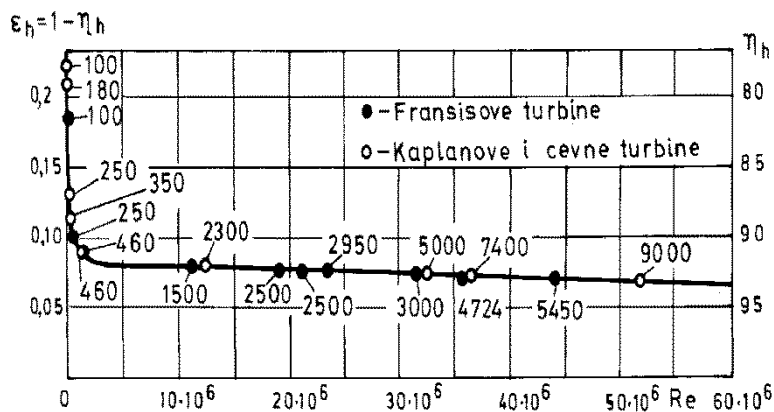
gde su:  $Q$  – protok kroz turbinu,  $D_1$  – prečnik turbine,  $d_g$  – prečnik glavčine i  $\nu$  – kinematska viskoznost.

Očigledno je da se bezdimenzijski hidraulični gubici  $\varepsilon_h$  menjaju u zavisnosti od  $Re$  broja i to:

- intenzivno u oblasti  $Re < Re_k$  i
- linearno u oblasti  $Re > Re_k$ .

Prema preporukama IEC (International Electrotechnical Commission) [9] kritična vrednost  $Re$  broja je:

- za aksijalne turbine  $Re_k = 2 \cdot 10^6$  i
- Fransisove turbine  $Re_k = 2.5 \cdot 10^6$ .



Slika 2. Zavisnost bezdimenzijskih ukupnih hidrauličkih gubitaka Kaplanovih i Fransisovih turbina od  $Re$  broja.

Figure 2. Dimensionless hydraulic losses dependence on  $Re$  numbers for Kaplan and Francis turbine.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Birajući da je  $Re_m > Re_k$  tada optimalne radne tačke modela i prototipa leže na pravoj koja ima oblik:

$$\varepsilon_h = 1 - \eta_h = a - b Re \quad , \quad (22)$$

Metodom najmanjih kvadrata određuju se vrednosti:  $a = 0.085$  i  $b = 4 \cdot 10^{-10} Re$  tako da je:

$$\varepsilon_h = 1 - \eta_h = 0.085 - 4 \cdot 10^{-10} Re \quad . \quad (23)$$

Za model i prototip mogu se napisati izrazi oblika (22). Oduzimanjem izraza za prototip od izraza za model dobija se:

$$(\varepsilon_h)_m - (\varepsilon_h)_p = (1 - \eta_{hm}) - (1 - \eta_{hp}) = 4 \cdot 10^{-10}(Re_p - Re_m), \quad (24)$$

odakle sledi formula za preračunavanje oblika:

$$\eta_{hp} = \eta_{hm} + 4 \cdot 10^{-10}(Re_p - Re_m) \quad . \quad (25)$$

Formula (25) za preračunavanje, primenjena na Kaplanove i Fransisove turbine, daje dobre rezultate u oblasti najvišeg stepena korisnosti.

Uočeni nedostaci, da se formule *grupe II* mogu primeniti samo u oblasti rada turbina sa najvišim stepenom korisnosti tj. u optimumu, kao i potreba da se stepen korisnosti modela preračuna u široj radnoj oblasti prototipa turbine, iziskivali su iznalaženje postupka za preračunavanje koji uzimaju u obzir položaj radne tačke turbine definisane sa  $(n_{11}, Q_{11})$  ili  $(Q, H)$ . Formule koje su nastale iz prethodnih razloga, da se uzima u razmatranje i šira radna oblast turbine, svrstavaju se u *formule za preračunavanje grupe III*.

Šćapov (Шћанов) [1] 1959. godine predložio je, nakon detaljnog izučavanja gubitaka u turbini, da se u cilju preračunavanja bezdimenzijskih gubitaka može usvojiti veza:

$$V^* = \frac{(\varepsilon_h)_m - (\varepsilon_h)_p}{(\varepsilon_h)_m \left[ 1 - \frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_m} \right]} \quad , \quad (26)$$

iz koje se može odrediti odnos bezdimenzijskih ukupnih hidrauličnih gubitaka  $(\varepsilon_h)_p$  prototipa i bezdimenzijskih ukupnih hidrauličnih gubitaka  $(\varepsilon_h)_m$  modela:

$$\begin{aligned} \frac{(\varepsilon_h)_p}{(\varepsilon_h)_m} &= \frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = 1 - V^* \left[ 1 - \frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_m} \right] = \\ &= (1 - V^*) + V^* \left[ \frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_m} \right] \quad , \quad (27) \end{aligned}$$

gde je po Šćapovu odnos relativnih hidrauličnih gubitaka na trenje prototipa i modela:

$$\frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_m} = \sqrt[5.5]{\frac{D_{1m}}{D_{1p}}} \quad , \quad (28)$$

Izgled formule Šćapova (27) za preračunavanje hidrauličkog stepena korisnosti ima formalno isti oblik kao i formule *grupe II* iz tabele 1, međutim vrednost  $V^*$  nije konstantna već zavisi od protoka kroz turbinu. Ovaj rad je podsticajno delovao na dalja istraživanja.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

*Etinberg (Этинберг)* 1965. godine [5], u cilju određivanja formule za preračunavanje stepena korisnosti, istražuje hidrauličke gubitke u turbini i njihovu zavisnost od razmere turbine. Ukupni bezdimenzijski hidraulički gubici prototipa turbine  $(\varepsilon_h)_p$  posmatraju se kao zbir:

$$(\varepsilon_h)_p = (\varepsilon_{hk})_p + (\varepsilon_{hs})_p + (\varepsilon_{hsif})_p + (\varepsilon_{hi})_p \quad , \quad (29)$$

gde su:  $(\varepsilon_{hk})_p$  – bezdimenzijski hidraulični gubici profila u kolu,  $(\varepsilon_{hs})_p$  – bezdimenzijski sekundarni gubici (gubici zbog sekundarnih strujanja u kolu, kroz procepe između kola i kućišta kao i kola i glavčine),  $(\varepsilon_{hsif})_p$  – bezdimenzijski gubici u sifonu i  $(\varepsilon_{hi})_p$  – bezdimenzijski izlazni gubici iz sifona (indeks  $p$  – označava prototip).

Etinberg je utvrdio zavisnost navedenih gubitaka od  $Re$  broja, tako da se mogu napisati veze između bezdimenzijskih hidrauličkih gubitaka modela ( $m$ ) i prototipa ( $p$ ):

$$\frac{(\varepsilon_{hk})_p}{(\varepsilon_{hk})_m} = \sqrt[7]{\frac{Re_m}{Re_p}} \quad (\varepsilon_{hs})_p = (\varepsilon_{hs})_m \quad (30)$$

$$\frac{(\varepsilon_{hsif})_p}{(\varepsilon_{hsif})_m} = \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} \quad (\varepsilon_{hi})_p = (\varepsilon_{hi})_m$$

Iz izraza (29) i (30) je:

$$(\varepsilon_h)_p = (\varepsilon_{hk})_m \sqrt[7]{\frac{Re_m}{Re_p}} + (\varepsilon_{hs})_m + (\varepsilon_{hsif})_m \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} + (\varepsilon_{hi})_m \quad , \quad (31)$$

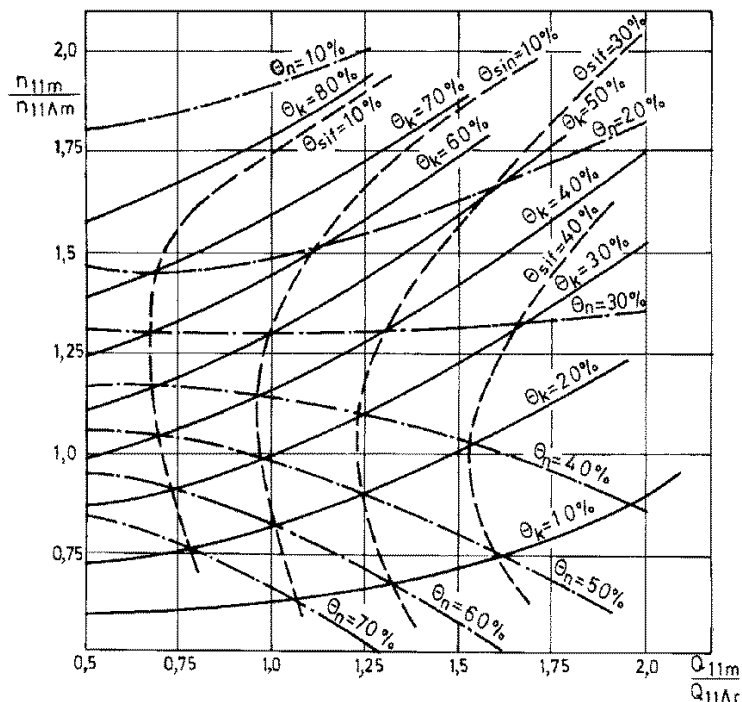
i dalje uvodeći procentualna učešća pojedinih bezdimenzijskih hidrauličkih gubitaka modela u ukupnim bezdimenzijskim hidrauličkim gubiticima modela:

$$\frac{(\varepsilon_{hk})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \Theta_k \quad , \quad \frac{(\varepsilon_{hs})_m + (\varepsilon_{hi})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \Theta_n \quad \text{i} \quad \frac{(\varepsilon_{hsif})_m}{(\varepsilon_h)_m} = \Theta_{sif} \quad , \quad (32)$$

dobija se:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = \frac{(\varepsilon_h)_p}{(\varepsilon_h)_m} = \Theta_k \sqrt[7]{\frac{Re_m}{Re_p}} + \Theta_{sif} \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} + \Theta_n \quad , \quad (33)$$

gde su:  $\Theta_k$  – učešće bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka u kolu i  $\Theta_{ksif}$  – učešće bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka u sifonu, dok je  $\Theta_n$  – učešće bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka koji se ne preračunavaju u ukupnim bezdimenzijskim hidrauličnim gubiticima modela turbine. Reynoldsov broj je definisan izrazom  $Re = D_1 \sqrt{2Y} / \nu$ .



Slika 3. Dijagram zavisnosti  $\theta_k$ ,  $\theta_{ksif}$  i  $\theta_n$  od bezdimenzijskih jediničnih parametara modela turbina.

Figure 3. Dependence of the  $\theta_k$ ,  $\theta_{ksif}$  and  $\theta_n$  on dimensional unit model turbine parameters.

Analizirajući zavisnost učešća pojedinih bezdimenzijski hidrauličnih gubitaka  $\theta_k$ ,  $\theta_{ksif}$  i  $\theta_n$  od jediničnog broj obrtaja  $n_{11m}$ , kao i od jediničnog protoka modela  $Q_{11m}$  za turbine različite brzohodosti  $n_{sp}$  određen je nomogram (prikazan na slici 3) zavisnosti  $\theta_k$ ,  $\theta_{ksif}$  i  $\theta_n$  od bezdimenzijskih jediničnih vrednosti  $n_{11m}/n_{11\Lambda m}$  i  $Q_{11m}/Q_{11\Lambda r}$ , gde  $\Lambda$  označava tačku najvećeg stepena korisnosti.

Etinbergova formula (33) za preračunavanje stepena korisnosti se može primeniti u širokoj radnoj oblasti turbine tako što se vrednosti  $\theta_k$ ,  $\theta_{ksif}$  i  $\theta_n$  određuju iz dijagrama prikazanog na Slici 3, a odnos  $Re_m/Re_p$  na osnovu relacije:

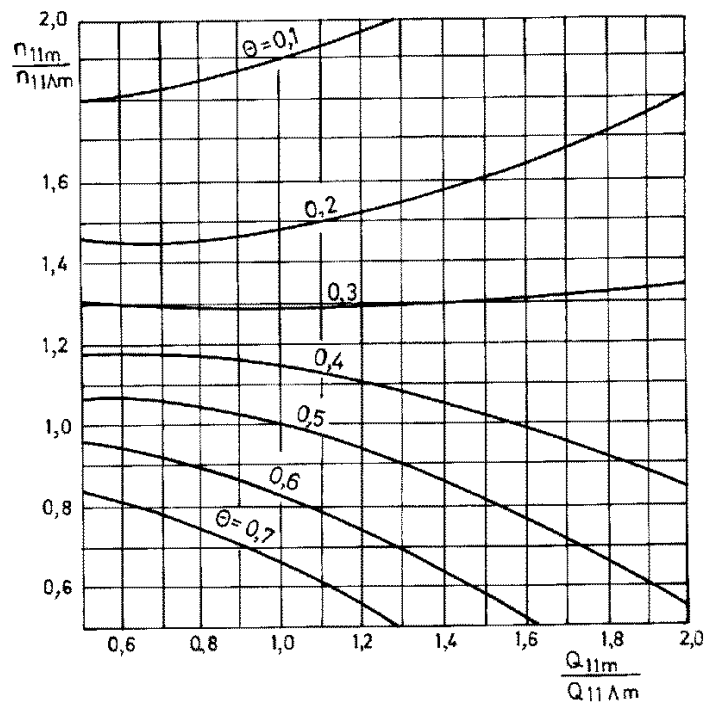
$$\frac{Re_m}{Re_p} = \frac{D_{1m} v_p}{D_{1p} v_m} \left( \frac{H_m}{H_p} \right)^{0.5} \quad (34)$$

U institutu CKTI (ЦКТИ – И. И. Ползунова) [1] obavljena su detaljna istraživanja gubitaka ener-gije u turbinama i kao rezultat tih istraživanja formula (33) je uprošćena i svedena na oblik:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = \frac{(\epsilon_h)_p}{(\epsilon_h)_m} = \theta + (1 - \theta) \left( \frac{Re_m}{Re_p} \right)^{1/n} \quad (35)$$

gde je:  $\theta$  – učešće bezdimenzijskih hidrauličnih gubitaka koji se ne preračunavaju u ukupnim bezdimenzijskim hidrauličnim gubicima. Veličina  $\theta$  se određuje iz dijagrama prikazanog na slici 4 znajući radnu tačku modela turbine.

Formule (33) i (35) se uglavnom primenjuju za preračunavanje stepena korisnosti Kaplanovih i cevnih turbina.



Slika 4. Dijagram zavisnosti  $\theta$  od bezdimenzijskih jediničnih parametara modela turbine.

Figure 4. Dependence of  $\theta$  on dimensionless unit model turbine parameters.

Za potrebe preračunavanja modelskih ispitivanja cevne turbine za hidroelektranu Dženpeg (Janpeg) u Kanadi stručnjaci LMZ [8] predložili su formulu u obliku:

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = (1 - V) + \left( \frac{Re_m}{Re_p} \right)^{0.2}, \quad (36)$$

gde veličina  $V$  predstavlja učešće preračunatog dela bezdimenzijskih gubitaka u ukupnim bezdimenzijskim gubicima modela turbine i iznosi:

$$V = a \frac{2 - 2 \eta_{hAm}}{2 - \eta_{hAm} + \eta_{hm}}, \quad (37)$$

U izrazu (37) su:  $\eta_{hAm}$  – najviši hidraulički stepen korisnosti modela,  $\eta_{hm}$  – hidraulički stepen korisnosti modela u radnoj tački.

Konstanta  $a$  zavisi od tipa turbine. Za cevne turbine u [2] izvršena je analiza gubitaka i određena je vrednost konstante  $a = 0.7$ . Merenjima [8] na HE Đerdap II pokazana je valjanost formule (36). Formula (36) sa (37) daje dobre rezultate preračunavanja u celoj radnoj oblasti cevne turbine.

Radna grupa IEC je 1985. godine predložila formulu za preračunavanje koja je data u [9], a ovde se daje postupak njenog izvođenja.

Preračunljivi bezdimenzijski gubici (trenje)  $\varepsilon_{htm}$  modela i preračunljivi bezdimenzijski gubici (trenje)  $\varepsilon_{htp}$  prototipa u odnosu na preračunljive bezdimenzijske gubitke u nominalnoj tački  $\varepsilon_{htnom}$  mogu se u zavisnosti od odgovarajućih  $Re$  brojeva prikazati u obliku:

$$\frac{(\varepsilon_{ht})_m}{(\varepsilon_{ht})_{nom}} = \left( \frac{Re_{unom}}{Re_{um}} \right)^{0.16}, \quad \frac{(\varepsilon_{ht})_p}{(\varepsilon_{ht})_{nom}} = \left( \frac{Re_{unom}}{Re_{up}} \right)^{0.16}, \quad (38)$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

gde je  $Re_u$  Rejnoldsov broj definisan na osnovu obimske brzine  $u_1$  na ulazu u kolo:

$$Re_u = \frac{u_1 D_1}{\nu} \quad (39)$$

Za model i prototip Rejnoldsovi brojevi su  $Re_{um}$  i  $Re_{up}$ , dok je  $Re_{unom}$  broj definisan za nominalnu (referentnu) tačku i iznosi  $Re_{unom} = 7 \cdot 10^6$ .

Nepreračunljivi bezdimenzijski gubici modela i prototipa su međusobno jednaki:

$$(\epsilon_{hv})_m = (\epsilon_{hv})_p = \text{const.} \quad (40)$$

Na slici (5) prikazani su bezdimenzijski gubici i hidraulički stepeni korisnosti modela, prototipa i u nominalnoj tački rada turbine.

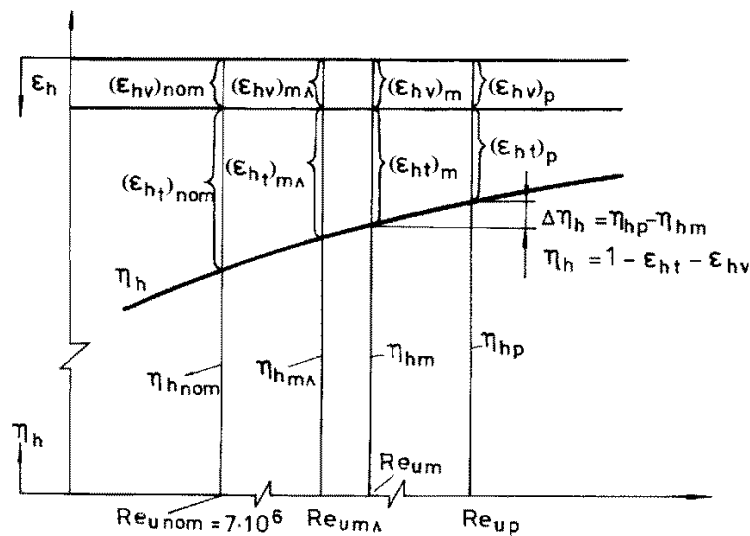
Povećanje stepena korisnosti prema (14), (38) i (40) je:

$$\Delta \eta_h = \eta_p - \eta_m = (\epsilon_h)_m - (\epsilon_h)_p = (\epsilon_{ht})_m - (\epsilon_{ht})_p =$$

$$(\epsilon_{ht})_{nom} \left[ \left( \frac{Re_{unom}}{Re_{um}} \right)^{0,16} - \left( \frac{Re_{unom}}{Re_{up}} \right)^{0,16} \right] \quad (41)$$

Vrednost preračunljivih bezdimenzijskih gubitaka  $(\epsilon_{ht})_{nom}$  se određuje poređenjem sa vrednošću preračunljivih bezdimenzijskih gubitaka  $(\epsilon_{ht})_\Lambda$  u optimalnoj tački modela predložili su formulu u obliku:

$$\frac{(\epsilon_{ht})_{m\Lambda}}{(\epsilon_{ht})_{nom}} = \left( \frac{Re_{unom}}{Re_{um\Lambda}} \right)^{0,16} \quad (42)$$



Slika 5. Bezdimezijski gubici modela, prototipa i u nominalnoj tački turbine.

Figure 5. Dimensionless model and prototype losses for the nominal operating point.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Koeficijent raspodele bezdimenzijskih gubitaka u nominalnoj tački za vrednost  $Re_{unom}$  je:

$$V_{nom} = \frac{(\varepsilon_{ht})_{nom}}{(\varepsilon_{ht})_{nom} + (\varepsilon_{hv})_{nom}} = \frac{(\varepsilon_{ht})_{nom}}{1 - \eta_{hnom}} \quad (43)$$

Za optimalnu tačku, izraz (43), postaje:

$$(\varepsilon_{ht})_{m\Lambda} + (\varepsilon_{hv})_{m\Lambda} = 1 - \eta_{hm\Lambda} \quad (44)$$

a za nominalnu tačku, na osnovu (43), može se napisati:

$$(\varepsilon_{ht})_{nom} + (\varepsilon_{hv})_{nom} = 1 - \eta_{hnom} = \frac{(\varepsilon_{ht})_{nom}}{V_{nom}} \quad (45)$$

Kako je  $(\varepsilon_{hv})_{nom} = (\varepsilon_{hv})_{m\Lambda}$  (40), to iz izraza (45) sledi:

$$(\varepsilon_{hv})_{nom} = (\varepsilon_{hv})_{m\Lambda} = (\varepsilon_{ht})_{nom} \frac{1 - V_{nom}}{V_{nom}} \quad (46)$$

Smenom izraza za  $(\varepsilon_{hv})_{m\Lambda}$  i izraza za  $(\varepsilon_{ht})_{m\Lambda}$  u (44) dobija se izraz za određivanje vrednosti:

$$(\varepsilon_{ht})_{nom} = \frac{1 - \eta_{hm\Lambda}}{\left(\frac{Re_{unom}}{Re_{um\Lambda}}\right)^{0,16} + \frac{1 - V_{nom}}{V_{nom}}} \quad (47)$$

Vrednosti koeficijenta preraspodele gubitaka  $V_{nom}$  koji odgovaraju  $Re_{unom} = 7 \cdot 10^6$  određeni su na modelima turbina i dati u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednosti za  $V_{nom}$ .

Table 2.  $V_{nom}$  values for various model turbine types.

Tip turbine	$V_{nom}$
Aksijalne i poluaksijalne turbine (Kaplan, dijagonalne i cevne), aksijalne ili poluaksijalne pumpe turbine (reverzibilne mašine) koje rade u turbinskom režimu, sa pokretnim lopaticama radnog kola i pokretnim ili nepokretnim lopaticama sprovodnog aparata.	0.8
Aksijalne ili poluaksijalne turbine sa nepokretnim lopaticama radnog kola.	0.7
Fransisove turbine i Fransisove pumpe – turbine koje rade u turbinskom režimu.	0.7

Veličina  $V_{nom}$ , data u tabeli 2, predstavlja srednju vrednost dobijenu ispitivanjima modela turbina hidrauličnih glatkih površina.

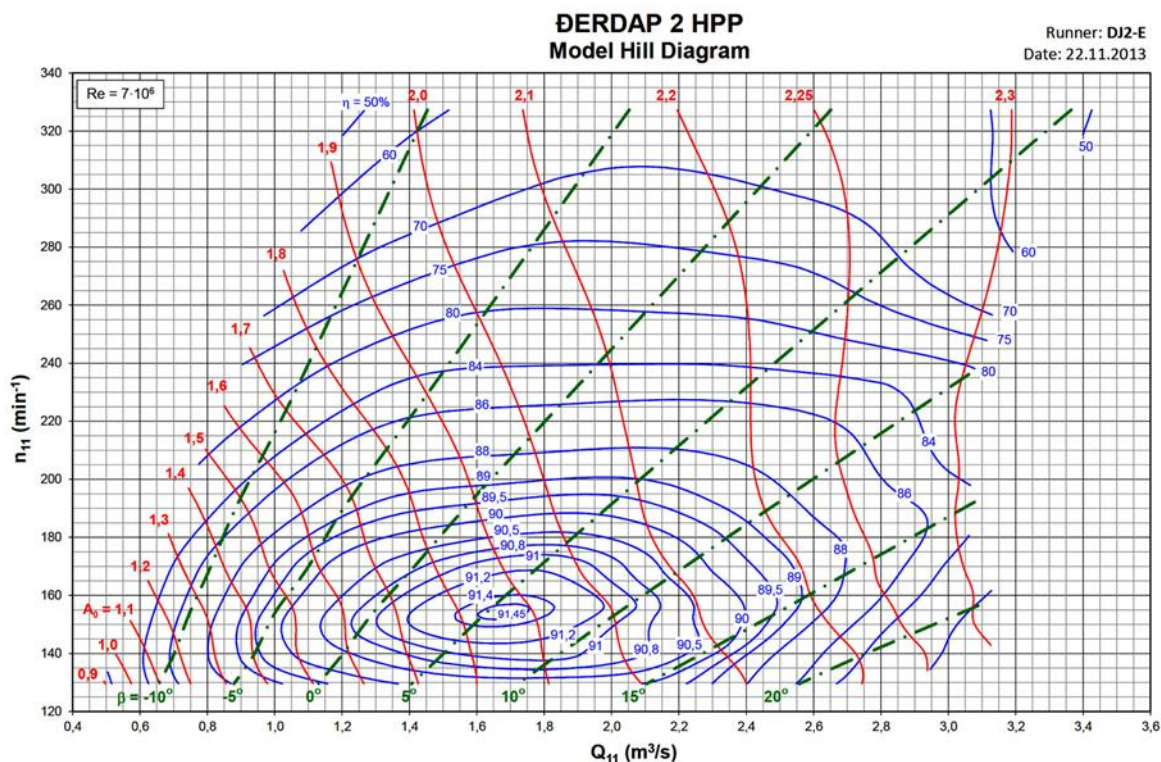
Preračunavanje se vrši pomoću formule (41) pošto se prethodno pomoću jednačine (47) odredi vrednost  $(\varepsilon_{ht})_{nom}$  korišćenjem vrednosti za  $V_{nom}$  iz tabele 2. Formula (41) je preporuka IEC na osnovu koje treba preračunati hidraulični stepen korisnosti modela na glavno izvođenje. Međutim, treba reći da ni ova formula ne daje apsolutno zadovoljavajuće rezultate za sve turbine u širokoj radnoj oblasti.



### 3 Prikaz preračunatih karakteristika modela na prototip

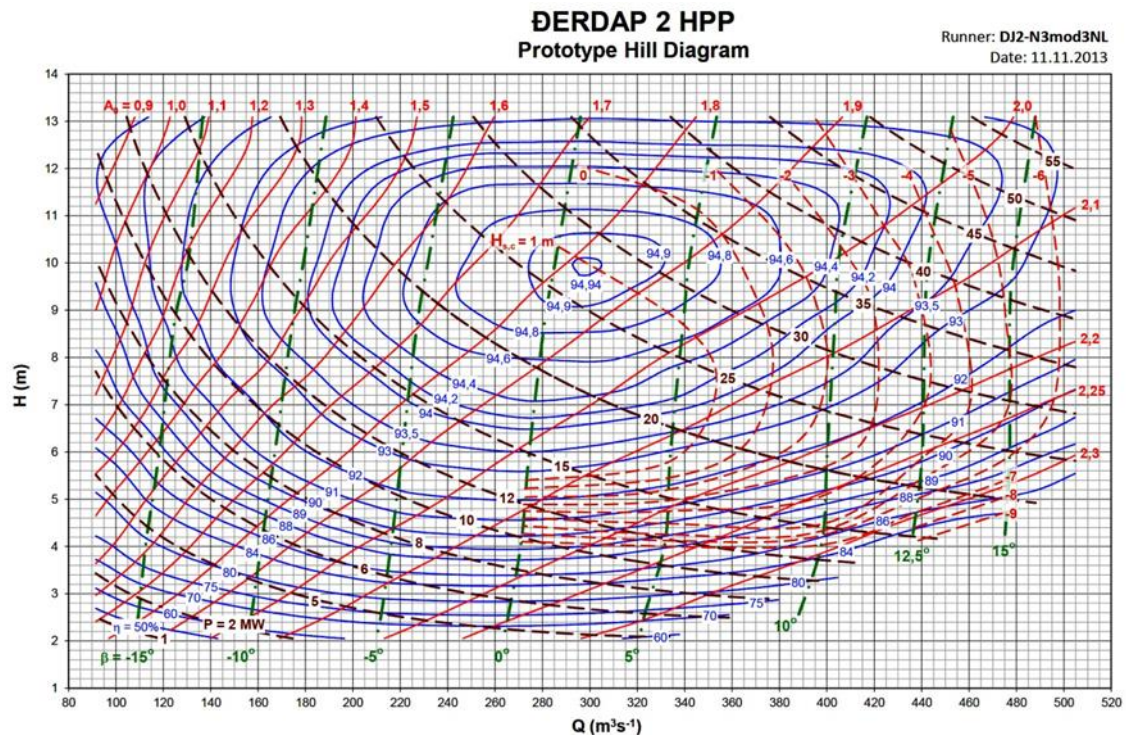
Rezultati preračunavanja sa modela na prototip prikazani su za cevnu turbinu HE Đerdap 2. Preračunavanje je izvršeno na osnovu izraza (41) i (42). Celokupan postupak preračunavanja svih relevantnih veličina (datih u abstraktu) na veličine: neto pad  $H_p$ , protok  $Q_p$ , snaga  $P_p$  i kavitacijski koeficijent  $\sigma_p$ , dat je u radu [4]. Na slici 6. data je univerzalna karakteristika modela postojeće cevne turbine HE Đerdap 2 koja je dobijena ispitivanjima u Laboratoriji LMH EPFL – Lozana, Švajcarska za  $Re_{nom} = 7 \cdot 10^6$ .

Univerzalna karakteristika modela ( $Q_{11}, n_{11}$ ) je preračunata na eksploatacionu karakteristiku ( $Q, H$ ) slika 7., pri čemu je prečnik obrtnog kola prototipa  $D_{1p} = 7.5$  m i brzina obrtanja  $n_p = 62.5$  min<sup>-1</sup>. Optimalni stepen korisnosti modela  $\eta_{m\Lambda} = 0.9145$  je preračunat na optimalni stepen korisnosti proto-tipa  $\eta_{p\Lambda} = 0.9494$ . Ostali stepeni korisnosti prototipa, u celokupnom radnom području, određuju se iz odgovarajućih radnih tačaka modela.



Slika 6. Univerzalna karakteristika modela postojeće turbine HE Đerdap 2 prečnika  $D_{1m} = 0.34$  m za  $Re_{nom} = 7 \cdot 10^6$ .

Figure 6. Model hill chart ( $Q_{11}, n_{11}$ ) of existing turbine PS Djerdap 2, diameter  $D_{1m} = 0.34$  m and  $Re_{nom} = 7 \cdot 10^6$ .



Slika 7. Eksploataciona protočna karakteristika prototipa postojeće turbine HE Đerdap 2, prečnika  $D_{1p} = 7.50$  m i brzine obrtanja  $n_p = 62.5$  min<sup>-1</sup>.

Figure 7. Prototype hill chart ( $Q, H$ ) of existing turbine PS Djerdap 2, diameter  $D_{1p} = 7.50$  m and rotational speed  $n_p = 62.5$  min<sup>-1</sup>.

## 4 Zaključak

Sve navedene formule u ovom radu mogu se primeniti za preračunavanje stepena korisnosti sa ispitnog modela na prototip (glavno izvođenje). Treba voditi računa da formule grupe I i II daju približno dobre rezultate u okolini optimalne tačke, međutim formule grupe III se mogu primeniti u celoj oblasti univerzalne karakteristike. Formula IEC60193 je prihvaćena kao najbolja od velikog broja istraživača, i uzeta je kao standard. Ovom formulom su preračunate sve ispitane modelske karakteristike naših hidroelektrana.

Izmereni rezultati modela, koji su dobijeni pri različitim  $Re$ -brojevima (razlog ovome su: da brzi-na obrtanja ne mora biti konstantna i neto pad može biti različit, a merenja treba da budu obavljena za različite konstantne jedinične brzine obrtanja) moraju se preračunati na nominalni (referentni) Reynold-sov broj  $Re_{nom} = 7 \cdot 10^6$ , radi upoređenja karakteristika modelskih ispitivanja. Svođenje  $Re$  modela do-bijenog prilikom ispitivanja na  $Re_{nom}$  vrši se pomoću date formule IEC60193. Nakon svođenja vrši se preračunavanje stepena korisnosti na prototip za  $Re_p = (u_p D_p) / \nu$ , pri čemu su zadati:  $D_p$  – prečnik obrtnog kola prototipa,  $u_p = D_p \omega / 2$  – obimska brzina,  $\omega$  – ugaona brzina i  $\nu$  – kinematska viskoznost. Problem preračunavanja sa modela na prototip nije zatvoren. On predstavlja veliki izazov istraživačima. Cilj i veliku korist od dobijanja rešenja visoke tačnosti u celom radnom području, da se ispitivanja kvaliteta turbine obavi samo u laboratorijskim uslovima.

## Literatura

1. Benišek M., (1998) *Hidrauličke turbine*, Mašinski fakultet, Beograd.
2. Benišek M., Vušković I., Ignjatović B. (1982) Efficiency scale-up calculation for tube turbines at the operating point of best efficiency and outside the point of best efficiency, *Proceedings of IAHR Symposium „Operating problems of Pump Stations and Power Plants“*, Vol II, 57/1-12, Amsterdam.
3. Benišek M., Nedeljković M., Petković Z. (1989) Garancijska i kompletna ispitivanja cevnog agregata br. 5 u HE Đerdap II, *Izveštaj Mašinskog fakulteta u Beogradu*, knjiga 5/1 do 5, Beograd.
4. Benišek M. (2012) The turbines model test during reconstruction power plants by the increasing turbine`s power, International Symposium Power Plants, Zlatibor 30.10 - 2.11.2012. (on CD).
5. Čantrak S., Benišek M., Pavlović M., Marjanović P., Crnojević C., Petković Z. (1989) *Mehanika fluida*, Građevinska knjiga, Beograd.
6. Чистяков А. М. (1972) *Исследования гидротурбинных блоков ГЭС*, Энергия – Ленинградское отделение, Ленинград.
7. Этинберг И. Э. (1965) *Теория расчет проточной части повротнолопастних гидротурбин*, Машиностроение, Москва – Ленинград.
8. Гушин В. М., Пылев М. И., Сидоренко Ф., В. (1980) Натурниа испитания гидроагрегата ГЭС Дженпег, *Энергомашиностроение*, No 9, str. 17-19.
9. IEC 600193 (1999-1) *Hydraulic turbines, storage pumps and pump turbines model acceptance tests*, International standard.

## U susret monografiji „Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica“

Stevan Prohaska<sup>1</sup>, Aleksandra Ilić<sup>2</sup>, Vladislava Bartoš-Divac<sup>3</sup>, Milena Jelovac<sup>4</sup>,  
Samir Čatović<sup>5</sup>, Srđan Marjanović<sup>6</sup>

APSTRAKT: U toku je izrada monografije „Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica“, koju zajednički realizuju Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ i Republički hidrometeorološki zavod Srbije uz učešće Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu. Osnovna ideja je da se na profilima hidroloških stanica izvrše nove obrade teorijskih hidrograma velikih voda, koristeći širi pristup koji vodi računa o odnosu osnovnih parametara hidrograma velikih voda (maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa). Bazni podaci koji su korišćeni za proračun su zvanični podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda sa 132 profila hidroloških stanica na teritoriji Srbije južno od Save i Dunava, na kojima je moguće analizirati osmotrene podatke. Pri tome su korišćene sve raspoložive vremenske serije srednjednevni i maksimalnih godišnjih protoka. Periodi obrade su bili od početka rada određene hidrološke stanice do zaključno sa 2015. godinom. U ovom radu daje se prikaz koje su obrade izvršene, sa kojim podacima i kako će u monografiji biti prezentirani rezultati.

Ključne reči: velike vode, hidrološke stanice, parametri hidrograma, maksimalna ordinate, zapremina poplavnog talasa

## Towards the monograph „Flood Flows at Gauged Catchments in Serbia“

ABSTRACT: Monograph “Flood Flows at Gauging Profiles in Serbia” is under preparation, organized by the Institute for Water Resources “Jaroslav Černi”, Belgrade and Republic Hydrometeorological Service of Serbia with the participation of Faculty of Civil Engineering and Architecture, Niš. The basic idea is that at profiles of hydrological stations run new theoretical flood waves processing, using a broader approach that takes into account the respect of the basic parameters of flood flow hydrograph (maximal ordinate and volume of the flood wave). The base data used for the calculation are the official data of the Hydrometeorological Service at 132 profiles of hydrological stations on the territory of Serbia south of the Sava and Danube rivers, where the data are good enough to be analyzed. All available time series were used, average daily as well as maximum annual flows. This paper gives an overview of calculations that are performed, with which data and how results will be presented in the monograph.

Key words: flood flows, hydrologic stations, parameters of flood flow hydrograph, maximal ordinate, volume of flood wave

<sup>1</sup> Prof. dr. Stevan Prohaska, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd, [stevan.prohaska@jcerni.rs](mailto:stevan.prohaska@jcerni.rs)

<sup>2</sup> M. Sc Aleksandra Ilić, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, [aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs](mailto:aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>3</sup> M. Sc Vladislava Bartoš Divac, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd, [vladislava.bartos@jcerni.rs](mailto:vladislava.bartos@jcerni.rs)

<sup>4</sup> M. Sc Milena Jelovac, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd, [milena.jelovac@jcerni.rs](mailto:milena.jelovac@jcerni.rs)

<sup>5</sup> M. Sc Samir Čatović, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, [samir.catovic@hidmet.gov.rs](mailto:samir.catovic@hidmet.gov.rs)

<sup>6</sup> M. Sc Srđan Marjanović, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, [srdjan.marjanovic@hidmet.gov.rs](mailto:srdjan.marjanovic@hidmet.gov.rs)

## 1 Uvodne napomene

Do sada u Srbiji nije izvršena ni jedna kompletna hidrološka obrada velikih voda reka Srbije na profilima hidroloških stanica po jedinstvenoj metodologiji i za više parametara. Sve što je do sada urađeno uglavnom se odnosilo na statističko-probabilističku analizu serija maksimalnih godišnjih protoka, ređe zapremina poplavnih talasa i, veoma retko, trajanja poplavnih talasa. Izuzev obrada koje su rađene za potrebe izrade vodoprivrednih osnova, gde su, uglavnom, obrađeni podaci za veći broj hidroloških stanica, sve ostale obrade rađene su za prostorno manje teritorije i namenjene su rešavanju određenih vodoprivrednih problema u slivovima manjih ili većih reka. Sa druge strane obrade su radile različite institucije u Srbiji, po različitim metodologijama i za različite periode obrade podataka o velikim vodama. Ono što je dobro, svi obrađivači su bili u obavezi da rade sa oficijelnim podacima, a mišljenje na rezultate obrade davao je RHMZ Srbije.

U takvim okolnostima Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" je, u okviru programa rada na naučnom projektu TR "Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije", koji finansira Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj, uvrstio temu "Sveobuhvatna analiza hidrograma velikih voda Srbije na hidrološkim stanicama". Rezultati realizacije teme naučnog projekta, koji se odnose na definisanje teorijskih hidrograma velikih voda različitih verovatnoće pojave biće detaljno prikazani u budućoj monografiji "Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica". U okviru ovoga rada prikazuje se koje su obrade izvršene za potrebe Monografije, sa kojim podacima i kako se prikazuju rezultati.

Bazni podaci koji su korišćeni za proračun su zvanični podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije sa 132 odabrane hidrološke stanice na teritoriji Srbije južno od Save i Dunava, pri čemu su korišćeni svi raspoloživi podaci, srednjednevni i maksimalni godišnji protoci (apsolutni maksimumi). Namera obrađivača je bila da se analizira što veći broj profila hidroloških stanica, a izbor stanica je izvršen na osnovu mogućnosti registrovanja stvarno maksimalnog talasa velikih voda. Periodi obrade su bili različiti, od početka rada određene hidrološke stanice do zaključno sa 2015. godinom.

Rad na ovoj monografiji svestrano je podržao RHMZ Srbije, obezbeđujući zvanične podatke, a sa Institutom "Jaroslav Černi" učestvovali su u zajedničkom izdavanju monografije "Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica". Eksperti iz RHMZ-a učestvovali su u izradi monografije u svojstvu recenzenata u hodu. Pored navedenih, u izradi monografije učestvovao je i ekspert sa Građevinskog arhitektonskog fakulteta u Nišu.

## 2 Tipovi izvršenih hidroloških obrada

Kao što je rečeno, osnova za analizu velikih voda Srbije bili su raspoloživi zvanični podaci vremenskih serija srednjednevnih protoka i maksimalnih godišnjih protoka na 132 hidrološke stanice na teritoriji Srbije južno od Save i Dunava.

Proračun maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa izvršen je korišćenjem serija srednjednevnih protoka  $Q_{i,j}$  gde je  $i$  redni broj dana u godini  $i=1,2,\dots,365$  (366), a  $j$  redni broj godine  $j=1,2,\dots,N$  a  $N$  ukupan broj godina u seriji  $Q_{i,j}$ , po jednačini (1):

$$W_{\max,j}(\text{m}^3) = \sum_{i=T_0}^{T_0+T_b} Q_{i,j}(\text{m}^3/\text{s}) \cdot 86400 \quad (1)$$

gde je:  $T_b$  - baza maksimalnog hidrograma u  $j$ -toj godini (dan),  $T_0$  - početni dan maksimalnog hidrograma u  $j$ -toj godini.

Na taj način dobijene su vremenske serije maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa –  $W_{\max,j}$  na svim razmatranim profilima hidroloških stanica.

Neophodno je napomenuti da je izdvajanje maksimalnih zapremina talasa iz godišnjih hidrograma srednjednevnih protoka bilo dosta komplikovano, naročito u slučaju pojave složenih hidrograma (superpozicija iz više prostih) i da je, u početnom trenutku, sama procedura sprovedena sa velikim stepenom subjektivnosti obrađivača. Detaljnije usaglašavanje (korigovanje) sračunatih

zapremina poplavnih talasa izvršeno je u postupku formiranja dijagrama koincidencija maksimalnih protoka i zapremina poplavnih talasa i proračuna teorijskih hidrograma velikih voda primenom metode graničnog intenziteta oticaja (GIO), što će u nastavku biti objašnjeno.

Statističko-probabilistička analiza maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa izvršena je primenom klasične procedure prilagođavanja teorijskih i empirijskih funkcija raspodele. Korišćeni su Pirson 3, Log-Pirson 3, Gumbel, Log –Normalna 3 i Log-Normalna 2 raspodela. Kvalitet prilagođavanja proveren je primenom tri testa:  $\chi^2$ , Kolmogorov-Smirnov i  $n\omega^2$  testa. Usvojene su one teorijske krive raspodele koje su pokazale najbolje slaganje prema primenjenim testovima.

Za sve razmatrane profile hidroloških stanica, korišćenjem modela PROIL (dvodimenzionalni zakoni raspodele veovatnoća), na bazi podataka o maksimalnim godišnjim protocima  $Q_{max}$  i maksimalnim godišnjim zapreminama  $W_{max}$  za sinhroni period (iste godine za koje postoje podaci na svim stanicama), uspostavljene su korelacione zavisnosti i definisane linije koincidencije navedenih parametara. Za marginalne verovatnoće uspostavljenih dvodimenzionalnih verovatnoća usvojene su, uglavnom, vrednosti is sprovedene statističko-probabilističke analize izvršene na bazi podataka za ceo raspoloživi niz. Odstupanja su, u izuzetnim slučajevima, dozvoljena samo u slučaju značajnih razlika između marginalnih verovatnoća, produkta dvodimenzionalnih raspodela i vrednosti dobijenih primenom klasične statističko-probabilističke analize, što je posledica korišćenja različitih dužina vremenskih serija (kod statističko-probabilističke analize maksimalno moguće dužine, a kod koincidencija samo sinhrona serije oba parametra).

Na dijagramima dvodimenzionalne verovatnoće pravim linijama prikazane su marginalne verovatnoće za oba parametra hidrograma velikih voda. Presečne tačke marginalnih verovatnoća imaju koordinate  $(Q_{max,p}; W_{max,p})$ , gde je  $p$  verovatnoća pojave. Na osnovu dobijenih presečnih tačaka  $(Q_{max,p}; W_{max,p})$ , određeni su teorijski hidrogrami velikih voda po metodi graničnog intenziteta oticaja (GIO) na svim razmatranim profilima hidroloških stanica. Parametri metode GIO tarirani su tako da odstupanje računskih vrednosti maksimalnih protoka i zapremina poplavnih talasa dobijenih metodom GIO od korespondentnih vrednosti dobijenih statističko-probabilističkom analizom budu minimalna. Pri tome je, istovremeno, vršeno i prostorno usaglašavanje bilansa zapremina poplavnih talasa duž pojedinih slivova, kao i teorijskih hidrograma (vreme pojave "pika"), dobijenih po metodi GIO. Sve eventualne nelogičnosti otklonjene su korigovanjem podataka serije maksimalnih zapremina poplavnih talasa  $W_{max,j}$  i ponavljanjem kompletne procedure. Napominje se da serije maksimalnih godišnjih protoka nisu menjane u postupku tariranja parametra metode GIO.

Ključni rezultat primene model PROIL je definisanje verovatnoće prevazilaženja  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} > P$  na razmatranim profilima hidroloških stanica na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava. Prema preporukama rada (Prohaska i Ilić – Teorijski hidrogrami velikih voda – tema i dilema, 2018.) za praktično korišćenje, u oblasti zaštite od poplava, najcelishodnije je raditi sa sledećim kombinacijama parametara istih marginalnih verovatnoća, a za unapred definisanu verovatnoću prevazilaženja  $P$  i to:

- Maksimalni godišnji protok – maksimalna zapremina poplavnog talasa istih marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$
- Maksimalni godišnji protok iste marginalne verovatnoće – odgovarajuća/korespondentna zapremina poplavnog talasa za usvojenu verovatnoću prevazilaženja –  $P(Q_{max,P}, W_{cor,P})$
- Odgovarajući/korespondentni maksimalni godišnji protok za usvojenu verovatnoću prevazilaženja – maksimalna zapremina poplavnog talasa iste marginalne verovatnoće –  $P(Q_{cor,P}, W_{max,P})$
- Najverovatnija kombinacija (Mod) maksimalnog godišnjeg protoka i maksimalne zapremine poplavnog talasa za odabranu verovatnoću prevazilaženja –  $P(Q_{Mod,P}, W_{Mod,P})$ .

Za sve razmatrane hidrološke stanice sračunati su teorijski hidrograma za sve navedene kombinacije protoka i zapremina i za verovatnoću prevazilaženja  $P=1.0\%$ .

Na kraju su date preporuke za korišćenje gore izložene procedure, što je detaljno, prikazano u radu (Prohaska i Ilić – Teorijski hidrogrami velikih voda – tema i dilema, 2018).

### 3 Obim rezultata prikazanih u monografiji

U monografiji “Velike vode Srbije na hidrološkim stanicama” prikazani su korišćeni osnovni podaci o velikim vodama na hidrološkim stanicama na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava, izabrane topografsko-morfološke karakteristike slivova uzvodno od hidroloških stanica i rezultati obrade.

Osnovni parametri hidrograma velikih voda, maksimalni godišnji protoci –  $Q_{max,i}$  i maksimalne godišnje zapremine poplavnih talasa –  $W_{max,i}$  gde je  $i=1,2,\dots,N$ ,  $N$  – ukupan broj podataka, prikazane su numerički.

Morfološke karakteristike sliva do profika hidroloških stanica: površina slina  $F$  –  $km^2$ , dužina toka  $L$  - km, srednje uravnat pad  $I$  - %, takođe su prikazane numerički.

Rezultati izvršenih proračuna dati su za sve profile hidroloških stanica, grafički i numerički. Numerički je prikazano:

- Verovatnoće pojave maksimalnih godišnjih protoka za usvojenu teorijsku krivu raspodele i po metodi graničnog intenziteta oticaja (GIO),
- Verovatnoće pojave maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa za usvojenu krivu raspodele i po metodi graničnog intenziteta oticaja (GIO),
- Dijagram koincidencije (linije istih verovatnoća i linija prevazilaženja verovatnoća) maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa,
- Teorijski hidrogrami velikih voda po metodi GIO za različite verovatnoće pojave, a za kombinaciju osnovnih parametara  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$
- Dijagrami koincidencije za verovatnoću prevazilaženja  $P = 1.0\%$ , maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa, sa naznačenim položajima karakterističnih tačaka
- Teorijski hidrogrami velikih voda po metodi GIO za karakteristične tačke na verovatnoći prevazilaženja  $P=1.0\%$ ,

Grafički su prikazani:

- Maksimalni godišnji protoci i zapremine poplavnih talasa
- Elementi sračunatih teorijskih hidrograma po metodi GIO za varijantu  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$
- Bilans zapremina teorijskih hidrograma po metodi GIO, po glavnim slivnim područjima, a za varijantu  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$
- Kombinacije osnovnih parametara velikih voda za različite verovatnoće prevazilaženja.

### 4 Namena monografije

Monografija će biti izdata kao zajednička publikacija Instituta za vodoprivredu “Jaroslav Černi” i Republičkog hidrometeorološkog Zavoda Srbije.

Namenjena je stručno-naučnom kadru u oblasti hidrologije za sagledavanje karakteristika režima velikih voda na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava, sa napomenom da se rezultati publikovani u njoj ne mogu koristiti kao merodavni za dimenzionisanje objekata za zaštitu od poplava i ostalih hidrotehničkih objekata. Naime, sve obrade izvršene za potrebe izrade Monografije izvršene su sa protocima dobijenim na osnovu registrovanih vodostaja (i protoka određenih sa krivih protoka ili krivih propusne moći) na hidrološkim stanicama. Na mnogim manjim vodotocima u Srbiji na potezu uzvodno od hidrološke stanice dolazi do izlivanja, pa su nivoi registrovani na profilu hidrološke stanice niži od nivoa koji bi se realizovali da nije došlo do izlivanja.

Iako se dobijeni rezultati ne mogu koristiti kao merodavni za dimenzionisanje, oni pružaju prostornu sliku o maksimalnom oticaju na širokoj teritoriji, dobijenu sa podacima nakon prolaska poplavnog talasa 2014. godine, koji je na velikom broju vodotoka predstavlja najveći ikada zabeleženi poplavni talas.

## **Analiza srednjih voda u Srbiji na osnovu kartiranih klimatoloških podataka u periodu 1961-2010**

Jovan Blagojević<sup>1</sup>, Jasna Plavšić<sup>2</sup>, Samir Čatović<sup>3</sup>, Andrijana Todorović<sup>4</sup>

**APSTRAKT:** U radu je sprovedena analiza prosečnog oticaja u Srbiji metodama za neizučene slivove na 46 izabrana profila sa slivnim površinama do 1000 km<sup>2</sup> na kojima postoje podaci merenja protoka vode. Primenjena je metoda Turka i metoda Langbajna, koje kao ulazne podatke koriste srednje temperature i prosečne godišnje padavine na slivu. Ulazni podaci za proračune u ovom radu dobijeni su korišćenjem digitalnog repozitorijuma CarpatClim, u kome se podaci nalaze u rasterskom formatu prostorne rezolucije oko 10 km x 10 km i pokrivaju period 1961-2010. Izučeni slivovi su tretirani kao neizučeni i izračunati srednji protoci su upoređeni sa izmerenim srednjim protocima. Analize su pokazale da je poželjna kalibracija parametara u metodi Langbajna kako bi se došlo do pouzdanijih ocena srednjih voda.

**Cljučne reči:** srednje vode, neizučeni slivovi, metoda Turka, metoda Langbajna, rasterski klimatološki podaci

## **Mean flows in Serbia using gridded climatological data for 1961-1990**

**ABSTRACT:** The paper presents a study of estimating mean flows in Serbia by using the methods for ungauged basins applied to 46 gauged basins with drainage area up to 1000 km<sup>2</sup>. The applied methods are the water balance method with Turc equation for evaporation, and the Langbein's method. Both methods use mean temperatures and mean annual precipitation over the basin as the input data. In this paper, the climatological input is obtained from the digital climatological database CarpatClim, which is provided in the grid format with horizontal resolution of about 10 km x 10 km and cover the 1961-2010 period. The gauged basins are treated as ungauged and the estimated mean flows are compared to those calculated from the observed data. The study has shown that the Langbein's method provides better results, but that it needs calibration of one of its parameters in order to provide more reliable mean flow estimates.

**Keywords:** mean flows, ungauged catchments, Turc method, Langbein method, gridded climatological data

---

<sup>1</sup> Jovan Blagojević, student, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [J.blagojevic@hotmail.com](mailto:J.blagojevic@hotmail.com)

<sup>2</sup> Dr Jasna Plavšić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [jplavsic@grf.bg.ac.rs](mailto:jplavsic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Samir Čatović, dipl. građ. inž., Republički hidrometeorološki zavod, [samir.catovic@hidmet.gov.rs](mailto:samir.catovic@hidmet.gov.rs)

<sup>4</sup> Dr Andrijana Todorović, docent, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [atodorovic@grf.bg.ac.rs](mailto:atodorovic@grf.bg.ac.rs)



## 1 Uvod

Srednje vode predstavljaju važnu odliku hidrološkog režima vodotoka i ukazuju na vodnost slivnog područja. Analizom srednjih voda dobijaju se pokazatelji oticaja koji se koriste u rešavanju mnogih zadataka u vodoprivredi i hidrotehnici. Procena prosečnih količina vode koje se mogu očekivati u nekom profilu vodotoka se može dati na osnovu analiza niza izmerenih vrednosti protoka. Takav pristup zahteva postojanje hidrološke stanice u profilu od interesa sa dovoljno dugom vremenskom serijom podataka o izmerenim protocima. Međutim, ukoliko to nije slučaj i hidrološka stanica ne postoji, sliv je hidrološki neizučeni. Tada se koriste druge metode za procenu prosečnih protoka.

U radu Jankovića (2015) ispitana je primenljivost primene dve metode, metode Turka i Langbajna, za određivanje srednjeg višegodišnjeg oticaja na području Srbije. Ove dve metode se zasnivaju na klimatološkim podacima, pa su relativno jednostavne za primenu. Janković (2015) je ove metode primenio na 17 manjih izučenih slivova u Srbiji i sproveo verifikaciju rezultata dobijenih metodama Turka i Langbajna. Na osnovu dobijenih rezultata zaključio je da su obe metode primenljive uz određene korekcije, ali je dao prednost primeni metode Langbajna zbog nešto boljeg slaganja sa izmerenim podacima.

U primeni ove dve metode za ocenu prosečnog oticaja kao ulazni podaci koriste se prosečne višegodišnje padavine i temperature na slivu. Ovi ulazni parametri se mogu dobiti nekom vrstom prostornog osrednjavanja (npr. Tisenovim poligonima) na osnovu podataka sa više kišomernih i klimatoloških stanica na slivu i njegovoj okolini.

U okviru projekta CarpatClim (Szalai et al., 2013) prikupljeni su podaci o velikom broju klimatoloških podataka za područje Karpata za period 1961-2010. Uz ekstenzivnu kontrolu podataka, popunjavanje nizova i pažljivu interpolaciju, u ovom projektu su formirane klimatološke digitalne karte za područje Karpata. Postojanje ovakvih podloga ima potencijal za primenu u hidrologiji, a naročito u primeni opisanih metoda Turka i Langbajna za procenu prosečnog oticaja na neizučenim slivovima.

Cilj ovog rada je da se utvrdi primenljivost metoda Turka i Langbajna na malim neizučenim slivovima uz korišćenje rasterskih podataka o padavinama i temperaturama iz projekta CarpatClim. Rasterski podaci o prosečnim padavinama i temperaturama iz baze CarpatClim su u ovom radu korišćeni da se odrede prosečne vrednosti na izabranim slivovima. Slivovi koji su odabrani za proračune su u prirodnom režimu, površine do 1000 km<sup>2</sup>. Ocena primenljivosti razmatranih metoda na neizučenim slivovima data je na osnovu poređenja izmerenih srednjih protoka sa rezultatima proračuna metodama Turka i Langbajna sprovedenih na izučenim slivovima.

## 2 Metodologija

### 2.1 Metoda bilansa prema Turku

Veličine koje se uzimaju u obzir pri razmatranju bilansa pomoću ove metode su: padavine kao ulaz u sistem, gubici koje u potpunosti čini evapotranspiracija i oticaj kao izlaz iz sistema. Jednačina kojom se opisuje bilans glasi:

$$P_0 = D_0 + Q_0 \quad (1)$$

gde su  $P_0$  prosečne padavine na slivu,  $D_0$  prosečni gubitak vode na slivu (evapotranspiracija) i  $Q_0$  prosečni oticaj (sve veličine se izražavaju u mm). Sve prosečne veličine treba da budu izračunate za dovoljno dug, reprezentativan period koji uključuje i sušne i vodne godine. Time se uvodi pretpostavka da veličina  $\pm\Delta Q_0$ , koja predstavlja promenu zapremine na slivu usled iscrpljivanja ili dopunjavanja podzemnih voda, teži nuli. Za izračunavanje gubitka se primenjuje formula Turka (Janković, 2015):

$$D_0 = P_0 \cdot \left(0.9 + \frac{P_0^2}{L^2}\right)^{-0.5} \quad (2)$$

Veličina  $L$  u gornjoj formuli se određuje kao:

$$L = 0.5 \cdot T_0^3 + 25 \cdot T_0 + 300 \quad (3)$$

gde je  $T_0$  prosečna temperatura na slivu izražena u °C. Da bi izraz (2) bio dimenziono korektan, može se smatrati da se parametar  $L$  izražava u mm, iako u fizičkom smislu  $L$  nema tumačenje. Kombinovanjem izraza (1) i (2) može se eksplicitno napisati izraz za proračun sloja oticaja  $Q_0$  u mm:

$$Q_0 = P_0 \cdot \left(0.1 + \frac{P_0^2}{L^2}\right)^{-0.5} \quad (4)$$

## 2.2 Metoda Langbajna

Metoda Langbajna koristi iste ulazne podatke kao i metoda Turka: prosečne padavine na slivu  $P_0$  i prosečnu temperaturu na slivu  $T_0$ . Srednji višegodišnji sloj oticaja sa sliva  $Q_0$  dobija se iz sledeće zavisnosti:

$$\frac{Q_0}{E} = f\left(\frac{P_0}{E}\right) \quad (5)$$

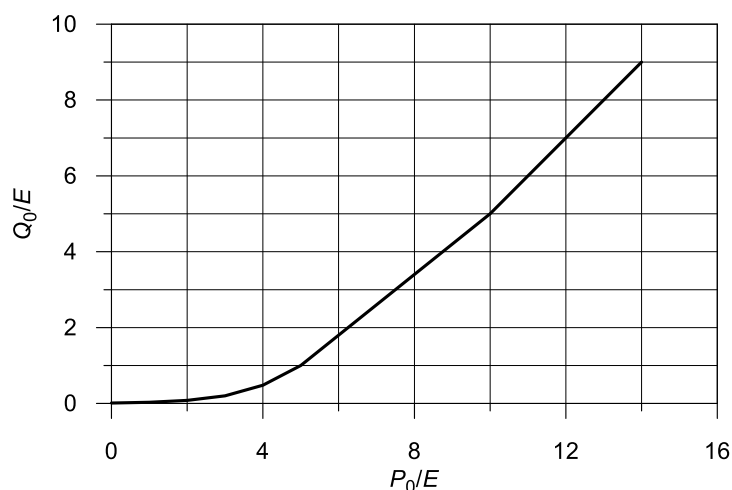
gde je  $P_0$  prosečna visina padavina,  $Q_0$  prosečan sloj oticanja na slivu i  $E$  tzv. temperaturni faktor. Za  $P_0$  i  $T_0$  unete u cm i °C,  $E$  se računa pomoću formule:

$$\log E = 0,027 \cdot T_0 + \Theta \quad (6)$$

Član  $\Theta$  u gornjoj formuli je originalno dat kao vrednost  $\Theta = 0.886$ , ali on može biti i kalibrisan u odnosu na izmerene podatke (što je kasnije prikazano). Zavisnost (5) definisana je tabelarno (Janković, 2015) i prikazana je u Tabela 1 i na Slika 1.

Tabela 1: Zavisnost  $Q_0/E$  od  $P_0/E$

$P_0/E$	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	1.00	1.80	2.60	3.40	5.00	7.00	9.00



Slika 1: Zavisnost  $Q_0/E$  od  $P_0/E$  u metodi Langbajna

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 2: Spisak obrađenih hidroloških stanica

Sliv	Stanica	Reka	A (km <sup>2</sup> )	Raspoloživost podataka		Q <sub>sr</sub> (m <sup>3</sup> /s)
				Period	Broj godina	
V. Morava	Čuprija	Ravanica	162.8	1958 - 1985; 1987 - 2016	58	0.70
V. Morava	Donja Šatornja	Jasenica	83.6	1960 - 2016	57	0.62
V. Morava	Smed. Palanka	Jasenica	496	1961 - 1996; 1998 - 2016	55	1.84
V. Morava	Smed. Palanka	Kuburšnica	743.2	1962-1979; 1981-2005; 2008-2016	52	1.72
J. Morava	Vranjska banja	Banjska	108.3	1964 - 2016	53	0.84
J. Morava	Tupalovce	Kozarska	98.1	1961 - 2016	56	1.46
J. Morava	Svođe	Lužnica	318	1961 - 2004; 2006 - 2014	53	2.72
J. Morava	Magovo	Toplica	180	1958; 1960; 1962 - 1992; 2006; 2008 - 2016	43	1.64
J. Morava	Merčez	Lukovska	112.6	1953 - 1992; 2006, 2008; 2011 - 2016	48	1.50
J. Morava	Visoka	Kosanica	370	1960 - 2016	57	1.99
J. Morava	Strazimirovci	Jerma	95	1961 - 2016	56	0.76
J. Morava	Radikine Bare	Kutinska	205	1958 - 1970; 1977 - 2016	53	1.28
J. Morava	Gornja Toponica	Toponička	202	1962 - 2004; 2007 - 2016	53	1.04
J. Morava	Pepeljevac	Toplica	986	1951 - 2016	66	7.16
Z. Morava	Požega	Skrapež	630	1952 - 2000; 2005 - 2014; 2016	60	5.11
Z. Morava	Ivanjica	Moravica	475	1925 - 1935; 1950 - 2002	64	6.63
Z. Morava	Rokci	Nošnica	164.2	1991 - 2016	26	2.12
Z. Morava	Guča	Bjelica	239	1961 - 2010; 2013 - 2016	54	2.70
Z. Morava	Prijevor	Kamenica	201	1961 - 1986; 1988 - 2015	54	2.06
Z. Morava	Gornja Gorevnica	Čemernica	143	1966 - 1977; 1994 - 1998; 2000 - 2016	34	1.26
Z. Morava	Preljina	Čemernica	625	1960 - 2016	57	3.98
Z. Morava	Brđani	Dičina	208	1966 - 1980; 1983 - 2015	48	1.61
Z. Morava	Biljanovac	Jošanica	265	1956 - 2016	61	3.40
Z. Morava	Devići	Studenica	191.4	1964 - 2016	53	2.95
Z. Morava	Mlanča	Studenica	310	1963 - 2015	53	4.79
Z. Morava	Ušće	Studenica	540	1954 - 2016	63	7.19
Z. Morava	Bogutovac	Lopatnica	115.8	1960 - 2015	56	1.91
Z. Morava	Brus	Rasina	213	1959 - 2016	58	2.39
Lim	Bistrica	Bistrica	79	1961-1985; 1989-1992; 1994-2016	52	1.35
Lim	Prijepolje	Mileševka	155	1968 - 2016	49	1.46
Kolubara	Bogovađa	Ljig	679	1955 - 2016	62	4.67
Kolubara	Belo Polje	Obnica	185	1953 - 2016	64	1.83
Kolubara	Mionica-Paštrić	Ribnica	104	2004 - 2014 / 1957 - 2003	58	1.19
Kolubara	Koceljava	Tamnava	208	1957 - 1974; 1979 - 2016	56	1.00
Kolubara	Ub	Ub	214	1960 - 1974; 1977 - 2016	52	1.06
Drina	Zavlaka	Jadar	313	1960 - 2016	57	3.06
Drina	Lešnica	Jadar	959	1960 - 2016	57	8.11
Sava	Rakovica	Topčiderska	138	1959 -1994; 1996-2002; 2004-2016	46	0.55
Sava	Valjevo	Kolubara	340	1957 - 2016	60	3.60
Pritoke Dunava	Kula	Vitovnica	243	1966 - 2016	51	1.09
Pritoke Dunava	Crnajka	Crnajka	96	1965 - 2016	52	0.62
Pritoke Dunava	Crnajka	Šaška	236	1966 - 2016	51	1.64
Timok	Rgošte	Svrljiški Timok	618	1953 - 2006; 2010 - 2016	61	3.51
Pritoke Dunava	Kučevo	Pek	849.5	1954 - 2016	63	7.16
Vardar	Barbace	Pčinja	457	1953-1975; 1977-1986; 1990-2002; 2004-2010; 2014 - 2016	56	3.76
Struma	Ribarce	Dragovištica	687.5	1964 - 2016	55	4.63

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U ovom radu za metodu Langbajna su korišćene tri varijante za parametar  $\Theta$ :

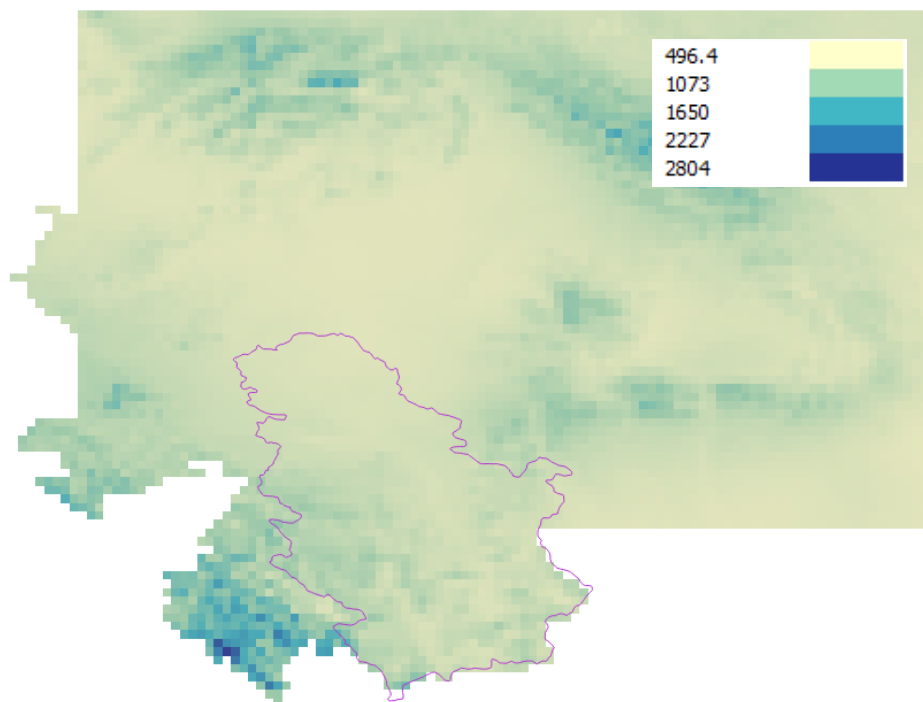
- originalna vrednost  $\Theta = 0.886$ ,
- kalibrisana vrednost parametra  $\Theta$ , jedinstvena za sve slivove, koja daje najbolje slaganje računatih i izmerenih vrednosti na svim razmatranim profilima hidroloških stanica, i
- kalibrisane vrednosti parametra  $\Theta$  koja daje najbolje slaganje računatih i izmerenih vrednosti na profilima hidroloških stanica koji pripadaju glavnim slivovima tj. oblastima.

Za analizu po oblastima, razmatrani slivovi su podeljeni u pet grupa: Južna Morava, Zapadna Morava, Velika Morava, Sava i istočna Srbija – Timok i pritoke Dunava. Reke Pčinja i Dragovištica nisu svrstane u neku od grupa (videti Tabela 2).

## 2.3 Raspoloživi podaci

U ovom radu metode Turka i Langbajna primenjene su na izučene slivove u cilju verifikacije ovih metoda na prostoru Srbije. Za ovu proveru na raspolaganju su bili podaci o prosečnom oticaju sa 46 slivova u Srbiji površine do 1000 km<sup>2</sup>, dobijeni od Republičkog hidrometeorološkog zavoda. Spisak razmatranih slivova je dat u Tabela 2, gde su naznačeni periodi raspoloživih podataka. Godine sa nepotpunim podacima nisu uzimane u obzir. U proseku, dužina niza izmerenih podataka iznosi 54 godine. Nizovi nisu istih dužina i ne pokrivaju isti period osmatranja, a takođe različito pokrivaju period 1961-2010 za koji postoje temperature i padavine u bazi CarpatClim. Prema Jankoviću (2015), pošto se srednji višegodišnji protok kao i podaci o temperaturi i padavinama određuju za dovoljno dug period, za analize njihovih međusobnih zavisnosti nije neophodno da budu određeni za isti period vremena.

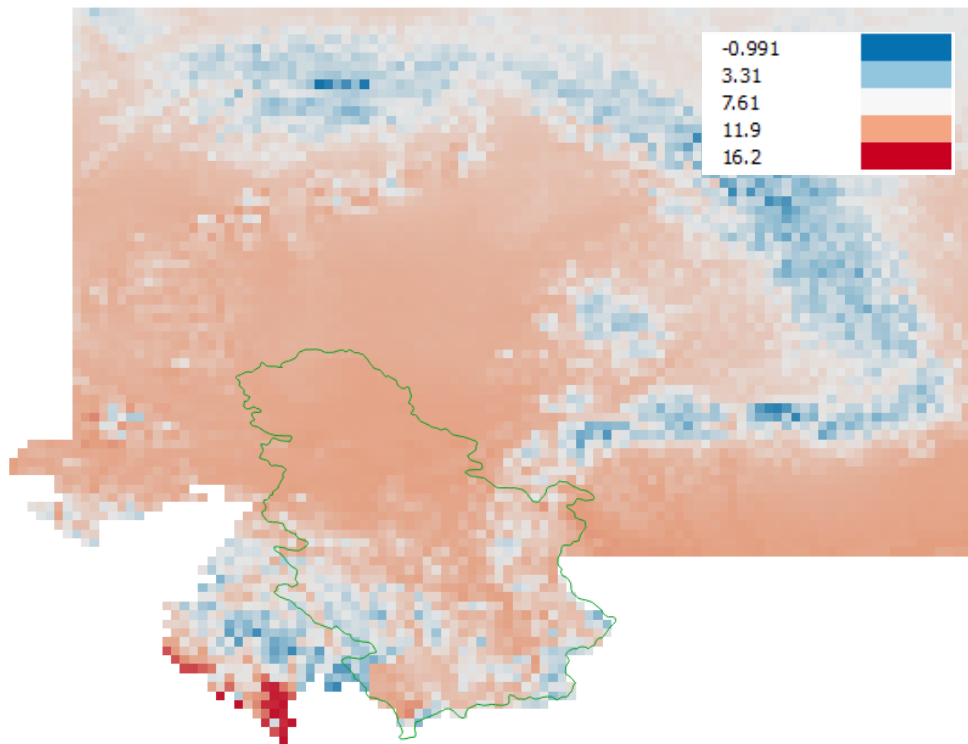
U odnosu na rad Jankovića (2015), u ovom radu je uzeto u obzir 13 slivova od ukupno 17 koje je Janković (2015) analizirao (slivovi do profila Svođe na Vlasini i Bosilegrad na Ljubatskoj nisu uzeti u obzir jer se njihov režim ne može smatrati prirodnim zbog prevođenja voda u hidroenergetskom sistemu Vlasina, za profil Donja Kamenica na Trgoviškom Timoku raspoloživi izmereni niz je imao samo 19 podataka, a za profil Beli Potok na Veternici se nije raspolagalo granicom sliva).



Slika 2: Prosečne godišnje padavine za 1961-2010 iz baze CarpatClim

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



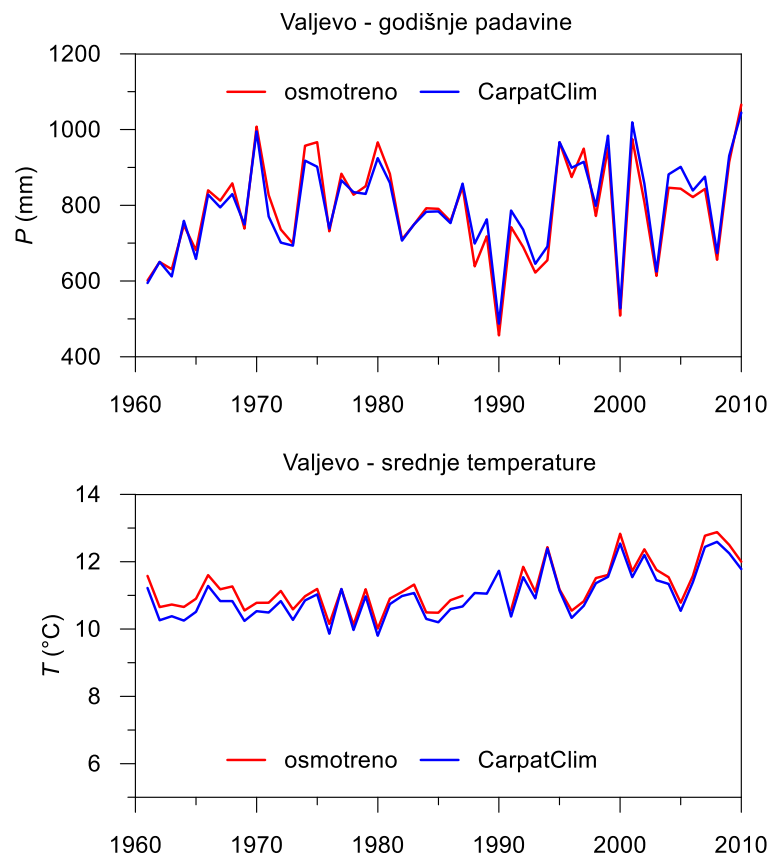
Slika 3: Srednje temperature za 1961-2010 iz baze CarpatClim

Kao ulazni podaci za proračun korišćene su padavine i temperature za period 1961-2010, preuzete iz baze CarpatClim. Ovi podaci su dati u rasterskom formatu sa horizontalnom rezolucijom od  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , što grubo odgovara elementima veličine  $10 \times 10 \text{ km}^2$ . Digitalne karte pokrivaju geografske širine od  $44^\circ$  do  $50^\circ$  i geografske dužine od  $17^\circ$  do  $27^\circ$ , ali ne u celosti (pokrivaju delove teritorija Srbije, Crne Gore, Republike Srpske, Mađarske, Slovačke, Rumunije i Ukrajine). Na osnovu godišnjih podataka iz baze CarpatClim izračunate su prosečne godišnje padavine i srednje temperature u periodu 1961-2010 (slike Slika 2 i Slika 3).

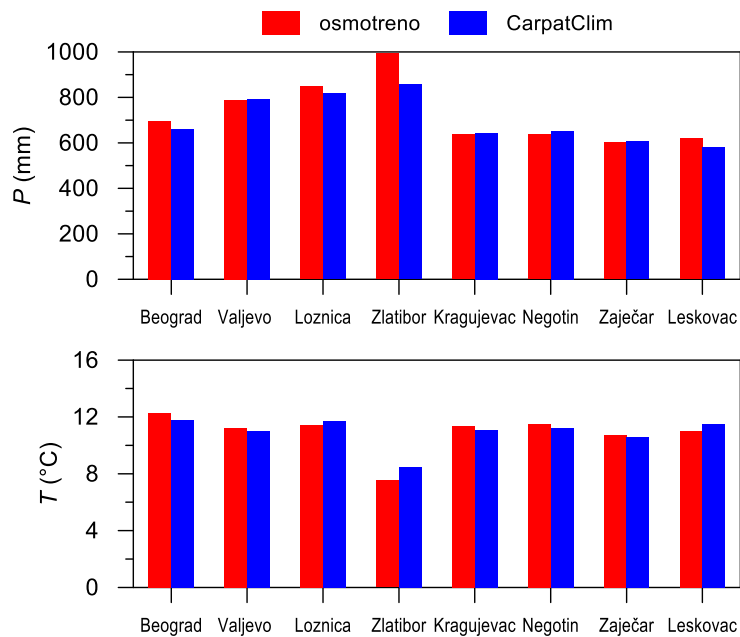
Zbog relativno grube prostorne rezolucije, izvršeno je poređenje podataka iz baze CarpatClim sa podacima osmatranja na izabranim klimatološkim stanicama u Srbiji, preuzetih iz klimatoloških godišnjaka RHMZ. Ova verifikacija je urađena za stanice Beograd Opservatorija, Valjevo, Loznica, Zlatibor, Zaječar, Kragujevac, Leskovac i Negotin. Na slici Slika 4 je izdvojen grafički prikaz vremenskih serija godišnjih podataka za stanicu Valjevo radi ilustracije. Sa ove slike se može videti da se godišnje padavine i srednje godišnje temperature iz projekta CarpatClim u ćeliji rastera u kojoj se nalazi stanica Valjevo dobro slažu sa osmotrenim podacima na ovoj stanici. Kako se kao ulazni podaci u razmatranim metodama koriste prosečne višegodišnje vrednosti, odstupanja kojih ima u pojedinim godišnjim vrednostima generalno ne dovode u pitanje dobro slaganje prosečnih višegodišnjih vrednosti. Na slici 5 dat je uporedni prikaz prosečnih temperatura i padavina sračunatih na osnovu nizova osmotrenih podataka na izabranim stanicama i na osnovu podataka iz odgovarajuće ćelije rastera u bazi CarpatClim. Jedina stanica na kojoj se vidi značajnije odstupanje je stanica Zlatibor, na kojoj su osmotrene padavine veće a temperature niže od onih iz projekta CarpatClim. Ovo odstupanje je posledica velike nadmorske visine stanice kao jedne tačke u ćeliji rastera, dok podatak iz baze CarpatClim predstavlja prosečnu vrednost za ćeliju rastera veličine  $10 \times 10 \text{ km}$  u kojoj se nalazi ova stanica. Na osnovu ove verifikacije zaključeno je da se podaci iz baze CarpatClim mogu smatrati validnim za proračun prosečnih padavina i temperatura u višegodišnjem periodu.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 4: Poređenje osmotrenih godišnjih padavina (gore) i temperatura (dole) sa podacima iz baze CarpatClim za lokaciju na meteorološke stanice Valjevo

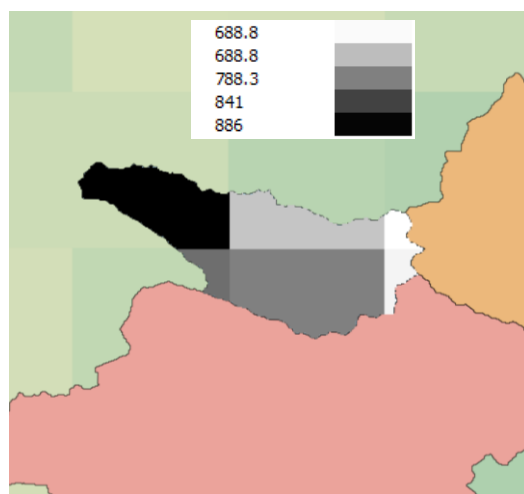


Slika 5: Poređenje osmotrenih prosečnih godišnjih padavina (gore) i srednjih temperatura (dole) sa podacima iz baze CarpatClim na lokacijama nekoliko meteoroloških stanica

## 2.4 Primena GIS-a za proračun prosečnih padavina i temperatura na slivovima

Određivanje prosečnih padavina i temperatura na slivovima sprovedeno je u GIS okruženju, korišćenjem rasterskih podataka o padavinama i temperaturama i vektorskih podataka o granicama slivova. Za manipulaciju i obradu digitalnih prostornih podataka korišćen je program QGIS. To je GIS aplikacija otvorenog koda koja omogućava vizuelizaciju, upravljanje, uređivanje i analizu geopodataka.

Sve podloge su dovedene u istu projekciju (WGS84). Granice slivova, koje su bile na raspolaganju u vektorskom formatu, transformisane su u rastere sa ćelijama veličine  $0,001^\circ \times 0,001^\circ$ . U rasteru koji predstavlja sliv, pikseli na slivu imaju vrednost 1, a izvan sliva 0. Ovo omogućava da se množenjem rastera temperatura ili padavina sa rasterom sliva dobiju izdvojeni podaci na samom slivu. Primer izdvajanja podataka iz baze CarpatClim na slivu prikazan je na slici 6. Prosečna vrednost padavina ili temperature na slivu dobija se kao jedan od statističkih parametara vezanih za podatke u rasteru.



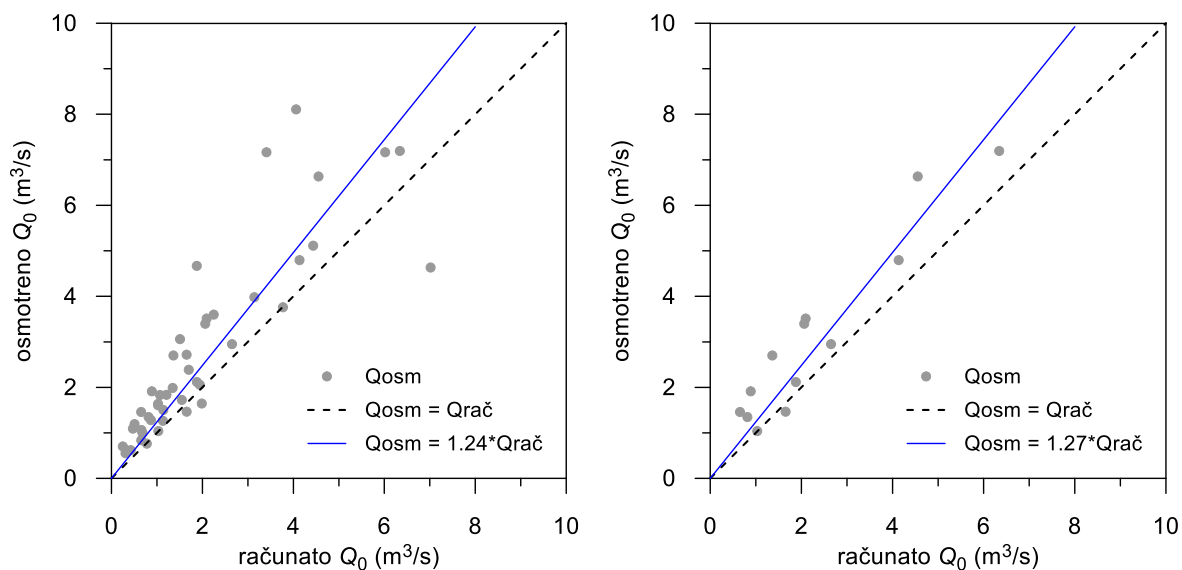
Slika 6: Primer preklapanja rastera sa padavinama iz baze CarpatClim sa slivom reke Banjske do stanice Vranjska banja

## 3 Rezultati i diskusija

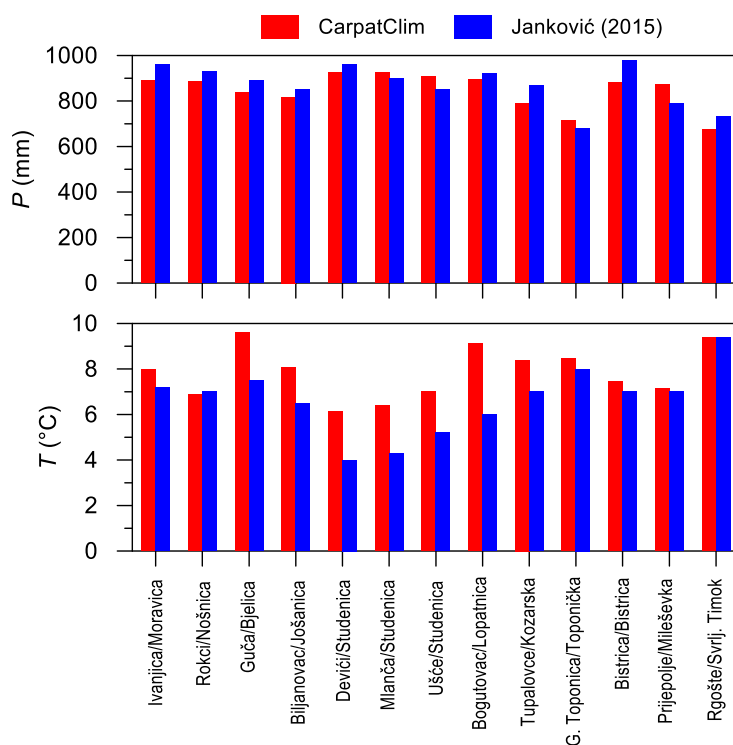
### 3.1 Metoda Turka

Za teritoriju Srbije i za korišćene ulazne podatke, metoda Turka generalno daje srednje protoke koji su manji od izmerenih vrednosti. Na slici Slika 7 levo prikazano je poređenje računatih protoka po metodi Turka sa osmotrenim vrednostima za sve razmatrane slivove. Linearnom regresijom, uz uslov da prava prolazi kroz koordinatni početak, dobijeno je da vrednosti sračunate metodom Turka treba množiti koeficijentom 1.24 da bi se dobile izmerene vrednosti protoka. Koeficijent determinacije  $R^2$  za ovu regresionu zavisnost iznosi 0.715. Drugim rečima, srednje protoke procenjene metodom Turka treba povećati za 24% kako bi u proseku rezultati ove metode bili uporedivi sa izmerenim vrednostima.

Navedeni rezultati pokazuju lošije slaganje srednjih protoka po metodi Turka nego u radu Jankovića (2015), u kome je faktor korekcije znatno manji (1.031) uz znatno bolje slaganje na koje ukazuje koeficijent determinacije od  $R^2 = 0.969$ . Na slici Slika 7 desno izdvojeni su rezultati iz ovog rada za 13 slivova koje je analizirao i Janković (2015), gde se vidi da je faktor korekcije sličan kao za sve slivove (1.267) uz koeficijent determinacije od  $R^2 = 0.879$ . Ovakve razlike su posledica donekle različitih prosečnih padavina i veoma različitih srednjih temperatura koji su korišćeni u ovom radu i u radu Jankovića (2015), što je ilustrovano na slici 8.



Slika 7: Odnos sračunatog srednjeg protoka po metodi Turka i izmerenih vrednosti za razmatranih 46 slivova (levo) i 13 slivova (desno)



Slika 8: Poređenje prosečnih padavina i temperatura na 13 slivova u ovom radu prema podacima iz baze CarpatClim i iz rada Jankovića (2015)

### 3.2 Metoda Langbajna

Poređenje računatih protoka po originalnoj metodi Langbajna sa vrednošću parametra  $\Theta = 0.886$  prikazano je na Slika 9 levo za sve razmatrane slivove. Ovako primenjena metoda Langbajna takođe generalno daje manje srednje protoke od izmerenih vrednosti. U ovom slučaju linearnom regresijom je dobijeno da vrednosti sračunate metodom Langbajna treba, u proseku, množiti koeficijentom 1.109 da



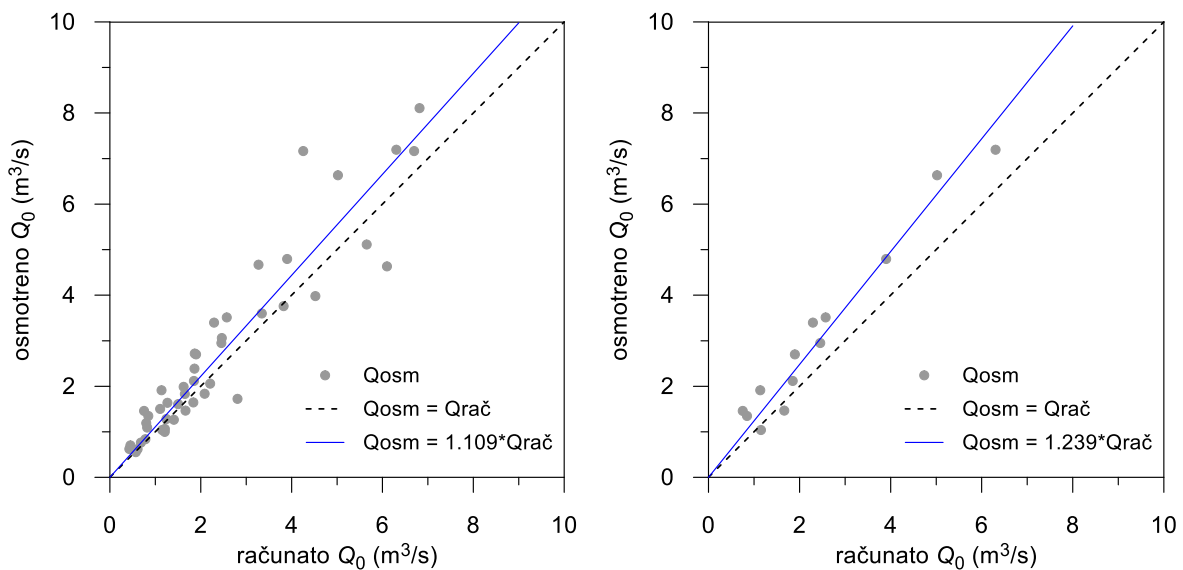
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

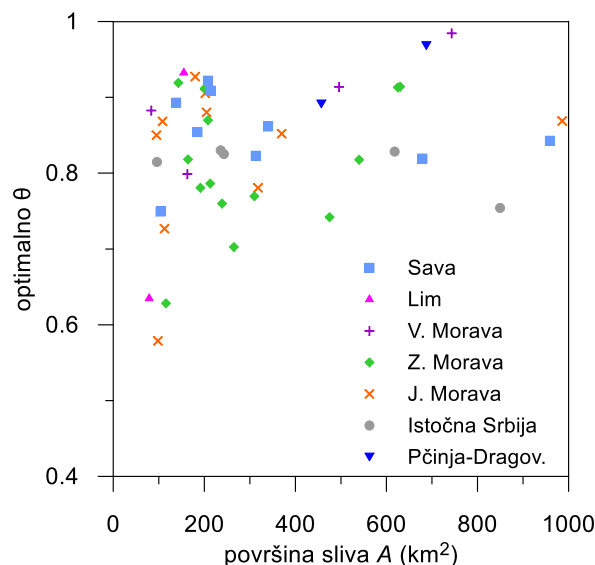
bi odgovarale izmerenim. Za ovu regresionu zavisnost koeficijent determinacije  $R^2$  iznosi 0.877 i ukazuje na bolje slaganje sračunatih i izmerenih protoka u odnosu na metodu Turka.

Prikazani rezultati po metodi Langbajna imaju lošije slaganje nego u radu Jankovića (2015), gde je slaganje bilo bolje ( $R^2 = 0.992$ ) i faktor korekcije bio nešto povoljniji (1.083). Kada se iz rezultata ovog rada izdvoji 13 slivova koje je analizirao Janković (2015), prikazanih na Slika 9 desno, dobija se nešto bolje slaganje sa koeficijentom determinacije od  $R^2 = 0.953$ , ali sa znatno većim faktorom korekcije od 1.239.

Prethodni rezultati ukazuju da je rasipanje veće za veće slivove, odnosno da bi se korekcijom parametra  $\Theta$  u zavisnosti od površine sliva možda postigli bolji rezultati. Za svaki sliv je zato određen optimalni parametar  $\Theta_0$  sa kojom je izračunati protok jednak izmerenom i analizirana je njegova korelacija sa površinom sliva (slika 10). Međutim, ne uočava se nikakva pravilnost u ovoj zavisnosti koja bi pomogla da se parametar  $\Theta$  za neizučene slivove oceni na osnovu površine sliva.



Slika 9: Odnos sračunatog srednjeg protoka po metodi Langbajna sa  $\Theta = 0.886$  i izmerenih vrednosti za razmatranih 46 slivova (levo) i 13 slivova (desno)

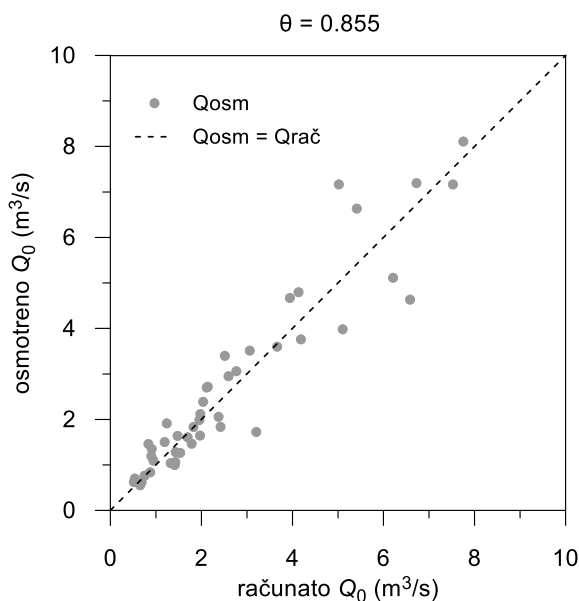


Slika 10: Optimalne vrednosti parametra  $\Theta$  u zavisnosti od površine sliva

Druga varijanta metode Langbajna koja je razmatrana jeste varijanta sa kalibrisanom vrednosti parametra  $\Theta$  za sve razmatrane slivove. U pokušaju da se parametar  $\Theta$  dobije optimizacijom u odnosu na koeficijent determinacije  $R^2$  u linearnoj regresiji između računatih i izmerenih srednjih protoka pokazalo se da se koeficijent determinacije ne menja znatno sa promenom parametra  $\Theta$  i da se ne može izdvojiti njegova optimalna vrednost. Zaključeno je da više ima smisla odrediti jedinstvenu vrednost za parametar  $\Theta$  sa kojom nema potrebe za korekcijom rezultata proračuna, tj. sa kojom bi nagib regresione prave između računatih i izmerenih srednjih protoka bio 1 ( $Q_{osm} = Q_{rač}$ ). Metodom najmanjih kvadrata za ocenu koeficijenta pravca u regresionoj zavisnosti  $y = a \cdot x$  dobija se:

$$a = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{\sum x_i^2} \quad (7)$$

gde niz  $x_i$  predstavlja protoke računate metodom Langbajna, a niz  $y_i$  izmerene protoke. Uz uslov da je  $a = 1$ , parametar  $\Theta$  je određen korišćenjem modula Solver u programu MS Excel. na ovaj način dobijena je vrednost parametra  $\Theta = 0.855$ , a koeficijent determinacije u ovom slučaju iznosi  $R^2 = 0.887$  (slika 11). U odnosu na varijantu proračuna sa originalnom vrednošću parametra  $\Theta = 0.886$ , koeficijent determinacije je malo povećan (sa 0.877 na 0.887), pri čemu je jednostavnije koristiti vrednost parametra  $\Theta = 0.855$  jer u tom slučaju nije potrebna korekcija rezultata proračuna.



Slika 11: Odnos sračunatog srednjeg protoka po metodi Langbajna sa  $\Theta = 0.855$  i izmerenih vrednosti

Treća razmatrana varijanta za primenu metode Langbajna je obuhvatila ocenu parametra  $\Theta$  po grupama glavnih slivova. Slivovi su podeljeni u 5 grupa, dok dve stanice na Limu i dve stanice na Pčinji i Dragovištici nisu učestvovala u ovoj analizi. Primenjen je isti kriterijum kao u prethodnoj varijanti, tj. da nagib regresione prave između računatih i izmerenih srednjih protoka bude 1. U **Error! Reference source not found.** prikazane su grupe stanica i dobijene vrednosti parametra  $\Theta$  za svaku grupu. Po pravilu, vrednosti parametra  $\Theta$  su manje od originalne vrednosti  $\Theta = 0.886$ . Optimalne vrednosti  $\Theta$  za grupu Sava (koja obuhvata stanice na Jadru, Kolubari i Topčiderskoj reci) i za grupu stanica u slivu Zapadne Morave veoma su slične (0.842 i 0.845). Vrednost  $\Theta = 0.862$  za grupu stanica na Južnoj Moravi je najbliža originalnoj vrednosti, dok je najveća razlika za grupu Istočna Srbija/Pritoke Dunava (stanice u slivovima Mlave, Peka, Porečke reke i Timoka) za koju optimalni parametar  $\Theta$  iznosi 0.784. Rezultat dobijen za Veliku Moravu može se odbaciti kao nepouzdan jer je

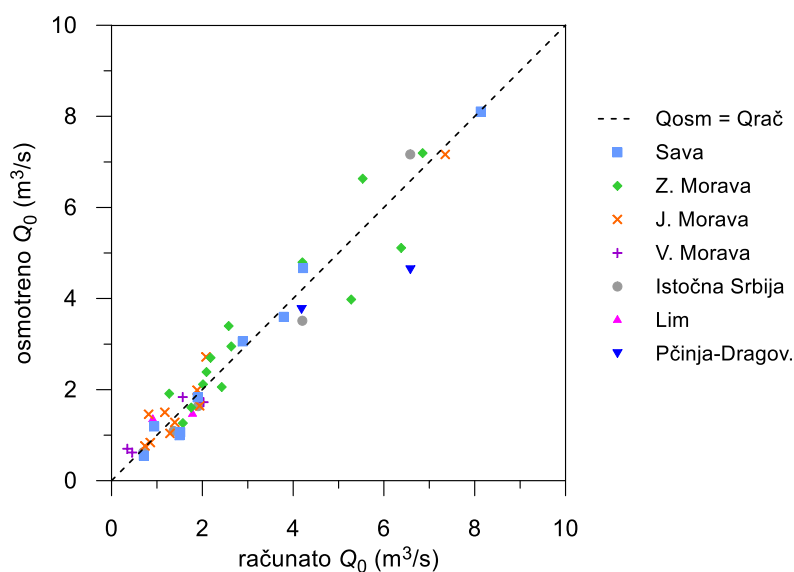
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

određen na osnovu samo četiri stanice sa velikim odstupanjima. Rezultati proračuna metodom Langbajna korišćenjem koeficijenta  $\Theta$  za pojedine grupe prikazani su na slici 12.

Tabela 3: Vrednost parametra  $\Theta$  određen po grupama slivova

Grupa	Broj stanica	Parametar $\Theta$
Sava (Jadar, Kolubara, Topčiderska r.)	9	0.842
Z. Morava	16	0.845
J. Morava	10	0.862
Istočna Srbija/Pritoke Dunava	5	0.784
V. Morava	4	0.941



Slika 12: Odnos sračunatog srednjeg protoka po metodi Langbajna sa parametrom  $\Theta$  po grupama i izmerenih vrednosti

Metoda Langbajna, sa parametrom  $\Theta$  kalibrisanim po grupama daje bolje rezultate nego u prethodnim varijantama. Koeficijent determinacije  $R^2$  u ovoj varijanti iznosi 0.943, što je veće od  $R^2 = 0.877$  za varijantu originalne vrednosti parametra  $\Theta = 0.886$  i od  $R^2 = 0.887$  za varijantu vrednosti parametra  $\Theta = 0.855$ . U ovoj varijanti četiri stanice nisu svrstane u grupe za koje je optimizovan parametar  $\Theta$ ; ako se srednji protok na tim stanicama računa vrednošću parametra  $\Theta = 0.855$ , ne dolazi do značajnog pogoršanja slaganja izmerenih i računatih vrednosti za svih 46 slivova (tada je  $R^2 = 0.924$ ).

## 4 Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata proračuna prosečnog oticaja metodama Turka i Langbajna sa originalnim parametrom  $\Theta = 0.886$ , može se zaključiti da metoda Turka ima veće rasipanje rezultata proračuna u odnosu na metodu Langbajna i generalno daje ocene srednjeg protoka koje su manje od izmerenih vrednosti. Takođe, potrebna korekcija rezultata proračuna je veća kod metode Turka (24%) u odnosu na originalnu metodu Langbajna (11%). Iz ovih razloga, prednost se može dati metodi Langbajna. Ovakav zaključak je u skladu sa zaključcima Jankovića (2015).

Za primenu metode Langbajna za teritoriju Srbije utvrđeno je da generalno daje rezultate bliže izmerenim vrednostima ukoliko je parametar  $\Theta$  manji od originalnog. Na osnovu rezultata proračuna i kalibracije parametra  $\Theta$  na 46 izučenih slivova površine do 1000 km<sup>2</sup>, može se dati preporuka za ko-

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

rišćenje vrednosti parametra  $\Theta = 0.855$  za male neizučene slivove u Srbiji, bez potrebe za korekcijom rezultata proračuna.

Grupisanjem stanica u veće slivove i određivanjem parametra  $\Theta$  za svaku grupu došlo se do zaključka da se vrednost kalibrisanog parametra  $\Theta$  kreće, bez većih odstupanja, oko spomenute vrednosti  $\Theta = 0.855$ . Izuzetak je istočna Srbija, gde su kalibrisane vrednosti parametra  $\Theta$  po pravilu niže u odnosu na ostale grupe. Kako se do ovog zaključka došlo na osnovu rezultata proračuna sa pet stanica u ovoj oblasti, nije data preporuka za korišćenje kalibrisane vrednosti  $\Theta = 0.784$  na teritoriji istočne Srbije. Ipak, ova oblast mogla bi da bude predmet daljeg istraživanja u pogledu primenljivosti metode Langbajna.

Na osnovu svih prikazanih rezultata može se zaključiti da metode daju dobre rezultate, ali приметно bolje kod metode Langbajna. Svi rezultati ukazuju da se metode mogu koristiti na neizučenim slivovima na teritoriji Srbije uz korišćenje podataka sa digitalnog repozitorijuma projekta CarpatClim. Ne preporučuje se korišćenje metoda nad slivovima koji nisu u prirodnom režimu ili su u karstnim područjima.

Bitno je naglasiti da se ulazni podaci mogu razlikovati u zavisnosti od načina na koji su određeni i perioda iz kojeg su korišćeni podaci. U radu Jankovića (2015) za određivanje prosečnih padavina i temperatura korišćene su karte izolinijske, izrađene za različite periode vremena. Poređenjem rezultata Jankovića (2015) sa rezultatima u ovom radu, za iste slivove, može se videti uticaj razlike u ulaznim podacima.

U radu Langbajna (Langbein, 1962) predloženo je korigovanje zavisnosti  $Q_0/E$  od  $P_0/E$  prema sezonskom faktoru. Sezonski faktor se računa na osnovu unutargodišnjeg režima (mesečnih vrednosti) padavina i geografske širine na kojoj se nalazi sliv. Kako je Langbajn izradio metodu za prostor SAD, koje se prostiru na geografskim širinama od  $30^\circ$  do  $50^\circ$ , dok se Srbija prostire od  $41^\circ$  do  $47^\circ$  severne geografske širine, predmet daljeg istraživanja može biti uticaj sezonske korekcije na rezultate procene prosečnih protoka na teritoriji Srbije.

## Literatura

1. Janković, D. (2015) O određivanju prosečnog oticanja sa neizučenih slivova na teritoriji Srbije. Zbornik radova 17. Savetovanja SDHI - SDH, Vršac, Srbija. str. 816-825.
2. Langbein, W.B. (1962) The water supply of arid valleys in intermountain regions in relation to climate. *Bulletin of the International association of Scientific Hydrology*, Vol. 7, No. 1, pp. 34-39.
3. Langbein, W.B. and others (1949) *Annual runoff in the United States*, US Geological Survey, Circular 52.
4. Republički hidrometeorološki zavod Srbije. Klimatološki godišnjaci, 1961–2010, [www.hidmet.gov.rs](http://www.hidmet.gov.rs).
5. Republički hidrometeorološki zavod Srbije. Hidrološki godišnjaci, 1925–2016, [www.hidmet.gov.rs](http://www.hidmet.gov.rs).
6. Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, Gy., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., Spinoni, J. (2013) Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. CARPATCLIM Database © European Commission - JRC, [www.carpatclim-eu.org](http://www.carpatclim-eu.org).

## Krive trajanja protoka kao sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV-light modela neizučenog sliva

Petar Praštalo<sup>1</sup>, Borislava Blagojević<sup>2</sup>, Žana Topalović<sup>3</sup>

APSTRAKT: Prilikom izrade planova upravljanja veštačkom akumulacijom u uslovima redovnog korišćenja, kod neizučenih slivova se postavlja problem određivanja hidroloških karakteristika prosečnih voda. Za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela za simulaciju vrednosti dnevnih protoka neizučenog sliva, u ovom radu su analizirane mogućnosti korišćenja krivih trajanja protoka sa izučenih slivova iz šireg regiona. Kontinualne hidrološke simulacije dnevnih protoka u periodu 1961-2008 izrađene su za mali sliv reke Vijake do profila brane Drenova u Bosni i Hercegovini. Kao osnovno sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela, korišćeno je poređenje nagiba krive dobijene na osnovu simuliranih protoka i prosečne krive trajanja protoka sa izučenih slivova. Kao dodatni kriterijum za verifikaciju modela, uvedeno je vizuelno slaganje modularnih krivih simuliranih prosečnih mesečnih protoka neizučenog sliva i odgovarajućih osmotrenih vrednosti u širem regionu. Rezultati ukazuju na bolje slaganje modularne krive simuliranih prosečnih mesečnih protoka u poređenju sa rešavanjem istog problema pomoću hidrološkog modela HEC-HMS.

Ključne reči: Kriva trajanja protoka, neizučen sliv, kontinualna simulacija oticaja, HBV light.

## Flow duration curves as a tool for calibration and verification of the HBV-light model in ungauged catchment

ABSTRACT: During development of reservoir management plans for the regular use mode, there is a problem of determining the mean flow characteristics in ungauged basins. For the calibration and verification of the HBV light model for simulating the values of the daily flows in the ungauged basin, this paper analyses the possibilities of using the flow duration curves from the gauged basins in the wider region. Continuous hydrological simulations of daily flows in the period 1961-2008 were made for a small river basin of the Vijaka river at the Drenova dam in Bosnia and Herzegovina. As a basic tool of calibration and verification of the HBV light model, a comparison of the flow duration curve slopes was used. The flow duration curves were generated from simulated flows for ungauged catchment, and observed flow data from gauged catchments. As an additional criterion for verification of the model, visual matching of modular curves – mean monthly flow ratio to mean annual flow curves was introduced. Modular curves obtained from simulated flows in the ungauged basin were compared to the curves from gauged catchments in the wider region. The results indicate a more realistic modular curve of simulated average monthly flows by the HBV light model, compared to the hydrological model HEC-HMS.

Keywords: Flow duration curve, ungauged catchment, continuous runoff simulation, HBV light.

<sup>1</sup> Petar Praštalo, D.I.G., stručni saradnik, Institut za građevinarstvo "IG", Banja Luka, [petarprastalo3@gmail.com](mailto:petarprastalo3@gmail.com)

<sup>2</sup> dr Borislava Blagojević, D.I.G., docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, [borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs](mailto:borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>3</sup> mr Žana Topalović, D. I. G., viši asistent, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, [zana.topalovic@aggfbl.unibl.org](mailto:zana.topalovic@aggfbl.unibl.org)

## 1 Uvod

U toku perioda eksploatacije hidrotehničkih objekata, ponekad se uvidi mogućnost dodeljivanja njihove dodatne/dopunske uloge u vodoprivrednom sistemu. Takav slučaj dogodio se nedavno sa akumulacijom i branom Drenova na severu Bosne i Hercegovine (BiH) u Republici Srpskoj. Akumulacija Drenova je višenamenska akumulacija nastala sedamdesetih godina prošlog veka, sa prvenstvenom namenom zaštite od poplava nizvodnog područja. U dolini reke Vijake izgrađena je niska betonska brana, iza koje je formirano akumulaciono jezero. Nakon izgradnje brane, akumulacija je duži vremenski period korišćena i kao izvoriste za vodosnabdevanje opštine Prnjavor, zbog veoma skromnih rezervi vode na području opštine (ZZV, 2016). Vremenom su se javljali novi načini korišćenja akumulacije, tako da su danas prisutni: zaštita od poplava, snabdevanje vodom, rekreacija i sport, oplemenjavanje malih voda, kao i najnovija namena, hidroenergetika. Nedavno se postavilo pitanje upravljanja branom i akumulacijom, zbog suprotstavljenih interesa svih trenutnih vodoprivrednih korisnika (ZZV, 2016).

U radu se istražuju mogućnosti dobijanja hidroloških podloga u domenu prosečnih voda za izradu planova upravljanja u uslovima redovnog korišćenja akumulacije, pomoću hidrološkog modela za kontinualnu simulaciju protoka. Problem kalibracije modela i verifikacije rezultata simulacije je naglašen zbog nepostojanja podataka osmatranja hidrometeoroloških veličina kako na samom slivu, tako i u neposrednoj okolini slivnog područja. Prethodno istraživanje je obuhvatilo korišćenje krivih trajanja dnevnih protoka (KTP) sa stanica u regionu koje su poslužile za kalibraciju i verifikaciju hidrološkog modela u paketu HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrological Modelling System) (Praštaló i sar., 2017). Cilj ovog istraživanja je ispitivanje mogućnosti drugog modela, HBV light, konceptualnog semi-distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju protoka, da vernije reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja na osnovu istih ulaznih veličina: padavina, temperature vazduha i potencijalne evapotranspiracije (PET). HBV model je 1970tih razvio Švedski meteorološki i hidrološki institut (SMHI) (Bergström, 1976). Verzija modela HBV light je posebno razvijena u obrazovne svrhe na Univerzitetu Upsala (Seibert, 2005; Seibert and Vis, 2012).

## 2 Metodologija

### 2.1 Opis modela HBV light

Model HBV light se temelji na jednačini vodnog bilansa (SMHI, 2018) :

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes) \quad (1)$$

gde su korištene sledeće oznake:  $P$  – padavine,  $E$  – evapotranspiracija,  $Q$  – proticaj,  $SP$  – snežni pokrivač,  $SM$  – vlaga (vlažnost) tla,  $UZ$  – zapremina vode u gornjem rezervoaru,  $LZ$  – zapremina vode u donjem rezervoaru,  $lakes$  – jezera i močvarne površine.

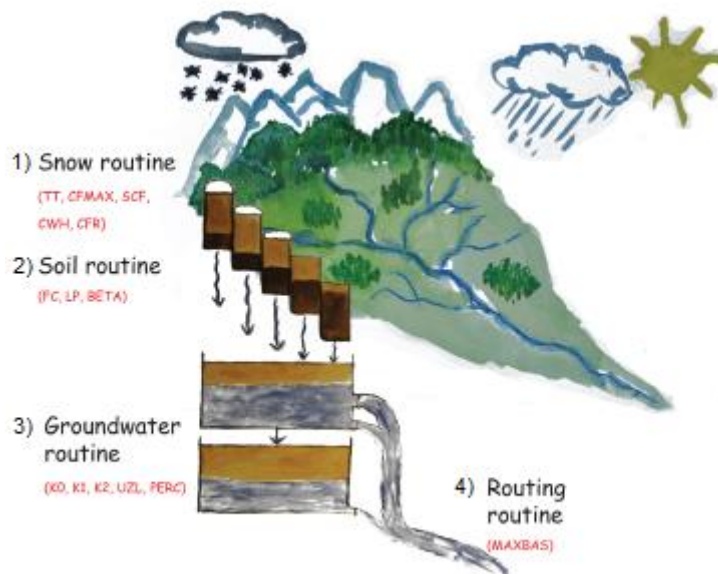
U modelu se na osnovu dnevnih ulaznih podataka o padavinama, temperaturi vazduha i podataka o potencijalnoj evapotranspiraciji (PET), simulacija oticaja sprovodi kroz četiri računski modula: 1) Sneg (akumulacija i topljenje snega), 2) Zemljište (vlažnost i zasićenost tla), 3) Podzemlje (generisanje oticaja), 4) Transformacija oticaja u hidrogram (Seibert, 2005). Struktura modela je ilustrovan na slici 1.

U četiri računski modula modela HBV light figuriše 19 parametara koji su prikazani na slici 1 i objašnjeni u tabeli 1 (kol.1-4).

Model je semi-distribuiran, tako da se sliv može predstaviti: visinskim zonama (najviše 20), vegetacionim zonama (najviše 3) i podslivovima. Temperatura i padavine variraju sa visinom, što određuju parametri  $PCALT$  i  $TCALT$ . Uobičajene vrednosti temperaturnog gradijenta za priraštaj nadmorske visine od 100 m su  $-0.6$  °C, a gradijenta padavina  $+10 \div 20\%$  (Seibert, 2005).

Sneg se računa metodom stepen-dan. U modulu Zemljište, dopuna podzemlja i stvarna evapotranspiracija (ET) se računaju kao funkcije aktuelne/raspoložive zapremine vode, dok je oticaj

funkcija zapremine vode i rezultata sračunatih u modulu Podzemlje. Na kraju se za transformaciju sračunatog oticaja koristiti trougaona ponderisana funkcija. Rezultat proračuna je hidrogram dnevnih protoka u periodu simulacije.



Slika 1. Šema strukture modela HBV light (izvor: Seibert and Vis, 2012).

Figure 1. Schematic structure of the HBV light model (source: Seibert and Vis, 2012).

## 2.2 Izučavano područje, raspoloživi i ulazni podaci

Akumulacija Drenova formirana je izgradnjom betonske brane Drenova na reci Vijaci, najvećoj levoj pritoci reke Ukrine, koja je desna pritoka reke Save (slika 2). U istraživanju je tretirano slivno područje do profila brane Drenova. Površina sliva je 68 km<sup>2</sup>. Sliv je hidrološki neizučen zbog kratkog perioda osmatranja protoka i padavina na slivu, u neposrednoj okolini i izrazito nepouzdanih hidroloških podataka za reku Vijaku (ZZV, 2016). Problem nedostatka hidroloških i meteoroloških podataka u BiH je svakodnevica struke, zbog prestanka rada Republičkog hidrometeorološkog zavoda BiH u periodu 1990-tih i velikih poplava od 2010 pa nadalje, koje su nanele štetu novoformiranim ili obnovljenim stanicama sledstvenika: Republičkog hidrometeorološkog zavoda Republike Srpske i Federalnog hidrometeorološkog zavoda BiH.

Podaci o dnevnim padavinama i temperaturama vazduha sa meteorološke stanice (MS) Banja Luka korišćeni su kao ulazni podaci modela HBV light za sliv brane Drenova, zato što je prostorna analiza podataka o padavinama metodom Tisenovih poligona, pokazala da od tri razmatrane MS u okolini sliva (Slavonski brod, Banja Luka, Doboj) 97% sliva leži u poligonu MS Banja Luka, a 3% u MS Doboj (Praštalo i sar., 2017).

Vremenski korak simulacije (jedan dan) mora biti isti za sve serije podataka osim za evapotranspiraciju, gde se mogu koristiti mesečne vrijednosti PET (Seibert, 2005). Mesečne vrednosti PET su dobijene metodom Torntvajtja (Thorntwaite, 1948), za koju su korišćeni klimatološki podaci sa MS Banja Luka (Praštalo, 2017; Praštalo i sar., 2017).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 1: Opis parametara HBV light modela (Seibert, 2005), opseg i usvojene vrednosti za sliv Drenova.

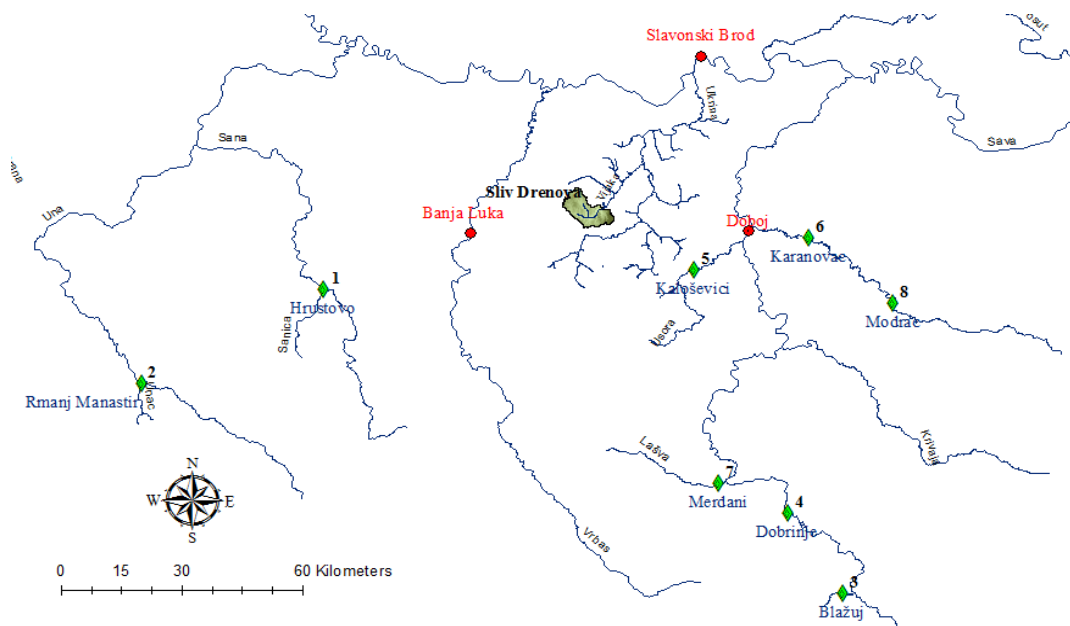
Table 1: The HBV light model parameter description (Seibert, 2005), parameter range and the Drenova catchment model parameter values.

Modul	Parametar	Opis	Jedinica	Donja granica	Gornja granica	Drenova
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Sneg	<i>TT</i>	Temperaturni prag koji klasifikuje padavine (sneg/kiša)	°C	-3.00	0.50	0.00
Sneg	<i>CFMAX</i>	Faktor topljenja snega	mm/dan/°C	0.100	10.000	10.000
Sneg	<i>SFCF</i>	Korektivni faktor za sneg	-	0.50	2.50	0.85
Sneg	<i>SP</i>	Faktor sezonske varijabilnosti	-	0.1	1	0.9
Sneg	<i>CFR</i>	Koeficijent ponovnog zamrzavanja	-	0.001	1.00	0.01
Sneg	<i>CWH</i>	Kapacitet vode u snegu	-	0.0001	0.0100	0.0001
Zemljište	<i>FC</i>	Maksimalni kapacitet vode u tlu	mm	100.0	550.0	350.0
Zemljište	<i>LP</i>	Vlažnost tla iznad koje ET dostiže PET	mm	1.00	1.00	0.05
Zemljište	<i>BETA</i>	Parametar za definisanje doprinosa proticaja od kiše ili snega	-	0.001	5.000	0.000
Podzemlje	<i>PERC</i>	Maksimalno proceđivanje u donji rezervoar (perkolacija)	mm/dan	0.00	10.00	8.00
Podzemlje	<i>UZL</i>	Granična vrednost u gornjem rezervoaru	mm	5.00	10.00	9.00
Podzemlje	<i>K0</i>	Koeficijent recesije za gornji deo gornjeg rezervoara	dan <sup>-1</sup>	0.001	0.500	0.005
Podzemlje	<i>K1</i>	Koeficijent recesije za donji deo gornjeg rezervoara	dan <sup>-1</sup>	0.01	0.30	0.30
Podzemlje	<i>K2</i>	Koeficijent recesije za donji rezervoar	dan <sup>-1</sup>	0.00005	0.25	0.11
Transformacija oticaja u hidrogram	<i>MAXBAS</i>	Baza jednakostraničnog trougla težinske funkcije	dan	1.00	2.00	1.00
Visinska varijabilnost podataka	<i>PCALT</i>	Promjena padavina sa nadmorskom visinom	%/100 m	10	50	40
Visinska varijabilnost podataka	<i>TCALT</i>	Promjena temperature sa nadmorskom visinom	°C/100 m	0,1	1	0,3
Visinska varijabilnost podataka	<i>elev P</i>	Povećanje padavina u PTQ datoteci	m	0,5	1	0,9
Visinska varijabilnost podataka	<i>elev T</i>	Povećanje temperature u PTQ datoteci	m	0,5	1	0,9



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2: Lokacije: brane Drenova, pripadajućeg sliva reke Vijake, MS razmatranih za ulazne meteorološke podatke i HS korišćenih za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela (dopunjeno na osnovu izvora: Praštalo i sar., 2017).

Figure 2. Location of the Drenova dam and associated catchment, MS stands for the meteorological input data, and HS hydrological stations applied for calibration and validation of the HBV light model (modified from source: Praštalo et al., 2017).

### 2.3 Karakteristike sliva i model sliva u HBV light-u

Površina sliva do pregradnog profila brane Drenova je 68.26 km<sup>2</sup>. Visinski položaj sliva je između 161 mm u profilu brane i 594 mm na najvišoj tački vododelnice. Hidrografsku mrežu čine četiri vodotoka: Vijaka, Topolova, Lišnja i Drenovica sa svojim pritokama (Slika 3 levo). Glavni tok je reka Vijaka. Hidraulička dužina tečenja je 16 km. Prosečan nagib sliva je 9.81%, dok je dužina glavnog toka 14 km, sa prosečnim nagibom od 1.25% (Praštalo, 2017).

Priprema modela slivnog područja je obavljena u GIS okruženju. Za formiranje visinskih zona kao ulazni podatak korišten je digitalni model terena (DTM), prikazan na slici 3 levo. Usvojena je jedna visinska zona. Na slici 3 desno, prikazano je korišćenje zemljišta na slivu Drenove dobijeno iz Corine (EEA, 2006), gde je prisutno 6 različitih tipova korišćenja zemljišta. Na osnovu toga, u modelu sliva su usvojene dve vegetacione zone: šume i ostale površine. Podslivovi nisu odvajani.

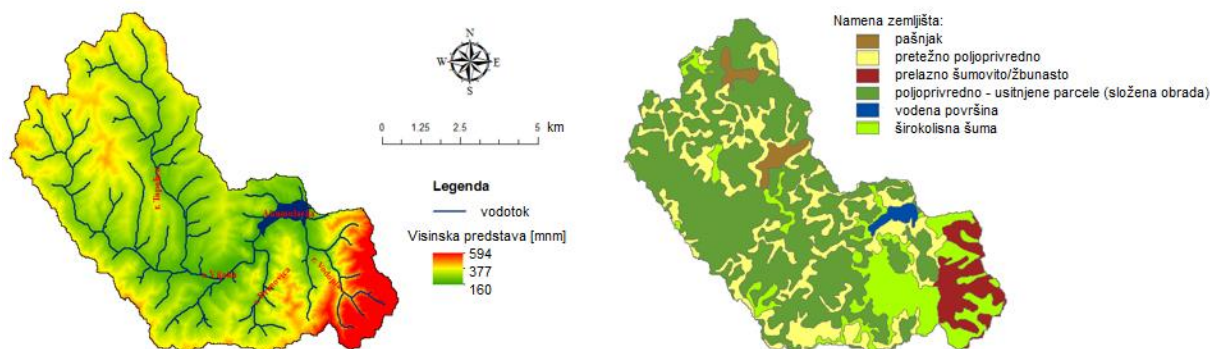
### 2.4 Kalibracija i verifikacija modela

Izbor strategije za kalibraciju parametara modela i verifikaciju rezultata simulacije je veoma složen problem čak i kada su u pitanju slivovi kod kojih postoje podaci osmatranja hidroloških i meteoroloških veličina. Kod neizučenih slivova, koriste se strategije za posrednu kalibraciju i verifikaciju modela. U radu je razmatran jedan pristup za kalibraciju parametara HBV light modela i dva pristupa za verifikaciju. Osnovna strategija je podela na period kalibracije i verifikacije modela, a osnovo sredstvo je bezdimenzionalna kriva trajanja dnevnih protoka (KTP). Kod ovako formulisane KTP, trajanja se povezuju sa odnosom karakterističnih protoka datog trajanja i prosečnog protoka u višegodišnjem periodu za koji se definiše KTP.

Usled nedostatka podataka osmatranja protoka u slivu Drenove za kalibraciju i verifikaciju modela, korišćeni su podaci iz šireg regiona sa hidroloških stanica (HS) koje imaju duži niz dnevnih osmatranja protoka (slika 2). Izbor HS je iznuđen, a vođen je raspoloživim periodom osmatranja, popunjenošću serija dnevnih protoka, površinom sliva i udaljenošću od sliva Drenove.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 3: Levo: Kombinovani prikaz digitalnog modela terena i rečne mreže sliva (izvor: Praštalo, 2017); Desno: Korišćenje zemljišta u slivu prema CLC (EEA, 2006).

Figure 3: Left: Combined DTM and river network (source: (Praštalo, 2017)); Right: Land use in the catchment according to CLC (EEA, 2006).

Odabrani period za kalibraciju modela je od 01.01.1961 do 31.12.1990. tj. 30 godina. Period verifikacije je 4 godine (01.01.2005. ÷ 31.12.2008.). Uticaj akumulacije Drenova je isključen tokom kalibrisanja kao i tokom verifikacije modela. U periodu kalibracije, za formiranje bezdimenzionalne KTP, korišćeni su podaci sa 8 HS, a u periodu verifikacije modela, sa 7 (bez HS Dobrinje na reci Bosni). Dakle, na osnovu registrovanih protoka na 8 HS (slika 2, tabela 2), formirane su bezdimenzionalne KTP za svaku HS, posebno za period kalibracije i posebno za period verifikacije modela. Za oba perioda, formirana je po jedna zajednička KTP (slika 4), osrednjavanjem bezdimenzionalnih KTP sa razmatranih HS.

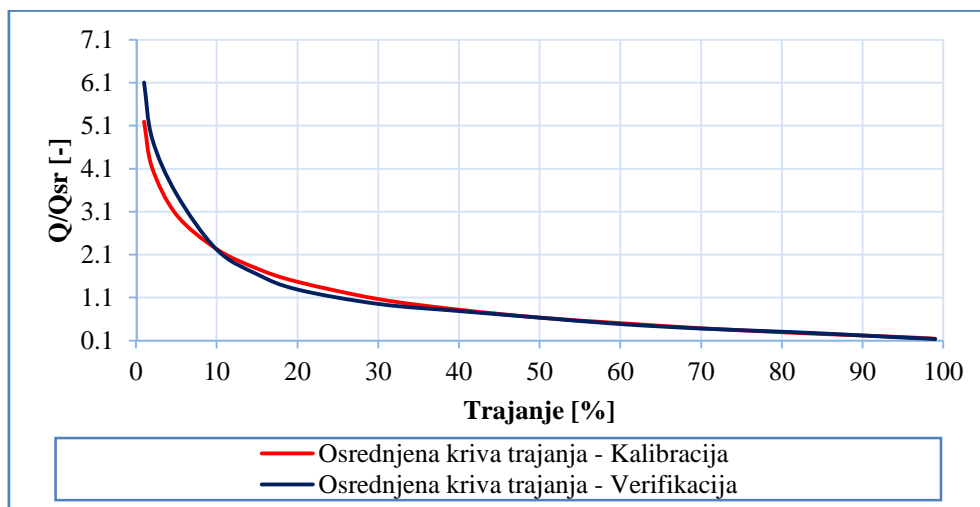
HBV light model može da koristi automatsku kalibraciju parametara modela i daje pet veličina za pokazatelje slaganja sa osmotrenim protocima (Seibert, 2005). Parametri modela ovde su kalibrisani manuelno. Kriterijum za kalibraciju je slaganje KTP modela sa osrednjenom KTP sa stanica iz regiona, a mera slaganja je nagib krive u sredini intervala, tj. za trajanja protoka između 30 i 60%. Međutim, pored kalibracije modela prema sredini intervala, ovde se gledalo slaganje u intervalima od 0-30%, kao i 60-100%, odnosno za period malih i velikih voda.

U poređenju sa korišćenim modelom HEC-HMS sa 8 parametara (Praštalo i sar., 2017), ovde je kalibrisano 19 parametara modela HBV light.

Tabela 2: Podaci o HS korišćenim za kalibraciju i verifikaciju modela Drenove (izvor: Praštalo i sar., 2017).

Table 2: Data on HS applied for calibration and validation of the Drenova model (source: Praštalo et al., 2017).

Br.	HS	Vodotok	Površina sliva [km <sup>2</sup> ]	Period raspoloživih podataka osmatranja protoka	Odstojanje HS od profila brane Drenova [km]
1	Hrustovo	Sanica	348	1966-1990; 2006-2008	74
2	Rmanj Manastir	Unac	1010	1961-1990; 2007-2008	125
3	Blažuj	Zujevina	155	1966-1990; 2006-2008	118
4	Dobrinje	Bosna	2677	1961-1990	93
5	Kalošević	Usora	633	1961-1990; 2006-2009	27
6	Karanovac	Spreča	1828	1961-1990; 2006-2008	52
7	Merdani	Lašva	950	1961-1990; 2006-2008	80
8	Modrac	Spreča	1176	1961-1990; 2006	77



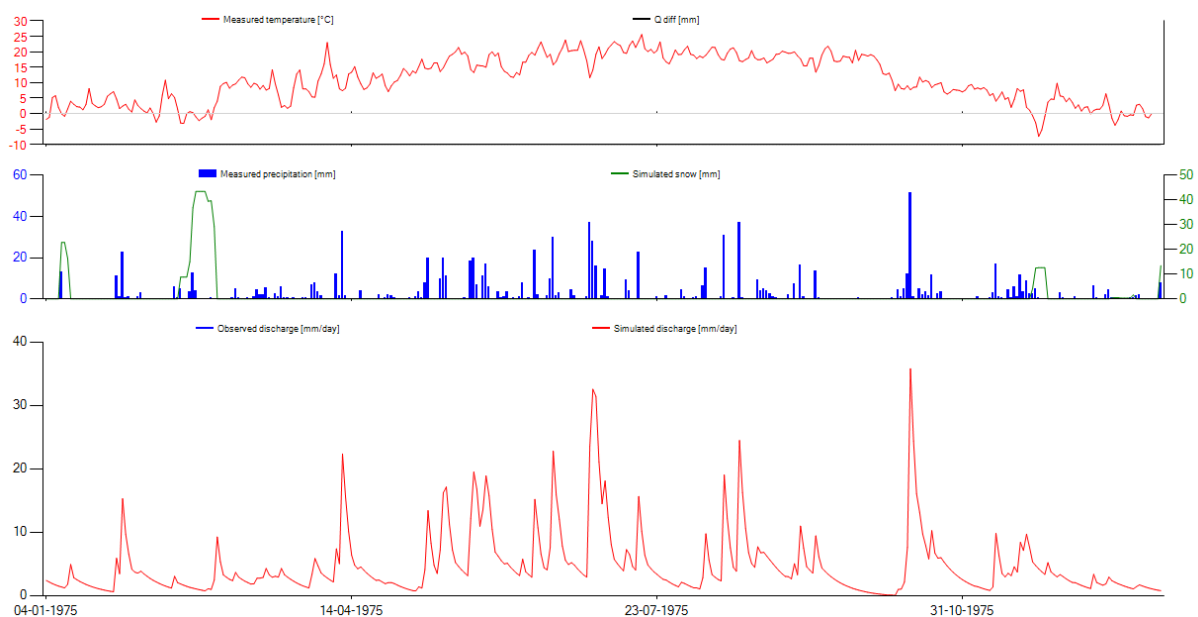
Slika 4: Bezdimenzionalne osrednjene KTP za periode kalibracije i verifikacije modela (Praštalo, 2017)

Figure 4: Dimensionless averaged FDC in the model calibration and verification periods (Praštalo, 2017)

### 3 Rezultati modeliranja i diskusija

#### 3.1 Dnevne KTP u periodima kalibracije i verifikacije modela

Primenjen pristup posredne kalibracije i verifikacije simulacionog modela, podrazumeva dodatni korak u obradi rezultata simulacije – izradu KTP na osnovu godišnjih serija simuliranih dnevnih protoka. Na slici 5 prikazani su rezultati simulacije za jednu godinu iz kalibracionog perioda.

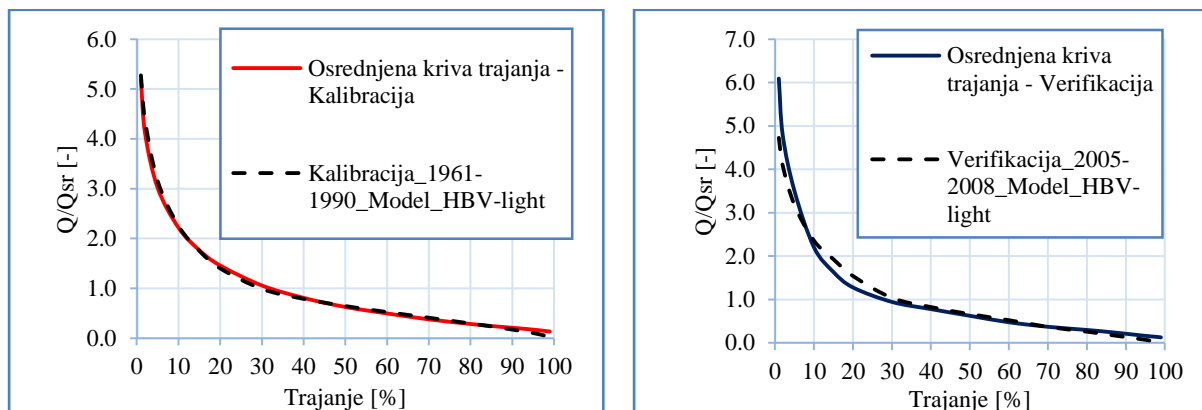


Slika 5: Grafički prikaz simulacije za 1975. godinu iz kalibracionog perioda.

Figure 5: Simulation results for the year 1975. in the calibration period.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

'Osmotrene' odn. osrednjene KTP korišćene u procesima kalibracije i verifikacije modela, prikazane su u celom dijapazonu trajanja na slici 6, zajedno sa odgovarajućim KTP modela. Nagib KTP u opsegu trajanja između 30 i 60%, izdvojeno je prikazan numerički u tabeli 4 i grafički na slici 7.



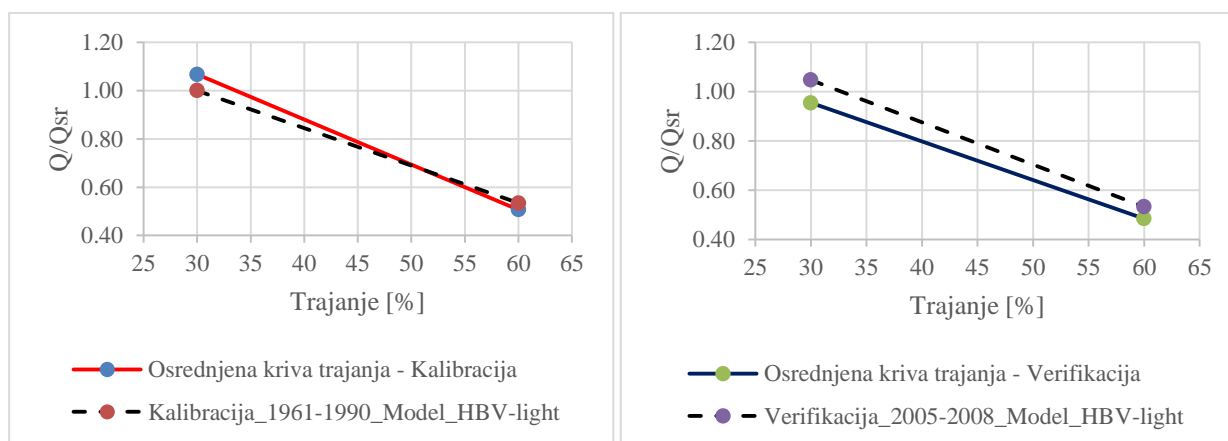
Slika 6: Osmotrene KTP i KTP modela. Levo: Period kalibracije; Desno: Period verifikacije.

Figure 6: Observed and modeled FDC and FDC. Left: The calibration period; Right: The verification period.

Tabela 4: Nagibi KTP [%] za interval trajanja protoka od 30÷60%

Table 4: Daily FDC slope [%] in the flow duration range of 30÷60%

Proces	KTP osmotreno	KTP model Drenova	$\Delta$ (osmotreno-model)
Kalibracija	1.867	1.552	0.315
Verifikacija	1.564	1.715	-0.151



Slika 7: Prikaz KTP u intervalu 30÷60% za periode kalibracije modela (levo) i verifikacije (desno).

Figure 7: The FDC interval 30÷60% in the calibration period (left) and validation period (right).

Na osnovu slike 6, vizuelnim upoređivanjem KTP za period kalibracije, primećuje se sasvim dobro slaganje u celom dijapazonu trajanja KTP. U periodu verifikacije, odstupanje KTP modela se javlja u domenu kraćih trajanja (do 20%) – srednjih velikih voda. Odstupanje nagiba na segmentu KTP između 30% i 60% je manje za period verifikacije u odnosu na period kalibracije (tabela 4). Grafički prikaz segmenata, sa pomakom nagore (slika 7 desno), ukazuje da model daje veću varijaciju oticaja u periodu verifikacije u odnosu na osrednjenu KTP.

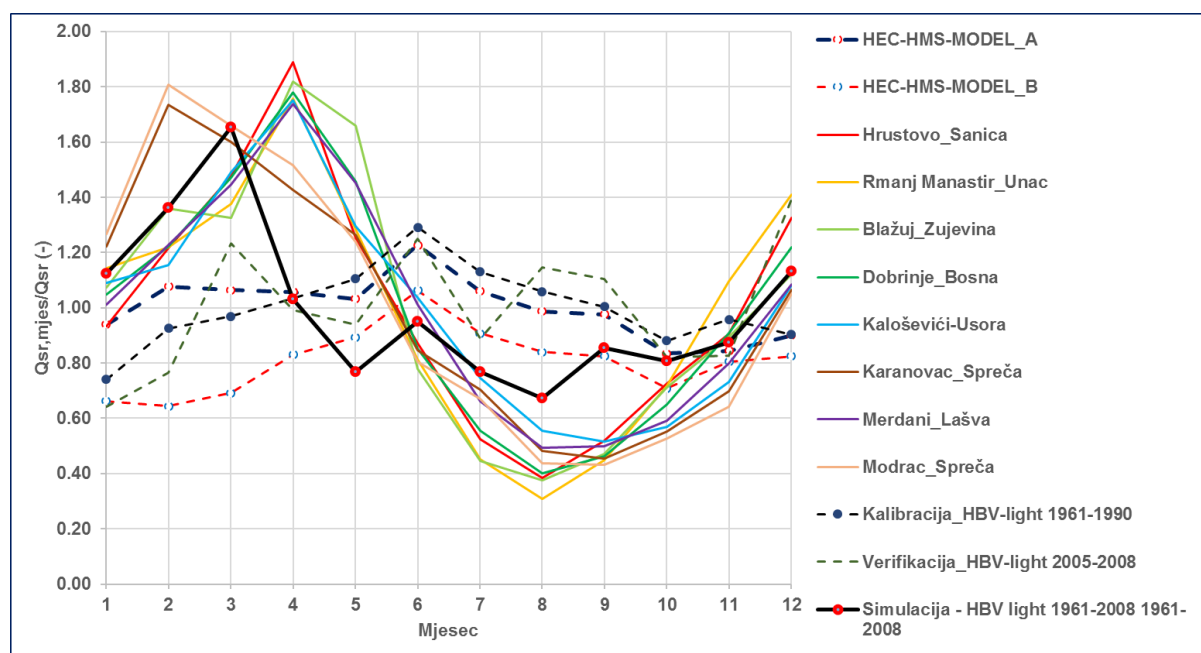
### 3.2 Osetljivost parametara modela

Pod osetljivošću parametara modela podrazumeva se uticaj promene njegove vrednosti u intervalu na konačni rezultat modeliranja - vrednost oticaja sa sliva. Osetljivi parametri modela za malu promenu vrednosti u svom intervalu značajno menjaju rezultat modeliranja.

Usvojene vrednosti parametara HBV light modela sliva Drenove prikazane su u tabeli 2, kol. 7, a gornja i donja granica intervala za svaki parametar u kol. 5 i 6. Prilikom ručne kalibracije modela, analiziran je svaki pojedinačni parametar modela tako što je proverena njegova osetljivost, tj. uticaj na KTP modela i njeno slaganje sa osrednjenom KTP u periodu kalibracije. Utvrđeno je da su najosetljiviji parametri modula Sneg - akumulacije i topljenja snega, kao i parametri transformacije oticaja u hidrogram.

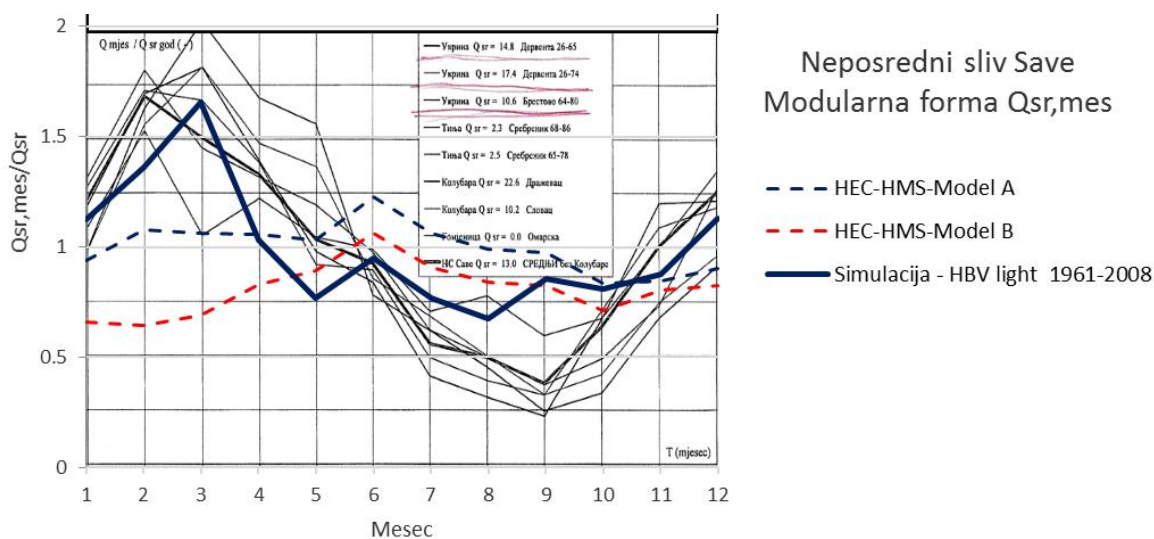
### 3.3 Unutargodišnja raspodela oticaja

U analizi srednjih voda, osim vrednosti prosečnog višegodišnjeg protoka, srednjih mesečnih protoka, kao i KTP, važna je i unutargodišnja raspodela oticaja. Ona ujedno u ovom radu predstavlja dodatni kriterijum za verifikaciju rezultata simulacionog modela HBV light. Verifikacija je opet posredna i prikazana je u dva konteksta: 1) u odnosu na skup HS koje su korišćene za kalibraciju i verifikaciju modela i 2) u okviru slivova direktnih pritoka reke Save u BiH, prema dijagramu iz Analize bilansa voda Republike Srpske (ZZV, 2011). Poređenje unutargodišnje raspodele oticaja među slivovima različite površine, najpogodnije je preko modularne krive srednjih mesečnih protoka. Modularna kriva se predstavlja odnosom srednjih mesečnih protoka i prosečnog godišnjeg protoka u višegodišnjem periodu. Na slici 8 prikazane su modularne krive za HS koje su korišćene za kalibraciju i verifikaciju modela, a na slici 9, za slivove neposrednih pritoka reke Save.



Slika 8: Unutargodišnja raspodela oticaja na HS korišćenim za kalibraciju modela i rezultati simulacije prikazani preko modularne krive srednjih mesečnih protoka.

Figure 8: Interannual variability at HS used for model calibration and simulation results shown as monthly flow ratio to annual flow.



Slika 9: Unutargodišnja raspodela oticaja u karakterističnim profilima direktnih pritoka reke Save (izvor: ZZV, 2011) i rezultati simulacije prikazani preko modularne krive srednjih mesečnih protoka.

Figure 9: Interannual variability for the direct tributaries to the river Sava (source: ZZV, 2011) and simulation results shown as monthly flow ratio to annual flow.

Unutargodišnja raspodela oticaja je slična na HS prikazanim na slici 8, kada je u pitanju pojava malih i velikih voda, osim na reci Spreči, gde je najvodniji mesec februar. Rezultati simulacije u paketu HEC-HMS za model sa snegom (A) i model bez snega (B), ukazuju da model nije u stanju da reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja (Praštalo i sar., 2017). Isto tako, posebno posmatrane modularne krive u periodima kalibracije i verifikacije modela HBV light, ne pokazuju realnu varijaciju oticaja između perioda velikih i malih voda, niti su ovi periodi dobro raspoređeni unutar godine. Period verifikacije modela je kratak da bi unutargodišnja raspodela oticaja mogla da se ispolji, što se i vidi iz naizmeničnih skokova modularne krive. Međutim, modularna kriva za ceo period 1961-2008, dobijena na osnovu simuliranih dnevnih protoka u modelu HBV-light, nalikuje modularnim krivama sa HS (slika 8). Postoji izražen period velikih voda, kao i period malih voda, ali je odnos mesečnih protoka i prosečnog protoka u periodu malih voda veći nego na razmatranim HS na slici 8.

Za pozadinu slike 9 koja je preuzeta iz originalnog dokumenta (ZZV, 2011), nažalost, nije bio dostupan bolji grafički prilog gde bi se jasno videla pripadnost modularnih krivih karakterističnim profilima reka. Ipak, ova slika omogućava da se bolje sagledaju rezultati simulacije modela HBV light za ceo period 1961-2008. Na slici su prikazane modularne krive sa profila koji su služili za bilansiranje voda u slivovima reka na reci Ukrini, Tinji i Gomjenici, a prikazani su i profili HS na Kolubari. Zapaža se da modularna kriva za sliv akumulacije Drenova dobijena preko hidrološkog modela HBV light bolje reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja u odnosu na HEC-HMS. Pored toga, u hladnom/vanvegetacionom periodu godine, modularna kriva odgovara 'familiji' krivih sa slivova iz užeg regiona.

## 4 Zaključak

U radu su istraživane mogućnosti kalibracije i verifikacije modela za simulaciju dnevnih protoka za neizučeni sliv pomoću KTP u softverskom paketu HBV light koji ima 19 parametara. Cilj istraživanja bio je ispitivanje potencijala za reprodukciju unutargodišnje raspodele oticaja u odnosu na rezultate simulacije HEC-HMS modelom sa 8 parametara (Praštalo i sar., 2017), na osnovu istih ulaznih veličina: padavina, temperature vazduha i potencijalne evapotranspiracije (PET).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Sliv brane Drenova je za HBV light model šematizovan kao celina – bez podslivova, preko jedne visinske zone i dve vegetacione. Model sliva je pripremljen u GIS okruženju. Za izrađeni model su korišćeni ulazni meteorološki podaci sa MS Banja Luka. Kalibracija i verifikacija modela sprovedene su pomoću KTP sa 8 odnosno 7 HS iz šireg regiona. Period kalibracije je 30 godina, a verifikacije 4. Utvrđeno je da su u HBV light modelu najosjetljiviji parametri modula Sneg - akumulacije i topljenja snega, kao i parametri transformacije oticaja u hidrogram.

Izvršeno je vizuelno poređenje celih dijapazona KTP tokom oba perioda i veća odstupanja u opsegu srednjih velikih voda su očigledna u periodu verifikacije modela. Međutim, u periodu verifikacije, razlika nagiba srednjeg segmenta KTP (30÷60%) je manja u odnosu na period kalibracije. Grafici nagiba KTP, sa druge strane, pokazuju da je KTP u periodu verifikacije bliža osrednjenom KTP u odnosu na period verifikacije gde je ona praktično translatorno pomerena naviše. Ova situacija navodi na zaključak da su sve evidentirane razlike, posebno u dijapazonu velikih voda i povećanja odnosa srednjih mesečnih i srednjeg višegodišnjeg protoka, doprinele da HBV light model bolje reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja u odnosu na HEC - HMS model.

Pool i saradnici (2017) su zaključili da se hidrogrami bolje simuliraju kada strategije kalibracije i verifikacije modela obuhvataju velike vode, a KTP krive, kada se baziraju na srednjim i malim vodama. U nastavku istraživanja, ispitaće se uticaj kalibracije parametara modela na segment KTP bliži velikim vodama, kao i finija šematizacija sliva u modelu HBV light, sa podslivovima i više visinskih zona.

## Zahvalnica

Autori rada se zahvaljuju Zavodu za vodoprivredu d.o.o. Bijeljina na ustupljenim podacima za istraživanje.

## Literatura

1. Bergström, S., (1976) *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*, SMHI Report RHO 7, Norrköping, 134 pp.
2. European Environment Agency (EEA) (2006) Corine Land Cover (CLC)
3. Pool, S., Viviroli, D., Seibert, J. (2017) Prediction of hydrographs and flow-duration curves in almost ungauged catchments: which runoff measurements are most informative for model calibration?, *Journal of Hydrology* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.037>
4. Praštalo, P. (2017) *Modeliranje hidrološki neizučenog sliva za potrebe akumulacije "Drenova"*, Diplomski rad, Arhitektonsko – građevinsko - geodetski fakultet Univerziteta u Banja Luci
5. Праштало, П., Благојевић, Б., Топаловић, Ж. (2017) Калибрација и верификација НЕС НМС модела неизученог слива помоћу кривих протока, *Наука у пракси*, бр. 20/2017, стр. 20-28
6. Seibert, J. (1999) *Conceptual runoff models - fiction or representation of reality?*, Ph.D. thesis, University of Uppsala the Faculty of Science and Technology.
7. Seibert, J. (2005) *HBV light user's Manual*. Stockholm: Stockholm University. doi: 10.13155/29825.
8. Seibert, J. and Vis, M. J. P. (2012) Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3315–3325, 2012. doi:10.5194/hess-16-3315-2012
9. SMHI. (2015) Swedish Meteorological and Hydrological Institute - Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning. [ONLINE] Available at: <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/hbv-1.90007>. [Accessed 6 September 2018]
10. Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38-1, pp. 55-94
11. Zavod za vodoprivredu (ZZV) (2011) *Analiza bilansa voda u Republici Srpskoj*, Hidrološka studija, Zavod za vodoprivredu d.o.o., Bijeljina

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

12. Zavod za vodoprivredu (ZZV) (2016) *Analiza stanja i prijedlog mjera za sanaciju brane, uspostavljanje sistema monitoringa i upravljanja branom i akumulacijom Drenova*, Studija, Zavod za vodoprivredu d.o.o., Bijeljina



## Analiza suše za područje leskovačke kotline

Dženita Idrizović<sup>1</sup>, Enika Gregorić<sup>2</sup>, Vesna Počuča<sup>3</sup>, Gordana Matović<sup>4</sup>

**APSTRAKT:** Poljoprivredna proizvodnja je bitna grana privrede u leskovačkoj kotlini, međutim često je limitirana zbog pojave suša. Osnovne karakteristike svake suše su njen intenzitet, učestalost i prostorni raspored. Cilj ovoga rada je da se primenom različitih indikatora utvrdi intenzitet i učestalost suše u leskovačkoj kotlini. Meteorološki podaci su prikupljeni sa klimatološke stanice u Leskovcu. Analiziran je period od 1961. do 2016. godine. Pojava suše je praćena u vegetacionom periodu (april–septembar) sa posebnim osvrtom na letnje mesece (jul i avgust). Za analizu su korišćeni indikatori meteorološke i poljoprivredne suše: SPI, Decili, Percentili, Aridity index, RDI, klimatološki deficit padavina, De Martonne indeks, Walterov dijagram. Od 56 analiziranih vegetacionih perioda, meteorološka suša je zabeležena u više od 12% slučajeva. Prosečan klimatološki deficit tokom vegetacionog perioda na ovom području iznosi 304 mm. Indikatori poljoprivredne suše ukazuju na značajan deficit vode i potrebu za navodnjavanjem tokom jula i avgusta.

Ključne reči: suša, indeksi suše, leskovačka kotlina

## Analysis of drought of Leskovac basin

**ABSTRACT:** Agricultural production is an important branch of the economy of the Leskovac basin, but it is still limited due to drought. The major characteristics of each drought are its intensity, frequency and spatial distribution. The aim of these works is to determine the intensity and frequency of drought in the Leskovac basin using different drought indices. Meteorological data were collected from the climatological station in Leskovac. The period from 1961 to 2016 was analyzed. Drought was observed in the vegetation period (April–September), with a special focus on summer months (July and August). The analysis used indices of meteorological and agronomic droughts: SPI, Deciles, Percentiles, Aridity index, RDI, climatic precipitation deficiency, De Martonne index, Walter diagram. Of the 56 vegetation periods analyzed, meteorological drought was recorded in more than 12% of cases. The average climatic deficit during the vegetation period in this area is 304 mm. The drought indices point out a significant water deficit and irrigation is required during July and August.

Keywords: Drought, Drought indices, Leskovac basin

## 1 Uvod

Suša je jedna od najvećih prirodnih nepogoda, izazvana meteorološkim uslovima. Uopšteno, suša se može definisati kao značajan deficit prirodno dostupne vode, u vidu padavina, oticaja ili podzemnih voda, tokom nekog vremenskog perioda i na nekom području (Beran and Rodier, 1985). Ona je ponavljajuća karakteristika klime i pojavljuje se u gotovo svim klimatskim režimima (Wilhite and Svoboda, 2000). Može se klasifikovati kao meteorološka, poljoprivredna, hidrološka ili socio–ekonomska suša (Masud i sar., 2015). Njene odlike su intenzitet, učestalost, trajanje i prostorna rasprostranjenost, kao i to da je teško je predvidiva.

<sup>1</sup> Mast. inž. Dženita Idrizović, doktorand, Poljoprivredni fakultet, Zemun, idrizovic@agrif.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Dr Enika Gregorić, vanredni profesor, Poljoprivredni fakultet, Zemun, enikag@agrif.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dr Vesna Počuča, docent, Poljoprivredni fakultet, Zemun, vpocuca@agrif.bg.ac.rs

<sup>4</sup> Dr Gordana Matović, vanredni profesor, Poljoprivredni fakultet, Zemun, gmatovic@agrif.bg.ac.rs

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Uslovi nastanka i karakteristike suše uslovljeni su klimatskim i hidrološkim režimom određenog područja, stoga je sušu moguće posmatrati sa više aspekata. Sa aspekta poljoprivredne proizvodnje, deficit vode koji se javlja tokom vegetacionog perioda naziva se poljoprivredna suša (Beran and Rodier, 1985).

Mnogobrojna istraživanja na nacionalnom, kao i na svetskom nivou govore o globalnim problemima izazvanim sušom (Wilhite i sar., 2007; Gocic and Trajkovic, 2014). Istraživanja na području Srbije ukazuju na sve češća variranja padavina po količini i rasporedu. Retko se desi da tokom godine padne dovoljna, pravilno raspoređena količina padavina, koja bi omogućila nesmetan rast i razvoj biljnih vrsta. Ovakva situacija prouzrokuje nestabilnu, kolebljivu poljoprivrednu proizvodnju, koja rezultira značajnim smanjenjem finalnih prinosa (Stricevic i sar., 2011; Matović i sar., 2013a; Gregoric i sar., 2014).

Za identifikaciju suše koriste se indeksi suše, koji su važni elementi monitoringa i procene suše, jer pojednostavljaju složene međusobne odnose između mnogih klimatskih parametara. Oni omogućavaju kvantitativnu procenu klimatskih anomalija u smislu intenziteta, trajanja, učestalosti i prostornog rasporeda (Wilhite and Svoboda, 2000). Indeksi se razlikuju po kompleksnosti i podacima potrebnim za njihovo izračunavanje. Za kompleksnu analizu suše iz više aspekata, na određenom području, razvijen je veliki broj indikatora suše (IPCC, 2012). Neki od njih se proračunavaju samo na osnovu padavina, dok drugi uzimaju u obzir i temperaturu, evapotranspiraciju itd. Indeksi suše bazirani samo na padavinama su prikladniji za praćenje meteorološke i hidrološke suše, dok se za procenu poljoprivredne suše koriste indeksi koju u proračun uvode i potencijalnu evapotranspiraciju. Pri planiranju vodnih resursa, pre svega u poljoprivredi (navodnjavanje), obično se odluke zasnivaju na više različitih indeksa.

Cilj ovog rada je da se, primenom osam indikatora meteorološke i poljoprivredne suše, utvrdi pojava, intenzitet i učestalost suše u vegetacionom periodu (april–septembar) sa posebnim osvrtom na letnje mesece (jul i avgust) na području leskovačke kotline.

## 2 Materijal i metode

Područje istraživanja je leskovačka kotlina. Reprezentativna meteorološka stanica se nalazi u Leskovcu. Podaci o klimatskim parametrima (mesečna suma padavina, mesečne vrednosti srednje dnevne temperature i mesečni podaci, potrebni za proračun potencijalne evapotranspiracije po FAO Penman–Monteith) preuzeti su iz Hidroloških godišnjaka Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZa). Period obrade je 1961–2016, sa osvrtom na vegetacionu sezonu (april–septembar) i na letnjim mesecima (jul–avgust i jun–avgust) jer su istraživanja obavljena sa aspekta poljoprivrede.

Uslovi vlažnosti u leskovačkoj kotlini analizirani su sa aspekta meteorološke i poljoprivredne suše, korišćenjem 8 različitih indeksa:

- indeksi koji koriste podatke o padavinama: standardizovani indeks padavina (SPI), decili i procentualno odstupanje od normale. Procentualno odstupanje od normale izračunato je i za srednju temperaturu vazduha;

- indeksi koji koriste podatke o padavinama i temperaturi: De Martonne indeks i Walter–ov dijagram;

- indeksi koji uključuju potencijalnu evapotranspiraciju: indeks aridnosti, klimatološki deficit padavina (KDP) i Reconnaissance Drought Index (RDI).

SPI, Decili i RDI su računati programom DrinC (<http://drinc.ewra.net>). Ostali indeksi su računati uz pomoć programa Microsoft Excel.

**Standardizovani indeks padavina – SPI (Standardized Precipitation Index)** je jednostavan i veoma primenljiv pokazatelj uslova vlažnosti, koji koristi samo istorijske podatke o količini padavina. SPI indeks je razvijen od strane McKee i sar. (1993) za procenu deficita padavina, kao i za procenu uticaja suše na raspoložive vodne resurse. Postupak proračuna ovog indeksa može se naći u literaturi Zarch i sar. (2015). Svetska meteorološka organizacija predložila je SPI kao glavni indeks meteorološke suše koji bi trebalo koristiti za monitoring i praćenje uslova suše (WMO, 2016).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Fleksibilnost SPI se ogleda u mogućnosti odabira vremenskih perioda za koji se vrši obračun. SPI obračunat za 3 meseca i kraći vremenski period je veoma značajan u bazičnoj analizi suše; SPI za 6 meseci i kraći period, koristan je u praćenju uticaja suše u poljoprivredi, dok SPI za 12 meseci i duži period je važan pri proučavanju hidrološke suše (WMO, 2016). SPI indeks je pogodniji za praćenje meteoroloških i hidroloških suša od poljoprivredne suše.

Za ocenu meteorološke suše tokom vegetacionog perioda (april–septembar) korišćen je šestomesečni SPI (SPI–6) za 30. septembar, a tokom letnjih meseci (jul–avgust) SPI–2 i (jun–avgust) SPI–3, oba za 31. avgust. Dužina sušnog perioda kao i vreme prestanka suše su određeni preko SPI–1.

Umesto brojnih vrednosti SPI, kao pogodnije za korišćenje, daju se kvalitativne ocene uslova vlažnosti prema kriterijumima utvrđenim za operativne potrebe (RHMZb). Prema tom kriterijumu početak „umerene suše“, kao najblažeg oblika, počinje od vrednosti –0,935. Što je niža vrednost SPI, suša je intenzivnija. Prema tome, suša se javlja svaki put kada je vrednost SPI–1 kontinuirano negativan i dostigne vrednost manju od –0,935. Prestanak suše je kada SPI–1 postaje pozitivan, čime je određena i njena dužina trajanja. Kategorizacija suše na osnovu SPI indeksa data je u Tabeli 1 (RHMZb; McKee i sar., 1993).

Tabela 1. Klasifikacija suše na osnovu SPI vrednosti.

Table 1. Drought classification by SPI value.

OBJAŠNJENJE OZNAKA ZA KATEGORIJE USLOVA VLAŽNOSTI		
Oznaka	Uslovi vlažnosti	Vrednost SPI
IS	Izuzetna suša	$SPI \leq -2.326$
ES	Ekstremna suša	$-2.326 < SPI \leq -1.645$
JS	Jaka suša	$-1.645 < SPI \leq -1.282$
US	Umerena suša	$-1.282 < SPI \leq -0.935$
S	Sušno	$-0.935 < SPI \leq -0.524$
N	Normalni uslovi vlažnosti	$-0.524 < SPI < +0.524$
MV	Malo povećana vlažnost	$+0.524 \leq SPI < +0.935$
UV	Umerena povećana vlažnost	$+0.935 \leq SPI < +1.282$
JV	Jako vlažno	$+1.282 \leq SPI < +1.645$
EV	Ekstremno vlažno	$+1.645 \leq SPI < +2.326$
IV	Izuzetno vlažno	$SPI \geq +2.326$

**Procenat odstupanja od normale (Percent of normal)** je indikator suše koji se dobija jednostavnim postupkom. Veoma je efikasan za analizu suše u jednom regionu, odnosno u jednoj sezoni. Predložen je od strane Hayes (2006). Izračunava se kao količnik odstupanja merenih padavina od normale i normale, pomnožen sa 100% (Hayes, 2006). Metoda proračuna može se primeniti na bilo kojoj lokaciji i najčešće se računa na mesečnom, sezonskom ili godišnjem nivou. Nedostatak ovog postupka je u tome što ne detektuje ekstremne sušne situacije, što je posebno značajno u područjima sa aridnom klimom. Problemi u proračunu javljaju se kod mesečnih ili sezonskih skala padavina koje nemaju normalnu raspodelu. Upotreba procentualnog odstupanja padavina od normale zahteva da analizirani podaci imaju normalnu raspodelu, gde se medijana i prosečna vrednosti posmatraju kao isto.

Normalom se, u ovom radu, podrazumevaju prosečne vrednosti meteoroloških parametara registrovane na meteorološkoj stanici Leskovac, u periodu od 1971 do 2000. Proračun odstupanja padavina i temperature od normale je sproveden za vegetacioni period i za dva najtoplija meseca u godini (juli i avgust).

Na osnovu podataka o padavinama i temperaturi, De Martonne–ovim indeksom suše može se klasifikovati klima područja. **De Martonne–ov indeks suše** u datom regionu, izračunava se prema sledećoj jednačini (1):

$$I_{DM} = \frac{P}{T+10} \quad (1)$$

gde je: P – prosečna godišnja suma padavina (mm); T – prosečna godišnja temperatura (°C).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Mesečne vrednosti indeksa računaju se na sledeći način (2):

$$I_m = \frac{12P'}{T'+10} \quad (2)$$

gde je:  $P'$  – prosečna mesečna suma padavina (mm);  $T'$  – prosečna mesečna temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Klasifikacija suše prema indeksu suše De Martonne-a ( $I_{DM}$ ), izvršena je na sledeći način (De Martonne, 1926):  $I_{DM} < 10$  – aridna klima; 10-20 – semiaridna; 20-24 – mediteranska; 24-28 – semihumidna; 28-35 – humidna; 30-55 – veoma humidna i  $> 55$  – ekstremno humidna klima. S aspekta poljoprivrede, ovim indeksom određenim na mesečnom nivou (Tabela 2.), mogu se proceniti potrebe za navodnjavanjem (Stričević, 2007a). Kada je vrednost mesečnog indeksa ( $I_m$ ) manja od 20, neophodno je primeniti navodnjavanje (Zambakas, 1992).

Tabela 2. Mesečni De Martonne-ov indeks suše i odgovarajuće potrebe za navodnjavanjem (Stričević, 2007a)

Table 2. Monthly De Martonne's index of drought and proper irrigation demand (Stričević, 2007a)

Vrednost $I_m$ indeksa	Pokazatelj potrebe za navodnjavanjem
< 5	pustinjski uslovi
5 – 10	neophodno navodnjavanje za sve useve
10 – 20	neophodno navodnjavanje, sem za neke kulture koje su otporne na sušu
20 - 30	navodnjavanje kao dopunska mera
>30	navodnjavanje nije potrebno

Početak pojave sušnog perioda i njegovo trajanje pokazuje **dijagram po Walter-u** (Walter i sar., 1975). Walter-ov dijagram je grafički prikaz klimatskih uslova na određenoj lokaciji. Na dijagramu su prikazane sezonske varijacije, ekstremne, kao i prosečne vrednosti, što omogućava jednostavan uvid u klimatske karakteristike posmatranog područja. Walter-ov dijagram prikazuje raspored humidnog i aridnog perioda kroz godinu, što je posebno značajno sa aspekta poljoprivrede, jer ukazuje na eventualnu potrebu za navodnjavanjem (Stričević, 2007a). Dobija se na osnovu dugogodišnjih srednjih mesečnih vrednosti temperature vazduha i dugogodišnjih mesečnih suma padavina prikazanih grafički u odnosu 1:3 (Stričević, 2007a).

Indeksi koji definišu poljoprivrednu sušu u proračunu uključuju i potencijalnu evapotranspiraciju (PET). **Indeks aridnosti (Aridity index – AI)** definiše se kao količnik sume padavina i sume potencijalne evapotranspiracije računane Penman metodom (UNESCO, 1979). Usled neraspologanja svim meteorološkim podacima potrebnim za obračun Penman metodom, UNEP (1992) je prilagodio klasifikaciju i za sračunatu PET po Thorntwaite-u (Thorntwaite, 1948). PET računat Thorntwaite-ovom metodom korišćen je za izračunavanje indeksa aridnosti u ovom radu. Jednačina (3) za izračunavanje AI indeksa glasi (UNEP, 1992):

$$AI_U = \frac{P}{PET} \quad (3)$$

gde je:  $P$  – prosečna godišnja suma padavina (mm);  $PET$  – prosečna godišnja suma evapotranspiracije (mm).

Klasifikacija klime prema AI indeksu (UNEP, 1992):  $P/PET < 0,05$  – hiperaridna klima; 0,05–0,20 – aridna; 0,20–0,50 – semiaridna; 0,50–0,65 – subhumidna i  $> 0,75$  humidna klima.

Oduzimanjem sume PET od sume padavina ( $P$ ) dobija se vrednost **klimatološkog deficita padavina (KDP)** (Spasov, 2003). Potencijalna evapotranspiracija računata je metodom FAO Penman Monteith (Allen i sar., 1998). Ovaj pokazatelj je izračunat za svaki prosečni mesec u vegetacionoj sezoni i u sumarnom obliku za period jul–avgust i vegetacionu sezonu. Za jul–avgust i vegetacioni period date su i krive raspodele na osnovu empirijskih vrednosti.

Proračun **RDI (Reconnaissance Drought Index)** pored padavina uključuje i PET. Postupak proračuna je identičan kao i kod indeksa SPI, s tim da se umesto padavina uzima količnik  $P$  i  $PET$

(Tsakiris and Vangelis, 2005). Indikator je poljoprivredne i hidrološke suše. RDI indeks se može računati za bilo koji vremenski period, međutim preporučuje se proračun na 3, 6, 9 i 12-omesečnom nivou, ukoliko je cilj poređenje stanja suše na različitim lokalitetima. Potencijalna evapotranspiracija računata je metodom FAO Penman Monteith (Allen i sar., 1998). Iako RDI uglavnom pokazuje meteorološku sušu, može se koristiti za grubu procenu gubitaka prinosa usled suše. Za ovu analizu je računat normalizovan, standardizovan indeks RDI, baziran na gama raspodeli. Izrazi potrebni za proračun dati su u literaturi Tsakiris i sar. (2007). Korišćeni su RDI-2, RDI-3 i RDI-6. RDI.

Indeks suše **decili**, predstavljen od strane Gibbs and Maher (1967), koristi se za identifikaciju meteorološke, hidrološke i poljoprivredne suše. Proračun indeksa je jednostavan. Bazira se na tome da se istorijski podaci o padavinama poređaju u rastući niz. Prvi decil označava 10% najnižih suma padavina u odnosu na posmatrani period, dok peti decil odgovara medijani. Proračun se može raditi na dnevnom, nedeljnom, mesečnom, sezonskom ili godišnjem nivou. Klasifikacija uslova vlažnosti (suše) na osnovu decila, predstavljena je u Tabeli 3. (Mannava i sar., 2011)

Tabela 3. Klasifikacija uslova suše prema decilima. (Mannava i sar., 2011)

Table 3. Classification of drought conditions according to deciles. (Mannava i sar., 2011)

Klasifikacija decila	Kategorija padavina	Opis
decili 1-2:	najniži 20%	mного ispod normale
decili 3-4:	sledeći najniži 20%	ispod normale
decili 5-6:	srednji 20%	oko normale
decili 7-8:	sledeći najveći 20%	iznad normale
decili 9-10:	najveći 20%	mного iznad normale

### 3 Rezultati i diskusija

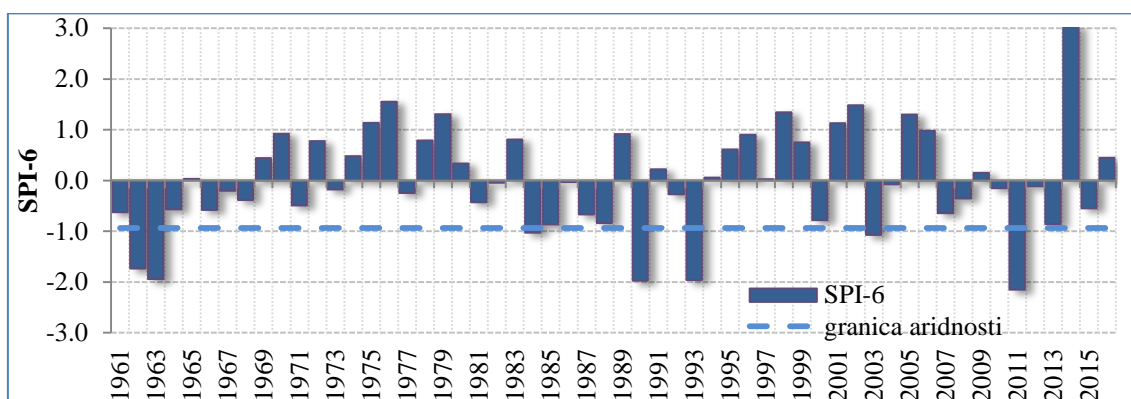
Leskovačka kotlina pripada području umereno-kontinentalne klime, sa toplim letima i hladnim zimama. Srednja godišnja temperatura vazduha iznosi 11,7°C, dok je srednja temperatura vazduha tokom vegetacione sezone prolećnih useva (april-septembar) oko 17,7°C. Najtopliji meseci u godini su jul (21,4°C) i avgust (21°C). U julu se u proseku javlja 12 tropskih dana. Ekstremna temperatura od 43,7°C zabeležena je 14. jula 2007. Temperature na ovom području približne su prosečnim temperaturama na poljoprivrednim (nizijskim) područjima Srbije (Matović i sar., 2013a).

Sa prosečnom sumom padavina od 623 mm, Leskovac spada u donju trećinu raspona prosečnih godišnjih padavina u Srbiji, koje se kreću od oko 550 mm u Kikindi do oko 950 mm na Zlatiboru (Tošić i sar., 2017). Gocić i Trajković (2014) su podelom Srbije na tri regiona, na osnovu različitih režima padavina, zaključili da region kome pripada Leskovac, tokom letnjeg perioda, ima najmanju količinu padavina na području Srbije. Oni su takođe zaključili da je u periodu od 1946-2012 na području cele Srbije prisutan trend porasta godišnje sume padavina, koji u proseku iznosi 0,851 mm/god. Na području centralne i jugoistočne Srbije, kome pripada istraživano područje, trend porasta padavina je najmanji i iznosi 0,383 mm/god (Gocić i Trajković, 2014). Tokom vegetacionog perioda (april-septembar) u leskovačkoj kotlini prosečno padne 326 mm kiše, što je manje nego u poljoprivrednim područjima u Srbiji, gde prosečno padne 365 mm (Matović i sar., 2013a). Jun je obično najkišovitiji mesec u godini. Posmatrajući mesečnu raspodelu padavina u vegetacionoj sezoni, period jul-avgust je najsušniji, sa prosečnom sumom padavina od 91 mm. Zbog visokih temperatura vazduha i niske vrednosti sume padavina, period jul-avgust je, pored vegetacione sezone, izabran za detaljnu analizu sa aspekta pojave suše. Najmanja količina padavina tokom vegetacione sezone zabeležena je 2011. godine (177 mm), kada je palo malo više od polovine prosečnih višegodišnjih padavina. Najmanja količina kiše u letnjem periodu (jul-avgust), od samo 1,2 mm, zabeležena je 1988. godine, kada je avgust bio beskišni.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

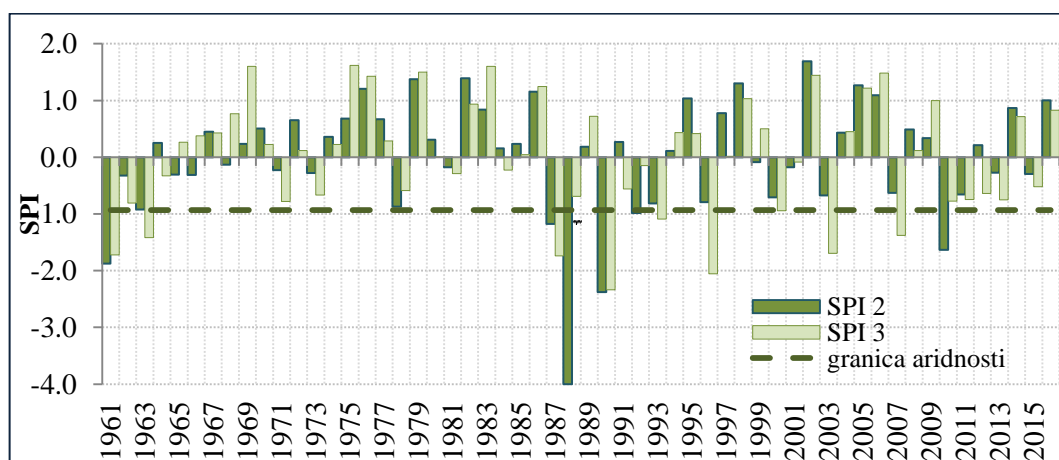
Iako su količine padavina manje od prosečnih u Srbiji, De Martonne–ov indeks (Ig), izračunat na bazi podataka o dugogodišnjim padavinama i temperaturama vazduha, iznosi 29,6. Na osnovu dobijene vrednosti, klima proučavanog područja karakteriše se kao humidna (granica je 28). Izračunata vrednost indeksa aridnosti je 0,89, što takođe klimu područja klasifikuje kao humidnu ( $AI > 0,65$ ). Sa aspekta poljoprivrede važno je ispitati uslove vlažnosti u periodu u kome se obavlja životni ciklus biljaka (vegetaciona sezona). Kod prolećnih useva koji se gaje u području našeg klimata, vegetaciona sezona podrazumeva šestomesečni period koji počinje od aprila i traje zaključno sa septembrom. U okviru vegetacione sezone izdvajaju se letnji, najtopliji meseci u godini: jul i avgust, tokom kojih se usevi obično nalaze u “kritičnom periodu” u odnosu prema potrebama za vodom. Nedostatak potrebne količine vode u ovom periodu može rezultirati velikim padom konačnih prinosa. Otuda je važna analiza letnjeg dela godine i cele vegetacione sezone, sa aspekta aridnosti. Rezultati ovih analiza prikazuju se u nastavku rada.

Analizom indeksa SPI–6 za 30. septembar, odnosno za vegetacionu sezonu (april – septembar), sedam puta je uočena pojava suše u nizu od 56 godina (Slika 1). To znači da je bilo 12,5% sušnih vegetacionih sezona. Analiza najtoplijeg dela godine (jun, jul, avgust) (SPI–3) pokazuje prisutnost suše tokom 12 godina, odnosno u 16,1% slučajeva. Pojava suše na osnovu SPI–2 indeksa (jul–avgust) je prisutna u 10,7% slučajeva.. Samo za 1990. godinu za sva tri vremenska perioda (vegetacioni period, jun – avgust i jul – avgust) SPI indeks pokazuje intenzivnu, odnosno ekstremnu sušu (Slika 1. i 2.). Na osnovu kriterijuma da je vrednost SPI–1 manja od  $-0,935$ , tokom vegetacione sezone, samo se u 1961. godini javila tromesečna suša (jul–septembar), a u jedanaest godina dužina suše je bila dva meseca.



Slika 1. Vrednosti SPI–6 za 30. septembar (vegetacionu sezonu) za meteorološku stanicu Leskovac.

Figure 1. SPI–6 values for September 30 (vegetation season) for the meteorological station Leskovac.



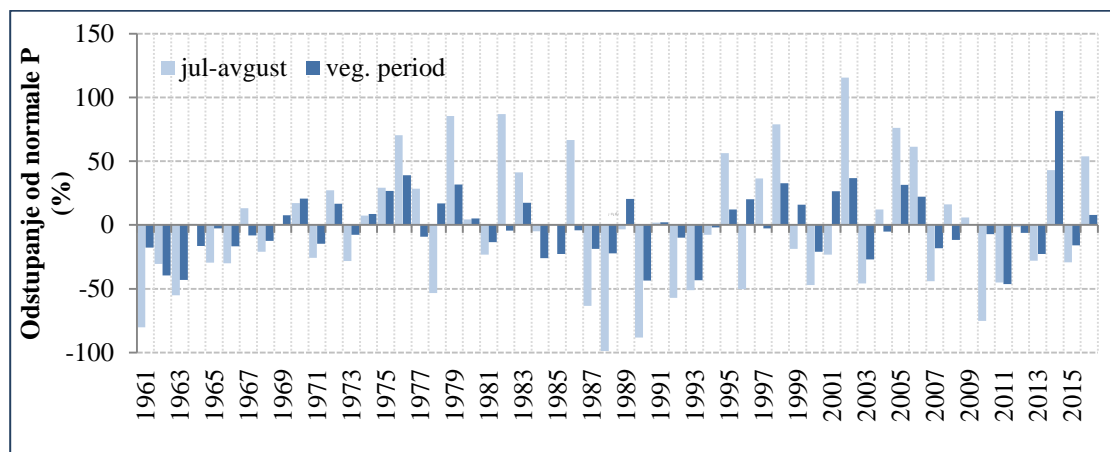
Slika 2. Vrednosti SPI–2 i SPI–3 za 31. avgust za meteorološku stanicu Leskovac.

Figure 2. SPI–2 and SPI–3 values for August 31 for the meteorological station Leskovac.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na osnovu indikatora decili, granična vrednost prema kojoj se definiše kategorija suše “mnogo ispod normale” (20% verovatnoće), za vegetacioni period iznosi 264,8 mm padavina. Prema istom indikatoru, najintenzivnija suša je bila 2011. godine, u kojoj SPI-1 pokazuje dvostruku dvomesečnu sušu u vegetacionoj sezoni (april–maj i avgust–septembar). Sledeća u nizu, prema intenzitetu suše, određene prema decilima, je 1990. godina, koju takođe svi analizirani SPI indeksi definišu kao sušnu.

Posle 1975. su češća izrazitija odstupanja vegetacionih i letnjih padavina od normale (Slika 3). U većem delu posmatranog perioda od 56 godina, tj. u 59% slučajeva, tokom vegetacione sezone, padavine su manje od normale (od proseka za period 1971–2000). U 55% slučajeva, tokom jula i avgusta je takođe bilo manje padavina od normale (Slika 3). Najsušnijeg leta (1988) je palo samo 1,2 mm kiše, pa razlika padavina u odnosu na normalu iznosi 91,8mm, odnosno 98,7%. Deficit padavina tokom najsušnije vegetacione sezone (2011) u odnosu na normalu iznosi 153,4 mm, odnosno 46,4%.



Slika 3. Odstupanje padavina od normale za period jul–avgust i za vegetacionu sezonu (april – septembar) za meteorološku stanicu Leskovac (1961–2016).

Figure 3. Deviation of precipitation from the normal for the period July–August and the vegetation season (April–September) for the meteorological station Leskovac (1961–2016).

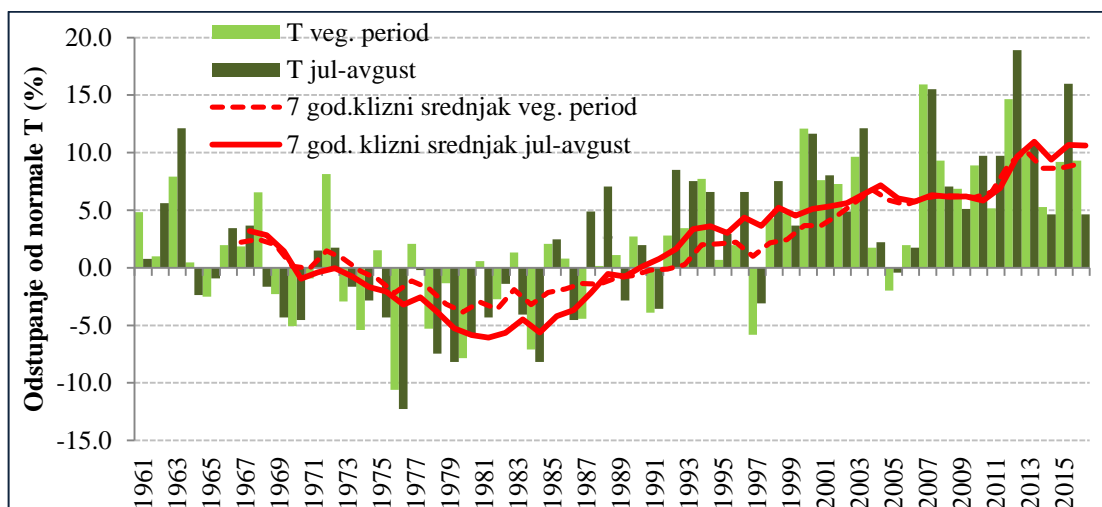
Srednja temperatura vazduha tokom vegetacionih sezona, kao i tokom letnjih meseci (juli, avgust), u prvih trideset godina istraživanog perioda (1961–1990) pokazuje uglavnom negativno odstupanje od normale (Slika 4). U narednom periodu (1990–2016), temperature su u porastu i imaju trend sve većeg pozitivnog odstupanja, što su pokazala i druga istraživanja rađena za Srbiju (Ruml i sar, 2017; Matović i sar., 2013a; Matović i sar., 2013b; Gregoric i sar., 2014).

Vrednosti de Martonne–ovog indeksa, sračunatih na mesečnom nivou, prosečno za 56 godina, date su u Tabeli 4. U kategoriju “navodnjavanje je neophodno, sem za neke kulture otporne na sušu”,  $Im=10-20$  (Stričević, 2007a), spadaju jul i avgust. Analizom de Martonne–ovog indeksa na mesečnom nivou, pojedinačno za svaku od 56 godina, dobijeno je da je “navodnjavanje neophodno za sve useve” u 30% slučajeva tokom avgusta i u 25% slučajeva tokom jula. U svim ostalim slučajevima, tokom jula i avgusta “navodnjavanje je takođe neophodno, sem za neke kulture koje su otporne na sušu”.

Walter–ov dijagram (Slika 5) pokazuje početak suše krajem juna i njeno trajanje do polovine septembra.

Vrednosti klimatološkog deficita padavina (KDP), izračunati su za svaki mesec u vegetacionoj sezoni, na bazi prosečnih vrednosti za vremenski period 1961–2016. godine. KDP pokazuje nedostatak vode tokom celog vegetacionog perioda, a najveći deficit je u julu (89,1 mm) i avgustu, (78,9 mm), kada se usevi najčešće nalaze u “kritičnom periodu” u pogledu potreba za vodom (Tabela 5). U vegetacionom periodu prosečni sumarni deficit vode je značajan i iznosi 304 mm. Veće vrednosti KDP (iznad 350 mm), Spasov (2003) prikazuje za severni Banat, Timočku Krajinu i za krajnji jug Srbije. Od analiziranih 56 godina, KDP je samo u 2014. godini pokazao suficit vode u vegetacionoj sezoni.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



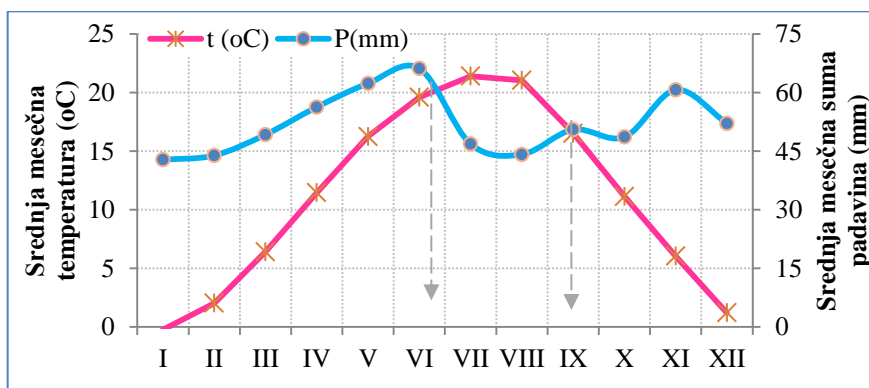
Slika 4. Procentualno odstupanje temperature vazduha od normale (1971–2000) tokom letnjeg perioda (jul–avgust) i vegetacione sezone (april–septembar). Crvene linije označavaju sedmogodišnji klizni srednjak (puna linija je za period jul–avgust, a isprekidana za vegetacionu sezonu).

Figure 4. Percentage of air temperature deviation from normal (1971–2000) during summer period (July–August) and vegetation season (April–September). The red lines indicate a seven-year slide mean (the full line is for the period July–August, and interrupted for the vegetation season).

Tabela 4. Mesečne vrednosti indeksa suše po De Martonne–u.

Table 4. Monthly values of the drought index according to De Martonne.

1961–2016	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
mesečni I	52,7	43,8	36,0	31,5	28,5	26,8	17,9	17,1	22,9	27,6	45,4	55,8



Slika 5. Walterov dijagram, urađen na bazi podataka sa meteorološke stanice Leskovac (1961-2016).

Figure 5. Walter diagram for the meteorological station Leskovac, based on a data for 1961-2016 period.

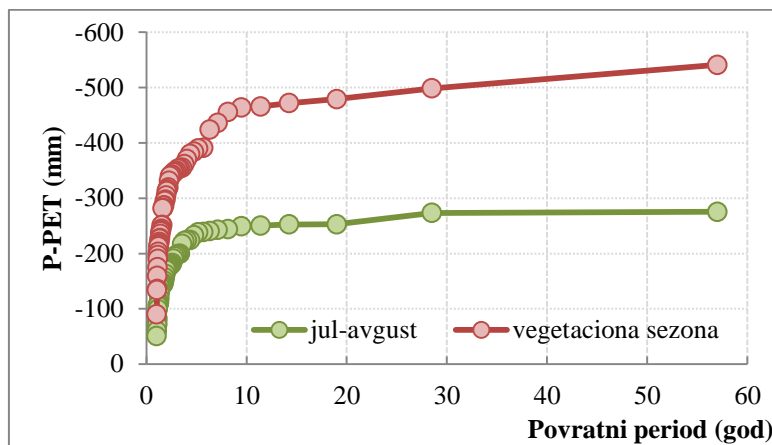
Tabela 5. Mesečne vrednosti klimatološkog deficita padavina, izračunate na bazi prosečnih vrednosti za vremenski period 1961–2016. P – mesečne padavine, PET – potencijalna evapotranspiracija.

Table 5. Monthly values of climatic precipitation deficits, calculated on averaged values for 1961–2016 period. P – monthly precipitation, PET – potential evapotranspiration.

meseci	april	maj	jun	jul	avgust	septembar
P – PET (mm)	-17,5	-32,9	-49,2	-89,1	-78,9	-36,4

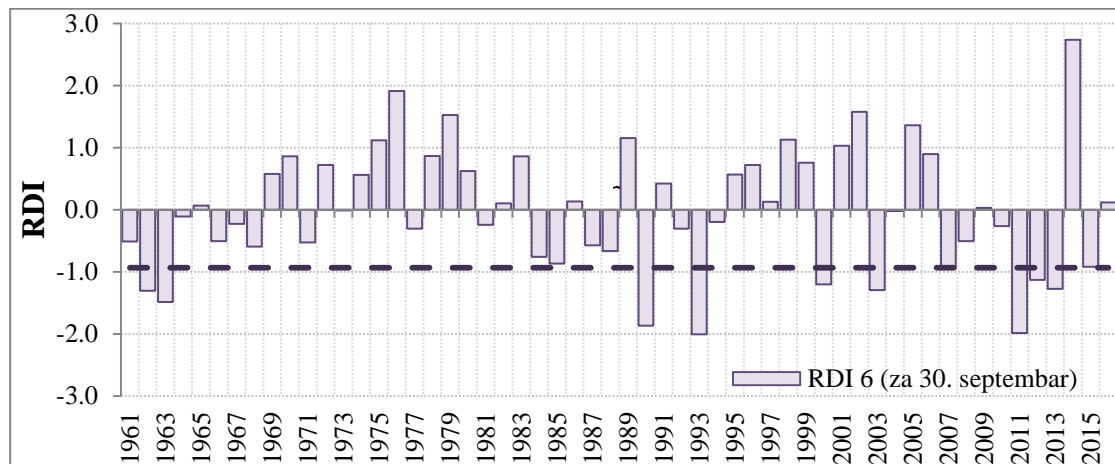


# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



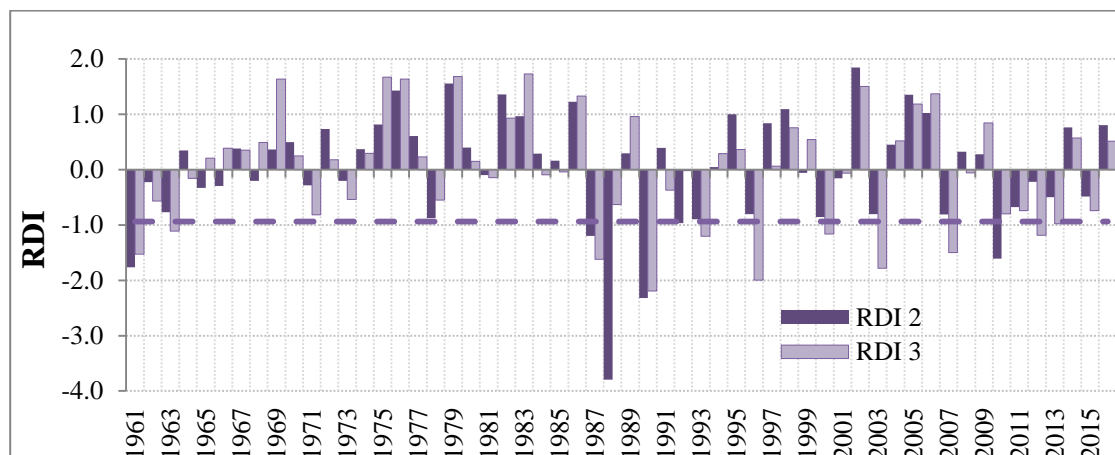
Slika 6. Funkcija raspodele klimatološkog deficita (KDP) za vegetacionu sezonu i period jul–avgust (1961–2016). Podaci sa meteorološke stanice Leskovac.

Figure 6. Function of distribution of climatological deficit for the vegetation season and period July–August (1961–2016). Data from meteorological station Leskovac



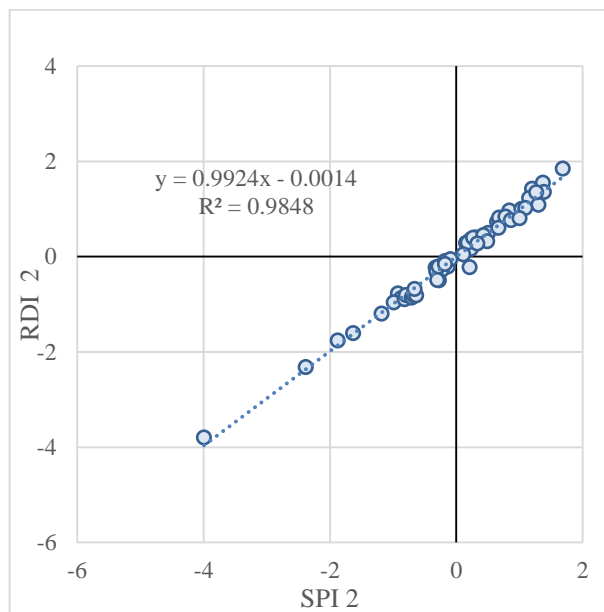
Slika 7. Vrednosti RDI–6 za 30. septembar (vegetacionu sezonu) za meteorološku stanicu Leskovac.

Figure 7. RDI–6 values for September 30 (vegetation season) for the meteorological station Leskovac.



Slika 8. Vrednosti RDI–2 i RDI–3 za 31. avgust za meteorološku stanicu Leskovac

Figure 8. RDI–2 and RDI–3 values for August 31 for the meteorological station Leskovac.



Slika 9. Slaganje indikatora RDI-2 sa SPI-2 za 31. avgust za meteorološku stanicu Leskovac (1961-2016).

Figure 9. Comparison between RDI-2 and SPI-2 for August 31 for the meteorological station Leskovac (1961-2016).

Funkcije raspodele (Slika 6) urađene za interval vegetacione sezone i period jul-avgust pokazuju da KDP može biti znatno veći od prosečnih vrednosti. Jednom u 10 godina (verovatnoća 10%) KDP u intervalu jul-avgust dostiže skoro 250 mm, a za ceo vegetacioni period 464 mm. Jednom u 56 godina, KDP je 541 mm, što iznosi čak 85,5% od prosečne PET za vegetacionu sezonu.

RDI indeks pokazuje slične rezultate kao SPI indeks (Slike 7 i 8), iako proračun SPI bazira samo na podacima o padavinama, dok RDI uzima u obzir i PET.

Poređenjem rezultata proračuna RDI i SPI indeksa dobijeno je veoma dobro slaganje vrednosti, kako za vegetacionu sezonu, tako i za letnji period. Za vegetacionu sezonu koeficijent determinacije iznosi 0,94, za period jun-avgust 0,97, a za jul-avgust 0,98 (Slika 9).

Slične rezultate, sa aspekta poklapanja indikatora SPI i RDI na godišnjem nivou, pokazala su istraživanja sprovedena u Sremu (Stričević i sar., 2007b) i u Grčkoj (Tsakiris i sar., 2010).

## 4 Zaključak

Rezultati analize suše na godišnjem nivou, pokazuju da leskovačku kotlinu karakteriše humidna klima (indeks De Martonne i indeks aridnosti).

Temperature vazduha tokom vegetacione sezone (april – septembar) i tokom letnjeg perioda (jul-avgust) od 1990. godine su u porastu i imaju trend sve većeg pozitivnog odstupanja od normale.

Padavine se iz godine u godinu, tokom letnjeg i vegetacionog perioda odlikuju čestim izrazitim odstupanjem od normale.

Meteorološka suša se registruje, ako tokom vegetacione sezone, u istraživanom području padne manje od 265 mm kiše (na osnovu indikatora decili). Po indikatoru SPI, meteorološka suša se tokom vegetacionih sezona pojavljuje u 12% slučajeva, a tokom letnjih meseci (juna, jula i avgusta) u 16% slučajeva.

Indikatori poljoprivredne suše pokazuju sledeće:

- Indikator RDI pokazuje visoku saglasnost sa rezultatima SPI analiza.

- U vegetacionom periodu se registruje klimatološki deficit vode (KDP), koji sumarno u proseku iznosi oko 300 mm. Samo jedne godine, od ispitanih 56, se desilo da nije registrovan klimatološki deficit, već suficit vode.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

-Konstatovana je potreba za primenom navodnjavanja tokom jula i avgusta. Kategorija potrebnog navodnjavanja je "neophodno za sve kulture sem za one koje su otporne na sušu". Svake treće, odnosno četvrte godine, uslovi su aridniji, pa je potreba za navodnjavanjem u kategoriji "neophodno za sve kulture" (De Martonne-ov indeks).

-Prosečan deficit vode u julu iznosi oko 90mm, a u avgustu oko 80 mm (KDP indikator).

-Walter-ov dijagram takođe ukazuje na potrebu za navodnjavanjem tokom jula i avgusta. Suša, po ovom indikatoru, počinje krajem juna a završava polovinom septembra.

Analiza suše, obavljena na bazi što više indikatora, omogućava precizniju predstavu o pojavi, trajanju i intenzitetu suše na određenom prostoru. Savremena, stabilna i održiva poljoprivredna proizvodnja zahteva ovakve analize, jer se na bazi njih sagledava potreba za navodnjavanjem određenog područja i procenjuje opravdanost ulaganja u izgradnju irigacionih sistema.

## Zahvalnost

Rad je realizovan uz finansijsku pomoć Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekata iz programa tehnološkog razvoja "Savremeni biotehnološki pristup rešavanja problema suše u poljoprivredi Srbije", TR 31005 i "Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije", TR 37005.

## Literatura

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 No. 56, FAO, Rome, Italy.
2. Beran, M., Rodier, J. A. (1985) *Hydrological Aspects of Drought*, Studies and Reports in Hydrology 39, Unesco-WMO, Paris.
3. De Martonne, E. (1926) *Une nouvelle fonction climatologique: L'Indice d'Aridité*, La Météorologie, 2, pp 449-458.
4. Gibbs, W.J. and J.V. Maher (1967) *Rainfall Deciles as Drought Indicators*. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Melbourne, Australia.
5. Gocic, M., Trajkovic, S. (2014) *Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia*, Journal of Hydrology, 510, 110-123.
6. Gregoric, E., Matovic, G., Ruml, M., Pocuca, V., Djurovic, N. (2014) *Bioclimatic moisture conditions in the lowlands of the Šumadija-Pomoravlje district*, Fifth International Scientific Agricultural Symposium „Agrosym 2014“, Jahorina, pp. 279-284
7. Hayes, M.J. (2006) *Drought indices*. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska
8. <http://drinc.ewra.net>; pristupljeno 10.05.2018. godine.
9. Mannava, V.K.S., Stone, R., Sentelhas, P. C., Svoboda, M., Omondi, P., Sarkar, J., Wardlow, B. (2011). *Agricultural Drought Indices: Summary and Recommendations; Agricultural Drought Indices*. Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain: Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB-2011. 172-197 pp.
10. Masud, M.B., Khaliq, M.N., Wheeler, H.S. (2015) *Analysis of meteorological droughts for the Saskatchewan River Basin using univariate and bivariate approaches*, Journal of Hydrology, 522: 452-466.
11. Matović, G., Gregorić, E., Glamočlija, Dj. (2013a) *Crop production and drought in Serbia in light of climate change* (Chapter 12), *Agriculture in Serbia and Portugal: Recent Developments and Economic Policy Implications*, Faculty of Economics of the University of Coimbra, Portugal, pp. 264-286.
12. Matović, G., Gregorić, E., Počuča, V., Radovanović, S. (2013b) *Drought even in a rainy agricultural region of Serbia*, International Conference "Climate Change Impact on Water Resources", Beograd, 260-268.
13. McKee T.B., Doesken N.J., Kliest J. (1993) *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proc. of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, pp 179-184.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

14. RHMZa - [http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija\\_godisnjaci.php](http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php); pristupljeno 18.05.2018. godine.
15. RHMZb - [http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/uslovi\\_vlaznosti.php](http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/uslovi_vlaznosti.php); pristupljeno 25.05.2018. godine.
16. Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., Počuča, V & Stojičić, D. (2017) Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961– 2010. *Atmospheric Research*, 183, 26-41.
17. Spasov, P. (2003) *Pojava suše u Srbiji, njeno praćenje i mogućnost prognoze*, Vodoprivreda 0350–0519, 35 201–202 p.30–36  
*standardized precipitation index*. *Bull Am Meteorol Soc* 80:429–438
18. Stricevic, R., Djurovic, N., Djurovic, Z. (2011). *Drought classification in Northern Serbia based on SPI and statistical pattern recognition*, *Meteorol Appl.* 18(1), pp. 60–69.
19. Stričević, R. (2007a) *Navodnjavanje: osnove projektovanja i upravljanja sistemima*, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd.
20. Stričević, R., Đurović, N., Pivić, R. (2007b) *Primena standardizovanog indeksa padavina za određivanje pojave suficita i deficita vode na području Surčinskog donjeg polja*; *Vodoprivreda* 0350–0519, 39, 229–230, pp. 366–375.
21. The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2012) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
22. Thornthwaite, C.W. (1948) *An approach toward a rational classification of climate*. *Geogr Rev* 38(1): 55–94.
23. Tošić, I., Unikašević, M., Putniković, S. (2017) *Extreme daily precipitation: the case of Serbia in 2014*, *Theoretical and Applied Climatology*, 128(3–4), pp. 785–794.
24. Tsakiris G., D. Pangalou, Vangelis, H. (2007) *Regional drought Assessment based on the reconnaissance drought index (RDI)*, *J. Water Resources Management*, 21(5), pp. 821-833.
25. Tsakiris, G., Vangelis, H. (2005) *Establishing a drought index incorporating evapotranspiration*. *European Water* 9/10, 3-11
26. Tsakiris, G., Vangelis, H., Tigkas, D. (2010) *Drought impacts on yield potential in rainfed agriculture*. In *Proceedings of 2nd International conference on drought management economics of drought and drought preparedness in a climate change context* , pp. 4–6.
27. UNEP (1992) *World atlas of desertification*, 1st edn. Middleton N (coordinating ed) Edward Arnold, Nairobi.
28. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (1979) *Map of the world distribution of arid regions: Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note*, MAB Technical Notes 7, UNESCO, Paris.
29. Walter, H., Harnickell, E., Mueller-Dombois, D. (1975) *Climate-diagram maps of the individual continents and the ecological climatic regions of the earth*. Berlin; New York: Springer-Verlag.
30. Wilhite, D. A., Svoboda, D. M. (2000) *Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation Early Warning Systems for Drought*, Preparedness and Drought Management Proceedings of an Expert Group Meeting held 5–7 September, Lisbon, Portugal.
31. Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J. (2007) *Understanding the complex impacts of drought: a key to enhancing drought mitigation and preparedness*. *Water Resour Manag.* 21(5): pp. 763–774.
32. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2016) *Handbook of Drought Indicators and Indices*, Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.
33. Zambakas J. (1992) *General Climatology*. Department of Geology, National & Kapodistrian University of Athens: Athens, Greece.
34. Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526, 183-195.

## Hidraulička modelska ispitivanja evakuacionih objekata HE „Riga“

Danica Starinac<sup>1</sup>, Predrag Vojt<sup>2</sup>, Dimitrije Mladenović<sup>3</sup>, Radomir Kapor<sup>4</sup>, Ljubodrag Savić<sup>5</sup>

APSTRAKT: Hidroelektrana "Riga" (puštena u rad 1974.) je najnižvodnija u sistemu od tri kaskadne brane na reci Daugavi, u Letoniji. Sistem HE Riga obuhvata mašinsku zgradu, prelivni deo i nasutu branu. U skladu sa projektnim kriterijuma koji su vladali u period izgradnje, svi objekti su dimenzionisani za bezbedno propuštanje proticaja od  $Q_{0,1\%} = 7800 \text{ m}^3/\text{s}$  pri uzvodnoj koti od 18.00 mnm i  $Q_{0,01\%} = 9450 \text{ m}^3/\text{s}$  pri uzvodnoj koti od 18.80 mnm. S obzirom da je čitav objekat pozicioniran na 15 km od glavnog grada, ubraja se u objekte visokog rizika, za koje aktuelni standardi preporučuju mogućnost bezbednog propuštanja maksimalno velike vode. Ovim projektom bilo je neophodno sagledati mogućnost propuštanja maksimalnih velikih voda (PMF) od  $Q = 12.800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cilj ispitivanja je utvrđivanje uzvodnih i nizvodnih kota koje mogu obezbediti propuštanje PMF  $Q = 12.800 \text{ m}^3/\text{s}$  kroz HE „Riga“, putem neophodne rekonstrukcije objekata ili njihovog ojačanja na strani slapišta, na osnovu rezultata hidrauličkih ispitivanja. Projekat je obuhvatio kombinaciju numeričkog modeliranja u cilju dobijanja krive protoka donje vode i ispitivanja na fizičkom modelu u razmeri 1:60, u Frudovoj sličnosti.

Ključne reči: HE „Riga“, slapište, preliv, model

## Scale modeling of flood evacuation structures of HPP „Riga“

ABSTRACT: Riga HPP was installed in 1974, as most downstream hydropower plant in a system of cascade dams (with HPPs) on the Daugava River (Latvia). The system includes HPP, spillway and embankment dam. According to the design criteria at that time, all structures were designed to safely pass a discharge of  $Q_{0,1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$  at reservoir level at 18 m asl and  $Q_{0,01\%} = 9450 \text{ m}^3/\text{s}$  at 18.80 m asl. Considering the fact that the capital city is located some 15 km downstream from the dam, it is considered a high-hazard dam. Current engineering trends recommend the application of a more stringent design criterion – all structures should be able to safely pass a discharge of  $Q_{\text{PMF}}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Scale model tests, which are the topic of this paper, were aimed at assessing the possibility of passing the higher flood discharge through existing structures, by determining all the important hydraulic parameters in the study area. The project included a combination of numerical modeling of the downstream rating curve and physical modeling and was carried out using a model on a scale of 1:60.

Keywords: HPP Riga, stilling basin, spillway, model

<sup>1</sup> Danica Starinac, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [danica.starinac@jcerni.rs](mailto:danica.starinac@jcerni.rs)

<sup>2</sup> Predrag Vojt, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [predrag.vojtc@jcerni.rs](mailto:predrag.vojtc@jcerni.rs)

<sup>3</sup> Dimitrije Mladenović, mast.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [dimitrije.mladenovic@jcerni.rs](mailto:dimitrije.mladenovic@jcerni.rs)

<sup>4</sup> Prof. dr Radomir Kapor, dipl.inž.građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [rkapor@grf.bg.ac.rs](mailto:rkapor@grf.bg.ac.rs)

<sup>5</sup> Prof. dr Ljubodrag Savić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [ljsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljsavic@grf.bg.ac.rs)

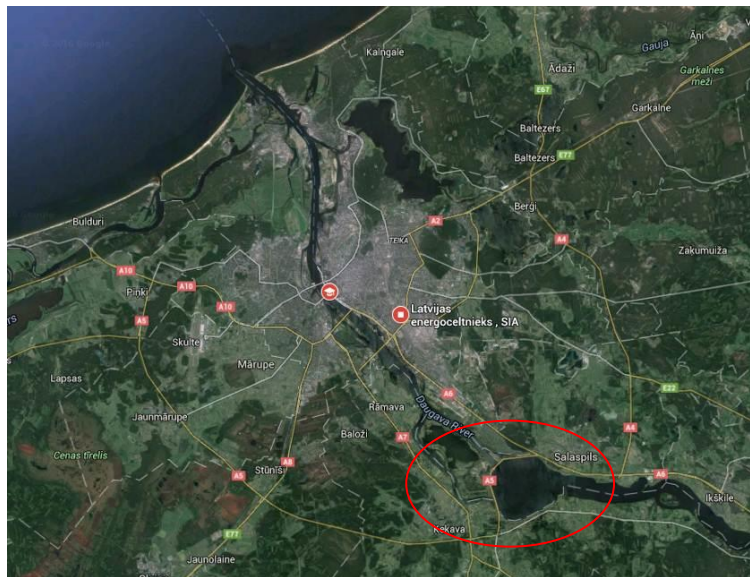
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

### 1 Uvod

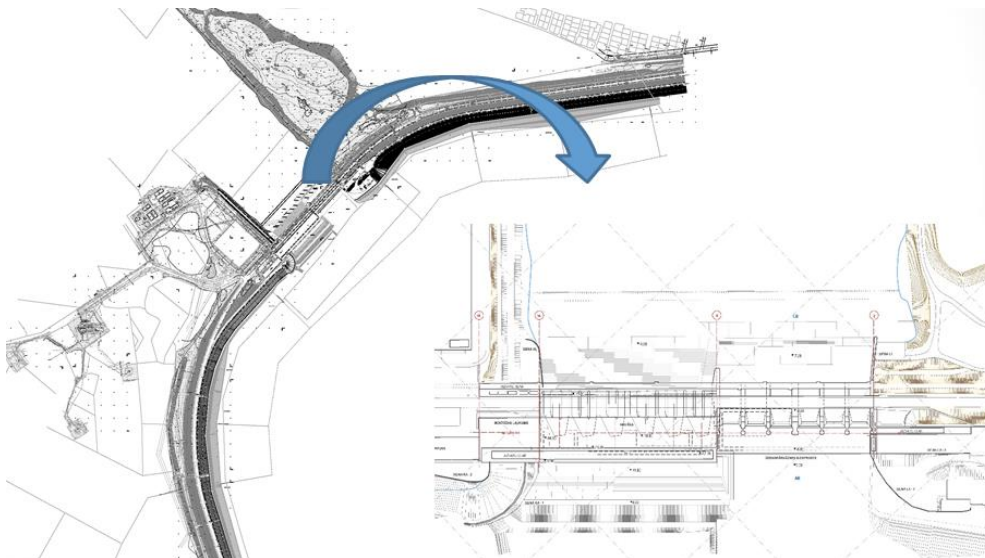
Hidroelektrana Riga je izgrađena 1974. Godine, kao najnižvodnija u sistemu od tri kaskadne brane (sa pripadajućim hidroelektranama) na reci Daugavi (Letonija). Locirana je u blizini mesta Salaspils, na rastojanju od oko 15 km uzvodno od glavnog grada – Rige, i na oko 30 km od ušća Daugave u Baltičko more (Slika 1).

Hydroenergetski sistem obuhvata mašinsku zgradu, preliv i nasutu branu velike dužine. Prelivni deo brane je dužine 160.15 m i podeljen je na dva bloka – hidroelektranu i preliv za evakuaciju viška vode (Slika 2). Maksimalna visina brane je 30 m.



Slika 1. Lokacija brane i HE Riga.

Figure 1. Location of HPP Riga.



Slika 2. Osnova prelivnog dela brane Riga.

Figure 2. Layout of HPP Riga spillway.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

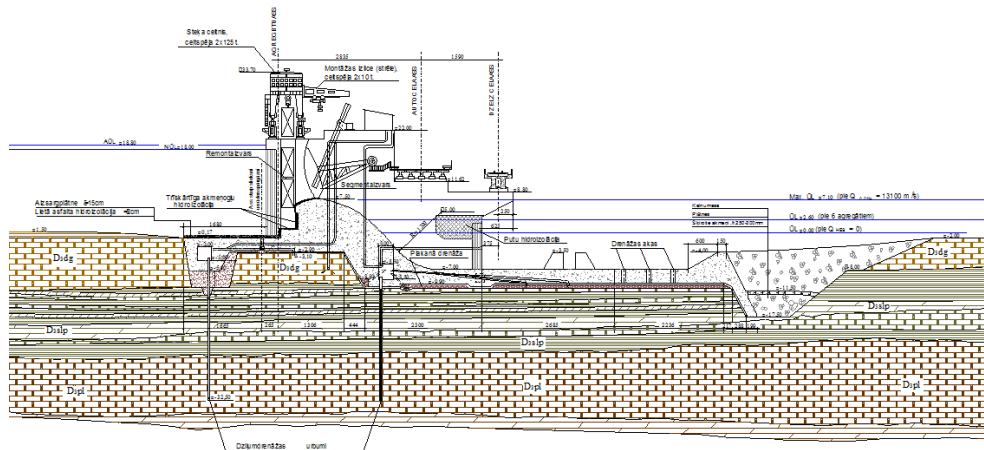
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Preliv se sastoji od 6 prelivnih polja, opremljenih radijalnim ustavama (Slika 3). Širina svakog prelivnog polja je 20 m, dok je kota krune preliva 7.5 mm (u odnosu na nivo Baltičkog mora, Baltic 1977 Normal Height System BAS-77). Hidroelektrana se sastoji od 6 agregata, kojima se ostvaruje instalisani kapacitet od 402 MW, pri maksimalnom padu od 18 m (Slika 4).

Voda sa preliva dospeva u horizontalno slapište sa kotom dna -7 mm, opremljeno sa dva reda zuba za disipaciju energije, poređanih u vidu šahovske table (Slika 5).

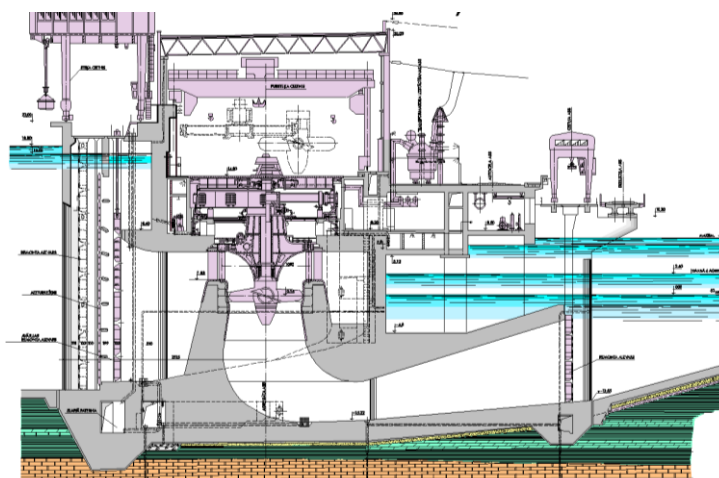
U skladu sa tadašnjim važećim kriterijumima za dimenzionisanje, svi objekti brane su izgrađeni tako da omogućе bezbedno propuštanje velike vode povratnog perioda 1000 godina -  $Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pre izgradnje brane, projektovano rešenje je provereno na fizičkom modelu u razmeri 1:80. Na osnovu tih ispitivanja, hidraulički uslovi u slapištu su bili prihvatljivi u uslovima protoka  $Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$  pri nivou u akumulaciji od 18.00 mm (kota normalnog uspora), kao i u uslovima protoka  $Q_{0.01\%}=9450 \text{ m}^3/\text{s}$  pri nivou u akumulaciji od 18.80 mm (kota maksimalnog uspora).

Savremeni inženjerski standardi i zakoni preporučuju upotrebu nešto strožijeg kriterijuma za dimenzionisanje brana sa visokim rizikom, kakva je predmetna brana. Svi objekti brane treba da omogućе bezbedno propuštanje maksimalne velike vode (PMF), što je u ovom slučaju  $Q_{\text{PMF}}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ . Svrha ovih modelskih ispitivanja bila je da se provere mogućnosti propuštanja maksimalne velike vode (PMF) kroz postojeće objekte, pri čemu je dozvoljeno podizanje nivoa u akumulaciji do 20.9 mm.



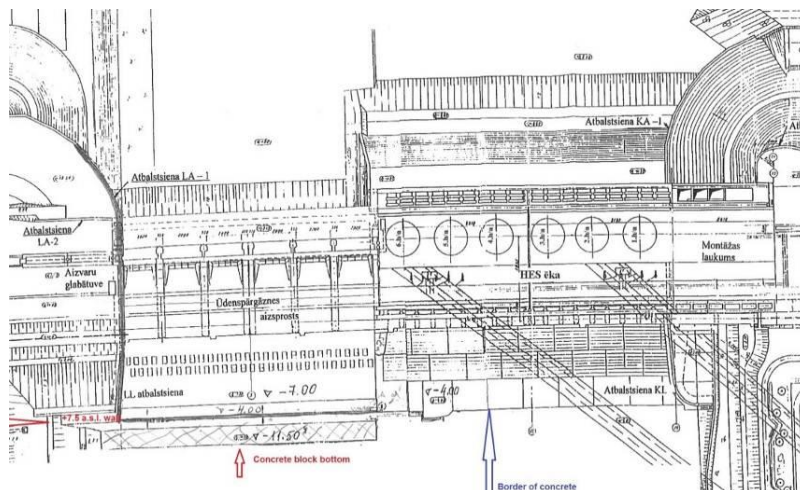
Slika 3. Poprečni presek preliva.

Figure 3. Spillway cross-section.



Slika 4. Poprečni presek turbine.

Figure 4. Turbine cross-section.



Slika 5. Osnova slapišta.

Figure 5. Stilling basin layout.

## 2 Fizički model

Fizički model prelivnog dela brane Riga (u razmeri 1:60, u Frudovoj sličnosti), izgrađen je u hidrauličkoj laboratoriji Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (Beograd, Srbija) tokom februara 2016. godine (Slika 6).

Na modelu je predstavljen deo akumulacije dužine 380 m, preliv, hidroelektrana, slapište, odvodna vada i nizvodna rečna deonica u dužini od 610 m.

Svi elementi su napravljeni prema postojećim dimenzijama objekata i od materijala odgovarajuće hrapavosti, čime se postiže potrebna sličnost sa prirodom.

Tokom ispitivanja, na modelu su mereni nivoi vode, protoci, brzine i hidrodinamički pritisci, pri čemu je primenjena standardna metodologija i oprema ([2], [3] i [4]).



Slika 6. Fizički model prelivnog dela brane Riga.

Figure 6. Scale model of HPP Riga spillway.



### 3 Određivanje krive protoka donje vode

Svrha kalibracije modela je postizanje sličnosti između strujanja u prirodi (na objektu) i na hidrauličkom modelu. Za objekte ovog tipa, kalibracijom (tariranjem) je potrebno postići zadovoljavajuću sličnost nivoa i proticaja vode.

Sličnost u pogledu proticaja ostvaruje se sistemom vodosnabdevanja modela, preko mernih komora iz kojih se tačno definisana količina vode upućuje na model.

Sličnost u pogledu nivoa vode za određeni proticaj postiže se zadovoljenjem nizvodnog graničnog uslova na modelu. Nizvodni granični uslov se obično ostvaruje podešavanjem nivoa vode u najnižvodnijem modeliranom profilu, na osnovu poznate krive protoka donje vode, dobijene ili posredstvom numeričkog modela ili putem terenskih merenja. S obzirom da se nije raspolagalo rezultatima terenskih merenja, kriva protoka donje vode je određena računskim putem.

Imajući u vidu blizinu Baltičkog mora i malu denivelaciju duž rečnog toka, uticaji oscilacija nivoa mora su morali biti uzeti u obzir tokom proračuna. Kao ulazni podaci korišćeni su prosečni višegodišnji podaci o mesečnim minimalnim i maksimalnim vrednostima nivoa Baltičkog mora na mestu ušća Daugave, kao i podaci o geometriji rečnih profila na deonici između nizvodnog graničnog profila i Baltičkog mora [4].

Proračun je urađen primenom softvera HEC-RAS [1], pri čemu su analizirana dva granična slučaja:

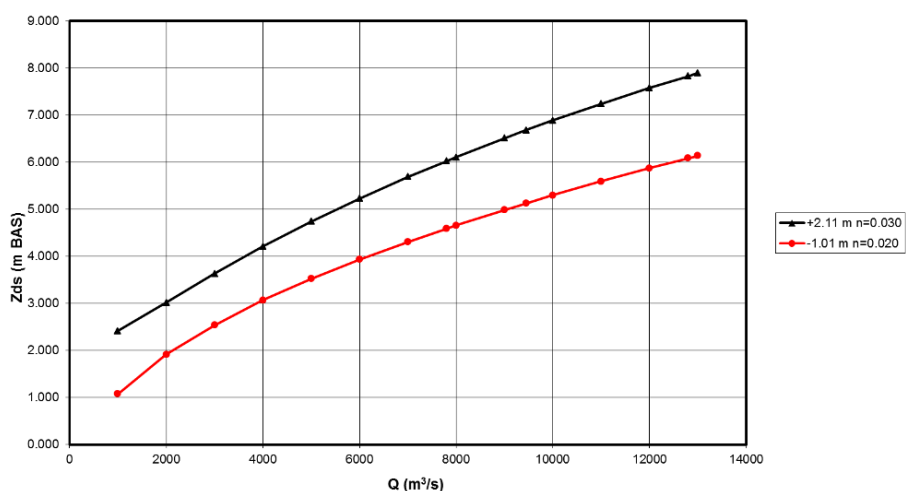
- MIN:  $Z_B = -1.01$  m BAS (minimalni nivo Baltičkog mora),  $n_{mch}=0.02$  m<sup>-1/3</sup>s,  $n_{ob}=0.10$  m<sup>-1/3</sup>s,
- MAX:  $Z_B = +2.11$  m BAS (maksimalni nivo Baltičkog mora),  $n_{mch}=0.03$  m<sup>-1/3</sup>s,  $n_{ob}=0.10$  m<sup>-1/3</sup>s,

pri čemu su:

$n_{mch}$  = Maningov koeficijent hrapavosti glavnog korita

$n_{ob}$  = Maningov koeficijent hrapavosti inundacija

Vrednosti Maningovih koeficijenata hrapavosti usvojeni su na osnovu preporuka iz literature [1]. U prvom slučaju (MIN), najmanja vrednost  $n_{mch}$  je izabrana kako bi se obezbedili minimalni gubici energije duž toka, čime bi se dobio minimalni nivo u nizvodnom graničnom profilu modela. Slično, u drugom slučaju (MAX), najveća vrednost Maningovog koeficijenta je izabrana kako bi se obezbedili maksimalni gubici energije duž toka, a tako i maksimalni nivo u nizvodnom graničnom profilu modela. Na ovaj način, praktično je obuhvaćen ceo opseg mogućih nivoa donje vode, a time i uslova tečenja. Dobijene krive prikazane su na Slici 7.



Slika 7. Maksimalna i minimalna kriva protoka donje vode.

Figure 7. Maximal and minimal downstream rating curve.

## 4 Rezultati modelskih ispitivanja

Hidraulička modelska ispitivanja obuhvatila su ispitivanja različitih kombinacija rada ustava na prelivu i turbina (potpuno otvorene ustave, delimično otvorene ustave, isključenje pojedinih prelivnih polja, turbine u radu, turbine van pogona) najpre za korišćeni protok za dimenzionisanje  $Q_{0.1\%}=7800$  m<sup>3</sup>/s, a takođe i za preporučeni novi protok  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s [4]. Sva ispitivanja rađena su kako za minimalni, tako i za maksimalni nivo vode u nizvodnom graničnom profilu, na osnovu krivih protoka sa Slike 7.

Upotreba maksimalno velike vode kao protoka za dimenzionisanje predstavlja najstrožiji kriterijum koji se primenjuje kod projektovanja brana visokog rizika. U skladu sa preporukama ICOLD-a i opštom međunarodnom praksom, dimenzionisanje preлива se radi za slučaj da hidroelektrana ne radi, odnosno da sam preliv mora da omogući evakuaciju maksimalno velike vode. Za to postoje brojni razlozi, poput toga da u slučaju nailaska tako velikih voda postoji realna opasnost da prilazi turbinama budu onemogućeni zbog granja, rastinja i plivajućih predmeta, da rad hidroelektrane nije bezbedan u takvim uslovima i sl. Takođe, u takvim uslovima, i kapacitet preлива može biti smanjen zbog eventualnog blokiranja ustava raznim plivajućim predmetima, nemogućnosti da se pokrenu ustave, da je neka ustava trenutno u remontu i sl. [4].

Zbog svega toga, tzv. (n-1) kriterijum je uobičajen pri dimenzionisanju preлива, što znači da preliv treba da omogući bezbednu evakuaciju velike vode bez učešća jednog prelivnog polja.

Postojeći preliv je dimenzionisan na protok  $Q_{0.1\%}=7800$  m<sup>3</sup>/s, i pri tom protoku, prvi navedeni kriterijum je ispunjen. Ispunjen je i kriterijum (n-1), s tim što je kota vode u akumulaciji u tom slučaju 19.25 mnm, što je iznad projektovane kote maksimalnog uspora  $KMU=18.8$  mnm, ali bez rizika od prelivanja brane.

Kako je maksimalni protok,  $Q_{PMF}$ , za 5000 m<sup>3</sup>/s (64%) veći od primenjenog protoka za dimenzionisanje, nije za očekivati da će postojeći objekti moći da ga propuste tako da zadovolje gornje kriterijume, a svakako ne pod istim uslovima tečenja kao za računski protok. Hidraulička modelska ispitivanja novog protoka, za slučaj da hidroelektrana ne radi, pokazala su da bi takav scenario bio izrazito nepovoljan. Slika 8 pokazuje uslove tečenja u slučaju minimalnog nivoa donje vode. Hidraulički skok je lociran u slapištu, ali se nizvodno formiraju sekundarni hidraulički skokovi, što je vrlo nepovoljno sa stanovišta moguće erozije.



Slika 8. Hidraulički uslovi nizvodno od preлива, HE van pogona,  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s, MIN Zds.

Figure 8. Flow conditions downstream of the spillway, HPP off,  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s, MIN Zds.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U tom slučaju, izmerena kota vode u akumulaciji iznosi 22.3 mm, što prelazi kotu krune brane od 22 mm. Ovakva situacija bi bez sumnje rezultirala potapanjem hidroelektrane, ali i ogromnim rizikom od rušenja nasute brane, što znači da se svakako ne sme dopustiti u praksi. Navedeni kriterijumi za dimenzionisanje nisu ispunjeni za novi protok.

Za slučaj da hidroelektrana ne radi, na modelu je izmerena kriva protoka preliva za čitav opseg proticaja [4]. Utvrđeno je da kapacitet preliva pri trenutnoj koti normalnog uspora u akumulaciji iznosi 7900 m<sup>3</sup>/s, odnosno pri trenutnoj koti maksimalnog uspora u akumulaciji 8800 m<sup>3</sup>/s.

Glavni zaključak ovog dela ispitivanja bio je da se novi protok ne može bezbedno propustiti preko postojećeg preliva bez učešća hidroelektrane.

Modelskim ispitivanjima je utvrđeno da nivo vode u odvodnoj vadi (neposredno iza hidroelektrane) ni u jednom slučaju ne prelazi vrednost od 8.1 mm. Ovaj podatak je vrlo značajan iz dva razloga. Prvo, investitor je pre ovih ispitivanja raspolagao krivom protoka donje vode koja je sračunata bez uzimanja u obzir uticaja Baltičkog mora. Prema toj krivoj, nivo vode u odvodnoj vadi je bio 9.1 mm, što je značajna razlika. Drugi razlog je što je proizvođač turbina propisao njihovo isključenje u slučaju da nivo vode u odvodnoj vadi dostigne vrednost 8.2 mm.

Problem nedovoljnog kapaciteta preliva moguće je rešiti na dva načina: izgradnjom dodatnog preliva ili usvajanjem nešto blažeg kriterijuma za dimenzionisanje. Razmatranje dodatnog preliva nije bila tema ovih ispitivanja, tako da je pažnja posvećena proveru nešto blažeg kriterijuma. Preciznije, razmatrano je učešće hidroelektrane u evakuaciji maksimalnog protoka.

Kako je već spomenuto, nivo vode u odvodnoj vadi ni u jednom slučaju nije prelazio kritičnu kotu pri kojoj je propisano isključenje turbina, pa ovaj uslov ne predstavlja ograničenje.

Modelska ispitivanja pokazala su stabilne uslove tečenja u akumulaciji i relativno dobre uslove tečenja u slapištu, pri protoku  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s, u slučaju da sve turbine rade (Slika 9).

Na osnovu vizuelnog osmatranja, uslovi tečenja na nizvodnoj rečnoj deonici su u prelaznom režimu, pa granice hidrauličkog skoka nisu jasno uočljive, ali nisu primećeni veći problemi.

Merenja nivoa vode na deonici nizvodno od slapišta pokazala su da je glavni hidraulički skok lociran u slapištu i da je lokalno potopljen (Slika 10). Međutim, na nizvodnoj rečnoj deonici se javljaju dodatni, (sekundarni) hidraulički skokovi. Naime, zbog geometrije terena, nivo donje vode jednostavno nije dovoljno visok da obezbedi stabilno tečenje u mirnom režimu ( $Fr > 1$ ). Ova pojava je uočena i pri manjim protocima. Za oba granična nivoa donje vode, voda koja dolazi sa preliva i nizvodni tok se spajaju putem većeg broja hidrauličkih skokova i uslovi tečenja odgovaraju kritičnom (prelaznom) režimu ( $Fr \approx 1$ ). Ovakvi uslovi su vrlo nestabilni i pogoduju eroziji, i generalno se teško prevazilaze tehničkim merama.

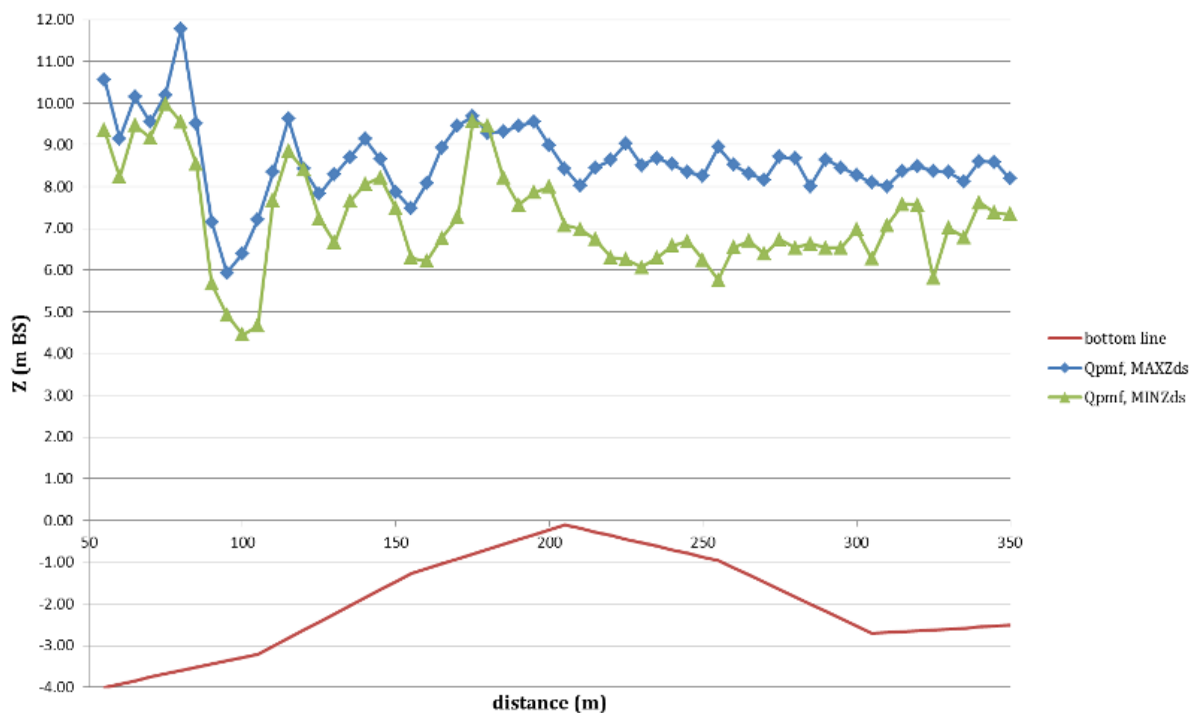


Slika 9. Hidraulički uslovi nizvodno od preliva, HE radi,  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s, MIN Zds.

Figure 9. Flow conditions downstream of the spillway, HPP on,  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s, MIN Zds.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 10. Nivoi vode nizvodno od slapišta pri  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 10. Water levels downstream of the stilling basin at  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Merenja brzina na nizvodnoj deonici pokazala su slične vrednosti za oba razmatrana protoka. Pri  $Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$ , maksimalne brzine su 6-7 m/s za maksimalni nivo donje vode i 8 m/s za minimalni. U slučaju većeg protoka, sa hidroelektranom u radu, maksimalna brzina iznosi 6 m/s za maksimalni i 7 m/s za minimalni nivo donje vode. Ovo pokazuje da je stanje brzina u izvesnoj meri povoljnije u slučaju blažeg kriterijuma za dimenzionisanje.

Merenja hidrodinamičkih pritisaka u slapištu pokazala su da su fluktuacije pritisaka uglavnom proporcionalne vrednosti srednjih pritisaka u svim tačkama slapišta. Vrednosti fluktuacija pritisaka su značajno manje od vrednosti srednjih pritisaka u svim tačkama slapišta (Tabela 1), pa nema opasnosti od pojave negativnih pritisaka. Povećanje protoka sa  $Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$  na  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$  (uz rad hidroelektrane) dovodi do povećanja srednjih pritisaka za oko 12-15%, ali i do smanjenja fluktuacija pritiska za oko 23-24%. Može se zaključiti da primena blažeg kriterijuma za dimenzionisanje ne dovodi do značajnih promena hidrodinamičkog stanja u slapištu u odnosu na postojeće, i što je najvažnije, nema opasnosti od pojave negativnih pritisaka.

Tabela 1. Maksimalne srednje vrednosti i fluktuacije pritiska.  
Table 1. Maximal average values of pressure and pressure fluctuations.

Uslovi	Max srednji pritisak [KPa]	Max fluktuacija pritiska [KPa]
$Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$ , MAX Zds, HE van pogona	165.06	56.56
$Q_{0.1\%}=7800 \text{ m}^3/\text{s}$ , MIN Zds, HE van pogona	157.98	62.28
$Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ , MAX Zds, HE radi	188.46	42.98
$Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ , MIN Zds, HE radi	180.12	50.08

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

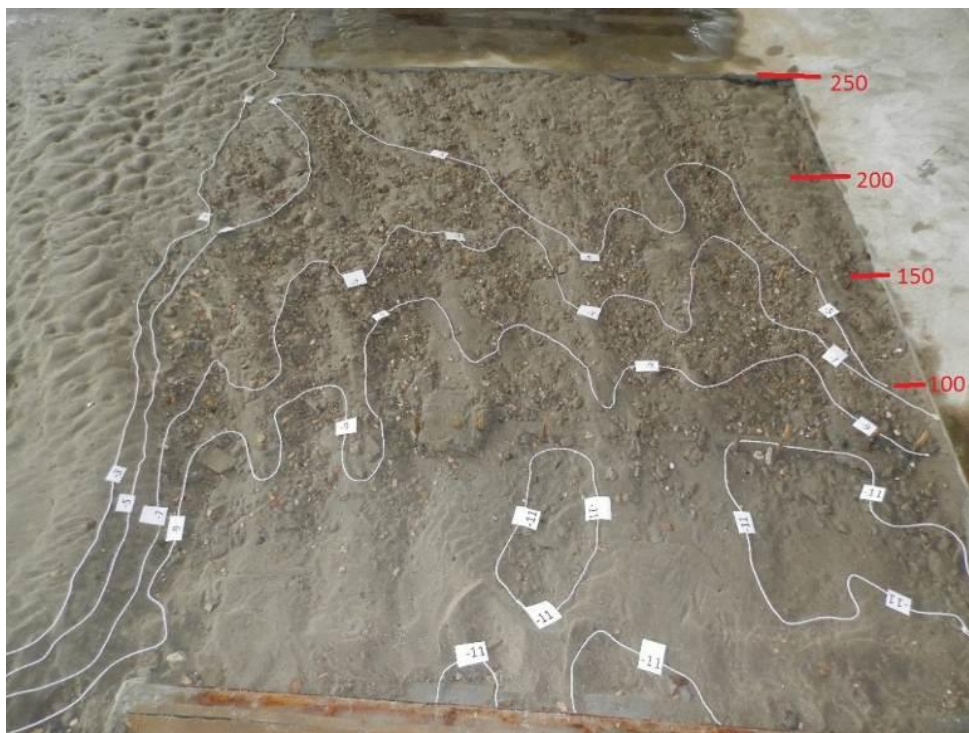
Razmotreni slučaj propuštanja  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$  kroz svih šest prelivnih polja (potpuno otvorene ustave) i kroz svih šest turbina, pokazao je da nivo vode u akumulaciji u tom slučaju iznosi 19.25 mm, dok nivo u odvodnoj vadi ne prelazi 7.9 mm.

Za isti protok i iste uslove rada turbina, zatvaranje bilo koje ustave na prelivu bi rezultiralo dozvoljenim kotama nivoa vode u akumulaciji, 20.6-20.7 mm. Za slučaj da su ustave otvorene više od 8.75 m, nivo vode u akumulaciji ne bi prelazio 20.8 mm.

Na osnovu krive protoka preлива [4], za maksimalni dozvoljeni nivo vode u akumulaciji od 20.9 mm, kapacitet preлива iznosi  $11247 \text{ m}^3/\text{s}$ . To znači da je za propuštanje  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$  neophodno angažovati i turbine, kao dopunu kapaciteta. Na osnovu ekstrapolacije krivih protoka turbina [4], utvrđeno je da je pri nivou vode u akumulaciji od 20.9 mm, ukupan kapacitet hidroelektrane  $3669.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , odnosno  $611.6 \text{ m}^3/\text{s}$  po turbini. Zaključuje se da je protok  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$  moguće propustiti pri nivou 20.9 mm u akumulaciji, ako rade sva prelivna polja i tri turbine. Odgovarajući nivo u odvodnoj vadi u tom slučaju iznosi 8 mm.

Ukoliko je jedno prelivno polje zatvoreno, pri nivou vode u akumulaciji od 20.9 mm, kapacitet preлива će biti  $9744 \text{ m}^3/\text{s}$ . To znači da pri propuštanju  $Q_{PMF}=12800 \text{ m}^3/\text{s}$ , turbine treba da pokriju razliku od  $3056 \text{ m}^3/\text{s}$ . Imajući u vidu kapacitet jedne turbine, zaključuje se da je neophodno angažovanje pet turbina. Odgovarajući nivo u odvodnoj vadi i u tom slučaju iznosi 8 mm.

Uočeni prelazni režim tečenja na nizvodnoj rečnoj deonici je pitanje koje zahteva naročitu pažnju. Kako je već pomenuto, hidraulički uslovi pogoduju eroziji, što je pokazala i dosadašnja praksa na objektu. Naime, uočene su značajne erozione jame, iako od početka eksploatacije protoci nisu prelazili  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Da bi se utvrdilo da li postoji rizik od potkopavanja slapišta i temelja brane, na modelu sa pokretnim dnom je izvršeno odgovarajuće ispitivanje.

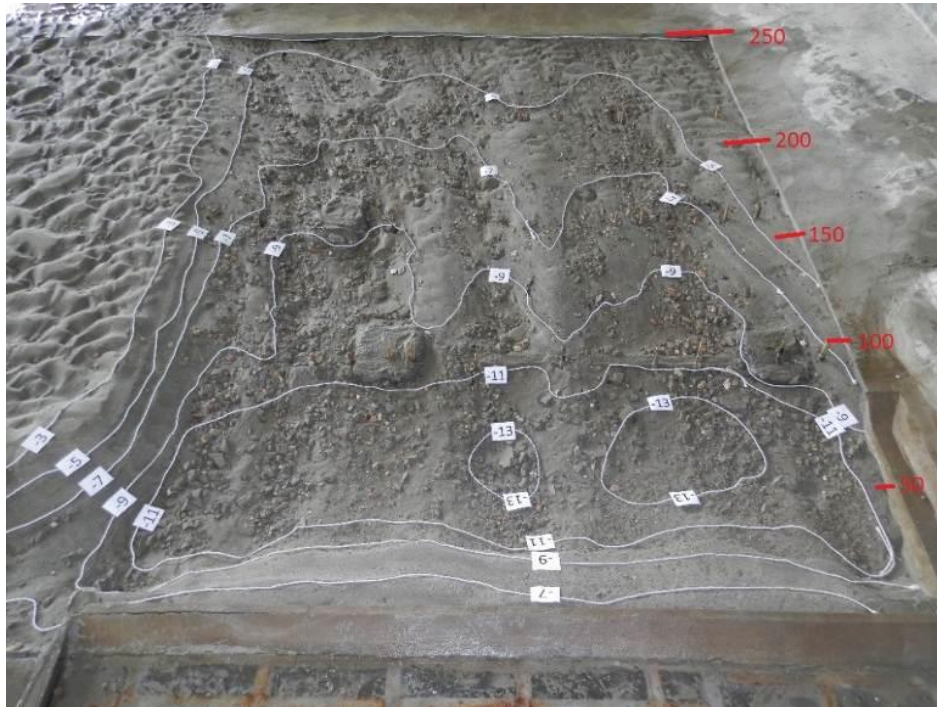


Slika 11. Erozijska nizvodno od slapišta pri  $Q_{0.1\%}$ .

Figure 11. Erosion downstream of the stilling basin at  $Q_{0.1\%}$ .

Iako su mogućnosti modeliranja erozije ograničene, fizičkim modelom je moguće odrediti približne lokacije na kojima se može očekivati erodiranje ili deponovanje materijala rečnog korita, odnosno mogu se utvrditi tendencije erozije. Primenom peska krupnoće 1 mm na modelu je dobijena morfologija približna rezultatima snimanja rečnog dna. Slike 11 i 12 pokazuju da erozione jame

nastaju i pri manjem i pri većem protoku za dimenzionisanje, tako da je zaštita nizvodnog rečnog korita pitanje koje se mora rešavati. S obzirom da mere zaštite od erozije nisu bile tema ovih modelskih ispitivanja, na modelu je utvrđen samo potreban prečnik materijala koji neće biti pokrenut sa rečnog korita ni pri maksimalnom protoku, i koji stoga treba koristiti prilikom projektovanja zaštite. Utvrđeno je da se materijalom prečnika 0.9-1.2 m može obezbediti stabilna zaštita od erozije.



Slika 12. Erozija nizvodno od slapišta pri  $Q_{PMF}$ .

Figure 12. Erosion downstream of the stilling basin at  $Q_{PMF}$ .

## 5 Rezultati dodatnih ispitivanja preliva

Nakon uspešnog završetka opisanih modelskih ispitivanja [4], investitor je, imajući u vidu da fizički model već postoji, ugovorio dodatna ispitivanja [5], sa ciljem određivanja optimalnih režima rada ustava na prelivu, u dnevnim uslovima eksploatacije. Cilj ispitivanja je bio da se pri zadatim dotocima u granicama između  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ , i zadatim nivoima u akumulaciji između 17-18 mm, odrede potrebni položaji ustava na prelivu pri različitim kombinacijama rada prelivnih polja.

U okviru dodatnih ispitivanja testiran je rad preliva za ukupno 18 različitih kombinacija rada prelivnih polja. Sva ispitivanja rađena su za slučaj da hidroelektrana radi punim kapacitetom, u zavisnosti od nivoa vode u akumulaciji.

Osnovni zaključak ispitivanja je da se najpovoljniji hidraulički uslovi dobijaju pri istovremenom radu svih 6 prelivnih polja, odnosno pri što manjem specifičnom protoku, a da koncentrisano prelivanje preko manjeg broja polja treba izbegavati. Dosta dobri rezultati se mogu dobiti i sa manjim brojem polja u radu, ako su adekvatno raspoređena i ako njihov broj nije manji od 4.

Pri izboru optimalnih scenarija, jedan od bitnih ograničavajućih faktora je bilo stanje rečnog dna nizvodno od slapišta, koje je već značajno erodovano. Naime, nizvodno od prelivnih polja 1 i 2 postoji značajna eroziona jama (Slika 13).

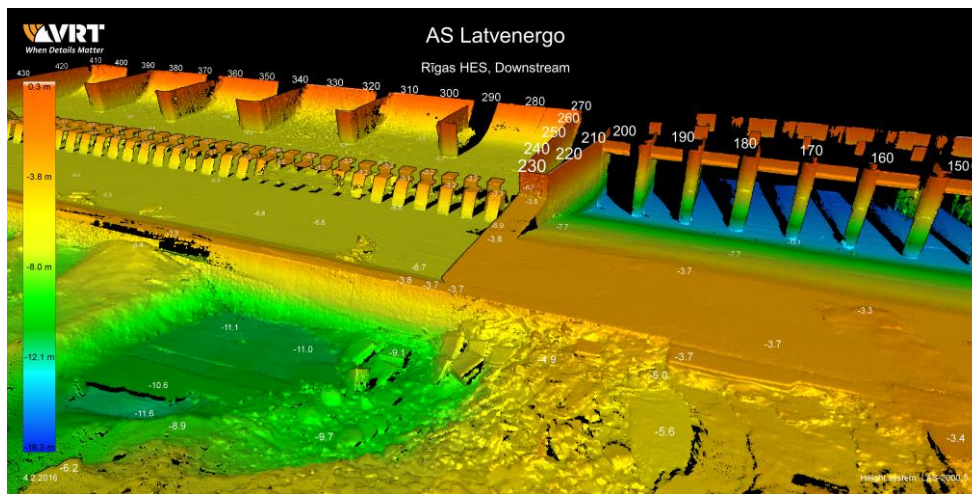
Na osnovu izmerenih brzina na delu nizvodno od slapišta, uočava se fenomen primećen i prilikom prethodnih ispitivanja, da brzine rastu idući nizvodno od slapišta. To zapravo znači da samo slapište efikasno obavlja svoju ulogu, ali sama geometrija nizvodne deonice to delimično poništava.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

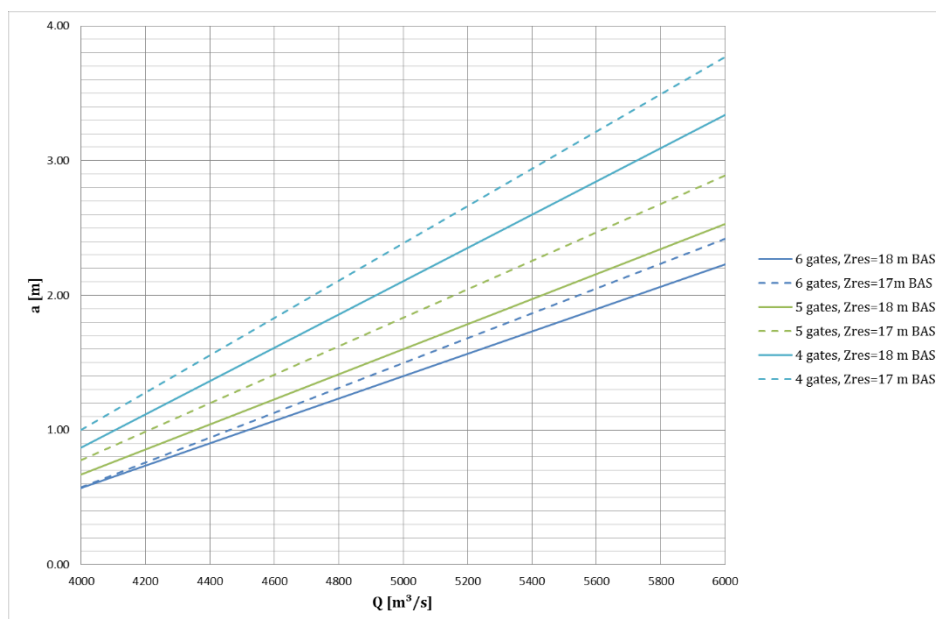
Rečni tok, umesto da nastavi dalje smirivanje brzina i usporavanje toka koji dolazi iz slapišta, naprotiv ubrzava delimično umiren tok. Jedan od najvažnijih zaključaka prethodnih ispitivanja bio je da su uslovi tečenja na deonici nizvodno od slapišta nepovoljni, jer se nalaze u prelaznom režimu ( $Fr \approx 1$ ) kako pri većim tako i pri manjim protocima, što znatno pogoduje eroziji. Svakako da je pitanje zaštite od erozije problem koji se mora zasebno rešavati, ali ono što se može uraditi u ovom trenutku je da se bar samim radom preliva dato stanje ne pogoršava. S tim u vezi, date su preporuke da se izbegava koncentrisan rad prelivnih polja, nizvodno od kojih su najdublje erozione jame, odnosno polja 1 i 2. Ova polja bi trebalo koristiti samo u kombinaciji sa 4, 5 ili 6 polja istovremeno u radu.

Položaji ustava za različite režime rada, kojima se održava nivo u akumulaciji na koti 17-18 mnm pri dotocima u granicama 4000-6000 m<sup>3</sup>/s dati su na Slici 14, za slučaj kada hidroelektrana radi punim kapacitetom, odnosno na Slici 15, kada je jedna turbina van pogona.



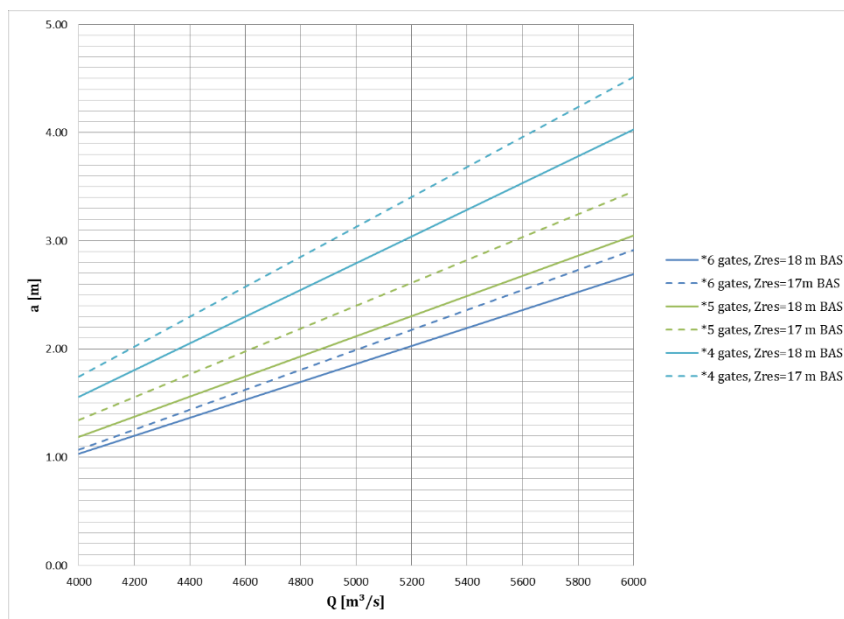
Slika 13. Trenutno stanje dna nizvodno od slapišta.

Figure 13. Present state of downstream erosion.



Slika 14. Položaji ustava na prelivu potrebni za obezbeđivanje nivoa u akumulaciji 17-18 mnm, u zavisnosti od dotoka i preporučenog režima rada, u slučaju rada HE punim kapacitetom.

Figure 14. Gate positions needed to establish reservoir water level 17-18 m, in dependence of income flow and recommended scenario.



Slika 15. Položaji ustava na prelivu potrebni za obezbeđivanje nivoa u akumulaciji 17-18 m, u zavisnosti od dotoka i preporučenog režima rada, u slučaju kada je jedna turbina van pogona.

Figure 15. Gate positions needed to establish reservoir water level 17-18 m BAS, in dependence of income flow and recommended scenario, in situation that 1 hydrounit is out of operation

## 6 Zaključak

Hidraulička modelska ispitivanja prelivnog dela brane Riga omogućila su uvid u osnovnu problematiku postojećeg objekta i obezbedila značajne podatke koji mogu da doprinesu prevazilaženju konkretnih problema u budućnosti i tako unaprede eksploataciju. Ova ispitivanja takođe predstavljaju dobar primer da je investitor imao sluha da iskoristi fizički model i van okvira osnovnog projektnog zadatka.

Najvažniji zaključci predmetnih ispitivanja su sledeći:

1. Kapacitet preliva nije dovoljan da obezbedi propuštanje maksimalnog protoka  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s pri dozvoljenim nivoima vode u akumulaciji.
2. Za bezbedno propuštanje maksimalnog protoka postoje dve mogućnosti: usvajanje blažeg kriterijuma za dimenzionisanje ili izgradnja dodatnog preliva.
3. Moguće je propuštanje  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s pri nivou u akumulaciji 20.9 m BAS, korišćenjem svih prelivnih polja i tri turbine ili pet prelivnih polja i pet turbina.
4. Propuštanje  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s korišćenjem svih šest prelivnih polja i svih šest turbina rezultuje nivoom vode u akumulaciji od 19.25 m BAS.
5. Nema opasnosti od pojave negativnih pritisaka u slapištu pri prolasku  $Q_{PMF}=12800$  m<sup>3</sup>/s kroz sva prelivna polja i sve turbine.
6. Hidraulički uslovi na nizvodnoj rečnoj deonici su problematični u pogledu erozije, nezavisno od protoka.
7. Erozijska na nizvodnoj rečnoj deonici se može značajno eliminisati ako se mere tehničke zaštite izvedu materijalom prečnika  $D=0.9-1.2$  m.
8. Za održavanje nivoa u akumulaciji u granicama 17-18 m u uslovima srednjih dotoka 4000-6000 m<sup>3</sup>/s kada hidroelektrana radi punim kapacitetom, moguće je koristiti različite režime rada ustava na prelivu. Preporučeni režimi rada obuhvataju rad sa 6, 5 ili 4 polja istovremeno.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

9. Za slučaj rada sa 6 prelivnih polja, ustave treba držati u položaju otvorenosti 0.58-0.57 m (4000 m<sup>3</sup>/s) do 2.42-2.23 m (6000 m<sup>3</sup>/s) kako bi se obezbedili zahtevani nivoi vode u akumulaciji.
10. U slučaju rada sa 5 prelivnih polja, ustave treba držati u položaju otvorenosti 0.78-0.67 m (4000 m<sup>3</sup>/s) do 2.89-2.53 m (6000 m<sup>3</sup>/s) kako bi se obezbedili zahtevani nivoi vode u akumulaciji. Preporuka je da polje 4 ili 3 bude zatvoreno. Ukoliko to nije moguće, treba zatvoriti polje 2 ili 5, a u krajnjem slučaju ivična polja 6 ili 1.
11. U slučaju rada sa 4 prelivna polja, ustave treba držati u položaju otvorenosti 1.00-0.87 m (4000 m<sup>3</sup>/s) do 3.77-3.34 m (6000 m<sup>3</sup>/s) kako bi se obezbedili zahtevani nivoi vode u akumulaciji. Preporuka je da polja 2 i 5 budu zatvorena, zatim 1 i 6, a ako i to nije moguće, 3 i 4.
12. Režime rada sa 3 polja treba izbegavati, osim u ekstremnim situacijama, kada treba koristiti naizmenična polja – 1, 3 i 5 ili 2, 4 i 6. U slučaju rada sa 3 prelivna polja, ustave treba držati u položaju otvorenosti 1.22-1.18 m (4000 m<sup>3</sup>/s) do 5.33-4.55 m (6000 m<sup>3</sup>/s).
13. Režimi rada sa 2 prelivna polja mogu se koristiti samo izuzetno i to samo za opseg dotoka 4000-5560 m<sup>3</sup>/s. U takvim slučajevima, nikako ne koristiti istovremeno polja 1 i 2, već eventualno centralna polja 3 i 4.
14. Režimi rada sa 1 prelivnim poljem su mogući samo izuzetno i to samo za opseg dotoka 4000-4450 m<sup>3</sup>/s kako bi se obezbedili zahtevani nivoi vode u akumulaciji. U takvim slučajevima, koristiti istovremeno polja 3, 4 ili 5, a nikako ostala tri.

## Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, za finansijsku podršku u okviru projekata tehnološkog razvoja broj 37010 i 37014.

## Literatura

1. Brunner G.W. (2010) "HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual", US Army Corps of Engineers HEC, CPD 69, January 2010.
2. Hajdin G. (1982) "Prilozi za procenu fluktuacionog opterećenja na granične površine fluidne struje – na osnovu izmerenih pritisaka u nekoliko tačaka površine", Zbornik radova sa 8.konferencije Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Portorož, Decembar 1982.
3. Muškatirović J., Jović S. (1982) "Analiza hidrodinamičkog opterećenja slapišta prelivne brane", Zbornik radova sa 8.konferencije Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Portorož, Decembar 1982.
4. Starinac D. (2016) Scale modeling of Riga HPP Stilling basin, Final report No. 1243, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Septembar 2016.
5. Starinac D. (2017) Scale modeling of Riga HPP Stilling basin – additional investigations, Final report No. 1248, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Jul 2017.
6. Starinac D., Vojt P., Mladenović D., Žugić D., Kapor R., Savić Lj. (2016) "Scale Modeling of Riga HPP Stilling Basin", Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, ISSN 2217-5237, Izdavač: Srpsko društvo za zaštitu voda, Vol. 6, No. 4, str. 3-19, 2016.  
[http://www.wrmjournal.com/images/stories/casopis/No\\_24/01.pdf](http://www.wrmjournal.com/images/stories/casopis/No_24/01.pdf)

## Hidraulička modelska ispitivanja složenog brzotoka brane Subela

Danica Starinac<sup>1</sup>, Predrag Vojt<sup>2</sup>, Dimitrije Mladenović<sup>3</sup>, Radomir Kapor<sup>4</sup>, Ljubodrag Savić<sup>5</sup>

APSTRAKT: Projektovano rešenje brane u Alžiru trebalo je izmeniti uz verifikaciju na fizičkom modelu u Frudovoj sličnosti, u razmeri 1:20. Objekti za evakuaciju velikih voda na predmetnoj brani smešteni su uz levi bok, i obuhvataju: slobodni preliv, brzotok i umirujući bazen. Zbog problema u izvođenju izmenjeno je tehničko rešenje završnog dela brzotoka kojim je ski skok sa disipacionom jamom i kanalom nizvodno zamenjen stepenastim brzotokom sa umirujućim bazenom, sve do rečnog korita. Uzvodni deo brzotoka je gladak i konstantne širine, sa nagibom koji počevši od uzvodnog kraja prvo ima nagib 4%, a zatim 12%, dok se na nizvodnom kraju pretvara u stepenasti brzotok sa nagibom 1:2. Umirujući bazen je tipa III, sa srednjim redom zuba i izlaznom rampom na nizvodnom kraju. Osnovna problematika projektnog rešenja ležala je u oblikovanju prelazne deonice brzotoka, gde dolazi do promene nagiba. Upoređivanjem različitih varijanti na fizičkom modelu, utvrđeno je najpovoljnije tehničko rešenje. Za konačnu dispoziciju, merenjima na fizičkom modelu su određene vrednosti bitnih parametara za dimenzionisanje (nivoi, dubine, brzine, pritisci), čime je projektno rešenje značajno unapređeno.

Ključne reči: hidraulički model, brzotok, Soubella

## Scale model investigations of Soubella dam complex chute

ABSTRACT: Soubella dam design had to be changed and verified using scale model 1:20 (in Froude similarity). Flood evacuation structures of this dam (free spillway, chute and stilling basin) are located on the left side. Due to problems occurred during construction, the design of downstream section of the chute has been changed – instead of ski jump, erosion pit and downstream channel, there were designed stepped chute and stilling basin till the downstream river. Upstream section of the chute is smooth and with constant width, with the slope 4% at the most upstream section, then 12% in the middle section, while the final section is stepped, with the slope 1:2. Stilling basin is of the USBR III type, with baffle blocks in the middle and downstream sill. Main problem of the design was the form of transitional section of the chute, where the slope is changing. By comparing variants on the scale model, the optimal technical solution had been found. For the adopted design, important parameters were determined by scale model measurements, which had significantly improved technical design.

Keywords: scale model, chute, Soubella

<sup>1</sup> Danica Starinac, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [danica.starinac@jcerni.rs](mailto:danica.starinac@jcerni.rs)

<sup>2</sup> Predrag Vojt, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [predrag.vojt@jcerni.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.rs)

<sup>3</sup> Dimitrije Mladenović, mast.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [dimitrije.mladenovic@jcerni.rs](mailto:dimitrije.mladenovic@jcerni.rs)

<sup>4</sup> Prof. dr Radomir Kapor, dipl.inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [rkapor@grf.bg.ac.rs](mailto:rkapor@grf.bg.ac.rs)

<sup>5</sup> Prof. dr Ljubodrag Savić, dipl.inž. građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [ljsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljsavic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Projektovana brana Subela gradi se na istoimenoj reci u opštini Magra, u pokrajini M'Sila, u Alžiru. Osnovna namena brane je regulisanje dotoka reke u cilju navodnjavanja, kao i bezbedno propuštanje protoka  $Q_{0,1\%} = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ , što predstavlja veliku vodu povratnog perioda 1000 godina.

Usvajeno projektno rešenje podrazumeva zoniranu nasutu branu, sa centralnim glinenim jezgrom (Slika 1). Usvajena kota krune brane iznosi 785 mm, a kota normalnog uspora 780 mm.

Objekti za evakuaciju velikih voda smešteni su u levom boku brane. Predviđen je slobodni preliv, sa prelivnom ivicom dužine 40 m, koji omogućava kontrolu evakuacije velike vode povratnog perioda 10000 godina, ispod kote 783 mm najviših voda. Betonski brzotok širine 16 m obezbeđuje kontinuitet uzvodnog preliva, i omogućava sprovođenje velikih voda nizvodno od brane.

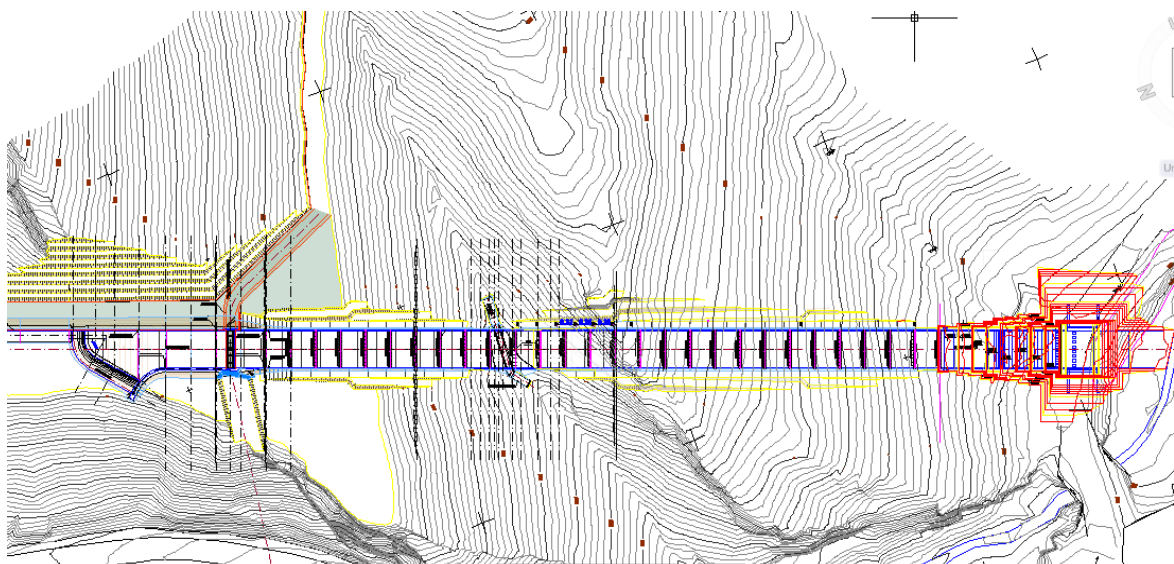
Na kraju preliva sa brzotokom, prvobitno je bio predviđen ski skok sa disipacionom jamom iskopanom u krečnjačkom masivu sa kanalom (širine oko 40 m) nizvodno do rečnog korita.

Zbog problema u izvođenju izmenjeno je tehničko rešenje završnog dela brzotoka, kojim je ski skok sa disipacionom jamom i kanalom nizvodno, zamenjen stepenastim brzotokom sa umirujućim bazenom, širine 16 m celom dužinom sve do rečnog korita. Izmene na brzotoku i umirujućem bazenu trebalo je potvrditi hidrauličkim modelskim ispitivanjima.

Izmene na brzotoku, širine 16 m, se sprovede od stacionaže 0+250,52 m. Od stacionaže 0+382,39 m, nagib brzotoka se povećava sa 12% na 1:2. Na brzotoku postoje stepenici osnovne visine 0,8 m i manji stepenici od 0,4 m. Umirujući bazen je tipa III, sa srednjim redom zuba i izlaznom rampom na nizvodnom kraju.

Svi delovi objekta su dimenzionisani na protok  $Q = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ . Uzvodni deo brzotoka je gladak i konstantne širine 16 m sa nagibom koji počevši od uzvodnog kraja prvo ima nagib 4%, a zatim 12% dok se na nizvodnom kraju pretvara u stepenasti brzotok sa nagibom 1:2. Umirujući bazen je takođe širine 16 m, i dužine 17.5 m, sa dnom na koti od 713.30 mm, sa srednjim redom zuba i pragom na izlazu, visine 1.35 m.

Imajući u vidu opisanu geometriju, kao i generalno uslove tečenja u brzoku (velike brzine, dvofazno tečenje), jasno je da su preciznija analiza i pravilno dimenzionisanje objekta, dosta nepouzdati bez primene fizičkog modela.



Slika 1. Opšta dispozicija predloženog tehničkog rešenja.  
Figure 1. General layout of Soubella dam.

## 2 Fizički model

Osnovni ciljevi hidrauličkih modelskih ispitivanja brane Subela [2] bili su provera kapaciteta i uslova tečenja u brzotoku i umirujućem bazenu, provera opasnosti od kavitacije, provera predloženog rešenja zaštite nizvodnog rečnog korita od erozije.

Fizički model brane Subela (Slika 2) je izgrađen u hali Hidrauličke laboratorije Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi", u Beogradu, tokom 2016.godine. Imajući u vidu pomenute ciljeve, izabrana je razmera modela 1:20.



Slika 2. Model složenog brzotoka u razmeri 1:20.  
Figure 2. Scale model of complex chute, scale 1:20.

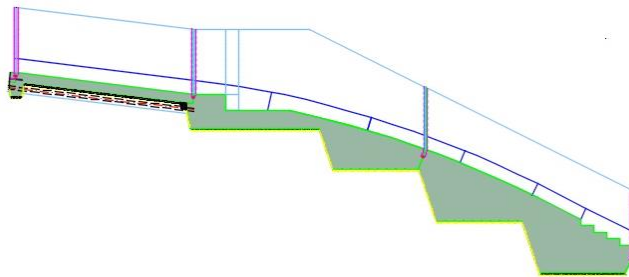
Model je obuhvatio deo glatkog brzotoka u dužini od 80 m (4 m na modelu), uzvodno od stacionaže 0+382,39 m, na kojoj se povećava podužni nagib brzotoka, zatim deonicu brzotoka sa stepenastim dnom, umirujući bazen i deonicu nizvodnog rečnog korita. Ukupna dužina deonice predstavljene na modelu iznosi 340 m (17 m na modelu).

## 3 Hidraulička modelska ispitivanja

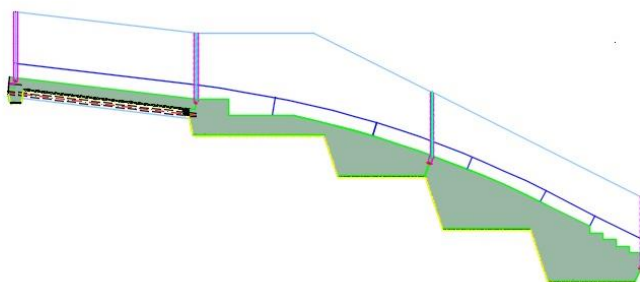
Osnovni cilj ispitivanja na modelu bio je da se odredi najpovoljnije tehničko rešenje brzotoka na mestu promene podužnog nagiba dna, na osnovu ispitivanja različitih varijanti.

Varijante I (Slika 3) i II (Slika 4) predviđale su postavljanje (varijanta I) ili demontažu (varijanta II) aeracije na bokove brzotoka na mestu promene nagiba, kako bi se obezbedilo ili onemogućilo aerisanje na celoj dužini ivice na tom mestu. Na modelu je aeracija ostvarena pleksiglas kanalom, dimenzija odgovarajućih dimenzijama na prototipu.

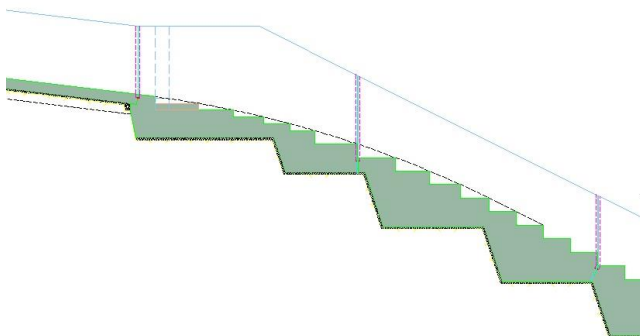
Varijantom III zadržana je aeracija iz varijante I, ali je nizvodno od tačke promene nagiba ceo brzotok promenjen u stepenast (Slika 5). Ova varijanta je osmišljena nakon ispitivanja prve dve, s obzirom da nijedna od njih nije dala hidraulički prihvatljive rezultate.



Slika 3. Varijanta I (sa aeratorom).  
Figure 3. Alternative I (including aeration).



Slika 4. Varijanta II (bez aeratora).  
Figure 4. Alternative III (excluding aeration).



Slika 5. Varijanta III (sa aeratorom i celokupnom stepenastom prelaznom deonicom).  
Figure 5. Alternative IV (including aeration and stepped bottom of the transitional section).

Svaka od varijanti ispitana je pri zadatom karakterističnom protoku  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T=1000$  god.) i ulaznoj brzini  $V=18 \text{ m/s}$ . Pomenuta ulazna brzina predstavljala je uzvodni granični uslov na modelu, a dobijena je kao računsa brzina u odgovarajućem poprečnom preseku brzotoka pri karakterističnom protoku  $Q_{0,1\%}$ . Na modelu je ova brzina ostvarena zadavanjem odgovarajućeg otvora ustave na nizvodnom kraju uzvodnog rezervoara pri zadatom protoku.

Efekat aeracije na deonici promene nagiba dna brzotoka jasno se uočava za varijantu I (Slika 6, levo) dok se za varijantu II (Slika 6, desno) vidi manje prisustvo vazduha.



Slika 6. Mesto promene nagiba brzotoka za varijantu I (levo) i II (desno) pri  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Figure 6. The profile of slope change for alternative I (left) and alternative II (right) at  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Na deonici nizvodno od promene nagiba brzotoka uočava se znatna razlika između varijante I (Slika 7 levo) i varijante II (Slika 7 desno), što su potvrdile i merene linije nivoa pri ovim varijantama.



Slika 7. Deonica nizvodno od promene nagiba brzotoka za varijantu I (levo) i II (desno) pri  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 7. The chute section downstream of profile of slope change for alternative I (left) and alternative II (right) at  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .

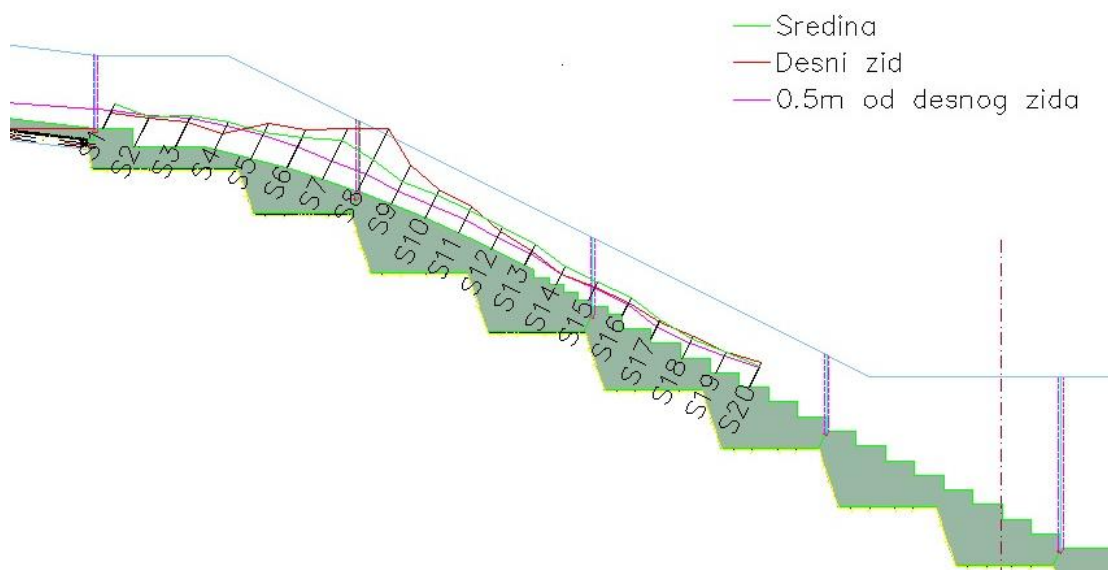
Za sve tri varijante, pri pomenutim uslovima ispitivanja, izmereni su nivoi vode po osi, uz desni zid (pošto je brzotok simetričan merenja su urađena samo sa jedne strane) i na 0.5 m od desnog zida glatkog dela brzotoka, kao i stepenastog dela brzotoka. Dubine su merene upravno na dno brzotoka. Rezultati merenja nivoa na glatkom delu brzotoka nisu pokazali bitne razlike između pojedinih varijanti, dok su u slučaju nizvodnog, stepenastog dela, razlike očiglednije, pa je njihovoj analizi posvećena veća pažnja.

Nivoi mereni u varijanti I su maksimalni na poziciji S7 (Slika 8). Ovako visok nivo nije opravdan iz dva razloga: prvi je da su nivoi u prirodi u odnosu na model veći zbog veće aerisanosti mlaza, a drugi da kroz brzotok treba propustiti i veće protoke od  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T=1000 \text{ god.}$ ), što bi nesumnjivo dovelo do još nepovoljnijih hidrauličkih uslova.

Ispitivanja varijante II preduzeta su da se proceni efekat na strujnu sliku bez aerisanja brzotoka. Nivoi izmereni u varijanti II (Slika 9), ukazuju na veoma značajne poremećaje pri bokovima, koji su posledica nearisanosti mlaza koji prerano udara u dno prelazne deonice i dovodi do velikog lokalnog povećanja nivoa na poziciji S8.



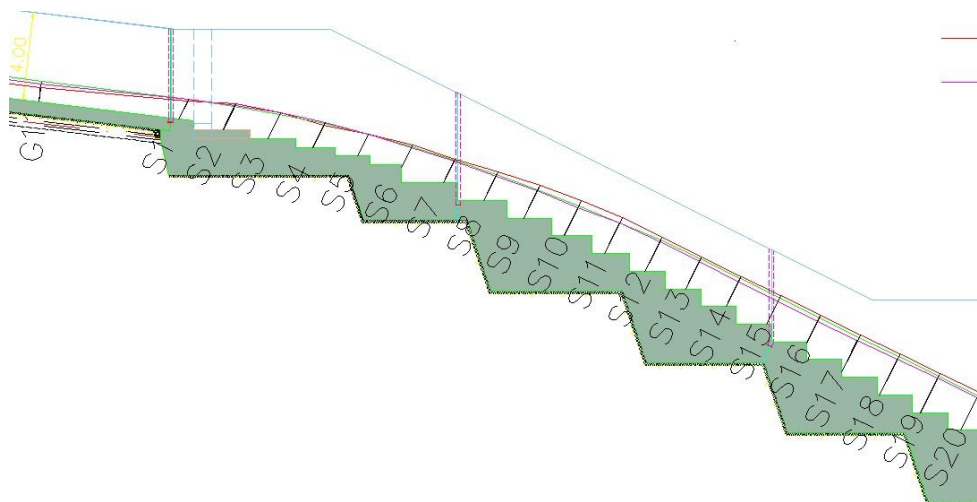
Slika 8. Linija nivoa na stepenastom brzotoku pri  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $V_{ul}=18\text{m/s}$  za varijantu I.  
Figure 8. Water levels in stepped section of chute at  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $V_{ul}=18\text{m/s}$ , alternative I.



Slika 9. Linija nivoa na stepenastom brzotoku pri  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $V_{ul}=18\text{m/s}$  za varijantu II.  
Figure 9. Water levels in stepped section of chute at  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $V_{ul}=18\text{m/s}$ , alternative II.

Za varijantu III (Slika 10), se jasno uočava da, sa usvojenom modifikacijom konture brzotoka, duž celog stepenastog brzotoka vlada stabilno strujanje, bez poremaćaja linije slobodne površine vode, kao i da tok ravnomerno dospeva u slapište.

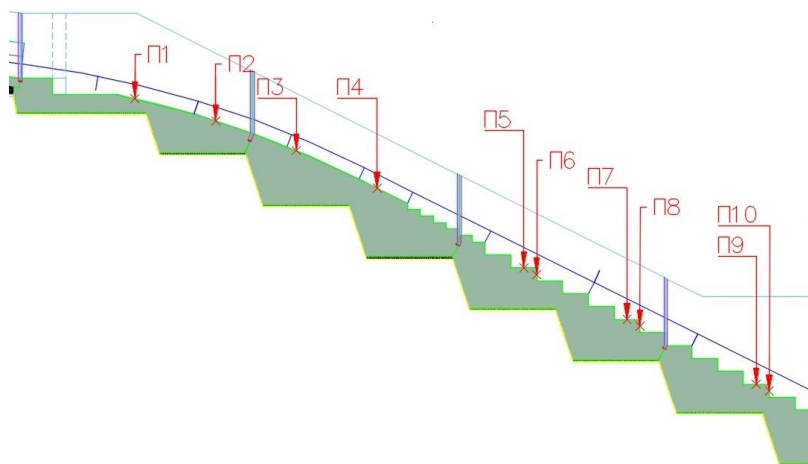
Na osnovu opisanih ispitivanja, varijanta III se pokazala kao najpovoljnija. Ipak, dodatno su izmereni i pritisci u izabranim tačkama brzotoka i slapišta, kako bi izbor varijante bio verifikovan i na taj način.



Slika 10. Linija nivoa na stepenastom brzotoku pri  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $V_{ul}=18\text{m/s}$  za varijantu III.  
 Figure 10. Water levels in stepped section of chute at  $Q_{0.1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $V_{ul}=18\text{m/s}$ , alternative III.

Za svaku od varijanti izmereni su pritisci na razmatranoj prelaznoj deonici brzotoka. Pritisci su mereni standardnim postupkom merenja u pijeziometarskim priključcima, postavljenim u izabranim tačkama po osi stepenastog brzotoka (Slika 11).

Varijanta I ima maksimalne pritiske u pijeziometru  $\Pi_4$ , koji se nalazi na mestu udara "ski-skoka" koji nastaje usled rampe na mestu promene nagiba brzotoka. Varijanta II ukazuje na povećanje pritiska u pijeziometru  $\Pi_3$  što je posledica kraćeg dometa neaerisanog mlaza (u odnosu na aerisani mlaz varijante I). Pijeziometri  $\Pi_5$  i  $\Pi_6$  ukazuju na razvijeno tečenje u stepenastom brzotoku, što se može reći i za pijeziometre  $\Pi_7$  i  $\Pi_8$ . Pijeziometri  $\Pi_9$  i  $\Pi_{10}$  se nalaze u zoni uticaja umirujućeg bazena, pa na njih prevashodno utiče hidralički skok u bazenu. Za obe ove varijante, javljao se skok mlaza (ski odskok) nizvodno od mesta promene nagiba dna, usled uticaja rampe. Ovakav skok značajno remeti strujnu sliku, stvarajući nestabilno strujanje sa kosim talasima i značajnim lokalnim povećanjem nivoa vode.



Slika 11. Raspored pijeziometara na razmatranom delu brzotoka.  
 Figure 11. Positions of piezometers at the analyzed chute section.

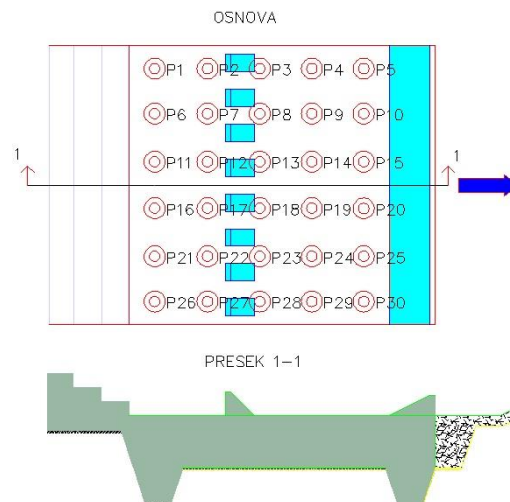
Svi ovi poremećaji bi se dodatno pogoršali pri većim protocima, kojima brzotok može biti izložen tokom eksploatacije, a koji (prema projektnom zadatku) nisu predviđeni da se modeliraju. Varijanta III, slično sa prikazanom linijom nivoa, nije pokazala ni skokove pritiska, pa se opet pokazala kao najpovoljnija i ona je usvojena kao konačna.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

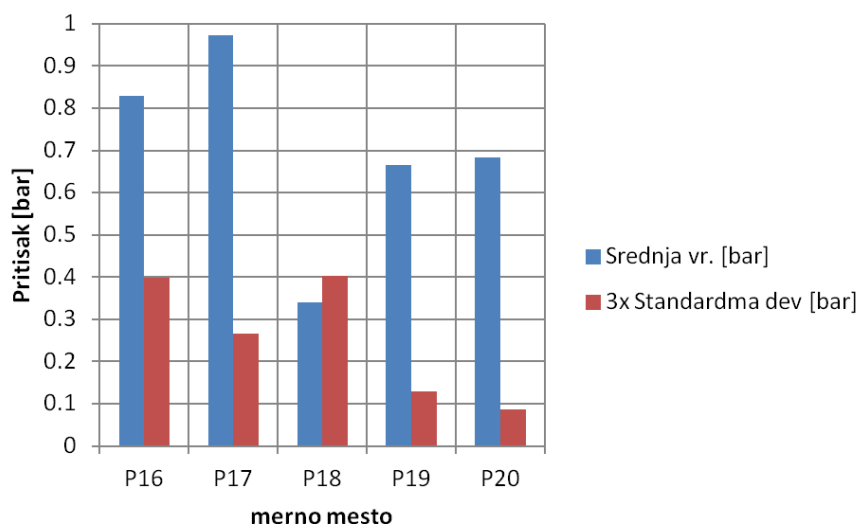
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Hidraulički uslovi u slapištu analizirani su pri svakoj varijanti. Na osnovu vizuelne ocene nisu uočene bitne razlike između prve dve varijante – hidraulički skok se zadržavao u slapištu. U sklopu dalje analize, izmereni su i pritisci u slapištu. Pritisci su mereni standardnim postupkom merenja [1] sa sondama u priključcima, postavljenim u izabranim tačkama (Slika 12). Za preliminarna ispitivanja u cilju poređenja varijanti korišćeni su rezultati merenja u tačkama od P16 do P20.



Slika 12. Slapište sa položajem mernih mesta.  
Figure 12. Pressure measurement points in stilling basin.

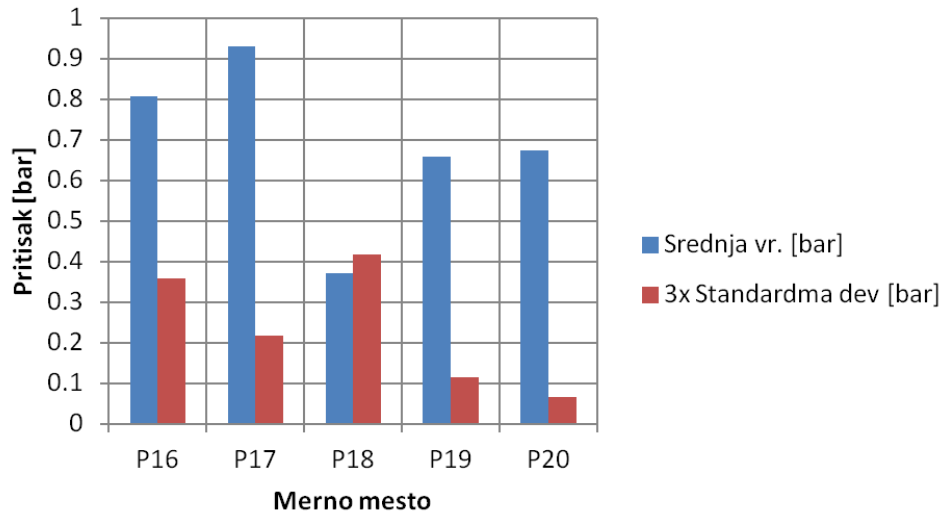
Rezultati merenja pritiska za varijantu I za tačke od P16 do P20 dati su na Slici 13 (za  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ ). U rezultatima su prikazane srednja vrednost pritiska, kao i vrednost od tri standardne devijacije pritiska, kao mera fluktuacije pritiska. Za tačku P18, koja se nalazi neposredno nizvodno od zuba, može se uočiti fluktuacioni podpritisak veći od srednje vrednosti, ali se mora zapaziti da je u pitanju trenutna vrednost, što ne bi trebalo da predstavlja realnu opasnost.



Slika 13. Raspodela pritiska u slapištu za varijantu I pri  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Figure 13. Pressures in the stilling basin at  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ , alternative I.

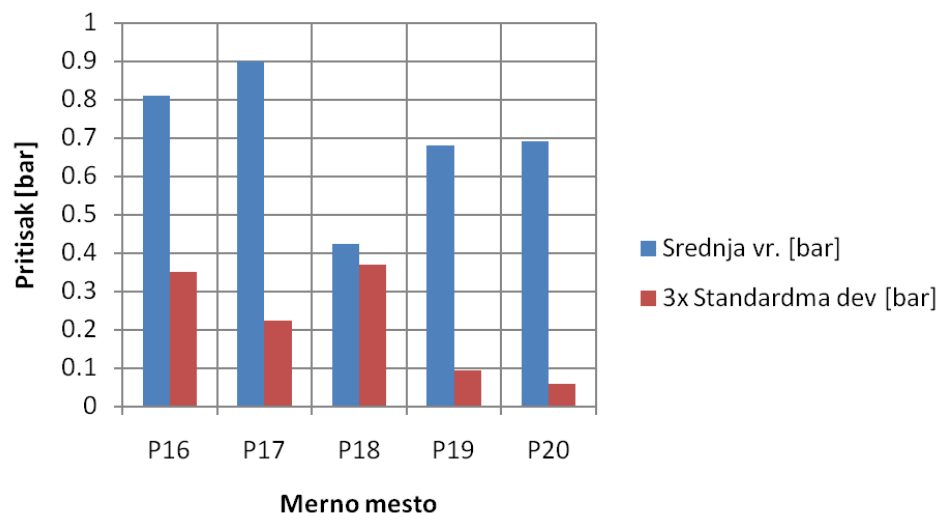
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Rezultati merenja pritiska za varijantu II za tačke od P16 do P20 dati su na Slici 14 (za  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Za tačku P18 koje je neposredno nizvodno od zuba može se primetiti ista pojava kao i za Varijantu I.



Slika 14. Raspodela pritiska u slapištu za varijantu II pri  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Figure 14. Pressures in the stilling basin at  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ , alternative II.

Radi poređenja sa ostalim varijantama, rezultati merenja pritiska za varijantu III, za tačke od P16 do P20, dati su na Slici 15 (za  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Za tačku P18, koja se nalazi neposredno nizvodno od zuba, može se uočiti fluktuacioni podpritisak blizak i manji od srednje vrednosti, ali važi isti zaključak kao kod varijanti I i II, tako da se ne smatra realnom opasnošću. Pulzacije pritiska za tačku P18 minimalno su manje za varijantu III, u odnosu na varijantu II, zbog bolje oblikovane prelazne deonice (gladak u stepenasti brzotok). Međutim generalno se ne može se uočiti bitna razlika u odnosu na varijante II i III, kako po rasporedu, tako i po intenzitetu pritiska.



Slika 15. Raspodela pritiska u slapištu za varijantu III pri  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Figure 15. Pressures in the stilling basin at  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ , alternative III.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Za usvojeno rešenje (varijanta III) izmereni su dinamički pritisci u slapištu za karakteristične protoke  $Q_{1\%}=107 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q_{0,1\%}=236 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zaključeno je da je standardna devijacija uglavnom proporcionalna osrednjenjnoj vrednosti sile, jer je osrednjena vrednost sile proporcionalna brzini. Veća brzina daje viši nivo turbulencije, a time su i fluktuacije sile veće. Zbog toga, pri računskom protoku od  $Q=236 \text{ m}^3/\text{s}$ , nema delova slapišta u kome se mogu očekivati negativne sile.

Sile na dno slapišta su značajno veće od sila na zidovima, dok su standardne devijacije istog reda veličine. Najveće vrednosti srednje sile i standardnih devijacija javljaju se na uzvodnom kraju slapišta, gde mlaz sa brzotoka pada u slapište, a takođe standardna devijacija očekivano je veća u zoni nizvodno od zuba.

Za projektovano rešenje, za protoke  $Q_{1\%}$  i  $Q_{0,1\%}$ , izmereni su nivoi vode po osi i uz desni zid slapišta. Pokazano je da je hidraulički skok potpuno u umirujućem bazenu pri  $Q_{1\%}$ , a da se sa povećanjem protoka na  $Q_{0,1\%}$  hidraulički skok zadržava u umirujućem bazenu. Dakle, na osnovu merenja može se potvrditi zaključak da projektovano rešenje zadovoljava potrebne i neophodne kriterijume sigurnosti objekta i da nisu potrebne dalje izmene.

## 4 Zaključak

S obzirom na buran režim tečenja, tačke promene podužnog nagiba na trasi brzotoka su vrlo osetljive tačke, pa prilikom projektovanja treba posvetiti posebnu pažnju oblikovanju prelaznih deonica. Takođe, imajući u vidu velike brzine koje se javljaju u brzotoku, treba voditi računa i o izboru adekvatne aeracije. Kako su pokazala opisana ispitivanja, aeracija značajno doprinosi poboljšanju uslova tečenja u brzotoku i na taj način štiti konstrukciju brzotoka od kavitacije. Ipak, sama aeracija ima smisla samo kao dodatna mera, uz već dobro projektovanu geometriju.

Stepanasto dno na izlaznom delu brzotoka predstavlja efikasan način da se voda iz brzotoka sprovede u umirujući bazen, a da se pri tome izgubi i deo energije vode, odnosno da se obezbede manje brzine na ulasku u umirujući bazen. U konkretnom slučaju, početak stepenastog dela brzotoka na samom prelomu dao je najbolje rezultate. Preporuke iz literature svakako su dale smernice za projektovanje, ali su ispitivanja na fizičkom modelu bez sumnje omogućila znatno precizniji uvid u kompletnu sliku i time doprinela unapređenju projektovanog tehničkog rešenja.

## 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. 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.
2. Vojt P. (2016), Hidraulička modelska ispitivanja brane Soubella - Konačan izveštaj, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd.

## **Hidraulička modelska ispitivanja PK preliva – primer brane Tarzout**

Dimitrije Mladenović<sup>1</sup>, Danica Starinac<sup>2</sup>, Predrag Vojt<sup>3</sup>, Radomir Kapor<sup>4</sup>, Ljubodrag Savić<sup>5</sup>

APSTRAKT: Glavni evakuacioni objekat projektovane brane sastoji se od preliva, stepenastog brzotoka i umirujućeg bazena. Preliv predstavlja varijantu lavirint preliva, u obliku klavirskih dirki, odnosno tzv. Piano Key (PK) preliv. Projektovano rešenje provereno je na fizičkom modelu u razmeri za dužine 1:30, uz poštovanje Frudove sličnosti. PK preliv se odlikuje izrazito kompleksnim, trodimenzionalnim tečenjem, pa određivanje njegovog kapaciteta predstavlja svojevrsan izazov. U ovom radu izvršiće se prikaz rezultata predmetnih modelskih ispitivanja.

Ključne reči: hidraulički model, piano key, PK preliv, brana Tarzout

## **Hydraulic model testing of Piano Key Weir – the example of the Tarzout dam**

ABSTRACT: Main flood mitigation components structures consists of spillway, stepped chute and stilling basin. The Piano Key Weir spillway is a variation of the traditional labyrinth weir. The design of Tarzout Dam has been verified by scale model analyses. The length scale of the physical model was 1:30 and the hydraulic parameters were scaled applying the Froude similarity. A PKW is characterized by complex three-dimensional flow, so the discharge over such a spillway depends on many parameters and represents a challenge. In this paper, the results of the subject model tests will be presented.

Keywords: scale model, Piano Key Weir, PK Weir, Tarzout

---

<sup>1</sup> Dimitrije Mladenović, mast.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [dimitrije.mladenovic@jcerni.rs](mailto:dimitrije.mladenovic@jcerni.rs)

<sup>2</sup> Danica Starinac, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [danica.starinac@jcerni.rs](mailto:danica.starinac@jcerni.rs)

<sup>3</sup> Predrag Vojt, dipl.inž. građ., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Pinosava-Beograd, [predrag.vojt@jcerni.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.rs)

<sup>4</sup> Prof. dr Radomir Kapor, dipl.inž.građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [rkapor@grf.bg.ac.rs](mailto:rkapor@grf.bg.ac.rs)

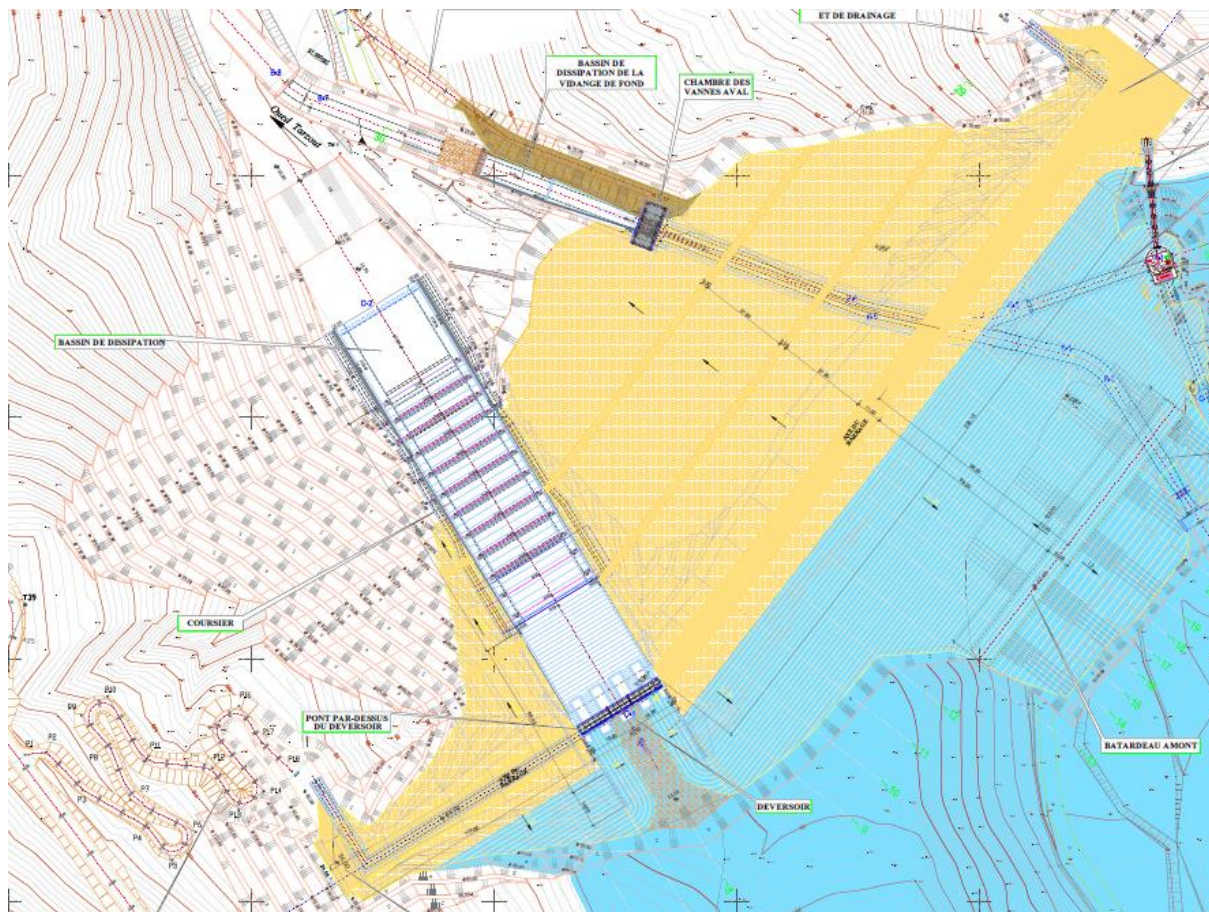
<sup>5</sup> Prof. dr Ljubodrag Savić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, [ljsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljsavic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod – opis tehničkog rešenja brane Tazout

Brana Tazout gradi se na reci Tazout u provinciji Biskra, u Alžiru. Glavna funkcija brane je regulacija dotoka vode reke Tazout radi obezbeđivanja vode za potrebe navodnjavanja. Pored navodnjavanja, brana i njeni prateći objekti dimenzionisani su tako da omoguće bezbedno prihvatanje i propuštanje poplavnog talasa 10,000 godišnje velike vode ( $Q = 965 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Brana Tazout je nasuta gravitaciona brana sa centralnim glinenim jezgrom. Za osu brane usvojeno je mesto na izlazu iz suženog dela reke Tazout, koje je ocenjeno kao mesto koje ima najbolje morfološke, topografske, geološke i geotehničke karakteristike za izgradnju nasute brane (Slika 1.). Kota krune brane je 86.00 m NGA. Brana formira akumulaciju ukupne zapremine  $11.2 \text{ hm}^3$  pri koti normalnog uspora na 80.60 m NGA.

Objekti za evakuaciju velikih voda smešteni su u levom boku brane. Njih čine PK preliv (Piano Key preliv), stepenasti brzotok i umirujući bazen tipa USBR II, u kome se vrši konačna disipacija energije prelivene vode i omogućava bezbedan spoj prelivene vode sa tokom reke Tazout nizvodno od brane. Preko preliva je predviđena mostovska konstrukcija koja se oslanja na bočne zidove preliva i dva stuba na prelivnom delu, čija visina omogućava dovoljan prostor za bezbednu evakuaciju velikih voda preko brane.



Slika 1. Dispozicija tehničkog rešenja preliva, brzotoka i slapišta brane Tazout.

Figure 1. Disposition of the technical solution of spillway, stepped chute and stilling basin of Tazout dam.

## 2 Fizički model brane Tarzout

Fizički model brane Tarzout [11] je izgrađen u hali Hidrauličke laboratorije Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi", u Beogradu, 2017. godine (Slika 2).

Na modelu u razmeri za dužine 1:30, predstavljeni su sledeći elementi: uzvodni deo akumulacije 50 m uzvodno od preliva, preliv (Piano Key), stepenastog brzotoka, slapište (USBR II) i 200 m nizvodnog dela rečnog toka.

Na hidrauličkom modelu predstavljeno je čitavo područje koje može imati uticaja na veličine koje su predmet modelskih ispitivanja.

Centralni deo modela čini stepenasti brzotok koji je napravljen od finog betona (Slika 4.), dok su Piano Key preliv, zidovi i umirujući bazen izrađeni od providnih ploča pleksiglasa (Slika 3.). Sve komponente modela izrađene su tako da odgovaraju projektovanim dimenzijama, a izabrani materijali imaju odgovarajuću rapavost, koja je potrebna da zadovolji zahtevanu sličnost sa uslovima na objektu.



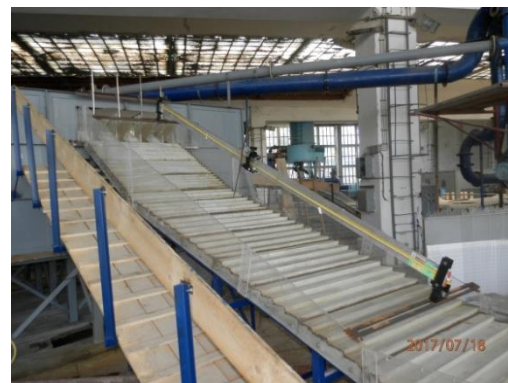
Slika 2. Fizički model brane Tarzout izgrađen u hali Hidrauličke laboratorije Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi"

Figure 2. Scale model of Tarzout Dam at the Hydraulics Laboratory of the Jaroslav Černi Water Institute.



Slika 3. Piano Key preliv

Figure 3. Piano key weir



Slika 4. Stepenasti brzotok

Figure 4. Stepped chute

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Prilikom izbora razmere modela vođeno je računa da se obuhvati i što krupnije predstavi čitava oblast gde se mogu očekivati složeni uslovi tečenja. Sa druge strane, ograničenje nameće i raspoloživi prostor za postavljanje modela, kao i raspoloživi kapacitet sistema vodosnabdevanja hidrauličke laboratorije.

U čitavoj oblasti koju obuhvata hidraulički model brane Tarzout javlja se tečenje sa slobodnom površinom za čitav opseg razmatranih proticaja, pa sličnost pojava u odnosu na objekat podleže Froude-ovom zakonu, uz zadovoljenje uticaja i sila trenja izborom materijala od koga je napravljen model i vodotok.

Izabrana razmera za dužine 1:30 omogućila je efikasno modeliranje kapaciteta preлива, nastanka stojećih talasa na stepenastom brzotoku i propagacije talasa u umirujućem bazenu.

Imajući u vidu da su zahtevi Froude-ove sličnosti ispunjeni, na modelu ove razmere ne može se efikasno reprodukovati protok mešavine vode i vazduha, tako da su dubine ostvarene na stepenastom brzotoku modela manje od onih koje bi se javile u prirodi, a preostala energija na kraju brzotoka je veća. To znači da se na modelu nije mogla pouzdano proceniti visina bočnih zidova brzotoka, dok su dimenzije umirujućeg bazena na strani sigurnosti. Sa druge strane, prema (Ercicum, i sar. 2016), protok preko Piano key preлива, za manje visine prelivnog mlaza, je manji na modelu nego što će biti na objektu. Ovo je posledica "efekta razmere", jer su sile površinskog napona na modelu veće nego odgovarajuće sile na objektu.

Model brane Tarzout je kalibrisan tako da je postignuta sličnosti između strujanja u prirodi (na objektu) i na hidrauličkom modelu. Za objekte ovog tipa, kalibracijom (tariranjem) je potrebno postići zadovoljavajuću sličnost nivoa i proticaja vode. Prema tome, potrebno je uspostaviti odgovarajuće granične uslove.

Uzvodni granični uslov predstavlja proticaj, koji se ostvaruje odgovarajućim sistemom vodosnabdevanja modela, preko mernih komora iz kojih se tačno definisana količina vode upućuje na model. Pored protoka, važan je i raspored brzina na uzvodnoj granici modela, na kojoj izvedeno umirenje kojim se obezbeđuje odgovarajući raspored brzina koji je sličan onom na objektu.

Nizvodni granični uslov predstavlja nivo vode u najnižvodnijem modeliranom profilu, u kome je definisana kriva protoka koja je dobijena od strane projekatana. Nivo u nizvodnom delu korita regulisan je preko igličaste ustave koja je postavljena na kraju modela.

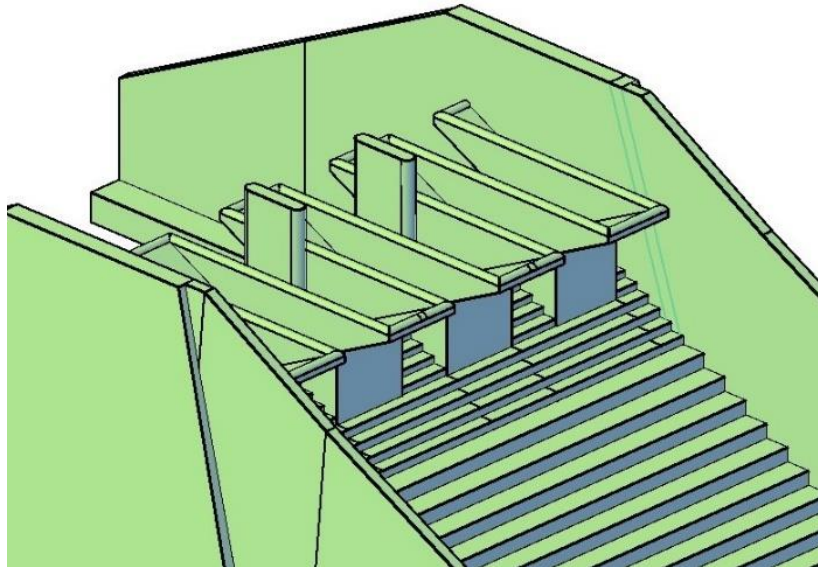
Protoci na modelu mere se na mernim komorama sa Bazen-ovim prelivom. Za merenje visine prilivnog mlaza na ovim prelivima koriste se merne igle sa nonijusom i tačnošću merenja  $\pm 1/10$  mm, što rezultira tačnošću merenja protoka od  $\pm 0,5\%$ . Protok na modelu takođe se meri i uređajem za kontinualno merenje protoka, ultrazvučnim merilom protoka, sa tačnošću od  $\pm 1,5\%$ . Kontinualno merenje obezbeđuje se akvizicionim modulom.

## 3 PK Preliv

Prelivi imaju značajnu ulogu u obezbeđenju brana od velikih voda. Nedovoljan kapacitet preлива uslovljava jednu trećinu proboja brana. Protočni kapacitet preлива sa slobodnim prelivanjem ili prelivom sa otvorenim ustavama je direktno proporcionalan dužini krune ili preлива pri datom uzvodnom nivou. Dužina prelivne ivice se može povećati korišćenjem zakrivljenih, valovitih preлива, umesto pravih, line-arnih, pri čemu se protok pri datom nivou takođe povećava. U nastojanju da dužina krune bude što veća, razvijeni su prelive sledećih geometrijskih karakteristika krune: preliv u obliku pačijeg kljuna ili u obliku kade, Y preliv, preliv u obliku latica cveta i kružni preliv. U narednoj fazi, tokom 1930-ih počinje razvoj lavirint preлива. Posle 2000. godine uveden je Piano Key preliv, u vidu nadgradnje tradicionalnog rešenja lavirint preлива [9], [10].

PK preliv je varijanta tradicionalnog lavirint preлива. Osnova je pravougaonog oblika (Slika 5), ali za razliku od lavirint preлива, teme nije vertikalno, već zakošeno u uzvodnom i nizvodnom pravcu. Dispozicija u obliku klavirskih dirki objašnjava naziv Piano Key preliv. Zavisno od usvojenih nagiba ulaznih i izlaznih „dirki“, postoje određene uzvodne i nizvodne izbočine. To zahteva manju osnovu objekta u poređenju sa pravougaonom lavirint prelivom sa vertikalnim

zidovima. Zbog toga je, mimo boljih hidrauličkih performansi, prednost PK preliva u tome što se jednostavno može izgraditi čak i u slučaju ograničenog prostora fundiranja, na primer u slučaju krune gravitacione brane. To je i razlog zašto prelivi sa PK prelivom predstavljaju efikasno i ekonomično rešenje za povećanje evakuacionog kapaciteta postojećih gravitacionih brana [1], [2].



Slika 5. 3D skica Piano key preliva

Figure 5. 3D sketch of Piano Key Weir

Prvi PK preliv je instaliran 2006. godine na brani Golours u Francuskoj, a nakon toga korišćen kod velikog broja drugih brana (Francuska, Vijetnam, Indija, Kina itd.).

PK preliv karakteriše složeno trodimenzionalno tečenje, tako da protok preko ovakvog preliva zavisi od mnogih parametara. Zbog toga je potreban čitav niz laboratorijskih eksperimenata da bi se utvrdila opšta pravila projektovanja. Preliminarne projektne kriterijumi izloženi su u literaturi [7], koji su zasnovani na eksperimentima vršenim na Univerzitetu „Biskra“ u Alžiru i Univerzitetu „Roorkee“ u Indiji. Nakon toga sistematičniji laboratorijski eksperimenti su sprovedeni u EDF – Nacionalnoj hidrauličkoj laboratoriji (EDF-LNHE Chatou) u Francuskoj, HACH – Hidrauličkoj laboratoriji Univerziteta u Liježu, Belgija, i Laboratoriji za hidrotehničke objekta (LCHEPFL) u Lozani, Švajcarska ([9], [3], [4], [5], [6] i [8]).

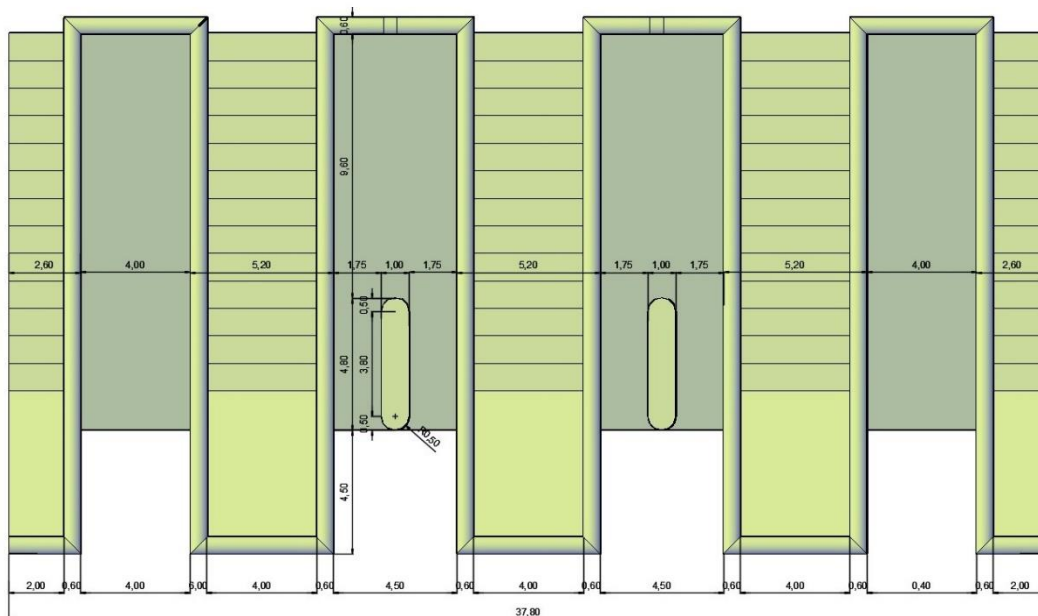
Iako je došlo do intenziviranja istraživanja u oblasti PK preliva, količina eksperimentalnih podataka je i dalje ograničena, a empirijske formule predložene u literaturi treba oprezno koristiti. Svaki novi PK preliv je jedinstven objekat, tako da se preporučuju fizički modeli za ocenu tehničkog rešenja.

## 4 Ispitivanja Piano Key preliva

Hidraulička modelska ispitivanja fizičkog modela brane Tarzout [11] započeta su preliminarnim testovima koncepta projektovanog preliva za tri protoka:  $Q_{0.01\%} = 965 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{0.1\%} = 740 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q_{1\%} = 478 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cilj ovih ispitivanja bio je utvrđivanje kapaciteta preliva pri merodavnoj velikoj vodi, kako bi se proverile vrednosti iz projektovanog rešenja.

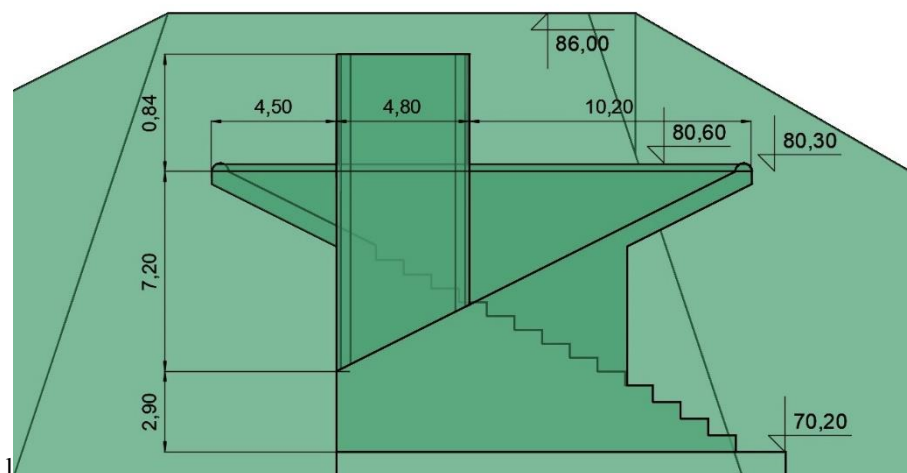
Projektovani Piano key preliv je dimenzionisan na protok  $Q_{0.01\%} = 965 \text{ m}^3/\text{s}$  koji se ostvaruje pri nivou vode u akumulaciji koji odgovara koti maksimalnog uspora  $Z_{MU} = 84 \text{ mm}$ . Ukupna širina preliva je 37.8 m (slika 6.), dužine u podužnom preseku 19.5 m, sa ukupnom dužinom prelivne ivice od 193.80 m ( $8 \times 19.5 + 37.8 \text{ m}$ ), sa krunom na koti od  $Z_{KP} = 80.60 \text{ mm}$  (slika 7).





Slika 6. Osnova Piano key preliva

Figure 6. Plan view of Piano Key Weir



Slika 7. Poprečni presjek Piano key preliva

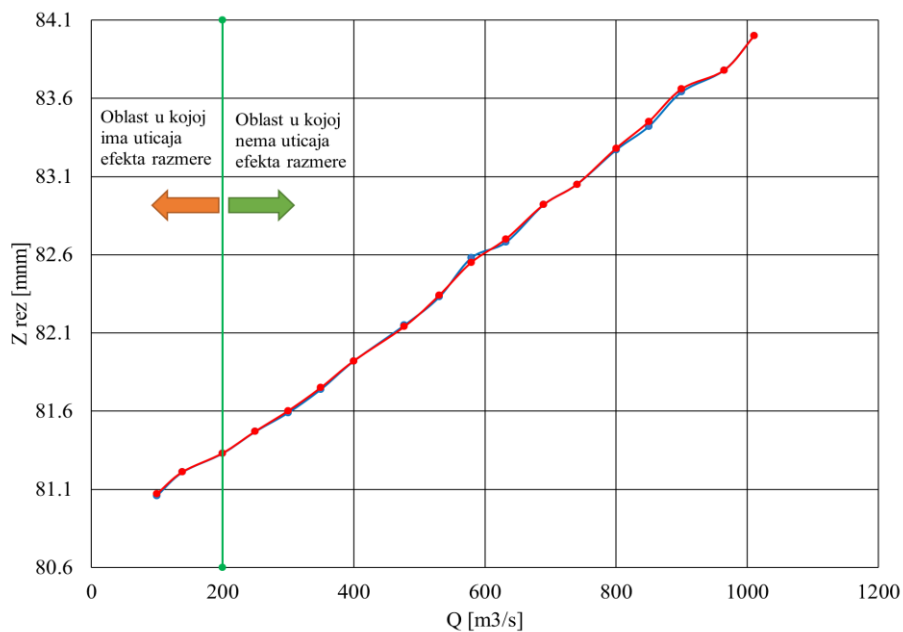
Figure 7. Cross section of Piano Key Weir (inlet)

Analizom hidrauličkih uslova na prelivu, brzotoku, umirujućem bazenu i nizvodnom rečnom koritu i merenjem dobijeni su najbitnijih parametri za procenu performansi brane.

Prema [5], efekti razmere utiču na rezultate merenja ako je visina prelivnog mlaza manja od 0,03 m, što bi sa razmerom za dužine 1:30 značilo do visine prelivnog mlaza od 0,90 m na objektu. Do te visine, zbog uticaja površinskog napona, izmereni kapacitet preliva na modelu preračunat na objektu, je nešto manji od onoga koji će se ostvariti na objektu. Kako ovoj visini prelivnog mlaza odgovara protok od oko 200 m<sup>3</sup>/s može se zaključiti da efekat razmere ne utiče na veće protoke, koji su interesantni za evakuaciju velikih voda.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 8. Kriva protoka preлива dobijena na fizičkom modelu.

Figure 8. Spillway rating curve, obtained from the scale model.

Tabela 1. Kriva protoka preлива dobijena na fizičkom modelu.

Table 1. Spillway rating curve, obtained from the scale model.

Test	Protok	Preliv	Igla BGV	EL. BGV
	nominalno	(m <sup>3</sup> /s)	(mm)	(mm)
1	100	99.7	81.06	81.07
2	150	138.5	81.21	81.21
3	200	199.7	81.33	81.33
4	250	249.7	81.47	81.47
5	300	299.6	81.59	81.60
6	350	349.8	81.74	81.75
7	400	399.8	81.92	81.92
8	Q <sub>1%</sub> = 478	477.2	82.15	82.14
9	530	530.3	82.33	82.34
10	580	579.2	82.58	82.55
11	640	632.1	82.68	82.70
12	690	689.7	82.92	82.92
13	Q <sub>0.1%</sub> = 740	740.4	83.05	83.05
14	800	800.2	83.27	83.28
15	850	849.9	83.42	83.45
16	900	900.1	83.64	83.66
17	Q <sub>0.01%</sub> = 965	965.1	83.78	83.78
18	maxRN	1010.8	84.00	84.00

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na osnovu zabeleženih nivoa vode u akumulaciji, zaključeno je da se projektovani protok preliva  $Q_{0.01\%} = 965 \text{ m}^3/\text{s}$  ostvaruje za projektovanu dužinu preliva pri visini prelivnog mlaza od 3,18 m, koja je manja od projektovane visina mlaza 3,4 m. Za kotu maksimalnog uspora od 84 mm ostvaruje protok od 1010,8  $\text{m}^3/\text{s}$ , tako da možemo zaključiti da je kapacitet preliva 4,7% veći od projektovanog.

Pošto su svi uslovi preliivanja zadovoljavajući za sve slučajeve ispitivanja, oblici i dimenzije Piano Key preliiva i stubova su zadržani.

Na osnovu modelskih ispitivanja dobijena je kriva protoka koja definiše veze između kote vode u akumulaciji i proticaja koji se ostvaruje na preliivu (Slika 8). Kriva protoka preliiva određena je za nivoe vode koji su između kote krune preliiva ( $Z_{KP} = 80,6 \text{ mm}$ ) i kote maksimalnog uspora ( $Z_{MU} = 84 \text{ mm}$ ). Rezultati modelskih ispitivanja PK preliiva dati su u tabeli 1.

Uslovi tečenja na PK preliivu i stepenastom brzotoku pri karakterističnim protocima prikazani su na slikama od 9 do 11.



Slika 9. Uslovi tečenja na PK preliivu pri protoku  $Q_{0.01\%} = 965 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 9. PKW flow conditions at a flow rate of  $Q_{0.01\%} = 965 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Slika 10. Uslovi tečenja na PK preliivu pri protoku  $Q_{0.1\%} = 740 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 10. PKW flow conditions at a flow rate of  $Q_{0.1\%} = 740 \text{ m}^3/\text{s}$ .

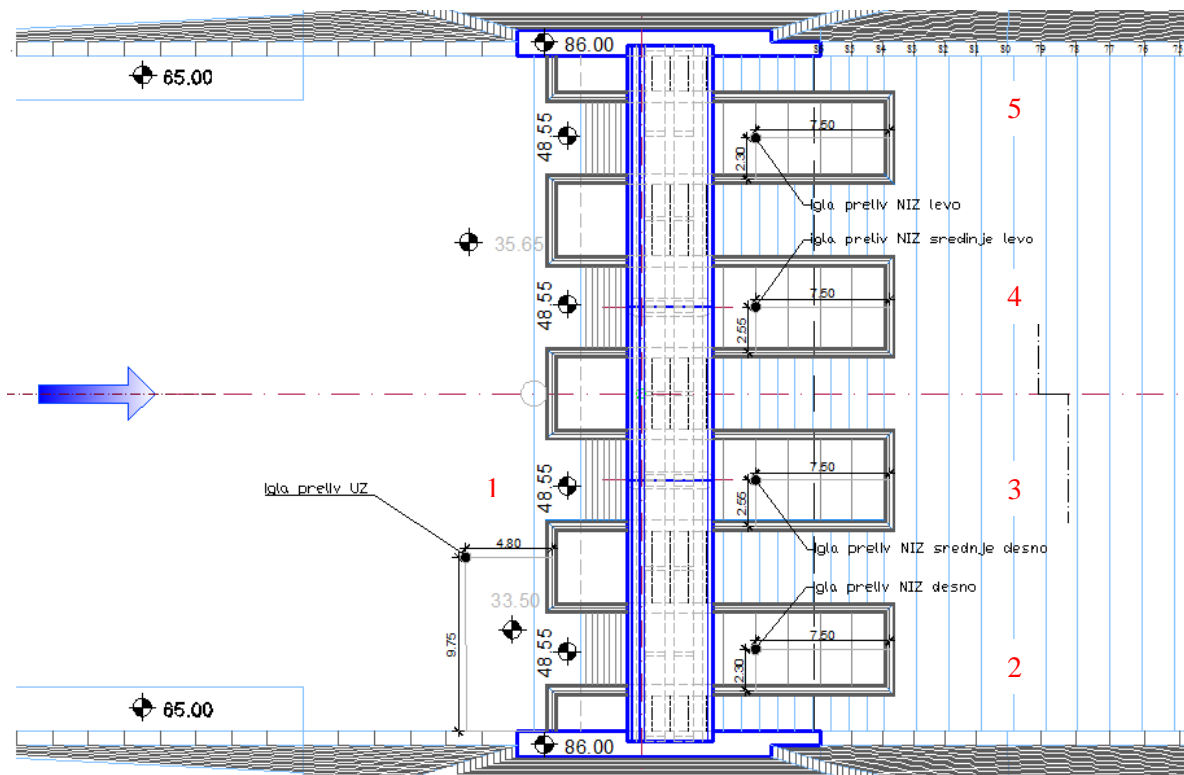


Slika 11. Uslovi tečenja na PK prelivu pri protoku  $Q_{1\%} = 478 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 11. PKW flow conditions at a flow rate of  $Q_{1\%} = 478 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Kako bi se stekao uvid uticaja mostovskih stubova na prelivanje pri protocima  $Q_{0,01\%}$ ,  $Q_{0,1\%}$  i  $Q_{1\%}$  na prelivu su takođe izmereni nivoi vode u nekoliko karakterističnih tačaka. Pozicija mernih mesta prikazana je na slici 12, na kojoj se vidi položaj merne igle uzvodno od preliva ( $n_{0,1}$ ), kao i mernih igli sa nizvodne strane preliva ( $n_{0,2} - n_{0,5}$ ), a rezultati merenja dati su u tabeli 2.

Uticaji mostovskih stubova na tečenje na Piano Key prelivu pri karakterističnim protocima prikazani su na slikama od 13. do 15.



Slika 12. Položaj mernih tačaka duž PK preliva.

Figure 12. Position of the measuring points on PKW.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 2. Tabelarni prikaz karakterističnih tačaka nivoa na PKW prelivu

Table 2. Display of characteristic points of the water level on the PKW

Test	Protok	Preliv	Igla BGV	EL. BGV	Igla preliv UZ (1)	Igla preliv NIZ levo (2)	Igla preliv NIZ srednje levo (3)	Igla preliv NIZ srednje desno (4)	Igla preliv NIZ desno (5)
	nominalno	(m <sup>3</sup> /s)	(mnm)	(mnm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
8	$Q_{1\%} = 478$	477.2	82.15	82.14	82.03	81.56	81.64	81.70	81.59
13	$Q_{0,1\%} = 740$	740.4	83.05	83.05	82.87	81.98	81.81	82.00	81.94
17	$Q_{0,01\%} = 965$	965.1	83.78	83.78	83.54	82.09	82.00	82.05	82.11



Slika 13. Uticaj mostovskih stubova na tečenje pri protoku  $Q_{0,01\%} = 965$  m<sup>3</sup>/s.

Figure 13. Influence of bridge pillars on flow conditions at a flow rate of  $Q_{0,01\%} = 965$  m<sup>3</sup>/s.



Slika 14. Uticaj mostovskih stubova na tečenje pri protoku  $Q_{0,1\%} = 740$  m<sup>3</sup>/s.

Figure 14. Influence of bridge pillars on flow conditions at a flow rate of  $Q_{0,1\%} = 740$  m<sup>3</sup>/s.



Slika 15. Uticaj mostovskih stubova na tečenje pri protoku  $Q_{1\%} = 478 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 15. Influence of bridge pillars on flow conditions at a flow rate of  $Q_{1\%} = 478 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5 Zaključak

Ispitivanjem na fizičkom modelu pomoglo se u otkrivanju i rešavanju problema projektovanog rešenja brane Tarzout, koji se nisu mogli pravilno sagledati prilikom faze projektovanja. Hidraulička modelska ispitivanja PK preлива (Piano key) pokazala su da projektovano rešenje preлива obezbeđuje bezbednu evakuaciju vode u svim razmatranim slučajevima i da se oblici i dimenzije Piano Key preлива i stubova mogu zadržati.

## 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. Anderson, R.M., Tullis, B. (2011): *Influence of Piano Key Weir geometry on discharge*. Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, pp. 75–80, CRC Press, Boca Raton, FL.
2. Anderson, R.M., Tullis, B. (2012): *Comparison of Piano Key and rectangular Labyrinth Weir hydraulics*. J. Hydraulic Eng. 138(4), pp. 358–361.
3. Blancher, B., Montarros, F., Laugier, F. (2011): *Hydraulic comparison between Piano Key Weirs and labyrinth spillways*. Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, pp. 141–150, CRC Press, Boca Raton, FL.
4. Cicero, G.M., Menon, J.M., Luck, M., Pinchard, T. (2011): *Experimental study of side and scale effects on hydraulic performances of a Piano Key Weir*. Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs, Liège B, pp. 167–172, CRC Press, Boca Raton, FL.
5. Erpicum, S., Tullis, B. P., Lodomez, M., Archambeau, P., Dewals, B. N., Piroton, M., (2016): *Scale effects in physical piano key weirs models*. Journal of Hydraulic Research Vol. 54, No. 6 (2016), pp. 692–698.
6. Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J-L., (2012): *Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 50, No. 4, 2012, pp. 400–408.
7. Lempérière, F., Ouamane, A. (2003): *The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways*. Hydropower & Dams 10(5), pp. 144–149.
8. Machiels, O., Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P., Piroton, M. (2011): *Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir*. Journal of Hydraulic Research Vol. 49, No. 3 (2011), pp. 359–366.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

9. Schleiss, A.J., (2011): *From labyrinth to piano key weirs: A historical review*. Proc. Int. Conf. Labyrinth and PianoKey Weirs, Liège B, pp. 3–15, CRC Press, Boca Raton, FL.
10. Starinac, D., Vojt, P., Mladenović, D., (2017): Scale modeling of Tarzout dam, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, ISSN 2217-5237, Vol. 7, No. 4, pp. 53-65, 2017.
11. Vojt, P., (2017): Hidraulička modelska ispitivanja brane Tarzut - Konačan izveštaj [Scale model analyses of the Tarzout dam – Final Report]. Jaroslav Cerni Institute for the Development of Water Resources (JCI), Belgrade, July 2017.

## **Kritički osvrt na rezultate sa fizičkih modela**

Božidar Batinić<sup>1</sup>

APSTRAKT: Kretanje vode kako u prirodi tako i u hidrotehničkim objektima zavisi od mnogo fizičkih veličina. U ovom radu pokušaćemo se da se da kritika rezultata dobijenih pri ispitivanju na fizičkim modelima. Eksperimentatori pokušavaju da ispitivanjem kretanja vode kroz fizičke modele uopšte rezultate i na osnovu zakona sličnosti dođu do rešenja u prirodi i hidrotehničkim objektima.

Ključne reči: fizički model, sličnost, eksperiment

## **Critical review of flow experiments on physical models**

ABSTRACT: Water flow in both the nature and hydraulic structures depends on numerous physical phenomena. This article tries to deliver a critical review of results obtained on flow over physical models. Experimenter goals are to generalize flow characteristics from scale models in laboratory and, according to laws of similarity, to translate them into the real world watercourses and hydraulic structures.

Keywords: physical model, similarity laws, experiment

---

<sup>1</sup> Prof.dr Božidar Batinić, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet.



### 1 Uvod

Pri rešavanju problema na fizičkim modelima, treba uraditi za svaki problem koji se rešava dimenzionalnu analizu. Svaki problem kretanja vode kroz hidrotehnički objekat ima svoje karakteristike – uslove.

Princip dimenzionalne analize sastoji se u sledećem:

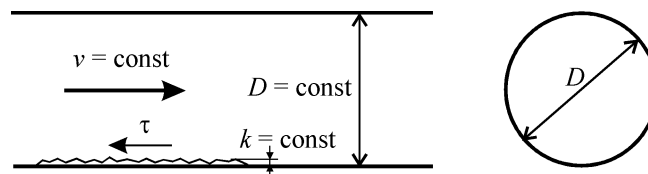
- svaki dimenzionalni sistem ima svoje konvencije,
- treba usvojiti pogodan dimenzionalni sistem,
- usvajanje dimenzionalnog sistema zavisi od umešnosti – snalažljivosti eksperimentatora, koji dovodi do lakšeg ili težeg puta rešenja,
- najbolje je izabrati one veličine koje su najpodesnije za problem koji se rešava; drugim rečima treba izabrati one veličine koje po prirodi stvari (problema) sa traženom veličinom omogućavaju dobijanje funkcionalne veze za traženu fizičku veličinu,
- osnovne veličine moraju biti tako izabrane da se mogu porediti, tj. izmeriti svi uticaji na koje se u određenoj problematici nailazi.

Ovaj princip dimenzionalne analize prikazaće se na problemu određivanja sile trenja.

### 2 Rešavanje problema - ispitivanje kretanja vode kroz cevi

Problem kretanja vode kroz cevi zavisi od sile trenja. Da bi pristupili rešavanju problema kretanja vode kroz cevi moramo jasno definisati konturne uslove tečenja vode kroz cevi:

- cev je dovoljno dugačka da se izgubi uticaj strujanja na ulazu,
- cev je strogo kružnog oblika, sa  $D = \text{const}$ . celom dužinom,
- strujanje u cevi je stacionarno, tj.  $dv/dt = 0$ .
- rapavost po obimu i dužini cevi treba da bude nepromenljiva.



Slika 1. Prikaz uslova tečenja u eksperimentu.

Figure 1. Experimental flow conditions.

Na osnovu principa dimenzionalne analize biramo osnovne veličine od kojih zavisi sila trenja:

- $D$  – karakteristična dužina je prečnik cevi,
- $v$  – srednja brzina vode u cevi,
- $\rho$  – gustina fluida – vode.

Ostale veličine od kojih zavisi sila trenja:

- $\tau$  – tangencijalni napon,
- $\mu$  – dinamički koeficijent viskoznosti,
- $k$  – apsolutna rapavost zidova cevi kao posledica konturnih uslova.

Ostale veličine samo bi opterećivale ispitivanje.

$$\tau = \tau(D, v, \rho, \mu, k)$$

Na osnovu ovoga možemo pisati dimenzionalnu zavisnost za  $\tau$  tangencijalni napon pošto je sila trenja  $T = A \tau$ , gde je  $A$  površina omotača cevi.

Primenom dimenzionalne analize dobijamo bezdimenzionalnu zavisnost za merni broj  $N_\tau$  tangencionalnog napona:

$$N_{\tau} = N_{\tau} \left( Re, \frac{k}{D} \right)$$

gde su:

$Re = \rho v D / \mu$  – Rejnoldsov broj, mera viskoznosti,

$k/D$  – relativna rapavost – bezdimenzionalni izraz rapavosti omotača cevi, mera geometrije.

Na ovaj način smo dobili povoljniju zavisnost, umesto zavisnosti pet fizičkih veličina, imamo zavisnost od dve bezdimenzionalne veličine.

### 3 Eksperimentalno ispitivanje

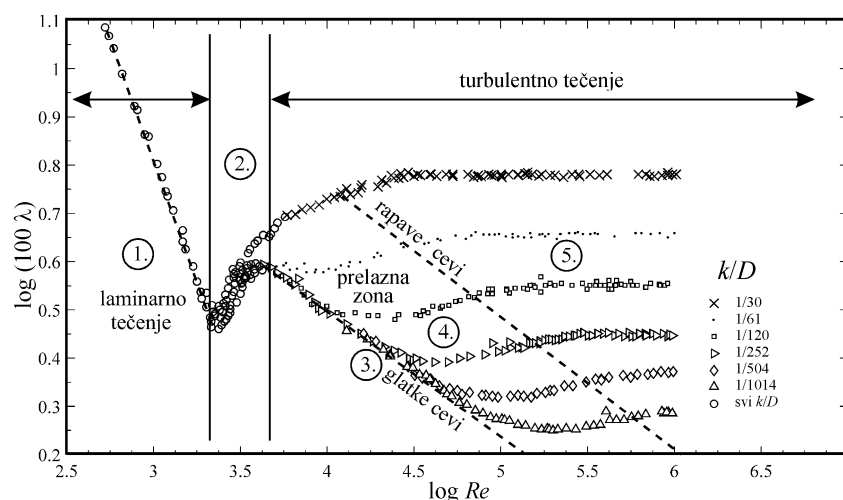
Ovaj postupak koji je kao rezultat dao zavisnost za bezdimenzionalnu vezu treba na fizičkom modelu i ispitati.

Sve navedene uslove relativno lako možemo ispuniti sem uslova za apsolutnu rapavost  $k$ . Tridesetih godina prošlog veka Nikuradze je došao na ideju da orapavi cev sa zrcima peska koja imaju isti prečnik. Na taj način imamo peščanu rapavost za koju su dobijani rezultati prikazani na slici 2 koja sledi. Na dijagramu su prikazani rezultati sprovedenih ispitivanja.

Na prvi pogled se uočava koliki je problem određivanja sile trenja i sa znatnim uprošćenjima. Uočeno je da ima pet (5) zona zavisnosti:

1. laminarno tečenje sa linearnim zakonom otpora  $\lambda = 64 / Re$ ,
2. prelazni režim iz laminarnog u turbulentno tečenje gde nema zavisnosti,
3. zavisnost za glatku cev  $\lambda^{-1/2} = 2 \log (Re \lambda^{1/2} / 2.51)$ , složena zavisnost,
4. prelazna zona između glatkih i rapavih cevi – nema jednačine već se mora sa dijagrama očitavati vrednost za  $\lambda$ ,
5. rapave cevi, kvadratni zakon otpora  $\lambda^{-1/2} = 2 \log(3.71 k/D)$ .

Prema tome se može zaključiti da ovo ispitivanje sa peščanom rapavošću moramo dodatno istražiti na fizičkom modelu za svaku proizvedenu cev. Odnosno istarirati proizvedene cevi od različitih materijala i utvrditi odgovarajuću „proizvodnu” rapavost koja odgovara peščanoj rapavosti. Zato proizvođači cevi u svom prospektu na osnovu merenja – tariranja cevi daju vrednosti za  $\lambda$ . Za cevi izlivenne na licu mesta treba probnim merenjima gubitaka visine pritiska na trenje (u Bernulijevom smislu) odrediti  $\lambda$ .



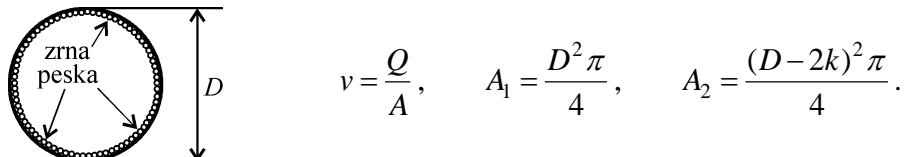
Slika 2. Nikuradzeov eksperiment otpora tečenju u cevima sa uniformnom peščanom rapavošću.

Figure 2. Nikuradze's experiments with fluid friction in roughened pipes.

## 4 Kritički osvrt na dobijene rezultate

### 4.1 Pitanje srednje profilske brzine tečenja u cevi

Jedno od osnovnih pitanja je da li je ispravno uzeti prečnik cevi  $D$  za dobijanje srednje profilske brzine kretanja vode u cevi, ukoliko je uvedena i apsolutna rapavost  $k$ ; postoji razlika u pretpostavljenoj proticajnom profilu ( $A_1$  protiv  $A_2$ ).



Slika 3. Koji prečnik cevi usvojiti za proračun srednje profilske brzine  $v$ ?

Figure 3. Which pipe diameter is relevant for mean flow velocity  $v$  calculation?

### 4.2 Pitanje potrebne dužine cevi

Postavlja se pitanje koja je dužina cevi u eksperimentu dovoljna da se eliminišu uticaji ulaza toka vode u cev; dakle koja je to dužina mereno od ulaska vode u cev posle koje se smatra da je po poprečnom preseku cevi formiran razvijeni profil brzina. Savetujemo da se ova dužina utvrdi na modelu.

### 4.3 Pitanje geometrijskog kvaliteta izrade cevi

Postavlja se i pitanje da li je moguće da se proizvede cev kod koje je konstantna vrednost prečnika  $D = \text{const.}$ , tj. da je  $\delta D / \delta L = 0$ , i da je garantovan pravilan kružni oblik. Napominje se da su u Hidrauličkoj laboratoriji na Građevinskom fakultetu u Beogradu ispitivane azbest-cementne cevi i da je konstatovano da ovi uslovi nisu ispunjeni.

### 4.4 Pitanje spojeva cevi

Cevi se proizvode u odgovarajućim dužinama prilagođeno prečniku, materijalu i transportnim sredstvima. Postavlja se pitanje da li spojevi i nastavci prilikom formiranja cevovoda utiču na karakteristike tečenja; na ovo pitanje se takođe dobija pozitivan odgovor – da, utiču.

### 4.5 Pitanje starosti cevi

Starost cevovoda takođe utiče na rapavost. Višestruki su uticaji i njihove posledice:

- erozija zidova usled abrazivnih čestica koje se nalaze u vodi – povećanje prečnika,
- taloženje materijala po zidovima cevi gde talog smanjuje prečnik cevi i menja rapavost.

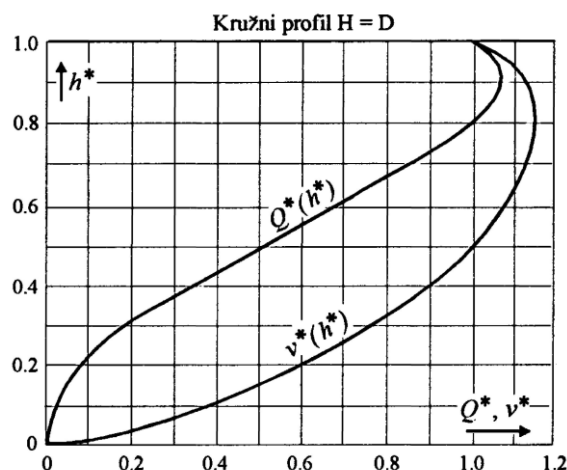
### 4.6 Pitanje računanja proticaja u delimično ispunjenoj cevi

Projektanti pri projektovanju cevovoda u kojima voda teče sa slobodnom površinom često ne vode računa o uticaju trenja vode o zidove i otpora vazduha na kontakstu sa slobodnom površinom vode. To se manifestuje time što se za ispunjenost cevi recimo 0.8 dobija isti proticaj kao za ispunjenu cev, a za ispunjenost 0.9 dobija se proticaj veći nego za punu cev (što se ne događa u stvarnosti). Proračuni bezdimenzionalnog proticaja  $Q^* = Q(h)/Q(H)$ , gde je  $Q(h)$  proticaj pri dubini vode u cevi  $h$ , a  $Q(H)$  je proticaj pri potpuno ispunjenoj cevi ( $H=D$ ) prikazani su na slikama 4 i 5. Bezdimenzionalna veličina ispunjenost cevi  $h^*$  je količnik trenutne dubine  $h$  i prečnika cevovoda  $D$ , tj.  $h^* = h/D$ .

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

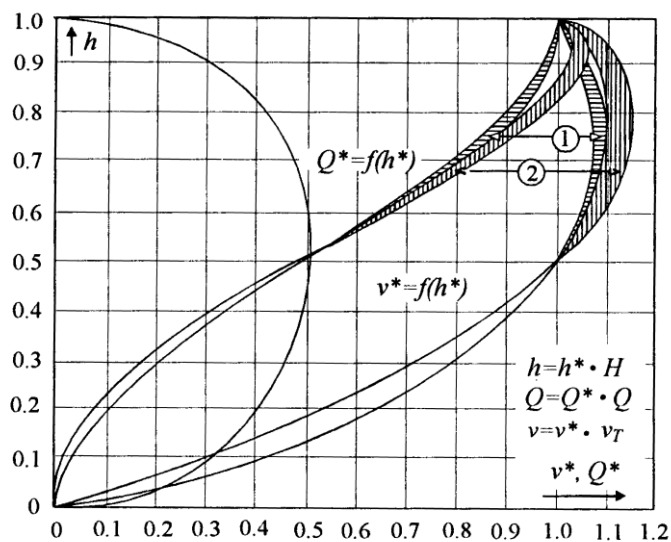
Na slici 4 prikazana je pogrešna zavisnost za proticaje i brzine koja je dobijena zanemarivanjem otpora vazduha na kontaktu sa slobodnom površinom vode i ne vodeći računa o promeni trenja sa promenom dubine vode [1].

Na slici 5, linije označene sa 1 prikazuju zavisnosti koje se dobijaju ispitivanjem na modelu vodeći računa i o uticaju otpora vazduha i promene trenja vode sa zidovima cevovoda, sa promenom ispunjenosti cevovoda [1]. Linije označene sa 1 bi trebalo da koriste projektanti u praksi, a ne one označene sa 2, kako je to, na žalost, uobičajeno.



Slika 4. Bezdimenzionalne zavisnosti proticaja  $Q^*$  i brzine  $v^*$  u funkciji ispunjenosti cevi  $h^*$ . Dijagram nastao ne vodeći računa o otporu vazduha i promeni trenja sa promenom dubine [1].

Figure 4. Relations of relative flow rate  $Q^*$  and mean velocity  $v^*$  vs. relative depth of flow  $h^*$  in closed circular conduits under neglect of air drag at fluid surface and fluid to wall friction vs. flow depth [1].



Slika 5. Uticaj otpora vazduha na smanjenje brzine i proticaja [1]; 1 – ima uticaja i otpora vazduha i promene trenja; 2 – nema ni uticaja otpora vazduha ni promene trenja (kao slika 4).

Figure 5. Air drag influence on reduction in flow rate and fluid mean velocity [1]; lines 1 – with air drag and fluid to wall friction changes; lines 2 – without influences under 1 (as in Fig. 4).

## 5 Zaključak

Iz prikazanog se vidi da je nemoguće sa sigurnošću utvrditi ispravnost dobijenih rezultata na fizičkom modelu. Ostali problemi koji se ispituju mogu biti složeniji ili lakši i istraživač mora voditi računa ne samo o greškama pri merenju već i o usvojenim pretpostavkama.

U slučaju cevi, treba propisima odrediti/zadužiti proizvođače cevi da na hidrauličkoj instalaciji odrede rapavost cevi i prikazu je u prospektima. Kao što postoji propis da na određenu zapreminu ugrađenog betona treba uzeti ispitne kocke i u ovlašćenoj laboratoriji utvrditi karakteristike betona, tako ispitivanja rapavosti cevi treba obaviti u nezavisnim i ovlašćenim (akreditovanim) laboratorijama.

## Zahvalnica

Zahvaljujem se mlađem kolegi doc. dr Dragutin Pavloviću (Građevinski fakultet Beograd) koji je tehnički pripremio ovaj tekst i slike u njemu.

## Literatura

1. Božidar Batinić (1994) *Hidraulika*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

## Утицај комплексности модела на хидролошке симулације

Андријана Тодоровић<sup>1</sup>, Јасна Плавшић<sup>2</sup>

**АПСТРАКТ:** Многи проблеми у хидролошком моделирању, као што је нпр. лошија ефикасност модела током изразито сушних периода, приписују се упрошћеном приказу процеса формирања отицаја у моделу. Стога се генерално очекује да модели са сложенијом структуром дају поузданије резултате симулација у свим хидролошким условима. Међутим, комплексни модели се ретко примењују у пракси, пре свега због захтевних рачунарских ресурса и улазних података који често нису доступни. Сложени модели имају много параметара које је потребно оценити, што захтева квалитетна осматрања у смислу: (1) великог броја осматраних хидролошких величина (нпр. проток, нивои подземних вода, садржај влаге у земљишту, итд.) и (2) fine временске и просторне резолуције података. У овом раду је анализиран утицај комплексности хидролошких модела тако што је систематски вариран број слободних параметара модела 3DNet-Catch, и на тај начин је добијено осам верзија модела различите сложености. Свака верзија је тестирана са аспекта ефикасности модела и неизвесности параметара. Циљ анализе је процена оптималне комплексности (т.ј. броја слободних параметара) модела за примену на сливовима са малим бројем метеоролошких станица. Анализа је урађена за слив реке Млаве до водомерне станице Велико Село. Најсложеније верзије модела лошије репродукују динамику отицаја и имају веће смањење ефикасности у тест периоду од једноставнијих верзија. Са друге стране, најједноставније верзије лошије репродукују запремину отицаја, па су верзије умерене сложености идентификоване као најбоље. Ови резултати указују да је пре примене модела потребно искључити из модела редундантне параметре према резултатима анализе параметарске осетљивости (овде су то параметри модула за снег и прорачун базног отицаја). На овај начин добија се боља и конзистентнија ефикасност хидролошких модела.

Кључне речи: вредновање модела, ефикасност модела, комплексност модела, хидролошки модели

## Impact of model structural complexity on hydrologic simulations

**ABSTRACT:** Problems in hydrological modelling, such as poor performance over prolonged dry periods, can be attributed to hydrologic model structures that represent over-simplified representation of runoff generation processes. Hence, complex models are generally expected to outperform the parsimonious ones. However, complex models are seldom applied in practice due to data and computational requirements. Additionally, these models imply estimation of numerous parameters, which requires (1) observations of many hydrologic variables, such as flows, groundwater levels or soil moisture, and (2) high spatial and temporal resolution of observed data. Analyses in this paper are conducted by using eight versions of the 3DNet-Catch model, obtained by systematically reducing the number of free parameters. Efficiency and parameter identifiability of each model version are evaluated, aiming at assessment of the optimal number of free model parameters for applications in data sparse catchments. The analysis is conducted for the Mlava catchment at the Veliko Selo stream gauge. The complex versions are outperformed by the parsimonious ones in terms of runoff dynamics, while it the opposite stands for runoff volume simulations. Parsimonious model versions result in smaller decrease in performance over the evaluation period than the complex ones. Hence, the versions of moderate complexity are identified as the most robust ones. Finally, the results suggest that prior to a model application, a SA should be conducted and redundant parameters should be excluded from calibration to obtain improved and more consistent model performance.

Keywords: hydrologic models, model complexity, model evaluation, model performance

<sup>1</sup> Доц. др Андријана Тодоровић, Грађевински факултет Универзитета у Београду, [atorovic@grf.bg.ac.rs](mailto:atorovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> В. проф. др Јасна Плавшић, Грађевински факултет Универзитета у Београду, [jplavsic@grf.bg.ac.rs](mailto:jplavsic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Увод

За симулацију отицаја са слива на располагању су бројни хидролошки модели (модели падавине-отицај). Ови модели се разликују пре свега по сложености структуре и начину на који третирају просторне неравномерности метеоролошког улаза и карактеристика слива. Према другом критеријуму, модели могу бити просторно хомогени (енгл. *lumped*), семи-дистрибуирани и дистрибуирани, односно просторно расподељени (енгл. *fully distributed*). Просторно хомогени модели не препознају просторну неравномерност: цео слив је приказан са својим упросеченим карактеристикама, а самим тим и једнственим скупом параметара: нпр. цео слив је представљен једним *CN* бројем, који је добијен пондерисањем *CN* бројева за све намене земљишта и типове тла на сливу. У случају семи-дистрибуираних модела, слив је представљен низом подсливова и међусливова, којима се, у општем случају, додељују различити метеоролошки улази и скупови параметара. Најсложенији су просторно расподељени модели, где је сливна површина дискретизована и представљена низом рачунских ћелија, које могу бити правилног (нпр. растерске мреже) или неправилног облика (нпр. ћелије добијене на основу ТИН модела терена).

Према сложености структуре, хидролошки модели се класификују као физички-засновани или модели „беле кутије“ (енгл. *physically based*), концептуални или модели „сиве кутије“ (енгл. *conceptual, bucket-type models*) и модели „црне кутије“ (енгл. *data-driven, black-box models*) (Pechlivanidis et al., 2011). Модели „црне кутије“ не разматрају физичке процесе генерисања отицаја, већ теже да пресликају улазни вектор (нпр. падавине) у излазни (нпр. проток). Типичн представник ове групе модела су неуронске мреже. Физички засновани модели се базирају на једначинама одржања. Како је за нумеричко решавање парцијалних диференцијалних једначина одржања потребно дискретизовати слив, ови модели су по правилу просторно расподељени. Модели ове групе се и данас релативно ретко примењују у пракси, с обзиром да су веома захтевни у смислу улазних података и рачунарских ресурса. У случају концептуалних хидролошких модела (модели „сиве кутије“), компоненте циклуса отицаја се представљају резервоарима (нпр. резервоари вегетације, снега, земљишта) за које важи једначина одржања масе, док се трансфери воде између појединих резервоара симулирају поједностављеним динамичким једначинама (нпр. једначина линеарног резервоара). Концептуални модели су најзаступљенији у пракси. Постоји много модела у оквиру ове групе: HBV (Lindstrom et al., 1997), HYMOD (Ebtahaj et al., 2010), HYPE (Lindström et al., 2010), PREVAH (Viviroli et al., 2009), Sacramento (Gan and Burges, 1990), TOPKAPI (Ragetti and Pellicciotti, 2012), VIC (Liang et al., 1994), и др. Сложеност модела у оквиру ове групе знатно варира од веома једноставних са свега неколико параметара, као што су нпр. *abcd* (Thomas, 1981) или GR4J модел (Perrin et al., 2003), до веома сложених са мноштвом резервоара (нпр. HYPE, PREVAH, VIC).

У општем случају се очекује да сложенији модели боље репродукују осматрања (пре свега осмотрене хидрограме). Међутим, многе студије су представиле другачије резултате. На пример, Orth et al. (2015) су анализирали ефикасност три модела различите сложености за симулације отицаја на осам сливова у Швајцарској. Најједноставнији модел је најбоље репродуковао хидрограме током сушних периода, и имао је исту ефикасност у симулацијама садржаја земљишне влаге као и два сложенија модела. Иако су сложенији модели знатно боље репродуковали хидрограме поплавних таласа, најједноставнији модел је имао најконзистентнију ефикасност, односно најмање погоршање ефикасности у тест периоду. Onyutha (2016) је тестирао неколико модела различите сложености, при чему је у анализу укључена и ефикасност у симулацији екстремно великих и малих протока. Најбољу ефикасност у симулацији екстремних протока имао је најједноставнији модел. Perrin et al. (2001) су анализирали ефикасност 19 модела различите сложености на 429 сливова. Њихови резултати су показали да сложени модели боље репродукују осмотрене хидрограме у калибрационом периоду, док се у тест периоду ова предност у односу на једноставне моделе губи. Стога су препоручили да се предност да једноставнијим моделима, код којих проблем велике

флексбилности и превеликог прилагођавања осматрањима (енгл. *overfitting*) није толико изражен. Andreassian et al. (2001) су показали да су модели са једноставнијом структуром мање осетљиви на неизвесности у просторној оцени падавина. До сличног закључка су дошли и Tarasova et al. (2016), који су препоручили да се сложени модели не користе за симулацију отицаја са сливова на којима има мало метеоролошких станица. Резултати које су приказали Finger et al. (2015) показују да усложњавање структуре модела нема смисла уколико се упоредо са усложњавањем у калибрацију модела не укључују и додатне осмотрене променљиве, које би омогућиле идентификацију додатних параметара (нпр. сателитска осматрања снежног покривача).

Циљ овог рада је анализа утицаја сложености хидролошких модела за симулације отицаја са сливова у Србији, које карактерише мали број метеоролошких станица. Сложеност модела је представљена бројем слободних параметара, при чему је коришћена иста структура модела. Различите верзије модела 3DNet-Catch су добијене тако што су параметрима најсложеније верзије, за које анализа осетљивости показала да нису најутицајнији, додељиване вредности, чиме су они искључивани из калибрације модела. На овај начин је добијено осам верзија модела, где најсложенија има 25, а најједноставнија 5 слободних параметара. У раду су анализирани ефикасност и идентификабилност параметара свих разматраних верзија модела. Анализе су урађене за слив реке Млаве до хидролошке станице Велико Село.

У наредном поглављу су описани слив и хидролошки модел, као и поступак калибрације модела и анализа сложености модела. У поглављу 3 су приказани резултати, док су закључци дати у поглављу 4.

## 2 Методологија

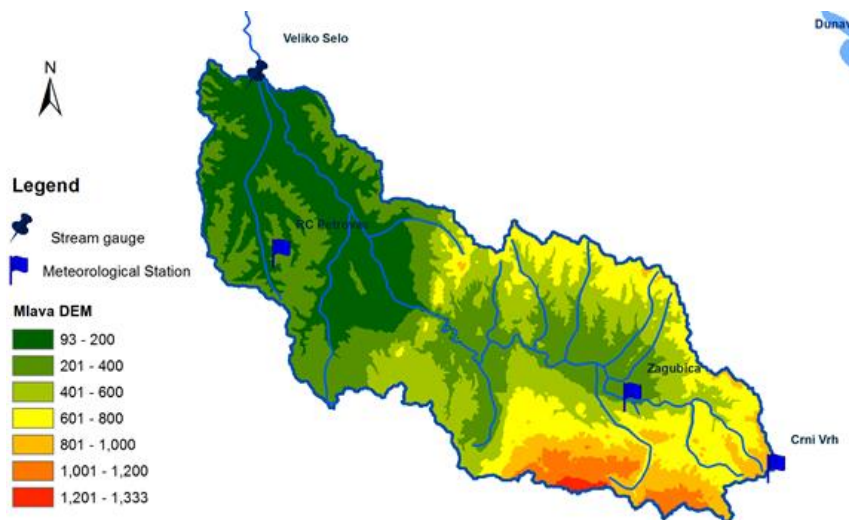
### 2.1 Слив реке Млаве

Река Млава је десна притока Дунава. Њен слив захвата површину од 1277 km<sup>2</sup> са распонем надморске висине од 93 до 1333 m n.m. Површина слива је углавном покривена листопадним шумама и пољопривредним земљиштем, док је мали део слива (~2,5%) урбанизован. На узводном делу слива доминирају подзоли, док су низводно највише заступљена браон шумска земљишта. Такође, на узводном делу слива су заступљени кречњаци, карбонатне стене и, у знатно мањој мери, језерски седиментни, који доминирају у низводном делу слива (Todorović, 2015).

За моделирање отицаја на овом сливу коришћена су дневни подаци о падавинама и температурама осмотреним на станицама Црни Врх, Жагубица и РЦ Петровац, као и дневни протоци са хидролошке станице Велико Село (Табела 1), чија сливна површина износи 1255 km<sup>2</sup>.

Хидролошки режим на слив одликује изразита сезоналност, где се велике воде јављају у рано пролеће као последица комбинације киша и топљења снега, док се најмањи протоци јављају у периоду од септембра до новембра. Поплавни таласи се могу јавити и током лета као последица интензивних пљускова. Нису детектовани значајни трендови у протоцима и падавинама, док постоји статистички значајан растући тренд у максималним и просечним годишњим температурама на сливу. На сливу не постоје акумулације које би утицале на низ осмотрених протока.





Слика 1. Слив реке Млаве до водомерне станице Велико Село (преузето из Тодоровић и Плавшић, 2015).

Figure 1. The Mlava catchment upstream of the Veliko Selo stream gauge (from Todorović and Plavšić, 2015).

Табела 1. Метеоролошке и водомерна станица на сливу реке Млаве и просечне вредности осматраних величина.

Table 1. Meteorological stations and the stream gauge in the Mlava catchment and the mean observed values.

Станица	Осматрене величине	Надморска висина (m n.m.)	Географска ширина	Географска дужина	Расположиви подаци	Просек у периоду осматрања
РЦ Петровац	$P$	282	44 ° 20'	21 ° 20'	1972-2013	689.5 mm
	$T$					11.5 °C
Жагубица	$P$	314	44 ° 12'	21 ° 47'	1972-2013	627.7 mm
	$T$					10 °C
Црни Врх	$P$	1027	44 ° 08'	21 ° 58'	1981-2013	759 mm
	$T$					6.8 °C
Велико Село	$Q$	92.55	44 ° 30'	21 ° 18'	1987-2013	7.5 m <sup>3</sup> /s (185.3 mm/god)

\*  $P$  – годишња висина падавина,  $T$  – просечна годишња температура,  $Q$  – просечни годишњи проток.

\*\* Кота нуле водомерне летве.

## 2.2 Хидролошки модел 3DNet-Catch

Хидролошки модел 3DNet-Catch је развијен на Грађевинском факултету у Београду. Модел је намењен пре свега континуалним хидролошким симулацијама отицаја са сливова умереног климата. Хидролошке симулације обухватају прорачун запремине отицаја, трансформацију отицаја на сливу и у деоницама речне мреже. У овом раду је дат кратак приказ модела, док се за детаљан опис структуре модела и резултате његове свеобухватне евалуације читалац упућује на литературу (Todorović et al., 2019).

Запремина отицаја подразумева симулацију (1) задржавања падавина на вегетацији (интерцепција), (2) формирања и топљења снежног покривача, и (3) земљишне влаге. Вегетација је у моделу представљена резервоаром чији капацитет може да варира сразмерно вредности индекса листа (енгл. *Leaf Area Index*, LAI). Све падавине при температурама мањим од  $T_{R-S}$  представљају снег, с обзиром да модел не препознаје комбинацију снега и кише. Топљење снега се симулира методом степен-дан, при чему се узима у обзир просторна

неравномерност снежног покривача и варијација коефицијента топљења снега током године (функција  $b_{melt}$ ). Моделирање земљишне влаге је засновано на једначини одржања масе, једначини нелинеарног резервоара и једначини Брукса и Корија (Brooks and Corey, 1964) за процену коефицијента филтрације за незасићено тло. У моделу је претпостављено да се вода у тлу креће само у вертикалном правцу (инфилтрација, перколација и евапотранспирација), док је латерално течење воде посредно симулирано трансформацијом отицаја до излаза са слива. Модел обухвата само симулације садржаја влаге у незасићеној зони (до непропусних стенских маса), коју је могуће представити у виду неколико слојева различитих карактеристика (дебљина, порозност, итд.). Обавезна су два слоја земљишта: површински, који се карактерише малом дебљином и великом порозношћу и коефицијентом филтрације, и потповршински који је знатно деље и има мању порозност и пропусност. Површински отицај се формира преваходно у површинском слоју земљишта, али површински отицај може да чини и вишак воде из потповршинских слојева (у случају њиховог засићења). Вода испарава са лишћа вегетације, снежног покривача (сублимација) и површинског слоја земљишта, док се транспирација одвија у дубљим слојевима тла. Запремина отицаја се у општем случају симулира у рачунским ћелијама неправилних облика које су добијене на основу TIN дигиталног модела терена (слично као у моделу tRIBS, Ivanov et al., 2004), које се могу укрупнити до нивоа подслива и целог слива. Такође, запремина отицаја се може симулирати и у рачунским ћелијама које су добијене на други начин (нпр. висинске зоне).

Отицај се трансформише до излазног профила слива применом једначине линеарног резервоара за површински отицај и нелинеарног резервоара са прагом за базни отицај. Пропагација таласа у речној мрежи је такође заснована на једначини линеарног резервоара, при чему је могуће у структуру модела укључити и хидротехничке објекте (акумулације, деривације, и др.). Модел 3DNet-Catch детаљно су описали Станић и сар. (2018) и Тодоровић и сар. (2019).

У овом раду коришћена је верзија модела са једним површинским и једним потповршинским слојем земљишта који се међусобно разлику према дебљини и коефицијенту филтрације. Рачунске ћелије представљају висинске зоне распона 100 m (према препорукама Seibert and Vis, 2012). Отицај са висинских зона се пропагира директно до водомерне станице Велико Село, без моделирања пропагације таласа дуж деоница речне мреже. Параметри модела су приказани у табели 2.

## 2.3 Калибрација модела

Модел 3DNet-Catch је калибрисан и тестиран на два десетогодишња периода: 1993-2003 и 2003-2013. Симулације су вршене са дневним кораком и током хидролошких година, при чему свакој симулацији претходни једна година за загревање модела.

За одређивање вредности параметара модела примењена је метода GLUE (Beven and Binly, 1992). Ова метода подразумева да се од великог броја случајно генерисаних скупова параметара одаберу најбољи скупови према неком критеријуму, при чему се могу бирати сви скупови чија је ефикасност боља од неке унапред дефинисане вредности или се може одабрати унапред дефинисан број најбољих скупова. У овом раду је најпре генерисано 20.000 скупова параметара применом шеме LHS (*Latin Hypercube Sampling*), при чему су параметри узорковани из почетних униформних расподела. За сваки скуп спроведене су симулације и одређена је вредност Клинг-Гупта показатеља ефикасности (KGE) (Gupta et al., 2009). Из 20.000 генерисаних скупова параметара, издвојено је 100 скупова са највећом вредношћу KGE.

## 2.4 Анализа комплексности структуре модела

У овом раду сложеност структуре модела је представљена бројем слободних параметара који се оптимизује. Примена различитих метода за симулацију појединих компоненти циклуса отицаја (нпр. различити модели топљења снега) није предмет овог рада.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Како би се анализирао утицај сложености структуре, формирано је неколико верзија модела 3DNet-Catch које се разликују према броју слободних параметара. Почевши од најсложеније верзије модела, која има 25 параметара (ознака M25, Табела 2), поједине верзије модела су добијене тако што су неким параметрима додељиване фиксне вредности, чиме су они искључивани из калибрације. Број слободних параметара је постепено смањиван, чиме је омогућена процена утицаја сложености модела. Избор параметара који ће бити искључени из калибрације је заснован на претходним анализама параметарске осетљивости симулираних протока и показатеља динамике отицаја (Todorović et al., 2019). Такође, избор параметара је вођен и врстом модула коме одређени параметри припадају, тако да се приликом упрощавања модела фиксирају вредности појединих параметара једног модула.

Различите верзије модела означене су бројем слободних параметара. Параметри којима су додељиване фиксне вредности означене су тамним пољима у табели 2, а те вредности су дате у последњој колони табеле. Ове вредности су процењене на основу препорука из литературе и претходног искуства са моделом.

Варијација коефицијента топљења снега у времену примењена је само у најсложенијој верзији модела (M25), док је у свим осталим верзијама претпостављена константна вредност овог коефицијента. У свим верзијама модела оптимизује се пет најутицајнијих параметара: ефективна порозност, дебљина и коефицијент филтрације потповршинског слоја земљишта, коефицијент линеарног резервоара за трансформацију површинског отицаја и градијент пораста падавина са надморском висином.

Поређење различитих верзија модела обухвата анализу ефикасности модела, и параметарске неизвесности.

Ефикасност модела је квантификована преко неколико стандардно коришћених показатеља у хидролошком моделирању (Табела 3). Ови показатељи су бирани тако да укажу на ефикасност модела у репродуковању запремине (*bias*, VE) и динамике отицаја (KGE, NSE, RMSE), као и у домену великих (RMSE<sub>HF</sub>) и малих вода (NSE срачунат на основу логаритмованих низова протока – NSE<sub>logQ</sub>, RMSE<sub>LF</sub>). Додатно, анализиран је и показатељ AIC (енгл. *Akaike Information Criterion*), који пенализује моделе са великим бројем параметара. Показатељ AIC је рачунат уз претпоставку да резидуали модела прате нормалну расподелу (Diks and Vrugt, 2010).

Ефикасност ансамбла је квантификована преко показатеља *p*-factor и *r*-factor, где први представља проценат осмотрених протока унутар интервала од 95% симулираних протока, а други релативну ширину интервала од 95% симулираних протока у односу на стандардну девијацију осмотреног низа  $\sigma_{Q_{OBS}}$  :

$$r\text{-factor} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{SIM,97.5\%} - Q_{SIM,2.5\%})}{\sigma_{Q_{OBS}}} \quad (1)$$

где  $Q_{SIM,97.5\%}$  и  $Q_{SIM,2.5\%}$  означавају перцентиле од 97,5% и 2,5% симулираних протока у *i*-том тренутку, а *n* је дужина низа протока.

Параметарска неизвесност је квантификована преко статистике IC (Wagener et al., 2003):

$$IC = 1 - \left[ \hat{\theta}_{norm, 97.5} - \hat{\theta}_{norm, 2.5} \right] \quad (2)$$

где  $\hat{\theta}_{norm, 97.5}$  и  $\hat{\theta}_{norm, 2.5}$  означавају перцентиле од 97,5% и 2,5% стандардизованих параметара.

Сваки параметар је стандардизован у односу на почетни распон, тако да има вредност између 0 и 1. Статистика IC такође има вредност између 0 и 1, при чему веће вредности IC означавају ужи распон интервала оцене параметра, а самим тим његову бољу идентификацију.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Табела 2. Параметри модела 3DNet-Catch и верзије модела различите сложености.

Table 2. The parameters of the 3DNet-Catch model and the model versions of varying complexity.

Параметар модела	Верзија модела									Вредност
	M25	M23	M19	M15	M12	M9	M7	M5		
Макс. капацитет резервоара вегетације, $CAN_{max}$ (mm)										4.5
Максимална вредност $LAI$ , $LAI_{max}$ ( $m^2 m^{-2}$ )										10
Температура раздвајања снега и кише, $T_{R-S}$ ( $^{\circ}C$ )										-1
Температура топљења снега, $T_{melt}$ ( $^{\circ}C$ )										$= T_{R-S}$
Дебљина прекривача као (водени талог) при којој је цела ћелија рачунске мреже покривена снегом, $S_{snow,100}$ (mm)										25
Фактор пондерисања за прорачун температуре снежног покривача, $\lambda$ (-)										0.4
Коефицијент топљења снега – вредност 6. јуна (највећа вредност), $b_{melt,6}$ , $b_{melt}$ ( $mm^{\circ}C^{-1} dan^{-1}$ )										1.6
Коефицијент топљења снега – вредност 21. децембра (највећа вредност, релативно у односу на $b_{melt,6}$ ), $b_{melt,12}$ (-)										$= b_{melt,6}$
Хидролошки број, $CN$ (-)										65
Почетни губитак, $I_{a,rel}$ (-)										0.1
Дебљина површинског слоја земљишта, $D_{surf}$ (mm)										40
Ефективна порозност тла, $p$ (-)										
Дарсијев коеф. филтрације површинског слоја, $K_{surf}$ ( $m s^{-1}$ )										-4.5
Влажност трајног свенућа биљака, $w_{PWP}$ (-)										0.15
Влажност пољског капацитета, $w_{FC}$ (-)										0.1
Индекс расподеле величина пора, $n$ (-)										2.5
Дебљина потповршинског слоја земљишта, $D_{subsurf}$ (mm)										
Дарсијев коеф. филтрације потповршинског слоја – релативно у односу на $K_{surf}$ , $K_{subsurf}$ (-)										
Коеф. лин. резервоара за трансформацију површинског отицаја, $K_d$ (dan)										
Коеф. лин. резервоара за брзи потповршински отицај – релативно у односу на $K_d$ , $K_{gw,fast}$ (-)										30
Максимални специфични базни отицај, $q_d$ ( $L s^{-1} ha^{-1}$ )										0.15
Коеф. нелинеарности резервоара подземних вода, $c$ (-)										10
Праг резервоара подземних вода по јединици површине $s_{max}$ ( $mm m^{-2}$ )										120
Градијент повећања падавина са надморском висином, $\alpha$ (% / 100 m)										
Градијент смањења температуре са надморском висином, $T_{lapse}$ ( $^{\circ}C / 100 m$ )										0.7

Табела 3. Показатељи ефикасности модела.

Table 3. Model performance measures.

Показатељ ефикасности	Једначина	Циљна вредност	Референца
Клинг-Гупта коеф. Ефикасности ( <i>KGE</i> )	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$ $r = \frac{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}}$ $\alpha = \frac{\hat{S}_{Q_{sim}}}{\hat{S}_{Q_{obs}}}; \beta = \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	1	Gupta et al., 2009
Неш-Сатклиф коеф. ефикасности ( <i>NSE</i> ) за протоке и логаритмоване протоке	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$	1	Nash and Sutcliffe, 1970
Волуметријска ефикасност ( <i>VE</i> )	$VE = 1 - \frac{\left  \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \right }{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}$	1	Criss and Winston, 2008
Релативна грешка у запремини отицаја ( <i>bias</i> )	$bias_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \cdot 100$	0	Moriasi et al., 2007
Корен средње квадратне грешке ( <i>RMSE</i> )	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}$	0	Crochemore et al., 2015
Корен средње квадратне грешке за велике воде ( <i>RMSE<sub>HF</sub></i> )	$RMSE_{HF} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \cdot w_{HF,i}}$ $w_{HF,i} = \left( \frac{Q_{obs,i}}{Q_{obs,max}} \right)^2$	0	Fenicia et al., 2007
Корен средње квадратне грешке за мале воде ( <i>RMSE<sub>LF</sub></i> )	$RMSE_{LF} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2 \cdot w_{LF,i}}$ $w_{LF,i} = \left( \frac{Q_{obs,max} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,max}} \right)^2$	0	Fenicia et al., 2007
<i>Akaike information criterion (AIC)</i>	$AIC = n \ln \hat{\sigma}_\varepsilon^2 + 2p$	min	Diks and Vrugt, 2010

\*  $Q_{obs}$  – осмотрени проток,  $Q_{sim}$  – симулирани проток,  $n$  – дужина низа,  $p$  – број параметара модела,  $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$  – варијанса низа резидуала (разлика симулираних и осмотрених протока).

### 3 Резултати и дискусија

Ефикасност осам анализираних верзија модела приказана је на слици 2. Релативна грешка у запремини отицаја *bias* и запреминска ефикасност *VE* указују на то да модел добро репродукује запремину осмотреног отицаја у оба периода. Највећа грешка се уочава код најједноставнијег модела *M5* који знатно прецењује запремину осмотреног отицаја. Релативна

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

грешка осталих верзија модела варира око нуле у калибрацији, док све верзије прецењују запремину отицаја у тест периоду (највише верзија M5). Иако је ефикасност модела нешто лошија у тест периоду, разлике нису значајне: на пример, медијана  $VE$  варира између 0.93 и 0.95 у калибрацији, и између 0.94 и 0.86 у тест периоду, при чему најмање вредности  $VE$  даје M5.

Ефикасност модела у репродуковању динамике отицаја је задовољавајућа, с обзиром да већина верзија модела даје вредности  $KGE$  и  $NSE$  веће од 0.4 током оба периода (Moriassi et al., 2007). Највеће вредности показатеља  $KGE$  остварују верзије модела M19 до M7, док најсложеније и најједноставнија верзија дају нешто мање вредности  $KGE$  у оба периода. Интересантно је да су вредности  $KGE$  веће у тест периоду од оних у калибрацији, изузев M25 који има најлошију ефикасност. Вредности  $NSE$  су сличне за верзије M5 до M19, док је ефикасност две најсложеније верзије нешто лошија. Ове разлике у односу на показатељ  $KGE$  се могу објаснити структуром показатеља: док најједноставнији модел M5 има лошију ефикасност  $KGE$  од модела умерене сложености због знатних грешака у запремини отицаја, показатељ  $NSE$  није толико осетљив на ту врсту грешке. Две најсложеније верзије модела имају највеће, односно најлошије, вредности  $RMSE$ , као и највећи пад у ефикасности током тест периода.

Показатељ за велике воде  $RMSE_{HF}$  указује да најсложенија и најједноставнија верзија модела најлошије репродукују осмотрене протоке у овом домену. Најлошију ефикасност у домену малих вода имају две најсложеније верзије модела M25 и M23, а M25 даје и највећи пораст  $RMSE_{HF}$  у тест периоду. Резултати  $NSE_{logQ}$  приказани на слици 2 указују да постоји велика варијација у ефикасности између појединих чланова ансамбла, посебно код верзија модела M23 до M15. Највеће вредности овог показатеља има верзија M5, док сложеније верзије M25 до M15 имају нешто лошију ефикасност у домену малих вода (нпр. неки чланови ансамбла M25 до M15 имају негативне вредности  $NSE_{logQ}$  у оба периода). Показатељ за мале воде  $RMSE_{LF}$  такође указује да најсложенија верзија модела најлошије репродукује мале воде, с тим да су разлике у ефикасности различитих верзија модела знатно израженије него код  $NSE_{logQ}$ . Оба показатеља ефикасности у домену малих вода указују на боља слагања у тест периоду, што се може објаснити већим протоцима у овом периоду, који се генерално боље репродукују (Todorović et al., 2019).

На слици 2 су приказане и вредности показатеља  $AIC$ , који пенализује велики број параметара модела (видети табелу 3). С обзиром на велику тежину коју  $AIC$  даје броју слободних параметара, у овом примеру се показало да овај показатељ не омогућава реално поређење ефикасности појединих модела.

У овом раду анализирани су и показатељи ефикасности целог ансамбла, који се састоје од 100 одабраних скупова параметара ( $p$ -factor и  $r$ -factor). Ови показатељи показују да проценат осмотрених протока који су обухваћени интервалом од 95% симулираних протока генерално расте са усложњавањем модела, али и ширина интервала. Међутим, однос ових показатеља ( $p$ -factor/ $r$ -factor) указује да су најсложенији и најједноставнији модели инфериорни у односу на моделе умерене сложености, код којих је овај однос већи од 1 (уз изузетак верзије M12 у калибрацији).

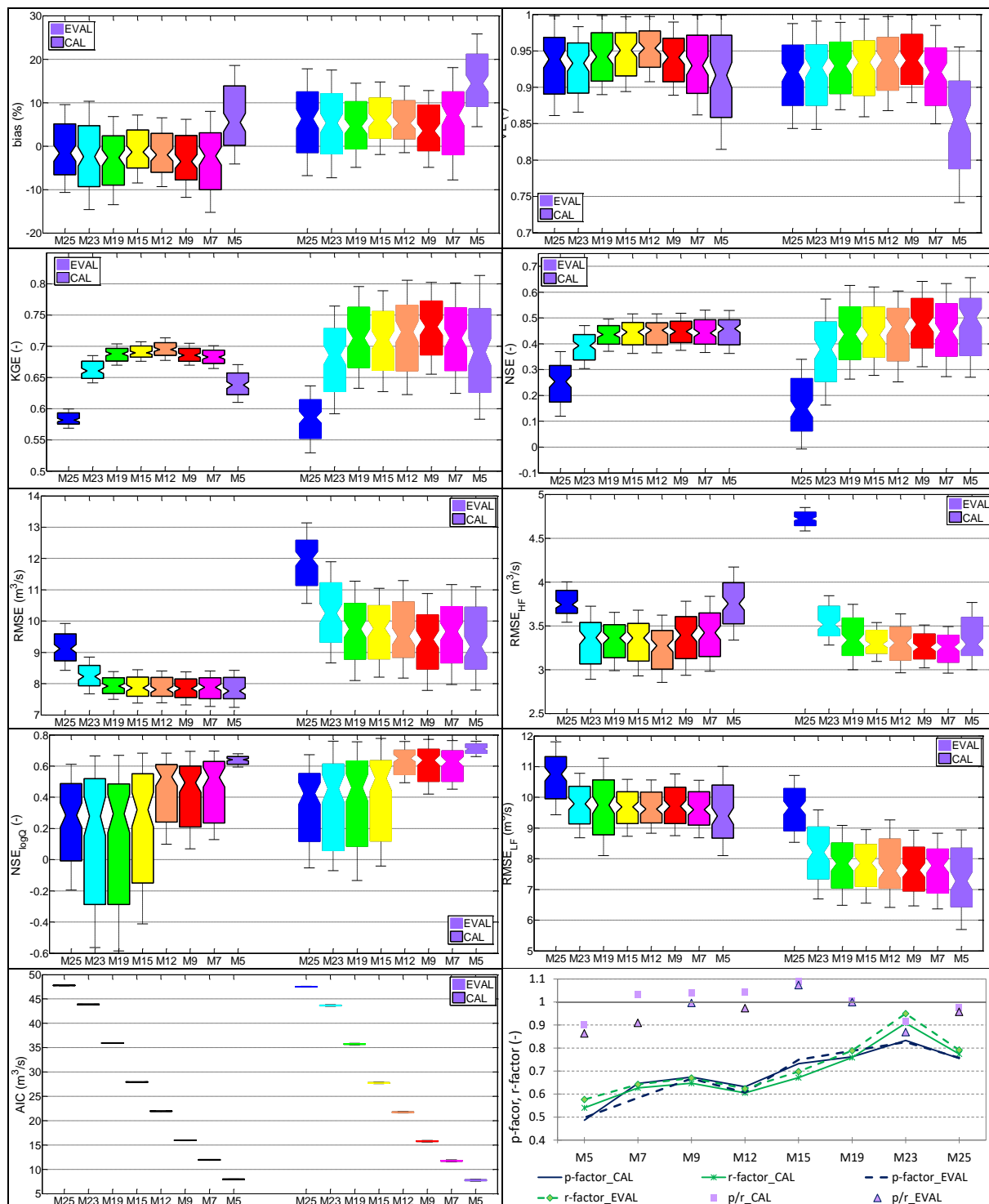
Свеобухватна анализа свих разматраних показатеља указује на то да модели „умерене“ сложености (M12, M9) знатно боље репродукују осмотрене хидрограме од најсложенијих и најједноставнијих верзија модела. Ово је показано на слици 3, где су све верзије рангиране према свим показатељима ефикасности у оба периода. Додатно, највеће разлике (пад у ефикасности) у калибрацији и тест периоду уочавају се код најсложенијих и најједноставнијих структура модела (нпр.  $RMSE$  у верзији M25 је већа за 31% у тест периоду него у калибрацији), док је ефикасност верзија модела „умерене“ сложености (M15, M12) знатно конзистентнија.

Поред ефикасности различитих верзија модела, у овом раду је анализирана и параметарска неизвесност. На слици 4 су дате вредности  $IC$  статистике за пет параметара који су садржани у свим верзијама модела, као и просечне вредности  $IC$  статистике одређене на основу свих параметара модела. Веће вредности  $IC$  статистике подразумевају бољу идентификацију параметара и, самим тим, мању параметарску неизвесност. Вредности  $IC$  статистике се разликују за различите параметре: нпр. коефицијент филтрације потповршинског

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

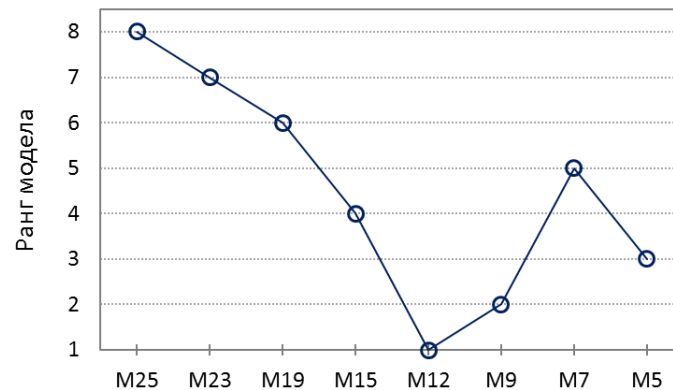
слоја земљишта i gradijent padavina se bolje identifikuju od ostalih parametara. Većina parametara se bolje identifikuje u jednostavnijim verzijama modela, sa izuzetkom efektivne poroznosti, gde se ne uočava jasan trend u *IC* vrednostima. Vrednosti *IC* statistike ostalih parametara su mañe od onih koje su prikazane na slici 4.



Слика 2. Ефикасност осам верзија модела у калибрационом и тест периоду.

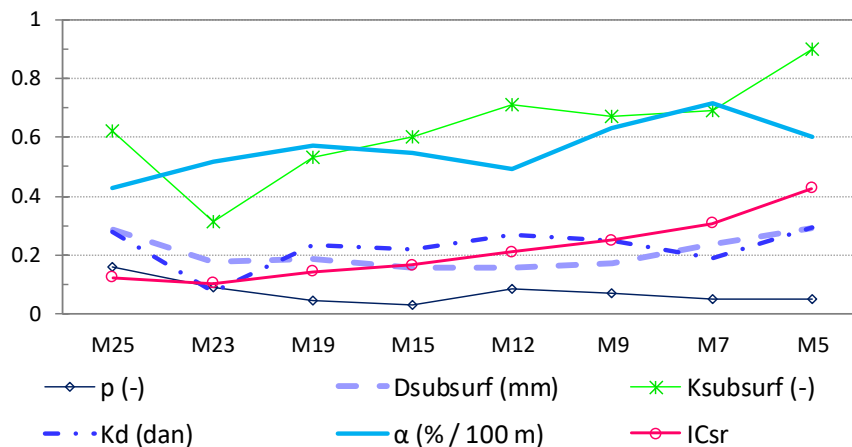
Figure 2. Efficiency measures of the eight model versions over the calibration and evaluation periods.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Слика 3. Рангирање верзија модела према њиховој ефикасности. Ниже вредности ранга означавају боље верзије модела.

Figure 3. Model ranking according to their efficiency. Lower rank indicates better model performance.



Слика 4. Вредности  $IC$  статистике за различите верзије 3DNet-Catch модела.

Figure 4. Parameter identifiability, quantified in terms of the  $IC$  statistic, in different 3DNet-Catch model versions.

## 4 Закључци

У овом раду анализиране су ефикасност, квантификована преко неколико показатеља слагања осмотрених и симулираних хидрограма, и параметарска неизвесност осам верзија модела 3DNet-Catch. Верзије модела се међусобно разликују према броју слободних параметара, при чему је претпостављено да број слободних параметара одражава сложеност модела. Једноставније верзије модела добијене су тако што су појединим параметрима најсложеније верзије M25 додељиване вредности, чиме су они искључивани из калибрације. У случају модела 3DNet-Catch и слива реке Млаве, искључивани су параметри везани за симулацију снега и базног отицаја.

Анализа ефикасности показује да верзије модела „умерене“ сложености дају боља слагања осмотрених и симулираних протока, али и конзистнтнију ефикасност (т.ј., мање разлике у ефикасности током калибрационог и тест периода). Најједноставније верзије модела лошије репродукују запремину отицаја, док најсложеније верзије лошије репродукују диманику



отицаја, посебно у домену екстремних протока. Ансамбли сложенијих верзија модела обухватају већи проценат осмотрених протока, али и имају знатно већу ширину интервала од једноставнијих верзија. Стога верзије „умерене“ сложености резултују оптималним односом процента обухваћених осматрања и ширине интервала симулација.

Резултати приказани у овом раду указују да се параметри модела, које прелиминарне анализе осетљивости не идентификују као важне, могу искључити из калибрације модела без утицаја на тачност резултата симулација. Штавише, најсложенија верзија модела је имала најлошије вредности неколико показатеља ефикасности, иако би се, у општем случају, од ове верзије очекивала највећа флексибилност, односно најбоље репродуковање осмотрених хидрограма. Међутим, управо ова флексибилност, односно прилагођавање параметара „шуму“ садржаном у низу осмотрених протока, може бити узрок оваких резултата (енгл. *model overfitting*). Велики број слободних параметара модела подразумева и њихову лошију идентификацију, што потврђују и вредности *IC* статистике, што има за последицу велику параметарску неизвесност.

Резултати анализе приказане у овом раду показују да би пре калибрације и примене хидролошких модела требало урадити анализу параметарске осетљивости, и искључити „неутицајне“ параметре из модела. Утицај неизвесности у вредностима које се додељују параметрима у једноставнијим верзијама модела захтева даља истраживања. Даља истраживања су потребна како би се утицај сложености модела анализирао и на сликовима са квалитетнијим осматрањима, у смислу финије просторне и временске резолуције осматрања и већег броја осмотрених хидролошких величина које би се могле укључити у калибрацију. Такође, у анализу би требало укључити и друге моделе, који се разликују не само по броју слободних параметара, већ и по методама које су укључене у њихову структуру.

## Захвалница

Истраживање представљено у овом раду је подржано од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (пројекти ТР 37005 и ТР 37010). Подаци су добијени од Републичког хидрометеоролошког завода Србије.

## Литература

- Andreassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *J. Hydrol.* 250, 206–223.
- Beven, K., Binly, A., 1992. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrol. Process.* 6, 279–298.
- Brooks, R., Corey, A., 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers*, Colorado State University. Colorado State University, Fort Collins.
- Crochemore, L., Perrin, C., Andréassian, V., Ehret, U., Seibert, S.P., Grimaldi, S., Gupta, H., Paturel, J.-E., 2015. Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrol. Sci. J.* doi:10.1080/02626667.2014.903331
- Diks, C.G.H., Vrugt, J.A., 2010. Comparison of point forecast accuracy of model averaging methods in hydrologic applications. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 24, 809–820. doi:10.1007/s00477-010-0378-z
- Ebtehaj, M., Moradkhani, H., Gupta, H. V., 2010. Improving robustness of hydrologic parameter estimation by the use of moving block bootstrap resampling. *Water Resour. Res.* 46, W07515, 1–14. doi:10.1029/2009WR007981
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., Seibert, J., 2015. The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments. *Water Resour. Res.* 51, 1939–1958. doi:10.1002/2014WR015712
- Gan, T.Y., Burges, S.J., 1990. An assessment of a conceptual rainfall-runoff model's ability to represent the dynamics of small hypothetical catchments: 2. Hydrologic responses for normal and extreme rainfall. *Water Resour. Res.* 26, 1605–1619. doi:10.1029/WR026i007p01605

- 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. *J. Hydrol.* 377, 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Ivanov, V.Y., Vivoni, E.R., Bras, R.L., Entekhabi, D., 2004. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resour. Res.* 40, W11102, 1–23. doi:10.1029/2004WR003218
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 99, 14415–14428. doi:10.1029/94JD00483
- Lindstrom, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *J. Hydrol.* 201, 272–288.
- Lindström, G., Pers, C.P., Rosberg, R., Strömqvist, J., Arheimer, B., 2010. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales. *Hydrol. Res.* 41, 295–319.
- Moriiasi, 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. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 50, 885–900.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Onyutha, C., 2016. Influence of Hydrological Model Selection on Simulation of Moderate and Extreme Flow Events: A Case Study of the Blue Nile Basin. *Adv. Meteorol.* 2016, 1–28. doi:10.1155/2016/7148326
- Orth, R., Staudinger, M., Seneviratne, S.I., Seibert, J., Zappa, M., 2015. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *J. Hydrol.* 523, 147–159. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.044
- Pechlivanidis, I.G., Jackson, B.M., Mcintyre, N.R., Wheeler, H.S., 2011. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Glob. NEST J.* 13, 193–214.
- Perrin, C., Michel, C., Andre, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Perrin, C., Michel, C., Andre, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. Hydrol.* 242, 275–301.
- Raetgli, S., Pellicciotti, F., 2012. Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glaciometeorological processes to constrain model parameters. *Water Resour. Res.* 48, W03509, 1–20. doi:10.1029/2011WR010559
- Seibert, J., Vis, M.J.P., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3315–3325. doi:10.5194/hess-16-3315-2012
- Stanić, M., Todorović, A., Vasilić, Ž., Plavšić, J., 2018. Extreme flood reconstruction by using the 3DNet platform for hydrological modelling. *J. Hydroinformatics* 20, 766–783. doi:10.2166/hydro.2017.050
- Tarasova, L., Knoche, M., Dietrich, J., Merz, R., 2016. Effects of input discretization, model complexity and calibration strategy on model performance in a data-scarce glacierized catchment in Central Asia. *Water Resour. Res.* 52, 4674–4699. doi:10.1002/2015WR018551
- Thomas, H.A., 1981. Improved Methods for National Water Assessment. U.S. Geological Survey, Cambridge, MA, USA.
- Todorović, A., 2015. Impact of Calibration Period on Parameter Estimates in the Conceptual Hydrologic Models of Various Structures. Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet.
- Todorović, A., Plavšić, J., 2015. Uticaj klimatskih promena na hidrološke režime Kolubare, Toplice i Mlave, in: 17. naučno savetovanje SDHI i SDH. pp. 315–330.
- Todorović, A., Stanić, M., Vasilić, Ž., Plavšić, J., 2019. The 3DNet-Catch hydrologic model: Development and evaluation. *J. Hydrol.* 568, 26–45. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.10.040
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* 24, 1209–1222. doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001
- Wagner, T., McIntyre, N., Lees, M.J., Wheeler, H.S., Gupta, H. V., 2003. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrol. Process.* 17, 455–476. doi:10.1002/hyp.1135

## Teorijski hidrogrami velikih voda – tema i dilema

Stevan Prohaska<sup>1</sup>, Aleksandra Ilić<sup>2</sup>

APSTRAKT: Teorijski hidrogram velikih voda predstavlja ključni parametar za potrebe dimenzionisanja hidrotehničkih objekata i od presudne važnosti je sa gledišta ekonomičnosti izgradnje i sa stanovišta sigurnosti objekata. Imajući ovo u vidu teorijski hidrogram je neizbežna TEMA u svim projektima sistema za zaštitu od poplava, kao i pri dimenzionisanju drugi hidrotehničkih objekata u oblasti vodoprivrede. U hidrološkoj praksi teorijski hidrogram velikih voda se definiše preko svojih osnovnih parametara, kao što su maksimalna ordinata, zapremina poplavnog talasa i oblik hidrograma, i to za unapred definisanu verovatnoću pojave  $-p(\%)$ , odnosno povratni period  $-T$  (god). Kod svih mogućih slučajeva hidrološki izučenih i/ili neizučenih profila, sve metode proračuna koje se koriste u praksi za definisanje teorijskih hidrograma polaze od pretpostavke da navedeni osnovni parametri hidrograma imaju istu verovatnoću pojave. Nažalost ova pretpostavka predstavlja osnovnu DILEMU, kojoj je posvećen ovaj rad, jer u praksi ova pretpostavka nema realno utemeljenje, što će biti prikazano u radu. Pored toga daće se koncept predloga sveobuhvatnijeg rešenja za definisanje teorijskih hidrograma određene verovatnoće pojave, za različite hidrotehničke slučajeve.

Ključne reči: velike vode, teorijski hidrogrami, pik poplavnog talasa, zapremina poplavnog talasa, dvodimenzionalna raspodela verovatnoće, verovatnoća prevazilaženja

## Design flood hydrographs – what that could mean?

ABSTRACT: Design flood hydrograph is a key parameter for designing hydraulic structures. It is of crucial importance from the viewpoints of both economical building and safety construction. Given this theoretical hydrograph is inevitable theme in all projects for flood protection, as well as in designing other hydraulic structures in the field of water management. In hydrologic practice theoretical flood wave is defined in terms of its basic parameters, such as maximum ordinate, volume and shape of the flood hydrograph, for a pre-defined probability of occurrence  $P$  (%), and the return period  $-T$  (y). In all cases, for possible hydrological gauged (monitoring data are available) or ungauged (monitoring data are not available) profiles, methods that are used in practice to define the design hydrograph start from the assumption that the above-mentioned basic parameters have the same probability of occurrence. Unfortunately, this assumption is the basic “dilemma” because in practice has no real basis, that will be shown in the paper. In addition, the proposal shall be given to the concept of comprehensive solutions for defining theoretical hydrograph probabilities for different hydro technical problems.

Keywords: floods, design hydrographs, maximum hydrograph ordinate, maximum hydrograph volume, two-dimensional frequency analysis, exceedance probability

<sup>1</sup> Prof. dr. Stevan Prohaska, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd, [stevan.prohaska@jcerni.rs](mailto:stevan.prohaska@jcerni.rs)

<sup>2</sup> M. Sc Aleksandra Ilić, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, [aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs](mailto:aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs)

## 1 Uvodne napomene

Hidrogram velikih voda predstavlja zavisnost protoka vode neke reke u određenom profilu u funkciji vremena. Posledica je pale kiše jakog intenziteta na slivu ili otapanja snežnog pokrivača sa, ili bez kiše. Oblik hidrograma uslovljavaju fizičko-geografski faktori, zatim topografske karakteristike sliva (forme i pada sliva), kao i klimatski činioci slivnog područja, a pre svega od trajanja i intenziteta raspodele padavina u, slivu (Prohaska, 2003).

U hidrotehničkoj praksi jedan od najbitnijih hidroloških elemenata koji služe za dimenzionisanje različitih hidrotehničkih objekata su računске velike vode, odnosno tzv. teorijski hidrogrami određene verovatnoće pojave. Dimenzionisanje hidrotehničkih objekata, na osnovu računski podcenjene vlike vode, dovodi do povećanja rizika od plavljenja i rušenja objekata sa svim drugim nepovoljnim posledicama. Računski precenjene velike vode smanjuju rizike, ali imaju za posledicu predimenzionisanje objekata, što nije u skladu sa realnim potrebama sigurnosti objekata, već predstavlja nepotrebno rasipanje investicionih sredstava.

Osnovni parametri hidrograma velikih voda (poplavnog talasa), o kojima se mora voditi računa u praksi su: maksimalna ordinata hidrograma, zapremina poplavnih talasa, oblik hidrograma i trajanje hidrograma. Za dimenzionisanje brojnih objekata, odnosno za definisanje njihove propusne moći, merodavan je vrh poplavnog talasa (maksimalni protok), zatim trajanje hidrograma i zapremina vode koja u toku talasa proteče.

Pri analizi dejstva akumulacija, retenzija ili rečnih korita na transformaciju poplavnih talasa, pored maksimalnog protoka, merodavni su zapremina poplavnog talasa, kao i oblik hidrograma. Kako se hidrotehnički objekti dimenzionišu sa ciljem da obezbede određenu sigurnost nizvodnog područja, određivanje merodavne (računске) velike vode svodi se na definisanje maksimalnog protoka i hidrograma poplavnog talasa (po zapremini i obimu) koji odgovara nekoj verovatnoći pojave, odnosno povratnom periodu. Zato je teorijski hidrogram velikih voda većita TEMA u hidrološkoj i hidrotehničkoj praksi.

DILEMA je činjenica da se velika većina metoda koje se u hidrološkoj praksi koriste, kako kod hidrološki izučenih, tako i kod hidrološki neizučenih slivova, definišu računске hidrograme preko svoja dva osnovna parametra, maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa, i to za istu, unapred definisanu verovatnoću pojave –  $p$  (%), odnosno povratni period –  $T$  (god.). To praktično znači da se polazi od pretpostavke da postoji veoma čvrsta (stoprocentna) koincidencija, sa koeficijentom korelacije  $R=1.0$ , između osnovnih parametara hidrograma, maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa, što u praksi nije realno, čemu je posvećen ovaj rad.

## 2 Koincidencija između osnovnih parametara hidrograma velikih voda u Srbiji

Za potrebe definisanja koincidencije između dva osnovna parametra hidrograma velikih voda (maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa) korišćeni su oficijelni podaci RHMZ Srbije na 132 hidrološke stanice južno od Save i Dunava. U konkretnom slučaju preuzete su raspoložive vremenske serije apsolutno maksimalnih protoka –  $Q_{max}$ , kao i serije srednje dnevnih protoka. Na osnovu serija srednje dnevnih protoka sračunate su maksimalne zapremine poplavnih talasa u godini, što je omogućilo formiranje njihovih vremenskih serija –  $W_{max}$ . Korišćenjem korespondentnih vrednosti ( $Q_{max,i}; W_{max,i}$ ), gde je  $i$  – redni broj godine u nizu od  $N$  članova, formirani su grafici korespondencija navedenih parametara, što je bila osnova za definisanje dvodimenzionalnog zakona verovatnoća (koincidencije) osnovnih parametara hidrograma velikih voda (maksimalnih godišnjih protoka i zapremine poplavnih talasa) na svim razmatranim profilima vodomernih stanica (Abramowitz i Stegun, 1972.; Prohaska i Ilić, 2010.; Prohaska i sar., 1999.). U vezi sa ovim korišćen je model PROIL koji u suštini definiše sledeće (Prohaska, 2006; Prohaska i sar., 1978):

- funkcije gustina (linije istih dvodimenzionalnih verovatnoća pojave):

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$F(Q_{max}; W_{max}) = p \quad (1)$$

za verovatnoće  $p = 0.1, 1.0, 5.0$  i  $50\%$ .

- Funkcije raspodele (linije prevazilaženja dvodimenzionalnih verovatnoća)

$$P \{ (Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P}) \} = P \quad (2)$$

za verovatnoće prevazilaženja  $P = 0.1\%, 1.0\%, 2.0\%$  i  $5.0\%$ .

Kvantitativni pokazatelji čvrstine definisane korelacione zavisnosti razmatranih parametara hidrograma velikih voda:

- koeficijent linearne korelacije  $R(Q;W)$ ,
- standardna greška ocene koeficijenta korelacije  $\sigma_R$ ,

ukazuju da je uspostavljena dvodimenzionalna korelaciona zavisnost, odnosno koincidencija osnovnih parametara hidrograma velikih voda statistički značajna, ako je zadovoljena nejednakost (Yevjevich, 1972):

$$|R| \geq 3\sigma_R \quad (3)$$

gde je:

$$\sigma_R = \frac{1-R(Q,W)^2}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

gde je  $N$  - ukupan broj članova u nizu  $(Q_{max}; W_{max})$ .

Rezultati ocene statističke značajnosti uspostavljenih korelacionih zavisnosti osnovnih parametara hidrograma velikih voda, maksimalnih godišnjih protoka i zapremina poplavnih talasa, na svim razmatranim profilima hidroloških stanica na teritoriji Republike Srbije, južno od Save i Dunava, pokazuju da se koeficijenti korelacije kreću u veoma širokom dijapazonu, od  $R(Q;W) = 0.013$  (h.s. Bistrica na Bistrici) do  $R(Q;W) = 0.895$  (h.s. Čemanov most na Tamnavi), sa prosečnom vrednošću za celu teritoriju Republike Srbije od  $R(Q;W) = 0.505$ .

Da bi se bolje sagledao karakter zastupljenosti vrednosti koeficijenta korelacije između osnovnih parametara hidrograma velikih voda (maksimalne ordinate i zapremine talasa) u tabeli 1 prikazani su numerički podaci o učestalosti koeficijenta korelacije unutar navedenog dijapazona njegovih promena. Na osnovu datih podataka može se videti da u raspon koeficijenta  $R(0.501-0.600)$  upada  $25\%$  slučajeva, a širi raspon  $R(0.401-0.700)$  upada  $57\%$  slučajeva.

Sa gledišta statističke značajnosti na 104 hidrološke stanice koincidencija između osnovnih parametara hidrograma velikih voda, maksimalnih godišnjih protoka i zapremina poplavnih talasa, je statistički značajna što čini ukupno  $79\%$  razmatranih hidroloških stanica.

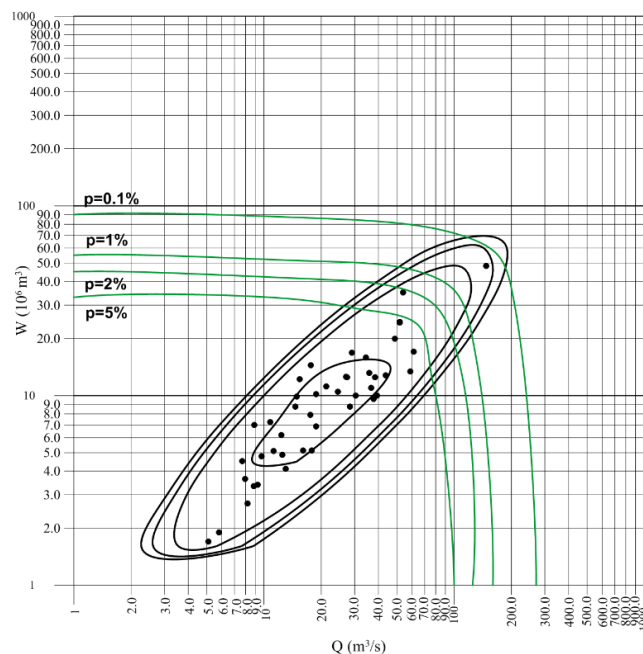
Tabela 1. Učestalost vrednosti koeficijenta korelacije  $R(Q_{max}, W_{max})$  na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava.

Table 1. The frequency of values of correlation coefficient  $R(Q_{max}, W_{max})$  in the territory of Republic of Serbia south of rivers Danube and Sava

	R(Q <sub>max</sub> : W <sub>max</sub> )								
Raspon	0.000-0.100	0.101-0.200	0.201-0.300	0.301-0.400	0.401-0.500	0.501-0.600	0.601-0.700	0.701-0.800	0.801-0.900
Učestalost (broj hidr. stanica)	1	9	10	19	20	33	22	15	5

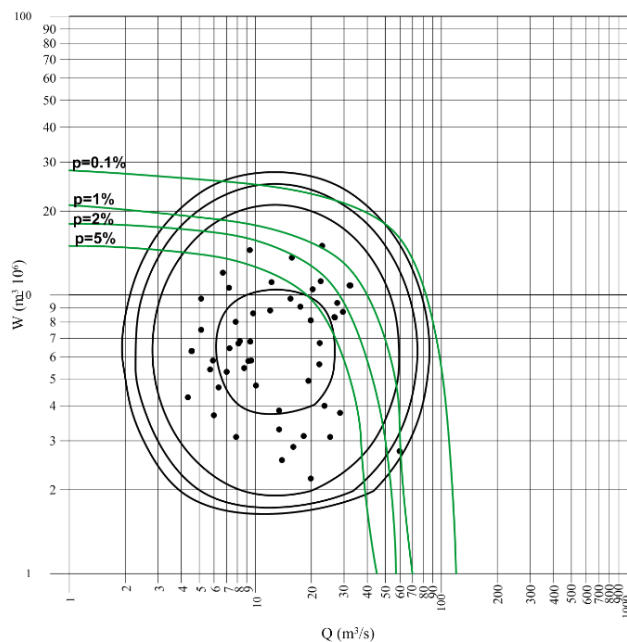
Ilustracije radi na slikama 1 i 2 prikazani su grafički rezultati proračuna dvodimenzionalne funkcije raspodele osnovnih parametara hidrograma velikih voda na hidrološkim stanicama sa najvećim (h.s. Čemanov most na r. Tamnavi) i najmanjim koeficijentom korelacije (h.s. Bistrica na Bistrici).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 1. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate –  $Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa –  $W_{max}$ ) reke Tamnave u profilu hidrološke stanice „Ćemanov most“

Figure 1. Bivariate distribution (coincidence) of basic parameters of the flood hydrograph (maximal ordinate -  $Q_{max}$  and maximum volume -  $W_{max}$ ) at hydrological stations profile "Ćemanov most" at Tamnava River



Slika 2. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate –  $Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa –  $W_{max}$ ) reke Bistrice u profilu hidrološke stanice „Bistrica“

Figure 2. Bivariate distribution (coincidence) of basic parameters of the flood hydrograph (maximal ordinate -  $Q_{max}$  and maximum volume -  $W_{max}$ ) at hydrological stations profile "Bistrica" at Bistrica River

### 3 Posledice korišćenja tradicionalnog postupka definisanja teorijskih hidrograma

Kao što je u uvodnom delu rada ukazano postojeće metode koje se u hidrološkoj praksi naše zemlje, a i šire, koriste za definisanje teorijskih (računskih) hidrograma polaze od pretpostavke da dva osnovna parametra hidrograma, maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa, imaju istu, unapred definisanu, verovatnoću pojave –  $p(\%)$ , odnosno povratni period –  $T(\text{god.})$ . To praktično znači da se polazi od pretpostavke da između dva osnovna parametra hidrograma postoji veoma čvrsta (stoprocentna) koincidencija, sa koeficijentom korelacije  $R=1.0$ . Da li je to tako, može se videti na navedenim primerima hidroloških stanica reka Tamnave i Bistice.

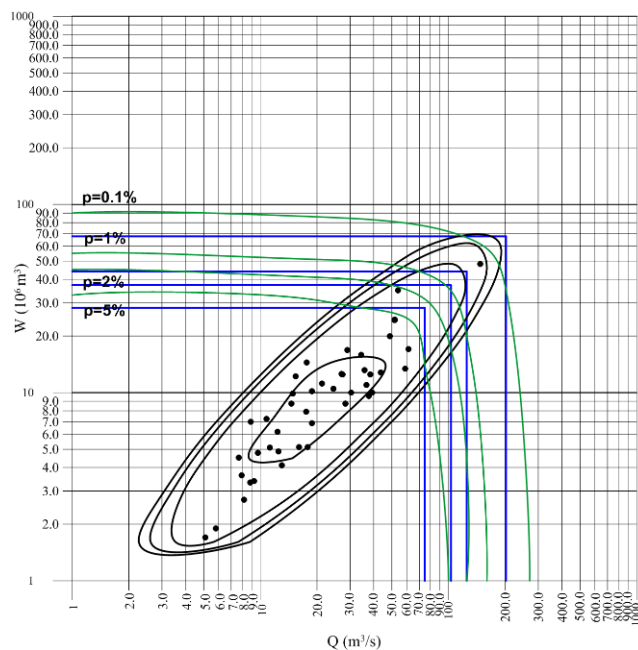
Korišćenjem klasične statističko-probabilističke analize vremenskih serija maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih godišnjih zapremina poplavnih talasa na navedenim hidrološkim stanicama reka Tamnave i Bistrice dobijeni su rezultati koji su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Maksimalni godišnji protoci i zapremine poplavnih talasa na razmatranim hidrološkim stanicama

Figure 2. Maximum annual flood waves flows and volumes at the considered hydrological stations

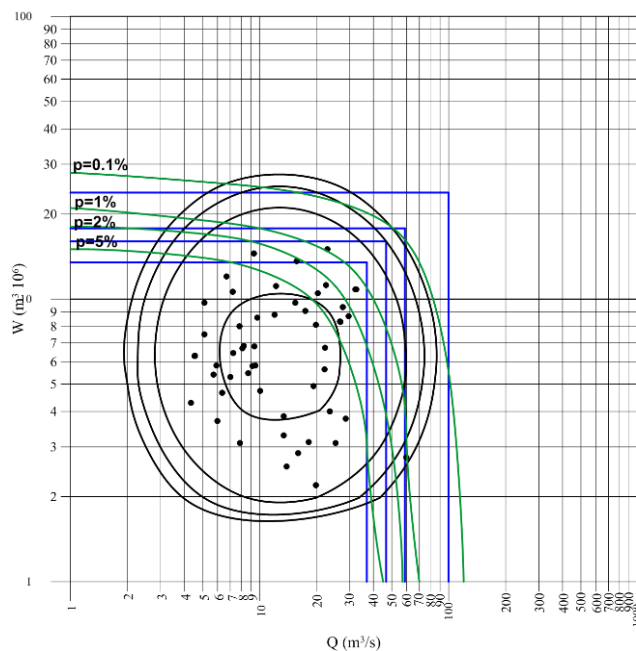
P(%)	h.s Čemanov most		h.a Bistrica	
	$Q_{\max,p}$	$W_{\max,p}$	$Q_{\max,p}$	$W_{\max,p}$
0.1	202	67.7	100	23.8
1.0	125	44.1	58.7	17.8
2.0	103	37.2	46.7	16.0
5.0	74.9	28.2	36.9	13.5

Kada se ove vrednosti nanese na korelaciona polja, prikazana na slikama 1 i 2, dobijaju se značajna odstupanja između presečnih tačaka osnovnih parametara hidrograma, preuzetih iz tabele 2, i linija verovatnoće prevazilaženja za iste verovatnoće pojave. što je prikazano na slikama 3 i 4. Linije povučene kroz presečne tačke istih verovatnoće pojave osnovnih parametara hidrograma velikih voda (maksimalne ordinate i zapremine talasa - Tabela 2) bi bile prave da su koeficijenti korelacije jednaki jedinici. Međutim, to ni o ovim ekstremnim slučajevima a ni na 132 hidrološke stanice na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava nije evidentirano. Prema tome može se zaključiti da sve metode i postupci koje se u hidrološkoj praksi koriste za definisanje teorijskih hidrograma, a koji se baziraju na pretpostavci da maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa imaju istu verovatnoću nemaju realnu osnovu.



Slika 3. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate –  $Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa –  $W_{max}$ ) reke Tamnave u profilu hidrološke stanice „Ćemanov most“

Figure 3. Bivariate distribution (coincidence) of basic parameters of the flood hydrograph (maximal ordinate -  $Q_{max}$  and maximum volume -  $W_{max}$ ) at hydrological stations profile "Ćemanov most" at Tamnava River



Slika 4. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate –  $Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa –  $W_{max}$ ) reke Bistrice u profilu hidrološke stanice „Bistrica“

Figure 4. Bivariate distribution (coincidence) of basic parameters of the flood hydrograph (maximal ordinate -  $Q_{max}$  and maximum volume -  $W_{max}$ ) at hydrological stations profile "Bistrica" at Bistrica River



#### 4 Preporuke autora rada

Činjenica je da definisane dvodimenzionalne funkcije raspodele osnovnih parametara hidrograma velikih voda na svim razmatranim hidrološkim stanicama na teritoriji Republike Srbije južno od Save i Dunava ukazuju da za određenu verovatnoću prevazilaženja  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} > P$  postoji veoma širok dijapazon mogućih kombinacija maksimalnih godišnjih protoka i maksimalnih zapremina poplavnih talasa. To praktično znači da postoji veliki broj kombinacija konstelacija osnovnih parametara hidrograma velikih voda koji odgovaraju istoj verovatnoći prevazilaženja  $P$ . Zato je neophodno da se pronađe postupak koji će, sa gledišta korisnika rezultata, definisati najoptimalnije kombinacije.

Autori ovog rada predlažu da je za korisnike iz oblasti zaštite od poplava, a za unapred definisanu verovatnoću prevazilaženja  $P$ , najcelishodnije raditi sa sledećim kombinacijama parametara istih marginalnih verovatnoća:

1. Maksimalni godišnji protok – maksimalna zapremina poplavnog talasa istih marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$ ,
2. Maksimalni godišnji protok iste marginalne verovatnoće – odgovarajuća zapremina poplavnog talasa za usvojenu verovatnoću prevazilaženja –  $P(Q_{max,P}, W_{cor,P})$ ,
3. Odgovarajući maksimalni godišnji protok za usvojenu verovatnoću prevazilaženja – maksimalna zapremina poplavnog talasa iste marginalne verovatnoće –  $P(Q_{cor,P}, W_{max,P})$ ,
4. Najverovatnija kombinacija (Mod) maksimalnog godišnjeg protoka i maksimalne zapremine poplavnog talasa za odabranu verovatnoću prevazilaženja –  $P(Q_{Mod,P}, W_{Mod,P})$ .

Praktični primer ilustracije gore navedenog postupka daje za slučaj hidrološke stanice Čemanov most na reci Tamnavi koji, kao što je navedeno, ima najveći koeficijent korelacije vrednosti između osnovnih parametara hidrograma velikih voda, maksimalne ordinate i zapremine poplavnog talasa. Prethodno su za ovu hidrološku stanicu, po metodi graničnog intenziteta oticaja (GIO) (Prohaska i Petković, 1989.), sračunati teorijski hidrogrami velikih voda za prvu navedenu kombinaciju parametara (maksimalni godišnji protok – maksimalna zapremina poplavnog talasa istih marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$ ), za tzv. „maksimalno moguću“ kombinaciju, Odgovarajuće korespondentne vrednosti ostalih navedenih kombinacija za istu verovatnoću prevazilaženja  $P$  određene su sa dijagrama dvodimenzionalne raspodele prikazane na slici 1. Numeričke vrednosti usvojenih konstelacija parametara hidrograma velikih voda za reku Tamnavu u profilu h.s. Čemanov most prikazane su u tabeli 3.

Odabrane kombinacije promenljivih (osnovnih parametara hidrograma velikih voda – pika i zapremine poplavnih talasa), a za verovatnoću prevazilaženja:

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = 1.0\%,$$

prikazane su na slici 5, zajedno sa definisanom dvodimenzionalnom funkcijom koincidencije. Sve odabrane kombinacije naznačene su rednim brojem tačaka, kao što je prikazano u tabeli 3.

Za sve četiri odabrane kombinacije promenljivih sa verovatnoćom prevazilaženja  $P=1.0\%$  sračunati su teorijski hidrogrami velikih voda reke Tamnave u profilu h.s. Čemanov most, po metodi GIO, a rezultati proračuna prikazani su na slici 6.

Kao što se vidi na slici 6 dobijena su četiri različita hidrograma, od kojih hidrogrami pod brojem 2, 3 i 4, svaki za sebe sa različitog stanovišta, predstavlja **stogodišnji hidrogram velike vode reke Tamnave u profilu hidrološke stanice „Čemanov most“**. Teorijski hidrogram, sastavljen iz marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,P}, W_{max,P})$ , koji predstavlja „maksimalni mogući“ hidrogram, jeste „kvazi stogodišnji“ hidrogram, po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), i on u suštini prevazilazi verovatnoću  $p$ , tj.  $p > P$ . Da je to tako potvrđuje i položaj karakteristične tačke 1 na slici 5, koja ne može da predstavlja stogodišnji teorijski hidrogram ( $p=1.0\%$ ), jer je evidentno da njen stvarni položaj odgovara liniji prevazilaženja verovatnoće:

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,P}) \cap (W_{max} \geq w_{max,P})\} = P < p = 1.0\%.$$

Njena stvarna verovatnoća prevazilaženja (Slika 5) je:

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

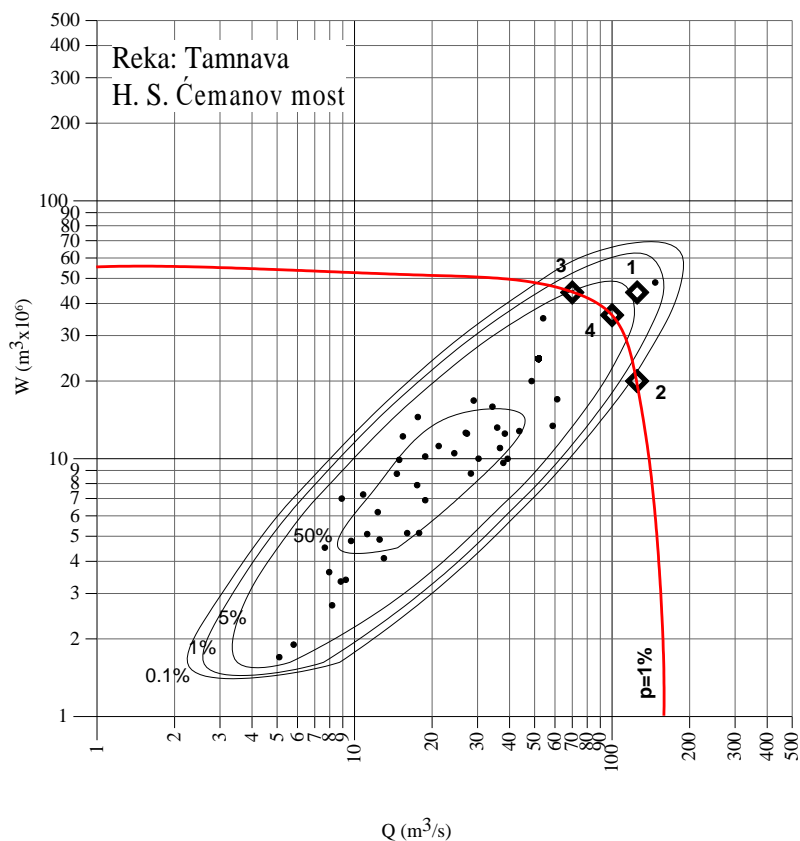
$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P = 0.2\% < p=1.0\%.$$

To praktično znači da hidrogram poplavnog talasa 1 odgovara **petstogodišnjem** povratnom periodu.

Tabela 3. Prikaz usvojenih kombinacija osnovnih parametara hidrograma velikih voda reke Tamnave u profilu h.s. Čemanov most za različite verovatnoće prevazilaženja  $P$

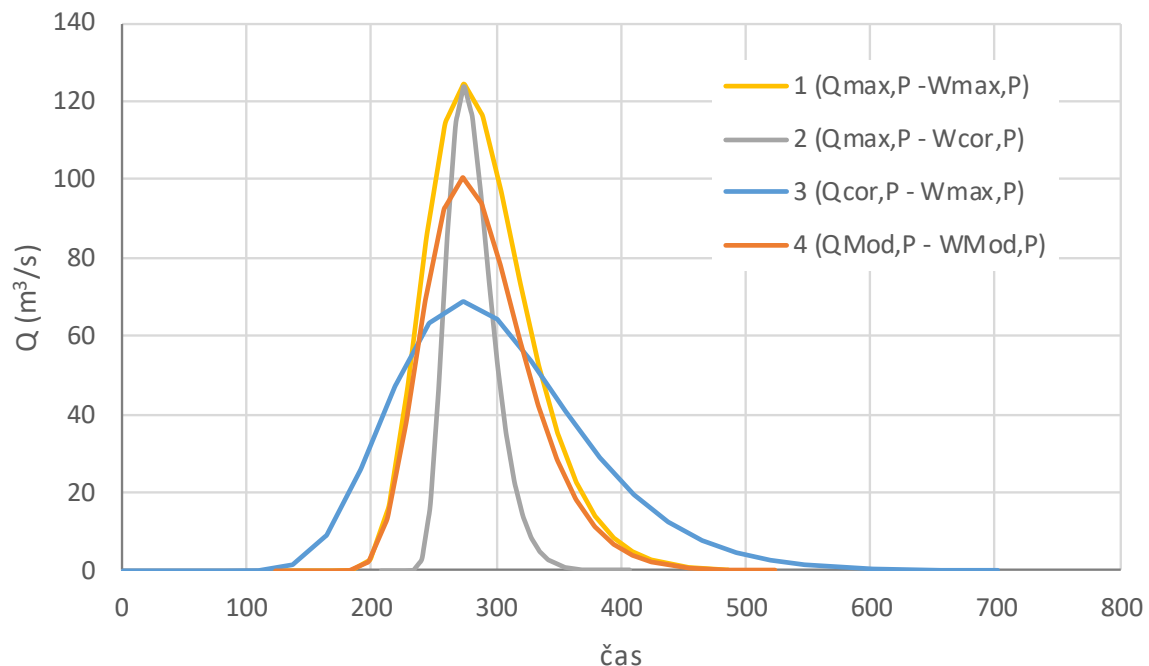
Table 3. List of selected combinations of basic flood hydrograph' parameter at hydrologic station' profile "Čemanov most" at Tamnava River for different exceedance probabilities  $P$

RB	Konstelacija promenljivih	Verovatnoća prevazilaženja – $P \{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P$							
		0.1 %		1.0 %		2.0 %		5.0 %	
		$Q_{max}$ ( $m^3/s$ )	$W_{max}$ ( $10^6 m^3$ )	$Q_{max}$ ( $m^3/s$ )	$W_{max}$ ( $10^6 m^3$ )	$Q_{max}$ ( $m^3/s$ )	$W_{max}$ ( $10^6 m^3$ )	$Q_{max}$ ( $m^3/s$ )	$W_{max}$ ( $10^6 m^3$ )
1	$Q_{max,P} - W_{max,P}$	202	67.7	125	44.1	103	37.2	74.9	28.2
2	$Q_{max,P} - W_{cor,P}$	202	35	125	20	103	17	74.9	14
3	$Q_{cor,P} - W_{max,P}$	120	67.7	70	44.1	50	37.2	28.2	28.8
4	$Q_{Mod,P} - W_{Mod,P}$	170	55	100	36	79	30	66	23



Slika 5. Dvodimenzionalna raspodela (koincidencija) osnovnih parametara hidrograma (maksimalne ordinate –  $Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa –  $W_{max}$ ) reke Tamnave u profilu hidrološke stanice „Čemanov most“ sa naznačenim usvojenim kombinacijama za verovatnoću prevazilaženja 1%

Figure 5. Bivariate distribution (coincidence) of basic parameters of the flood hydrograph (maximal ordinate -  $Q_{max}$  and maximum volume -  $W_{max}$ ) at hydrological stations profile "Čemanov most" at Tamnava River with selected combinations for the exceedance probability  $P=1\%$



Slika 6. Stogodišnji hidrogrami velikih voda reke Drave u profilu hidrološke stanice „Ćemanov most“ za usvojene kombinacije osnovnih parametara hidrograma (maksimlane ordinate  $-Q_{max}$  i maksimalne zapremine talasa  $-W_{max}$ )

Figure 6. Flood wave hydrographs with return period 100yr at hydrologic station' profile “Ćemanov most “ for selected combinations of basic parameters (maximal ordinate  $-Q_{max}$  and maximum volume  $-W_{max}$ )

## 5 Zaključak

Osnovna ideja autora ovog rada jeste da predlože jedan **novi pristup u definisanju teorijskih (računskih) hidrograma velikih voda na hidrološki izučanim profilima**, kakvi su profili oficijelnih hidroloških stanica sa dugogodišnjim nizovima osmatranja vodostaja i merenjima protoka. To je svakako veoma aktuelna TEMA, koja permanentno traje i trajaće sve dok hidrolozi širom sveta ne smognu snage da konačno utvrde odgovarajuće standarde za ovu vrstu hidroloških obrada i analiza.

Teorijski hidrogrami velikih voda različitih verovatnoća pojave su jedan od najbitnijih hidroloških elemenata kada su u pitanju sledeće vodoprivredne aktivnosti:

- Odbrana i zaštita od poplava;
- Dimenzionisanje akumulacija i retezija u funkciji odbrane od poplava;
- Dimenzionisanje nasipa, mostova i propusta;
- Ocena rizika i upravljanje rizikom od poplava.

Sa aspekta navedenih aktivnosti nisu svi parametri hidrograma velikih voda od istog značaja, odnosno težine. Najfrekventniju praktičnu upotrebu ima maksimalna ordinata hidrograma (špic, pik talasa) i ona igra dominantnu ulogu u skoro svim navedenim vodoprivrednim aktivnostima. Zapremina poplavnog talasa je veoma bitna za potrebe optimalnog dimenzionisanja, kako brana i retezija, tako i za uspešno sprovođenje odbrane od poplava, analize prostiranja poplave u prostoru, a s tim u vezi i ocenom rizika od poplava i upravljanjem njenim rizikom. Trajanje poplavnih talasa je značajno za optimalno dimenzionisanje nasipa i uspešnu odbranu od poplava itd.

Pri razradi ove procedure polazna pretpostavka je da su osnovni parametri hidrograma velikih voda ponaosob slučajne veličine koje se pokoravaju nekom jednodimenzionalnom, dvodimenzionalnom ili višedimenzionalnom zakonu raspodele. Sprovedene dvodimenzionalne analize verovatnoće u ovom radu samo potvrđuju svu širinu mogućnosti raznoraznih kombinacija parametara

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

hidrograma pri definisanju teorijskog hidrograma određene verovatnoće pojave. Autori ukazuju na to da su za određenu verovatnoću prevazilaženja  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P$  karakteristične četiri tačke, čije koordinate (koje u suštini predstavljaju maksimalnu ordinatu hidrograma i zapreminu poplavnog talasa) definišu teorijski hidrogram iste verovatnoće pojave  $P \cong p$ .

Praktična vrednost teorijskih hidrograma velikih voda, određenih na osnovu koordinata navedene četiri karakteristične tačke, za istu verovatnoću prevazilaženja:

$$P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P \cong p,$$

ogleda se u sledećem:

1. Teorijski hidrogram, sastavljen iz marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,p}, W_{max,p})$ , predstavlja „maksimalni mogući“ hidrogram, po oba parametra (maksimalne ordinate hidrograma i maksimalne zapremine hidrograma), i on u suštini prevazilazi verovatnoću  $p$ , tj.  $p > P$ . Da je to tako potvrđuje i položaj karakteristične tačke 1 na slici 5, koja može da predstavlja stogodišnji teorijski hidrogram ( $p=1.0\%$ ), ali je evidentno da njen stvarni položaj odgovara liniji prevazilaženja verovatnoće:  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P < p=1.0\%$ , odnosno njena stvarna verovatnoća prevazilaženja (slika 6) odgovara tristogodišnjem povratnom periodu.
2. Stogodišnji teorijski hidrogram sastavljen iz odgovarajućih marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{max,p}, W_{cor,p})$ , jeste stogodišnji ( $p=1.0\%$ ) samo po parametru maksimalne ordinate hidrograma, pa se može praktično koristiti samo za dimenzionisanje prelivnih organa, kota krune nasipa, mostovskih otvora, propusta i sl. Ne može biti korišćen za dimenzionisanje akumulacionih i retenzionih prostora, jer je verovatnoća pojave drugog parametra hidrograma – zapremine poplavnog talasa manja od stogodišnje, tj.  $p < 1.0\%$ .
3. S druge strane, stogodišnji teorijski hidrogram sastavljen iz marginalnih verovatnoća  $P(Q_{cor,p}, W_{max,p})$ , jeste stogodišnji ( $p=1.0\%$ ) samo po parametru maksimalne zapremine hidrograma i može biti korišćen za dimenzionisanje akumulacionih i retenzionih prostora, ali se ne može koristiti za dimenzionisanje prelivnih organa, kota krune nasipa, mostovskih otvora, propusta i sl, jer je verovatnoća pojave drugog parametra hidrograma – maksimalne ordinate hidrograma manja od stogodišnje, tj.  $p < 1.0\%$ .
4. Teorijski hidrogram sastavljen iz marginalnih verovatnoća –  $P(Q_{Mod,p}, W_{Mod,p})$  jeste „najverovatniji“ hidrogram čija se verovatnoća prevazilaženja  $P$  i verovatnoća pojave  $p$  poklapaju (identične su), tj.  $P\{(Q_{max} \geq q_{max,p}) \cap (W_{max} \geq w_{max,p})\} = P = p$ .

Autori predlažu da se ovaj „najverovatniji“ hidrogram za bilo koju verovatnoću ( $P=p$ ) koristi kao kontrolni u svim gore navedenim slučajevima dimenzionisanja hidrotehničkih objekata.

## Zahvalnica

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2017. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

## Literatura

1. Abramowitz M., Stegun A. I. (1972) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, Dover Publications, INC., New York
2. Prohaska S. (2003) *Hidrologija I Deo, Hidro-meteorologija, hidrometrija i vodni režim*, Rudarsko-geološki fakultet, Institut „Jaroslav Černi“, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd.
3. Prohaska S. (2006) *Hidrologija II Deo, Hidrološko prognoziranje, modelovanje i praktična primena*, Institut „Jaroslav Černi“, Rudarsko-geološki fakultet, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

4. Prohaska S et al. (1999) Concidence of Flood Flow of the Danube River and its Tributary, *The Danube and its Basin – A Hydrological Monograph*, Follow-up volume IV, Regional Cooperation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO, Bratislava.
5. [Prohaska S.](#), [Ilic A.](#) (2010) *Coincidence of Flood Flow of the Danube River and Its Tributaries*, (In: Mitja Brilly (Ed.): [Hydrological Processes of the Danube River Basin](#) - Perspectives from the Danubian Countries), Publisher: Springer, ISBN 978-90-481-3422-9, Book Chapter 6, p. 175-226. DOI: 10.1007/978-90-481-3423-6\_6
6. Prohaska S., Marjanović N., Čabrić M. (1978) *Dvoparametarsko definisanje velikih voda*, Vode Vojvodine, Novi Sad
7. Prohaska S., Petković T. (1989) Metode za proračun velikih voda, Deo I, Proračun velikih voda na hidrološki izučeni profilima, *Građevinski calendar 89*, Beograd.
8. Yevjevich V. (1972) *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A

## **Primena radarskih slika u hidrološkoj rekonstrukciji poplave na reci Bjelici marta 2016. godine**

Nikola Zlatanović<sup>1</sup>, Vanja Damjanović<sup>2</sup>, Stevan Prohaska<sup>3</sup>

APSTRAKT: Sedmog marta 2016. godine, reka Bjelica se izlila iz korita i poplavila je brojna sela duž rečne doline, uključujući i grad Lučani na najnižvodnijem delu pred ušće u Zapadnu Moravu. Da bi se izvršila hidrološka rekonstrukcija poplavnog događaja, formiran je semi-distribuirani hidrološki model slivnog područja, koji kao ulazne podatke koristi radarske slike za procenu intenziteta padavina. Padavine procenjene radarskim slikama upoređene su sa podacima osmatranja na pluviografu, a hidrološki model je verifikovan osmotrenim hidrogramom na hidrološkoj stanici Guča. Na nizvodnom kraju toka u zoni grada Lučani, formiran je hidraulički model rečnog korita koji je iskorišćen za verifikaciju hidrograma na toj deonici. Rezultati pokazuju značajno slaganje modeliranih i osmotrenih veličina, kao i slaganje rezultata hidrološkog i hidrauličkog modela, i ukazuju na to da je moguće uspešno primeniti radarske slike u hidrološkom modeliranju iako je neophodno obratiti posebnu pažnju na kalibraciju radarskih snimaka na osnovu „klasičnih“ zemaljskih osmatranja kao i na efekat radarske senke.

Ključne reči: poplave, radar, Bjelica, HEC-HMS

## **Hydrologic reconstruction of the Bjelica River flood of March 2016 using radar precipitation measurements**

ABSTRACT: On March 7th 2016, the town of Lučani, together with numerous villages and towns along the Bjelica River valley, was severely flooded. In order to hydrologically reconstruct the flood event in the entire river basin, a semi-distributed hydrologic model was developed, with radar precipitation measurements as input. The radar precipitation data were compared to traditional ground-based rainfall measurements, and the hydrologic model was validated with the observed hydrograph at the gauging station Guča. Downstream, at the town of Lučani, a hydraulic model of the river was developed to validate the downstream hydrograph. The results show great agreement, showing that radar precipitation can be successfully implemented in rainfall-runoff modelling, although care should be taken with certain issues such as calibration and radar shadowing.

Keywords: floods, radar, Bjelica, HEC-HMS

---

<sup>1</sup> Nikola Zlatanović, M.Sc., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [nikola.zlatanovic@jcerni.rs](mailto:nikola.zlatanovic@jcerni.rs)

<sup>2</sup> Vanja Damjanović, dipl. graš. inž., Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [vanja.damjanovic@jcerni.rs](mailto:vanja.damjanovic@jcerni.rs)

<sup>3</sup> Prof. dr. Stevan Prohaska, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [stevan.prohaska@jcerni.rs](mailto:stevan.prohaska@jcerni.rs)

## 1 Uvod

Reka Bjelica protiče kroz oblast Dragačevo u zapadnoj Srbiji (slika 1) i desna je pritoka Zapadne Morave. Izvor reke nalazi se na 930 metara nad morem na severnim obroncima planine Čemerno, i teče u pravcu severozapada kroz opštinu Lučani dužinom od 41 km do ušća u Zapadnu Moravu kod sela Dljina blizu naselja Lučani.

Položaj naselja Lučani u dolini reke Bjelice u kombinaciji sa bujičnim karakterom reke i uspornim vodama Zapadne Morave, ima kao posledicu često plavljenje područja i velike načinjene štete. Jedna takva poplava se dogodila 7. marta 2016. godine, kada je poplavljena čitava rečna dolina i ugrožena su brojna sela i naselja, uključujući Guču i Lučane. Više hiljada hektara poljoprivrednog zemljišta se našlo pod vodom, a više od 80 kuća je oštećeno u selima Turica, Puhovo, Đerađ, Dljina, Lis i Viča, kao i u stambenim delovima naselja Guča. Ukupno 52 osobe su evakuisane i preko 120 objekata je poplavljeno. Nakon preliminarnih analiza, poplave iz marta 2016. godine su načinile štete u visini od više stotina hiljada evra (Opština Lučani, 2016).



Slika 1. Položaj opštine Lučani (označena crvenom bojom) na karti Srbije

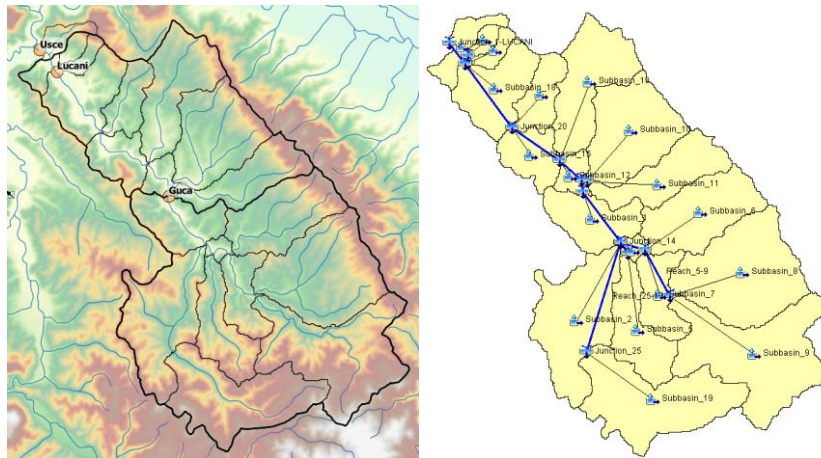
Figure 1. Location of the municipality of Lučani (shown in red) within Serbia

U ovom radu, autori su razvili semi-distribuirani hidrološki model tipa padavine-oticaaj radi hidrološke rekonstrukcije poplave iz marta 2016. godine, koji kao ulazne podatke koristi radarske slike za procenu intenziteta padavina. Osnovni zadaci hidrološke rekonstrukcije su opisivanje nastanka i propagacije poplavnog talasa, kao i predstavljanje prednosti i mana primene radarskih slika u hidrološkom modeliranju poplavnih talasa.

## 2 Metodologija i podloge

Hidrološki model tipa padavine-oticaaj razvijen je primenom softvera HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling System) (USACE, 2000). Struktura modela je formirana na osnovu fizičkih karakteristika slivnog područja i hidrografije, dok su parametri modela procenjeni na osnovu raspoloživih topografskih i pedoloških podloga kao i zemljišnog pokrivača.

Sliv reke Bjelice je podeljen na ukupno 18 podslivova na osnovu topografskih podloga (reljefa terena). Korišćen je digitalni model terena SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Rodriguez et al, 2005) za delinaciju slivova i podslivova, kao i za procenu morfoloških elemenata slivova, kao što su dužine tokova, podužni padovi itd. Na slici 2 je prikazana struktura modela sa delinacijom podslivova na osnovu digitalnog modela terena.

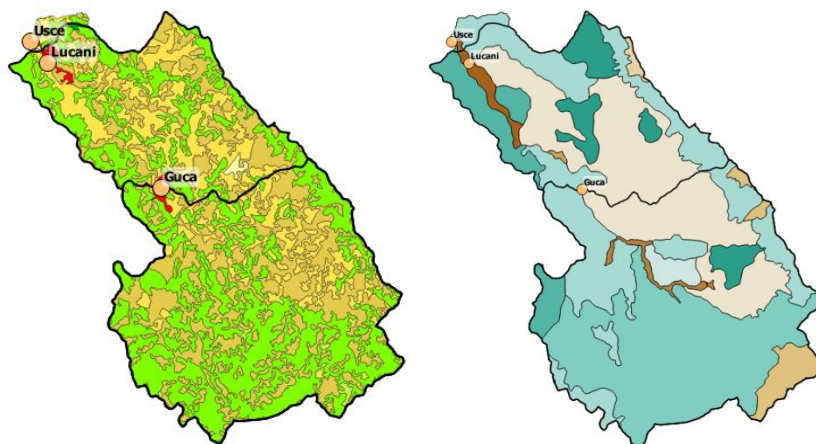


Slika 2. Sliv reke Bjelice: podslivovi i digitalni model terena (levo) i struktura hidrološkog modela (desno)

Figure 2. Bjelica River Basin: delineated subbasins with digital terrain model (left) and hydrologic model structure (right)

Proračun direktnog oticaja efektivne kiše vršen je primenom Klarkovog jediničnog hidrograma (Clark, 1945). Parametri Klarkovog jediničnog hidrograma su za svaki podsliv procenjeni koristeći karakteristike najdužeg toka i uravnatog pada na osnovu digitalnog modela terena, i procenjujući vreme koncentracije primenom Kirpichove formule (Kirpich, 1940), odnosno modifikacije po Zelenhasiću (1970). Početne vrednosti koeficijenta linearnog rezervoara  $R$  su procenjene kao linearna zavisnost vremena koncentracije  $T_c$ , kao što je to predložio Rasel (Russel, 1979).

$SCS-CV$  metoda je korišćena za procenu ukupnih efektivnih padavina (SCS, 1985), odnosno procene infiltracije ili gubitaka. Metoda koristi podatke o zemljišnom pokrivaču i pedološkim karakteristikama zemljišta za procenu krive oticaja  $CN$  (Curve Number) za područje svakog računskog podsliva. Podaci o zemljišnom pokrivaču su preuzeti is baze CORINE (*Coordination on Information on the Environment*) (EAA, 2007), koja grupiše ukupno 44 klasa zemljišnog pokrivača u 3 osnovne grupe – veštačke površine, poljoprivredno zemljište i šumsko i polu-prirodna područja (slika 3). Pedološke karakteristike zemljišta su preuzete sa pedoloških karata razmere 1:50.000, koje su razvijene u Institutu za zemljište, i korišćene su radi klasifikacije zemljišta u tzv. hidrološke klase zemljišta.



Slika 3. CORINE 2015 Land Cover (levo) i pedološka karta (desno) sliva reke Bjelice

Figure 3. CORINE 2015 Land Cover (left) and soil map (right) of the Bjelica River basin



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Propagacija poplavnog talasa duž rečnog toka računata je primenom modela *Muskingum-Cunge* (Miller and Cunge, 1975). Parametri modela, uključujući dužinu toka, srednji pad, Manningov koeficijent hrapavosti kao i oblik i dimenzije poprečnog preseka procenjeni su na osnovu digitalnog modela terena i obilaska terena.

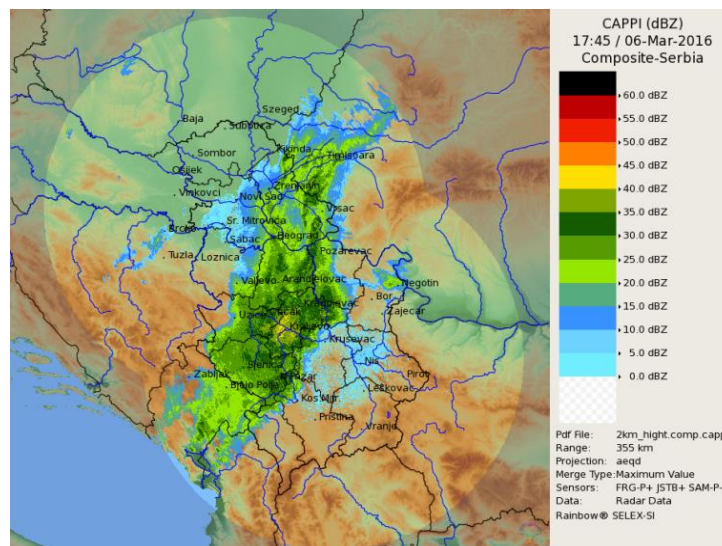
Radarske slike, koje pokazuju strukturu oblaka, orijentaciju i brzinu kretanja, kao i intenzitet padavina, preuzete su od Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZS) koje se objavljuju na veb sajtu u 15-minutnim intervalima. Radarske slike su date kao kompozitne slike, spojene od merenja sa više radara. U toku poplavne epizode na reci Bjelici marta 2016. godine su bili aktivni radari na Fruškoj Gori i Jastrepcu, kao što se može videti sa jednog radarskog snimka od 6. marta 2016. godine, na slici 4.

Intenziteti padavina sračunati su iz kompozitnih radarskih slika primenom standardne *Z-R* formule (Marshall i Palmer, 1948), koji su potom korišćeni za proračun ukupnih suma padavina. Parametar reflektivnosti *Z* (u  $\text{mm}^6\text{m}^{-3}$ ), koje radar detektuje, se preračuna u intenzitet padavina *R* (u  $\text{mm/h}$ ) primenom unapred određene *Z-R* formule sledećeg oblika:

$$Z = A \cdot R^b \quad (1)$$

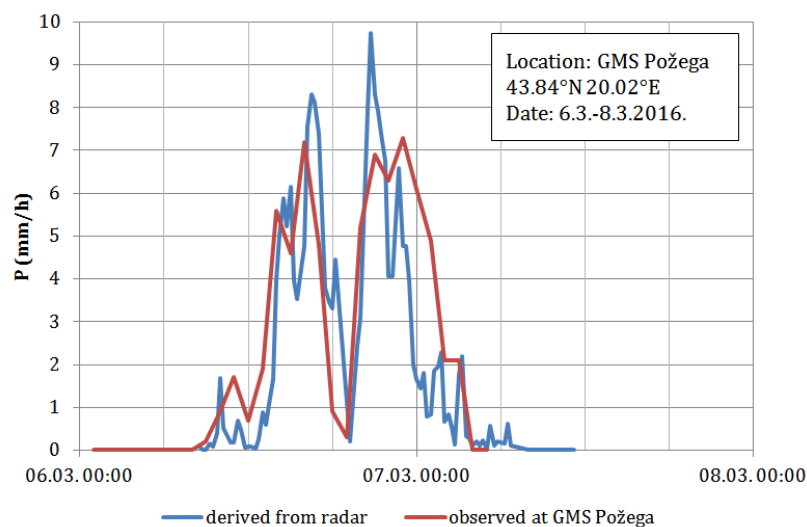
gde su *A* i *b* empirijski parametri koji opisuju oblik i veličinu hidrometeora.

Parametri *A* i *b* Maršal-Palmerove jednačine kalibrisani su na osnovu osmotrenih padavina na glavnoj meteorološkoj stanici GMS Požega, za posmatrani period početkom marta 2016. godine. Na slici 5 su prikazani kalibrisani intenziteti na osnovu radarskih snimaka (plavom bojom) u odnosu na osmotrene intenzitete na GMS Požega (crvenom bojom). Usvojene vrednosti parametara iznose  $A=200$  i  $b=1$ .



Slika 4. Primer radarske slike u toku poplave na reci Bjelici 2016. godine, na kojoj se vidi olujni oblak (izvor: Republički hidrometeorološki zavod Srbije)

Figure 4. Example radar image during the 2016 Bjelica flood, showing the storm cloud (source: Republic Hydrometeorological Service of Serbia)



Slika 5. Kalibrisani intenziteti padavina na osnovu radarskih snimaka (plavo) u odnosu na osmotrene intenzitete na GMS Požega (crveno) u periodu poplave početkom marta 2016. godine

Figure 5. Calculated rainfall intensity based on observed radar reflectivity (shown in blue) compared to observed rainfall intensity at main meteorological station Požega during the 2016 Bjelica river flood event

Sa tako usvojenim parametrima, radarska reflektivnost je preračunata u intenzitete padavina na celokupnom slivnom području reke Bjelice. Za svaki podsliv hidrološkog modela je izdvojena jedinstvena vremenska serija intenziteta padavina primenom prostornog uprosečavanja.

Hidrološki model je verifikovan na hidrološkoj stanici Guča, gde je su protoci (posredstvom nivoa) osmotreni u časovnim intervalima. Nakon uspešne verifikacije, sračunat je i hidrogram reke Bjelice u Lučanima, gde je putem krive proticaja sračunat i nivogram poplavnog događaja koji je poređen sa rezultatima hidrauličke rekonstrukcije poplavnog događaja.

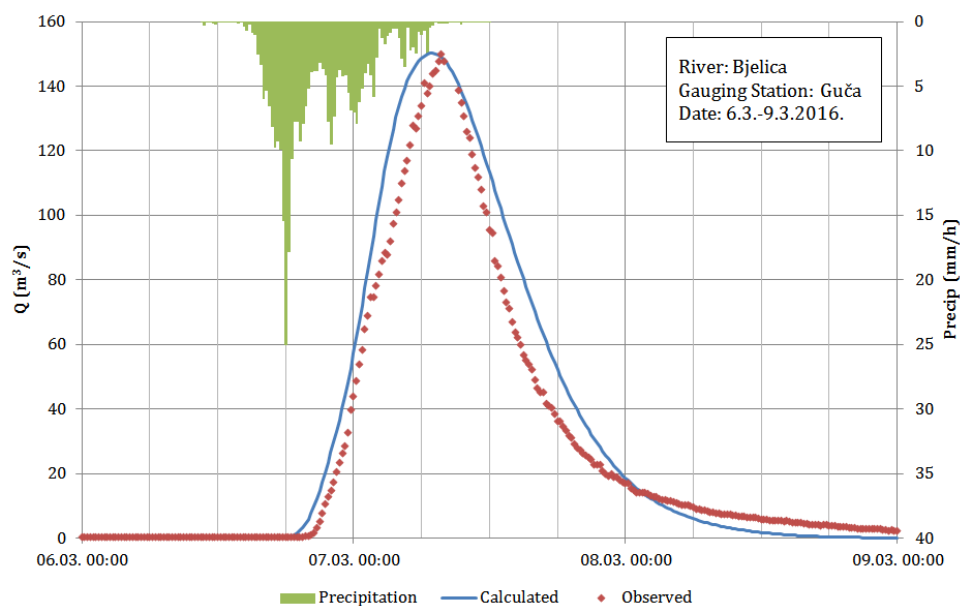
Hidraulička rekonstrukcija poplavnog događaja je izvršena na najnižvodnijoj deonici reke Bjelice, od ušća u Zapadnu Moravu do 4,5 km uzvodno kod mosta u selu Krstac. Geometrijski model reke je formiran na osnovu ukupno 33 geodetski snimljenih profila koji obuhvataju rečno korito i inundacioni prostor, širine u proseku 500-1000 metara. Koeficijent rapavosti osnovnog korita je procenjen na osnovu granulometrijskog sastava nanosa u rečnom koritu koji je evidentiran terenskim obilaskom. Koeficijent otpora tečenju na inundacijama je procenjen na osnovu stanja i načina korišćenja ovog prostora (terensko rekognosciranje i aerofoto snimak). Duž toka Bjelice prepoznate su inundacione zone u kojima postoji efekat retenziranja i te zone su prilikom modeliranja isključivane iz aktivnog tečenja u uslovima nailaska velikih voda.

### 3 Rezultati

Rezultati hidrološkog modeliranja su prikazani grafički u vidu hidrograma. Na hidrološkoj stanici Guča, sračunati hidrogram je uporedno prikazan sa osmotrenim hidrogramom (zvanični podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda). Kao što se vidi na slici 6, sračunati hidrogram daje dobro slaganje sa osmotrenim, naročito u zoni vrha poplavnog talasa.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

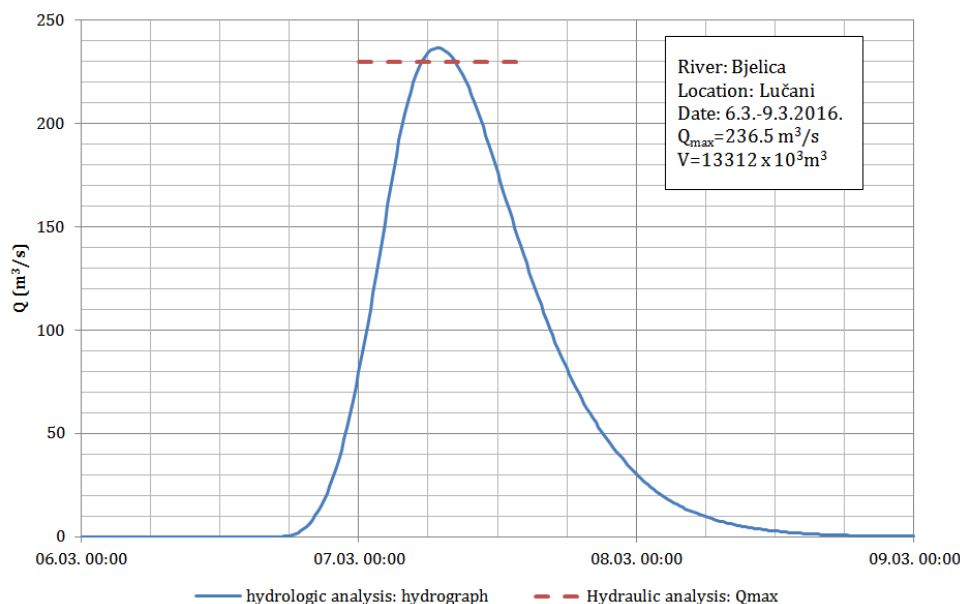
Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 6. Sračunati hidrogram (plavo) i osmotreni proticaji (crveno) na hidrološkoj stanici Guča; padavine (zeleno) su uprosečene za celokupno slivno područje

Figure 6. Calculated hydrograph (blue line) compared to observed discharge values (red dots) at the gauging station Guča on the Bjelica River; precipitation (shown in green) is spatially averaged for the upstream basin

U zoni gradskog naselja Lučani, rezultujući sračunati hidrogram je uporedno prikazan sa rezultatima hidrauličke rekonstrukcije poplavnog događaja. Hidrauličkom rekonstrukcijom je dobijen maksimalni proticaj od  $230 \text{ m}^3/\text{s}$ , što statistički odgovara vrednosti 20-godišnje velike vode. Na slici 7 se može videti da se slažu rezultati hidrološkog i hidrauličkog modela, sa manje od 3% razlike u vršnom proticaju.

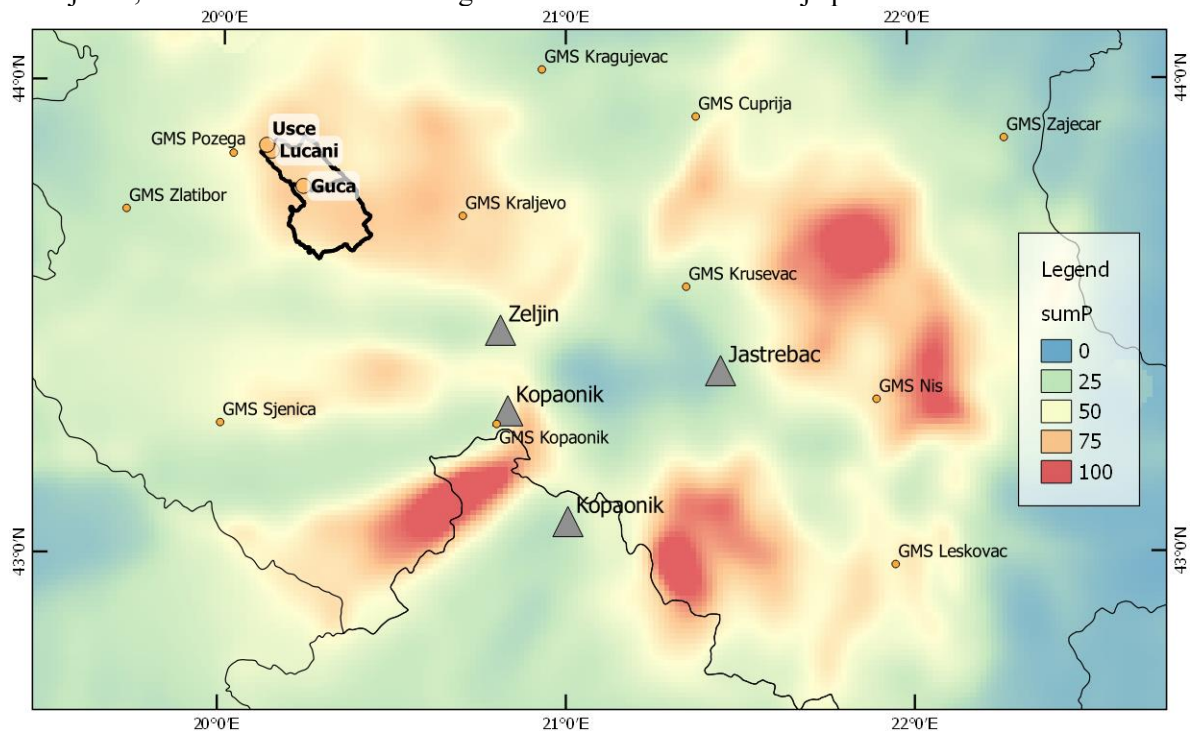


Slika 7. Hidrogram sračunat hidrološkim modelom (plava linija) i vršni proticaj sračunat hidrauličkom rekonstrukcijom (crvena isprekidana linija)

Figure 7. Calculated hydrograph of the Bjelica River in Lučani (blue line) and peak discharge calculated by hydraulic analysis (red dashed line)

### 4 Diskusija

Iako je hidrološka rekonstrukcija poplavnog događaja na reci Bjelici marta 2016. godine korišćenjem radarskih slika koje su preuzete od RHMZ-a pokazala izuzetne rezultate, proračun ukupnih (sumarnih) padavina je ukazao na određene detalje na koje je neophodno obratiti veću pažnju pri ovakvoj primeni radarskih snimaka. Na slici 8 je prikazan prostorni raspored sumarnih padavina za posmatrani period, osmotren radarskim sistemom, gde se jasno mogu videti veoma jake radarske senke – regioni koji su sakriveni od radarskog sistema osmatranja reflektujućim ili apsorbujućim objektima poput brda i planina. U ovom konkretnom slučaju, radar se nalazi na planini Jastrebac, a radarski snop ometaju okolni planinski vrhovi – Željina, Kopaonik i Jastrebac. U slučaju posmatranog sliva reke Bjelice, radarske senke ne utiču negativno na radarska osmatranja padavina.



Slika 8. Sumarne padavine (6.3.-8.3.2016.) prema radarskim osmatranjima; planinski vrhovi Željina, Kopaonik i Jastrebac ometaju radarski snop i prave jake radarske senke

Figure 8. Total event precipitation (6.3.-8.3.2016.) as observed by radar; note mountain peaks Željina, Kopaonik and Jastrebac obstructing the radar and resulting in strong radar shadow

### 5 Zaključci

Kao što je prikazano u rezultatima, radarska osmatranja padavina mogu biti veoma koristan ulaz za modeliranje padavina i oticaja na slivu reke Bjelice. Primene takvog hidrološkog modeliranja su brojne, uključujući razvoj sistema za ranu najavu poplava primenom radarskih osmatranja i znatno unapređenu prostornu raspodelu padavina i samim tim i proticaja, usled daleko veće prostorne i vremenske rezolucije radara u poređenju sa gustinom mreže tradicionalnih meteoroloških stanica. Međutim, za pouzdane primene ovakve vrste podataka, neophodno je vršiti rekonstrukcije više događaja kao što je to vršeno u ovom radu, u cilju pravilne kalibracije radarski osmotrenih padavina i hidrološkog modela, i smanjivanje neizvesnosti rezultata.

## Zahvalnica

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2018. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

## Literatura

1. Clark, C.O. (1945), Storage and the unit hydrograph, Transactions, ASCE, 110, 1419-1446.
2. European Environment Agency (EEA) (2007), CLC2006 Technical Guidelines - EEA Technical Report No 17/2007
3. Kirpich, Z.P. (1940),. Time of concentration of small watersheds. J. of Civil Engineering 10(6). ASCE. New York, NY. pp. 362.
4. Marshall, J.S., R.C., Langille, and W. McK. Palmer (1947), Measurement of rainfall by radar. J. Meteor., 4, 186-192
5. Miller, W.A., and Cunge, J.A. (1975), Simplified equations of unsteady flow, K.Mahmood and V.Yevjevich eds, Unsteady flow in open channels, Vol. I, Water Resources Publications, Ft. Collins, CO.
6. Opština Lučani, Poplava u opštini Lučani, <http://www.lucani.rs/index.php/8-aktuelne-vesti/214-2016-03-09-15-48-39.html> (приступљено 01.04.2016.)
7. Rodriguez, E. et al., (2005), An assessment of the SRTM topographic products. (Technical Report JPL D-31639). Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
8. Russell S., Kenning B. and Sunnell G. (1979), Estimating Design Flows for Urban Drainage, Journal Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, pp 43-52.
9. Soil Conservation Service (1985), National engineering handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapter 10. US Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C.
10. U. S. Army Corps of Engineers (USACE) (2000), Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
11. Zelenhasić E. (1970), Theoretical probability distributions for flood peaks. Hydrol. Paper 42, Colorado State University, Fort Collins, CO.

## **Disaster risk reduction management and resilience – Flood Resilience Index (FRI) as communication tool**

Jelena Batica<sup>1</sup>, Philippe Gourbesville<sup>2</sup>

**ABSTRACT:** Understanding the risk to extreme flood events is crucial for local communities. Damages and in particular direct flood damages can be reduced if there are available tools, proper disaster risk reduction framework and established communication bridges within population. Disaster comes after natural hazards and level of damages can vary. This depends on vulnerability levels. A new approach, resilience is bringing a holistic view, focusing on system approach and taking into account different indicators. The focus point of this paper is resilience as a suitable approach in setting up the scene for a better understanding of disaster risks and climate change. The FP7 PEARL R&D project (<http://www.pearl-fp7.eu/about-pearl/>) case study Chatelaillon-Plage, located on the Atlantic coast of France is a very good example of how local community could increase flood resilience and be more prepared for the future coastal submersion events. For the case study, an analysis of extreme storm surge event Xynthia (occurred on February 27-28, 2010) is performed in order to define a generic, new index characterizing resilience to flooding. Here, the Flood Resilience Index (FRI) is employed as a new communication tool with local stakeholders. The tool enables mapping of evaluated flood resilience for each building in the case study area. In this way the existing flood maps are overlapped with evaluated resilience in different dimensions of urban system.

Key words: flood, resilience, vulnerability, risk, damage, management

## **Upravljanje smanjenjem rizika od prirodnih nepogoda i rezilijentnost – indeks rezilijentnosti na poplave (IRP) kao sredstvo komunikacije**

**APSTRAKT:** Razumevanje rizika od ekstremnih događaja, od poplava prvenstveno, presudno je za lokalne zajednice. Štete, a naročito direktne štete od poplava mogu se smanjiti ako postoje raspoloživi alati, razvijen odgovarajući okvir za smanjenje rizika od katastrofa i uspostavljeni komunikacijski mostovi unutar populacije i donosioca odluka. Katastrofa dolazi nakon prirodnih opasnosti i nivo oštećenja unutar lokalnih samouprava može se razlikovati. Ovo zavisi od nivoa njihove ranjivosti. Novi pristup, rezilijentnost, donosi holistički pogled, fokusirajući se na sistemski pristup i uzimajući u obzir različite indikatore koje treba razmotriti. Cilj fokusa ovog rada je rezilijentnost kao pogodan pristup u postavljanju scene za bolje razumijevanje rizika od katastrofa i klimatskih promena. Studija slučaja Chatelaillon-Plage, FP7 PEARL projekta (<http://vfv.pearl-fp7.eu/about-pearl/>), nalazi se na obalnom području Francuske, vrlo je dobar primer kako bi lokalna zajednica mogla povećati otpornost na poplave i biti spremnija za buduće elementarne nepogode. Za studiju slučaja izvršena je analiza ekstremnog olujnog udara Xynthia (koja se dogodila 27. i 28. februara 2010. godine) kako bi se definisao generički, novi indeks koji karakteriše otpornost na poplave. Ovde indeks rezilijentnosti na poplave (IRP) koristi se kao novi komunikacioni alat sa lokalnim zajednicama i donosiocima odluka. Alat omogućava mapiranje procenjene rezilijentnosti na poplave za svaku zgradu u području studije slučaja. Na ovaj način postojeće poplavne mape preklapaju se sa procenjenom rezilijentnošću u različitim dimenzijama urbanog sistema.

Ključne reči: poplave, rezilijentnost, ranjivost, rizik, štete, upravljanje

<sup>1</sup> Jelena Batica, D. Sc., Research Engineer, University Nice Sophia Antipolis, France, [jelenabatica@gmail.com](mailto:jelenabatica@gmail.com)

<sup>2</sup> Prof. Philippe Gourbesville, Professor, University Nice Sophia Antipolis, France

## 1 Introduction

Floods that happened in urban areas are characterized by increased frequency and they are no longer just natural phenomenon. Flooding is one of the most frequent natural hazard (Kreimer et al., 2003, Munich Re 2000). Flood events cause significant damages and create disruption of physical environment and urban communities. It is understood that floods can't be stopped, but the reduction of damages and vulnerability of risk prone communities can be done. (e.g. Bharwani et al., 2008; Krywkow et al., 2008; Vis et al., 2003). The need for a shift to a new approach within flood risk management resulted in Integrated Flood Risk Management (IFRM) concept. IFRM is defines as holistic approach in setting up the framework for managing floods including social and economic development with the management of natural ecosystem (APFM 2017). Added value of IFRM compare to former approach relies in inclusion of all system elements e.g. application of strategies has to be insured by existing legal framework, financial resources, institutional and social capacity. IFRM aims to maximize productivity and efficiency of coastal and riparian zones and at the same time to minimize the loss of life and impact livelihoods through protective measures.

Existing flood defence structures demonstrates its downsides. There are different approaches in setting up the framework and solving problems connected to urban flooding in Europe and Asia. One of the solutions is moving to risk culture and finding the balance between the shape of land use and urbanization. The practical way and following the traditional risk management cycle is to focus on adaptation, mitigation, and prevention and recovery strategies. In this paper the focus is on soft solutions and adaptation to flooding where a holistic approach and therefore social component play significant role.

Focusing on several research projects that are optimizing a problem of natural disasters in urban areas and floods in particularly the CDRI (Climate Disaster Resilience Index) created by Rajib Show (2009) we found that personalized approach to urban flooding is crucial. The aim is to create a tool that provides a good description of resilience level for elements in urban area. Predominantly, the tool in a form of index presents a decision making tool useful for local communities and help them in finding better strategies in order to cope with future floods.

A guiding question is how to evaluate a flood resilience of urban systems taking into account its characteristics? Along with that, what type of communication is acceptable and effective enough to improve understanding of flood risk and encourage people to take action?

## 2 Resilience and Integrated Flood Risk Management (IFRM)

There is no absolute flood protection and within IFRM the first thing is to define acceptable risk level. As integrated, FRM brings together: interplay of institutions, well defined communication, and development and implementation of flood modelling tools. Through overall inclusion, the defined communication is therefore compromises risk-informed decision making on flood hazard is one of the key element of IFRM. This compromises three elements: (i) decision making based on flood risk estimation, (ii) cost-benefits on flood mitigation and (iii) management. Usually this is an iterative process and compromises several iterations.

The advantage of resilience approach is presented in figure above. On the left side diagram, the effect of protection measures expressed through structural measures is presented in relation to magnitude of event and impact and damages. On the right side diagram the same protection measure along with resilience measures but for bigger event results with much lower damages and impacts. Here, it is important to state that resilience concept or approach is contributing to better adaptation of existing protection.

Along with IFRM the concept of flood resilience is in focus. Under the IFRM there are three concepts (Burton, 1983): carrying capacity, vulnerability and resilience. The introduced concepts are defining maximum tolerable damage and carrying capacity of urban system.

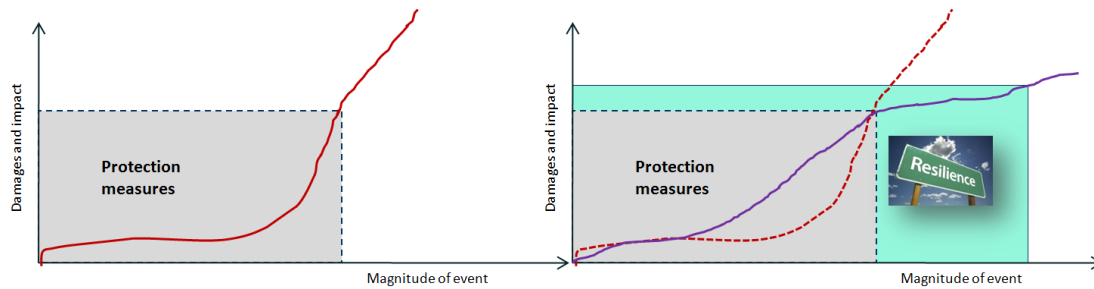


Figure 1. Effect of protection measures versus resilience

Slika 1. Efekat protekcionih mera i rezilijentnosti u odnosu na štete i veličinu događaja (elementarne nepogode)

The concept of carrying capacity identifies the maximum tolerable damage that a community or a city could bear. The concepts of vulnerability and resilience serve to measure and to assess the carrying capacity of a community or a city. The vulnerability expresses the impact of disturbance of a system while the resilience describes the capacity of a system to absorb the shock. Moving from vulnerability and resilience general definition to application to urban flood framework is given here below.

**Vulnerability** presents a pre-event characteristic of a system that has a potential to harm. Vulnerability is in a function of exposure or sensitivity of a system to disturbance. This is explained through answer on question who or what is at risk? Vulnerability defines the conditions determined with physical, social, economic, or environmental factors or processes which are increasing the weakness of community to the impact of hazard (UN/ISDR, 2004). Specific definition of vulnerability to flood events is given in Balica (2013) as the extent to which a system is susceptible to floods due to exposure, a perturbation, in conjunction with its ability (or inability) to cope, recover, or basically adapt.

**Resilience** term is often left open to debate and doesn't have a general or consensual definition although it is increasingly used in integrated urban drainage management, (Ashley *et al.*, 2012; De Bruijn 2004; Klein *et al.*, 1998; Sayers *et al.*, 2003; Sendzimir *et al.*, 2007; Vis *et al.*, 2003;). The diverse interpretations of resilience reflect the complexity of this concept and made it 'difficult' in implementation of integrated urban drainage management. From a general perspective, resilience represents the capacity of an urban system or community exposed to hazard to adapt by resisting or changing in order to reach an acceptable level of functioning, organization and structure (UN/ISDR, 2004).

By narrowing down the resilience the specified resilience comes to focus. This resilience deals with following principle: "of what to what" (Carpenter *et al.*, 2001). It can be defined by identifying what system attributes are to be resilient, and to what kind of disturbances. Specified resilience in the context of Integrated Urban Drainage Management (IUDM) has often been defined in a restricted sense to express the ability of the whole system to recover from the reaction of flood waves (Klein *et al.*, 1998; Sayers *et al.*, 2003; De Bruijn, 2004). Suitable definition for resilience adopted for the research in this paper is proposed by the United Nations' International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). In the context of urban flooding, resilience can be defined as follows:

"Resilience is the capacity of a system, community or society potentially exposed to hazards to adapt, by resisting or changing in order to reach and maintain an acceptable level of functioning and structure. This is determined by the degree to which the social system is capable of organising itself to increase this capacity for learning from past disasters for better future protection and to improve risk reduction measures".

From this wide sense the concept provides a perhaps more suitable background framework to develop and assess integrated approaches to flood risk management. Resilience is therefore specified here in respect to the broader social-ecological context as the capacity of the system to absorb flood waves in annual variability, and to reorganize while undergoing change in flood wave frequency and severity in the long term, so as to enable it to function normally. The resilience approach is aiming to



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

prevent the urban system to move from an undesirable state from which it is not possible to recover from flood impact to functional state. These preventions go in following directions (Figure 2):

1. Adjusting the thresholds of a system with respect to changes in response to flood waves;
2. Defining the level to which system is capable of self-organizing;
3. Define the level to which the system is able to build and increase capacity for learning and adaptation.

This defines resilience thinking, a different point of view for guiding and organizing urban systems.

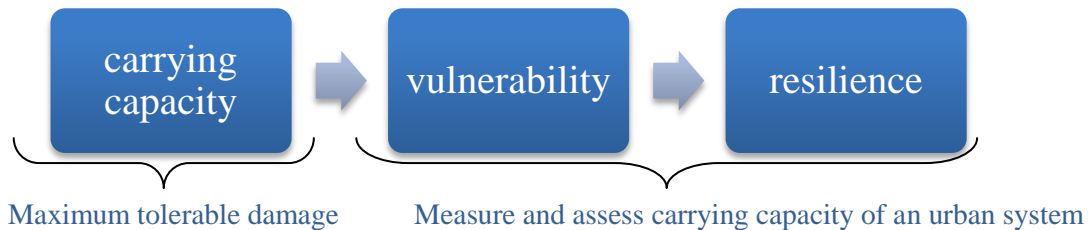


Figure 2. Carrying capacity, vulnerability and resilience

Slika 2. Nivo zasićenosti, osetljivost i rezilijentnost

Defined terminology of vulnerability and resilience stands as an important element in the analysis of urban areas and their existing flood risks but there should be a distinction between the flood vulnerability and resilience of people on one side and the urban structure on the other side.

The resilient urban systems and urban communities should have ability to accept, resist, recover and learn from the events. Capacity of urban systems and communities is improved in each part of the flood risk management cycle. It covers actions related to preparedness, response and recovery. Within this research the five elements of flood risk management are developed: Reflect, Relief, Resist, Response, and Recovery. These new elements explain as follow:

- Relief phase – Defined as 'a buffer' where existing structures and urban functions accept floodwater (green areas, different playgrounds, etc.) using its own capacities. Implementation of physical, technical, non-structural and procedural measures relates to the concept “living with floods”.
- Resist phase – Reduction of flood risk if possible. This is in direct connection with existing threshold capacity. Under this phase, the activities rely on the existing structural (done before flood event). Limiting flood damage and easing recovery by planning and building adaptation, infrastructure, surfaces and economic activity relate to the concept of resistance.

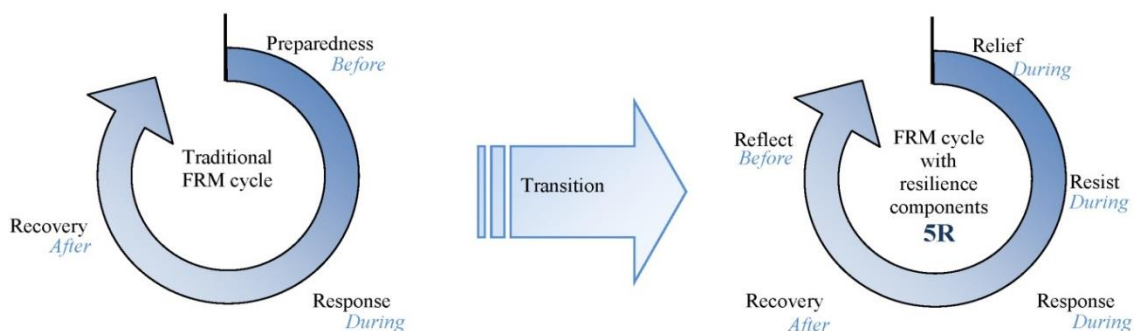


Figure 3. Defined elements for flood risk management cycle with transition to resilience concept - 5R concept (Batica, 2013)

Slika 3. Definisani elementi za upravljanje rizikom od poplava sa tranzicijom na koncept rezilijentnosti - 5R koncept

- Response phase – Focus is on measures taken during the flood related to crisis management. At this time, flood impact is reduced by implementation of physical, technical, non-structural and procedural measures relates to the concept “living with floods”.
- Recovery phase – Take into account activities that provide support by developing capacity building in communities enable to cope with the impacts after flooding events, cleaning and rebuilding.
- Reflect phase – Here, the focus is on increasing awareness and adaptive capacity, learning from past event and/or preparation for an uncertain future. These activities enhance awareness and engagement in all aspects of flood risk. It is influencing the managing at the policy level (politicians/decision makers), professionals (of the involved authorities and elsewhere) and at the public participation (people, companies, developers, insurance companies).

Presented elements introduce resilience concept into flood risk management cycle. The elements are structured into different phases starting from striking the flood through whole duration of event including post flood period. The last element is very important since it focuses on: learning from event, rising awareness, alerting and engaging decision makers and key stakeholders.

### 3 Flood Resilience Assessment

Assessment focuses on analysis of urban system. The system components are mapped with respect to different function in the system. Also the system is scaled into: parcel, block, district and city (the whole system). The methodology focuses on mapping the components of urban system for improving analysis and focus on critical elements. Mapping of urban system is needed in order to achieve a balanced study of flood resilience. In addition, scaling of urban system allows being able to recognize main urban patterns. Mapping and scaling of urban system breaks down the structure of urban pattern into physical components and system requirements (Daniell, K.A. et al, 2005). Functional analysis of system will allow evaluating flood resilience of each system element.

Physical components of the systems are urban functions and services: buildings, streets, parks, water distribution network, shops, industrial buildings, electricity network, religion areas, etc. Some of them represent assets that the city needs to have in order to perform while others provide connections between different system components. Urban functions of a city define physical components that urban system needs to provide as fundamental needs to residents. The physical component of a city has spatial extension and the expression is through units ( $m^2$ ). There are nine main urban functions, which urban system needs to have in order to fulfil requirements related to integral need provided to residents. The urban functions are listed as follows:

- houses (individual or collective),
- educational areas (for local and non-local education services),
- food (area for food storage),
- work areas (areas for industry and areas for non-industrial activities),
- areas established for location of police, fire brigade and rescue services (on local level), health areas (hospitals on local and non-local level),
- areas for leisure and tourism (on local and non-local level) and
- areas for religion activities (churches and cemeteries).

The city services give connectivity between physical components. Services in the city gives functionality to urban features (e.g. the function of a house is to provide space for living).

#### 3.1 Flood Resilience Index (FRI)

The need for index introduction comes from the intent to have a compact presentation of resilience. The index is represented by number and describes the **level of flood resilience in analysed area and for certain flood characteristics with value from 0 to 5.**

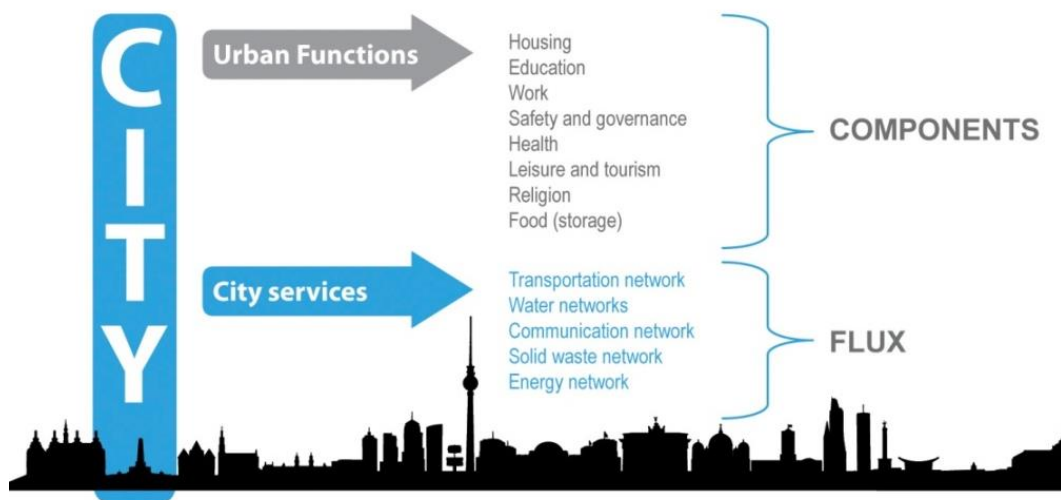


Figure 4. Mapping of the city according to urban functions and services

Slika 4. Mapiranje urbanih sredina na urbane funkcije i servise

This way of presentation comes from considering resilience as a characteristic by definition and represents **ability to accept** a disturbance up to some level. This ability is defined up to the level where the system is able to organize itself and preserve the structure and function. Reflected in urban systems this means that resilience is defined up to the level that urban structure and urban community are able to accept disturbance, preserve the ‘level of functioning’, organize and recover from it.

To measure flood resilience in urban spaces, the index takes into account several indicators based on the notions of the five R’s of resilience regarding flood management: Reflect, Relief, Resist, Response, and Recovery.

There is a different process of index evaluation based on scale dependency. For the small scales: (i) parcel/building and (ii) block scale, index evaluation focuses on the urban function. In the process of calculating the FRI, external and internal requirement are evaluated. The method for macro scale: (i) district and (ii) city scale takes into account whole system through five dimensions.

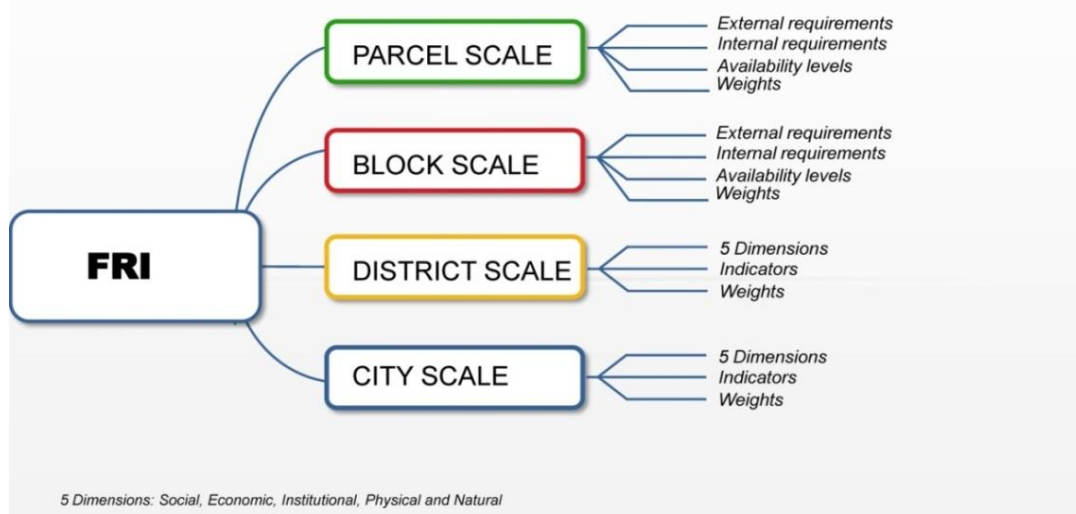


Figure 5. FRI diagram assessment for the different scales

Slika 5. IRP dijagram procene za različite skale

Table 1. FRI evaluation at property scale

Tabela 1. IRP procena za mikro skalu (nivo objekta)

Requirements for urban function	Availability level (0-5)	FRI (property scale)
EXTERNAL SERVICES ( $r_e$ )	0,1,2,3,4,5	$FRI_{building} = \frac{\sum_{i=1}^5 r_{ei} \times w_i + \sum_{i=1}^3 r_{ii} \times w_i}{8}$
Energy	0,1,2,3,4,5	
Water	0,1,2,3,4,5	
Waste	0,1,2,3,4,5	
Communication	0,1,2,3,4,5	
Transport	0,1,2,3,4,5	
INTERNAL SERVICES ( $r_i$ )		
Food availability	0,1,2,3,4,5	
Occupation of urban function	0,1,2,3,4,5	
Access to urban function	0,1,2,3,4,5	
Where: $r_e$ is an external service, $r_i$ is an internal service, $w_i$ is assigned weight.		

### 3.1.1 Micro scale assessment

The evaluation on micro scale takes into account urban functions and services as main elements. The evaluation of FRI for property scale where focus is on urban function and its structure and level of functioning during flooding conditions presents a union of all external and internal requirements presented in table below. Each mapped property is evaluated and presented with flood resilience level.

### 3.1.2 Macro scale assessment

The assessment of Flood Resilience Index on the parcel and block scale is focused on the building (urban function) while for the bigger scale (city/district) the evaluation of Flood Resilience Index is done through five dimensions (natural, physical, economic, social and institutional). These five dimensions describe the physical and social attributes of urban system. One of the main objective criteria was to evaluate urban community and its ability to accept certain disturbance and recover from it. The scheme in Figure 6 presents the flow path for evaluation of FRI for macro scale. The calculation is done using the developed matrix with 91 indicators that are corresponding to different element of flood risk management cycle following already developed 5R concept. Evaluation continues with allocation each indicator to particular dimension (natural, physical, economic, social and institutional).

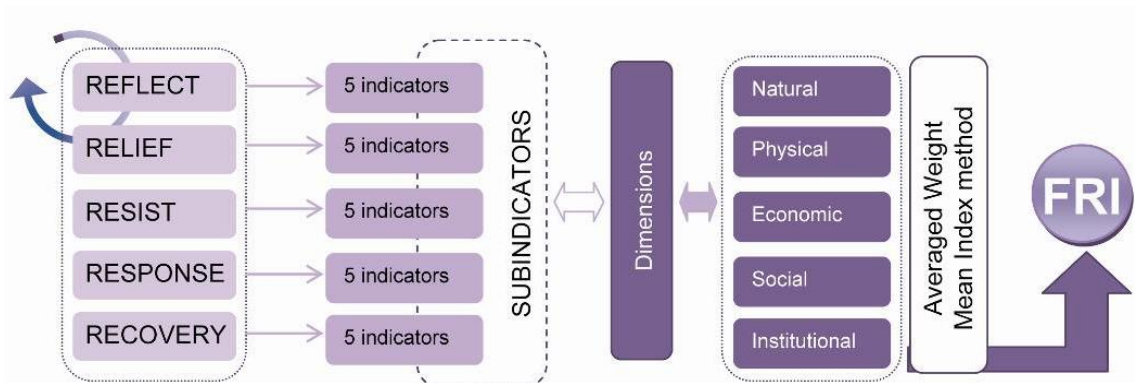


Figure 6. Schematic presentation of FRI evaluation of city/district scale

Slika 6. Šematski prikaz IRP procene za makro skalu (grad/distrikt)

## 4 Results

Developed flood resilience assessment framework with application of FRI is done on French case study area. Application of presented methodology was conditioned with data availability and usually the data had security issues.

The two cities of the Charente-Maritime department, “Les Boucholeurs” is a district of Châtelaiillon-Plage located on the limit of Yves (Figure 7). District count approximately 600 houses and have an important activity in oyster and mussel farming. This coastal case study has area of 6.9km<sup>2</sup> and 6049 residents (based on the 2008 census). Known by the mussel and oyster farms the district Les Bouchelours is located on the south part of the commune Châtelaiillon-Plage and on the north part of commune Yves.



Figure 7. Case study area Châtelaiillon-Plage, France (satellite view, source Google Maps)

Slika 7. Studija slučaja Châtelaiillon-Plage, Francuska (satelitski snimak, izvor Google Maps)

The rare extreme event Xynthia occurred in early morning of 28<sup>th</sup> February 2010 as a result of atmospheric depression created on 27<sup>th</sup> February morning. This storm hit west coast of France causing large-scale floods with huge damages. Beside France, the storm hit Germany and the Benelux countries. In total 65 people died. The significance of this case study area is the extreme event Xynthia and its effect on the social, economic, natural, institutional and physical dimensions. The FRI assessment on property/building scale is performed for the whole case study area. The results obtained within this analysis are transformed in map using GIS. As described within the first part of report the assessment is done based on critical requirements for each urban function mapped in the case study area. Total number of objects classed in urban functions is 2295. The idea of index introduction was to adapt the method and to be able to map results of FRI evaluation in GIS. In this way, the flood resilience through index is comparable with other outputs such as: flood maps, land use, risk maps, vulnerability maps, etc.

FRI evaluation for each urban function on parcel scale is done for the given flood depths as a result of flood modelling done by ARTELIA. The evaluation of FRI for property/building scale is done for each urban function. FRI evaluation started with flood map classification. Here, the existing flood depth is mapped into several intervals: 0.2, 0.5, 1 and flood depth above 1m. Data used for evaluation of FRI are: results of 2D modelling, land use data, statistical data regarding population, job activities, income, gender, etc. Figure 8 presents the flood map as a result of 2D modelling and mapped case study area into urban functions and services.

In Figure 9 the values for FRI of different urban functions for different flood depth are presented. It can be concluded that the influence on FRI values flooded and non-flooded urban functions is significant. Within analysis a FRI is analyzed on building/property scale and city scale. For property scale a map is produced with evaluated flood resilience level for each building in the case study area.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

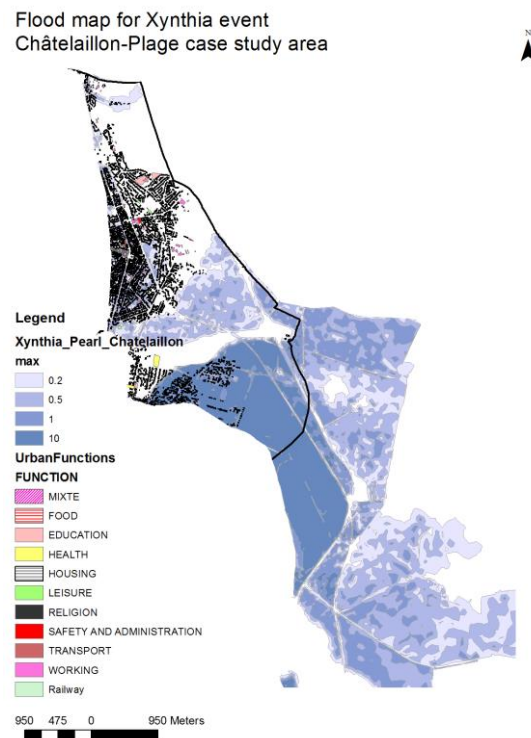


Figure 8. Flood map, for flood initiated by Xynthia storm- Châtelaiillon-Plage, France

Slika 8. Karta poplave, za Xynthia poplavu - Châtelaiillon-Plage, Francuska

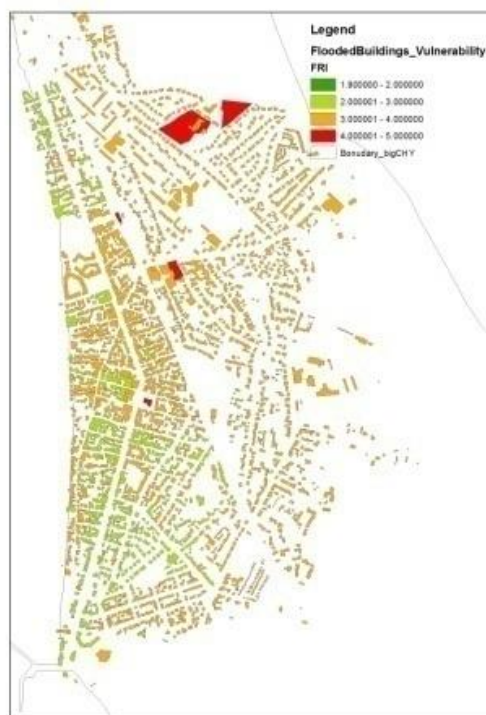


Figure 9: Overall FRI for the property scale, for flood initiated by Xynthia storm- Châtelaiillon-Plage, France

Slika 9: IRP mapiran za svu zgradu, za Xynthia poplavu - Châtelaiillon-Plage, Francuska

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 2: Overall FRI for the city/urban scale, for flood initiated by Xynthia storm- Châtelailon-Plage, France

Tabela 2: IRP za makro skalu (grad/distrikt), za Xynthia poplavu - Châtelailon-Plage, Francuska

Châtelailon-Plage	Indicators	Dimension index $\sum((xi*wi)/ \sum wi)$	Overall index
Natural dimension	2	2.50	2.38
Social dimension	10	2.35	
Economic dimension	16	2.19	
Institutional dimension	24	2.76	
Physical dimension	30	2.12	

Châtelailon-Plage, France

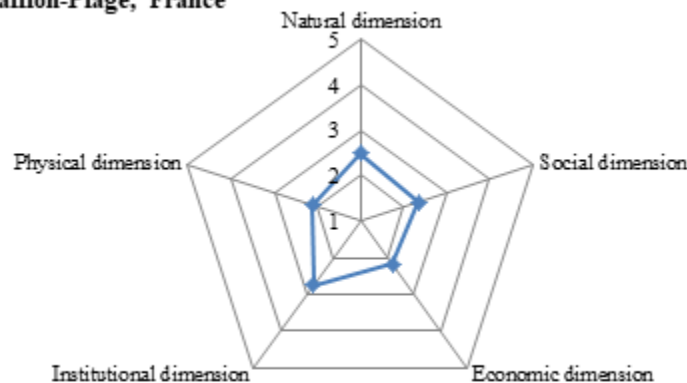


Figure 10: Overall FRI for the city/urban scale, for flood initiated by Xynthia storm- Châtelailon-Plage, France

Slika 10: IRP za makro skalu, za Xynthia poplavu - Châtelailon-Plage, Francuska

### Vulnerability assessment

Beside flood resilience assessment the vulnerability and risk mapping is done for the case study area on property level. Data used for vulnerability assessment is taken from National Institute for Statistics and Economy studies (INSEE). While creating the framework for vulnerability the data availability is crucial. The framework for vulnerability is defined in order to have vulnerability mapping in Esri software. Based on available information about buildings following attributes are available:

- Building type - urban function
- Building height

Vulnerability assessment takes into account *population vulnerability*, *socio-economic vulnerability* and *vulnerability of build environment*. This was chosen in order to have possibility to have spatial representation of results. Each vulnerability parameter has associated impact element.

Impact elements taken into account for population vulnerability (PV) are:

- PV1 - population density,
- PV2 - number of children, senior citizens, invalids,
- PV3 - gender and
- PV4 - mean income

Based on requirement we obtained data from INSEE in the form of tables. For this analysis impact elements or weights are defined arbitrary. Calculation of population vulnerability based on available data is done using relation below.

$$PV = \omega_1 PV_1 + \omega_2 PV_2 + \omega_3 PV_3 + \omega_4 PV_4$$

where values for the weights are:  $w_1=0.25$ ,  $w_2=0.15$ ,  $w_3=0.25$  and  $w_4=0.35$ :

$$PV = 0.25PV_1 + 0.15PV_2 + 0.25PV_3 + 0.35PV_4$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Calculated value for population vulnerability is 4.8. Since we did not use population data available for each building this value will be assigned to overall vulnerability.

## Socio-economic vulnerability (SE)

Disasters affect assets through direct damages and the flow for the production through indirect damages. Hence, the socio-economic dimension suffers from both direct and indirect losses. Since we want to have vulnerability mapped only direct losses will be considered for this analysis. Predefined vulnerability levels are from 1 to 5 where level 5 corresponds to high vulnerability and level 1 to very low vulnerability. The different vulnerabilities are assigned to existing urban functions. The values are presented in Table 3. Overall vulnerability is presented with the relation:

$$V = PV + SE$$

Following this the vulnerability is calculated for each building in the case study area. The maps below show vulnerability mapping for the Xynthia event in Chantellailon-Plage.

$$V = \frac{V_p + V_{SE}}{2}$$

## Hazard mapping

Based on different flood depths the classes are defined (Table 4) and the case study area is covered (Figure 13).

## Risk assessment

Numeric value of risk is calculated as a product between vulnerability and hazard and divided by five.

$$R = \frac{V \times HM}{5}$$

where  $R$  is representing risk with the value range from 1 to 5 where 5 is high risk and value 1 is low risk (Figure 14).

Table 3: Assigned vulnerability levels for urban function mapped for case study

Tabela 3: Mapirani nivoi osetljivosti za urbane funkcije u studiji slučaja

	Urban functions	Vulnerability level
1	Housing	5
2	Education	4
3	Food	4
4	Working	5
5	Safety	5
6	Leisure	2
7	Religion	2
8	Health	5
9	transportation	4
10	railway	3
11	mixte	5



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

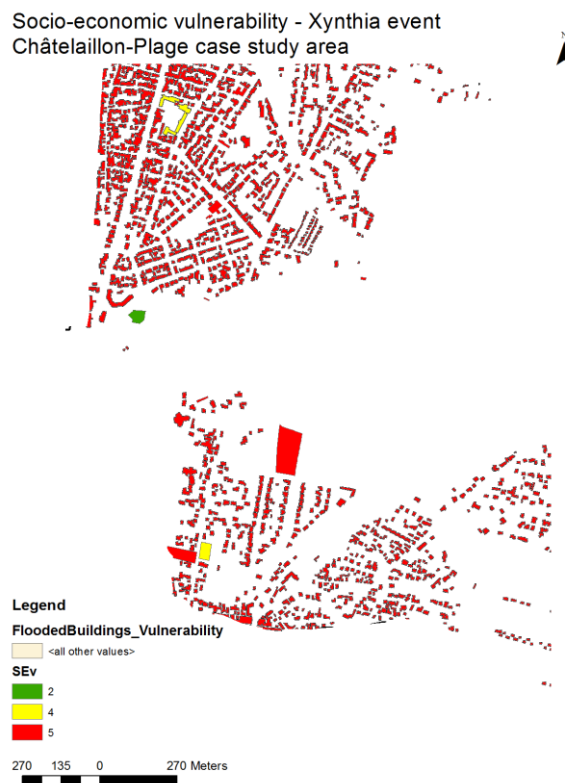


Figure 11: Socio-economic vulnerability mapped, for Xynthia event, Chantellailon-Plage, France

Slika 11: Mapirana socio-ekonomska osetljivost mapirana, za Xynthia poplavu - Châtelaillon-Plage, Francuska

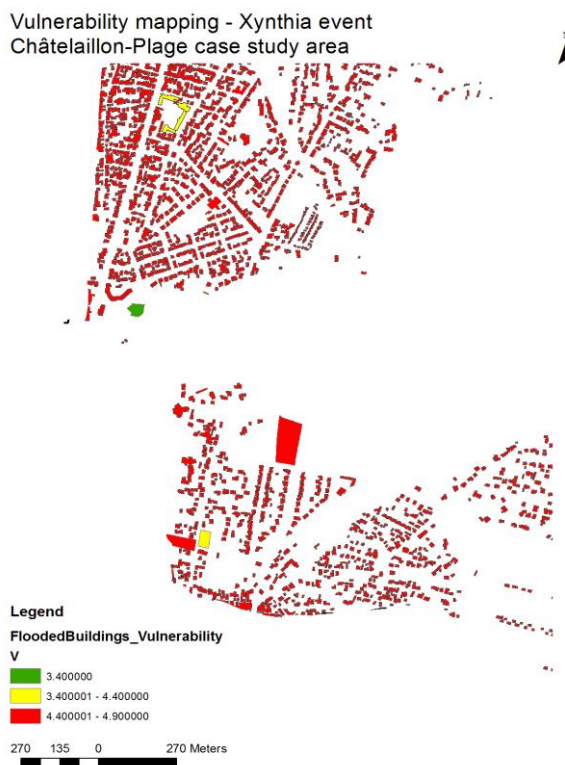


Figure 12: Vulnerability mapping for Xynthia event, Chantellailon-Plage, France

Slika 12: Mapirana osetljivost, za Xynthia poplavu - Châtelaillon-Plage, Francuska

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 4: Defined zones for hazard mapping

Tabela 4: Definisanje zona za mapiranje rizika

Flood depth	Vulnerability level	
0	1	Zone 1
0.2	2	Zone 2
0.5	3	Zone 3
1	4	Zone 4
5	5	Zone 5

Hazard mapping - Xynthia event  
Châtellailon-Plage case study area



Figure 13: Hazard mapping (zoning) for Xynthia event, Chantellailon-Plage, France

Slika 13: Mapiranje rizika (zoniranje), za Xynthia poplavu - Châtellailon-Plage, Francuska



Figure 14: Risk map of case study area for Xynthia event, Chantellaillon-Plage, France

Slika 14: Mapa rizika studije slučaja, za Xynthia poplavu - Châtelaillon-Plage, Francuska

## 5 Communication and key stakeholders

Work done by now is presenting our analysis regarding flood modelling, vulnerability and risk mapping, and resilience assessment, where mapping within GIS is arranged to enhance communication between key stakeholders. In the experience gained during meeting with the stakeholders in the case study area the maps present very good way of presentation. In this way we are able to show on the map each building in the case study with calculated direct damage based on the flood map and available depth damage curves. Also for each building the vulnerability, risk and resilience level is evaluated. This helps a lot in the communication with stakeholders and as a part of decision making process. The purpose of presented methodology is to minimize the flood damages where possible. In most of the causes damages driven by floods can be minimized if urban system: already implemented some of the existing active and passive protection measures. A community within the system is able to organize itself and to prevent more damages; the shape of a system can also be adapted to receive some disturbance and to be able to learn from past events.

The framework is potentially applicable to any urban system on any geographic scale. Connections and dependences between main city elements and natural hazards (in this case urban

flooding process) have to be defined. With its implementation, social, economic, political and cultural relations within city will be more visible and better established. The approach should uncover the role of physical components of urban system and population in relation to urban flooding processes. A further strategy focuses on simulation of community losses and recovery measures. As a major challenge that faces urban systems nowadays, the research on resilience prioritizes in following years.

## 6 Discussion, Conclusion and Recommendation

The flood resilience concept brings a new philosophy to urban systems: “living with floods”. The approach give recommendations that transform existing organization of urban system and creates a system that is accepting the water with minimal damages, system that is able to recover in a minimum time frame and system that is able to have a certain level of functioning during the flood. The imperative is to acknowledge the importance of social, institutional and economical component when managing flood risk. The Flood Resilience Index (FRI) represents a tool for stakeholders and decision makers. Different weights in matrix for evaluation FRI on macro scale highlight the most important variables that are contributing higher level of resilience for the certain case study area.

An outcome is improved flood resilience by use of diverse regulations such as institutional, urban planning and design, architectural design, public participation, financial stimulation, etc. A majority of flood risk management (FRM) strategies are based on historical events by depending on resistance measures. Accepting resilience concept urban communities are moving to the risk culture. This trend of development in resilience evolution is graphically presented in Figure 15. The presented flood resilience curves for urban system highlight the nonlinear characteristic of the whole resilience concept. This theoretical curve tends to present how development of urban system has influenced flood risk.

It starts with agricultural age where the resilience is constant due to not signify development of assets, landscape and concentration of population. With the beginning of industrial time the changes in the landscape are significant. The assets becoming more sophisticated which contributes to higher concentrations of people. The structure of urban system starts to change and big challenges are posed to original landscape. Flood risk starts to increase and strategies were developed to reduce flood frequency and flood hazard. The theoretical curve is presented in Figure 15. The expansion of urban landscapes on behalf of environment started to be more dominant. The flood vulnerability becomes higher and the urban communities realized that the way forward is in increased flood resilience.

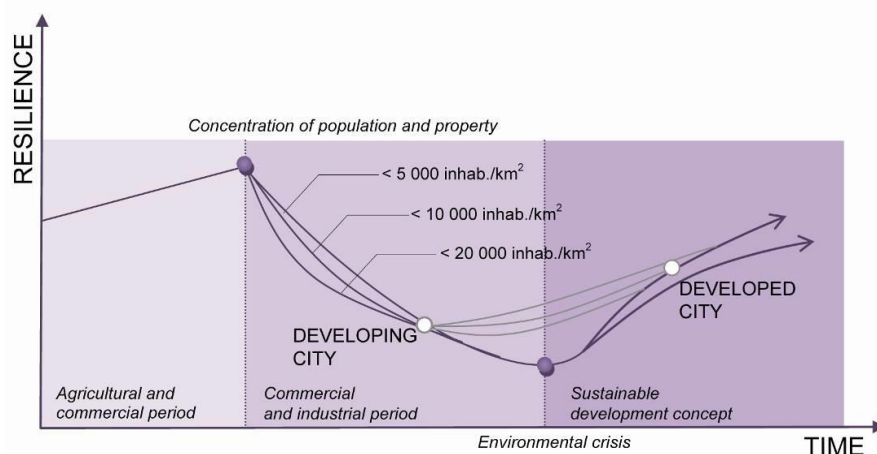


Figure 15: Evolution of flood resilience curve

Slika 15: Razvoj krive rezilijentnosti na poplave

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

In conclusion, the importance is in the possibility to use experience from flood resilience urban systems and avoid huge flood damages and dysfunction. The developing urban systems can find a good practice and good paths towards flood resiliency without reaching a low level of functioning.

## Acknowledgement

The research work presented here has received funding from the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant agreement n° 603663 for the research project PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions). The research and its conclusions reflect only the views of the authors and the European Union is not liable for any use that may be made of the information contained herein.

Project CORFU (Collaborative research on flood resilience in urban areas) project was funded by the European Commission through Framework Programme 7, Grant Number 244047

Municipality Nice Cote d'Azur

Municipality Châtellailon-Plage

Engineering, scientific teams in case study areas and key stakeholders

## References

1. APFM (2017), Selecting the measures and designing strategies for integrated flood management
2. Archontakis D. (2006). Rethymno of the future. Rethymno, Kalaitzakis.
3. Archontakis D. (2013) The Old Town of Rethymno: from a run down ghetto to growth leverage of Rethymno. Rethymno
4. Ashley R., Blanksby J., Maguire T., Leahy T. (2010). Frameworks for adapting to flood risk: experiences from the EU's flood resilient city project, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). <http://www.sustainable-environment.brad.ac.uk> (accessed 29 November 2012)
5. Balica, S. F., Popescu, I., Beavers, L., & Wright, N. G. (2013). Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: a comparison. *Environmental Modelling & Software*, 41, 84-92
6. Batca, Jelena, Gourbesville, Philippe, and Hu, Fang-Yu.: "Methodology for Flood Resilience Index", International Conference on Flood Resilience Experiences in Asia and Europe – ICFR, Exeter, United Kingdom, 2013.
7. Bharwani, S., Magnuszewski, P., Sendzimir, J., Stein, C., Downing, T.E., 2008. Vulnerability, Adaptation and Resilience. Progress Toward Incorporating VAR Concepts into Adaptive Water Resource Management Report of the NeWater Project – New Approaches to Adaptive Water Management under Uncertainty. Report of the NeWater Project. Stockholm Environment Institute, Oxford Centre.
8. Carpenter S., Walker B., Anderies J.M. and Abel N. (2001). From metaphor to measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems*, 4, 765-781.
9. Daniell, K.A. et al (2005) – Integrated urban system modelling: methodology and case study using multi-agent systems
10. De Bruijn, K.M. 2004a. Resilience and flood risk management. *Water Policy*. 2004 (6) pp. 53-66.
11. Klein R.J.T., Smit M.J., Goosen H. and Hulsbergen C.H. (1998). Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics or Dutch Dikes? *The Geographical Journal*, 164(3), 259-268.
12. Kreimer, A., Arnold, M., & Carlin, A. (2003). Building safer cities: the future of disaster risk. World Bank Publications
13. Krywkow, J., Filatova, T., van der Veen, A., 2008. Flood risk perceptions in the Dutch province of Zeeland: does the public still support current policies? In: Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W., Harrop, J. (Eds.), *Flood Risk Management: Research and Practice*, CRC Press/Balkema Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Science. Taylor & Francis Group, London, pp. 1513–1521.
14. Makropoulos C., Tsoukala V., Belibbasakis K., Lykou A., Chondros M., Gourgoura P., Nikolopoulos D. (2015) Managing flood risk in coastal cities through an integrated modelling framework supporting stakeholders' involvement: the case of Rethymno, Crete (abstract submitted and accepted). Paper presented at the 36th IAHR World Congress 2015, Hague, Netherlands, 28 June -3 July 2015

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

15. Makropoulos, C., Tsoukala, V., Lykou, A., Chodros, M., Manojlovic, N. and Vojinovic, Z. (2014) Improving resilience against extreme and rare events in coastal regions: an initial methodological proposal - The case study of the city of Rethymno. International Conference ADAPTtoCLIMATE, 27-28 March 2014, Nicosia, Cyprus
16. Munich Reinsurance Company (2000). Annual Review of Natural Catastrophes 1999. Munich
17. RAJIB SHAW and IEDM Team (2009) – Climate Disaster Resilience: Focus on Coastal Urban Cities in Asia (Downloadable at [http://www.unescap.org/idd/events/2009\\_EGM-DRR/Japan-Rajib-Shaw-CLIMATE-DISASTER-RESILIENCE.pdf](http://www.unescap.org/idd/events/2009_EGM-DRR/Japan-Rajib-Shaw-CLIMATE-DISASTER-RESILIENCE.pdf))
18. Sayers P., Gouldby B.P., Simm J.D., Meadowcroft I. and Hall J. (2003). Risk, Performance and uncertainty in flood and coastal defence – A review. R&D Technical report FD2302/TR1.
19. Sendzimir J., Magnuszewski P., Flachner Z., Balogh P., Molnar G., Sarvari A. and Nagy Z. (2007). Assessing the resilience of a river management regime: informal learning in a shadow network in the Tisza River Basin. *Ecology and Society*, 13(1): 11. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art11/>
20. UN/ISDR, 2004 : United Nations, International Strategy for Disaster Reduction, <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>
21. Vis M., Klijn F., and Van Buuren M. (eds.) (2001). Living with Floods, Resilience Strategies for Flood Risk Management and Multiple Land Use in The Lower Rhine River Basin. Executive Summary. NCR-report 10-2001. NCR, Delft.
22. Vis M., Klijn F., de Bruijn K.M. and Buuren M. van (2003). Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands. *International journal of river basin management*, 2003/1, 33-40.vomFebruar 1962, School authority, 1962(In German)

## Development of real-time flood forecasting and warning system for the Sava River basin

Klaas-Jan van Heeringen<sup>1</sup>, Hanneke Schuurmans<sup>2</sup>, Mihailo Anđelić<sup>3</sup>, Victor Simončić<sup>4</sup>, Imra Hodzic, Sabina Hadziahmetovic<sup>5</sup>

**ABSTRACT:** Disastrous floods in May 2014 in Sava River basin resulted in 79 casualties and substantial economic damage in Croatia, Bosnia, Herzegovina, and Serbia. Assessments of the total damage in the area range up to 3.8 billion Euros. Distressing is the fact that besides flooding the Balkan region recently suffered from severe droughts as well. In order to be more resilient to flood and drought events, data and model output sharing is key. Better information will lead to better decisions. The Flood Forecasting and Warning System (Sava-FFWS) in which five countries jointly work together is at the forefront of transboundary cooperation. The FFWS, which is based on the well-known Delft-FEWS software, lends ample data and information enabling ultimately the decision makers to make right management decisions and implement operational measures to prevent and mitigate severe flood and drought situations on the basis of reliable forecasts of flows and discharges with a long lead time. The paper outlines key components of the Sava-FFWS illustrated with concrete application examples.

**Key words:** real-time flood forecasting, Delft-FEWS, Sava river basin, Sava HIS, hydrological models, hydraulic models, numerical weather prediction, water levels, discharges, precipitation, temperature, snow, GIS data, dissemination

## Razvoj sistema za prognozu i upozorenje na velike vode u realnom vremenu za sliv reke Save

**APSTRAKT:** Katastrofalne majske poplave iz 2014. godine u slivu reke Save pogodile su delove Bosne i Hercegovine, Hrvatske i Srbije i ostavile iza sebe pustoš: 79 osoba je izgubilo život a ogromna materijalna šteta je procenjena na preko 3.8 milijardi evra. Velika nevolja je i to što u poslednje vreme značajne delove Balkana često pogađaju i žestoke suše. Da bi se u regionu povećala otpornost na poplave i suše, od ključnog značaja je da se međusobno razmenjuju podaci osmatranja i rezultati modela za prognozu i najavu ovih fenomena – jer bolje informacije sledstveno rezultiraju u boljim odlukama i rešenjima. Sistem za prognozu i upozorenja na velike vode u slivu reke Save (Sava-FFWS) u okviru kojeg 5 savskih zemalja rade zajedno predstavlja odličan primer dobre i višestruko korisne prekogranične saradnje u međunarodnom slivu. Za razvoj Sava-FFWS korišćen je dobro poznati Delft-FEWS softverski paket a razvijeni sistem omogućuje svestrane analize procesa oticanja i hidrološke prognoze u slivu reke Save, sa dovoljno dugim prognoznim periodom; kao takav, on daje savskim državama važan alat za donošenje pravilnih odluka i preduzimanje blagovremenih mera usmerenih na predupređenje ili ublažavanje posledica od poplava i suša u slivu reke Save. U radu su prezentirane glavne karakteristike Sava-FFWS i konkretni primeri primene.

**Ključne reči:** prognoza velikih voda u realnom vremenu, Delft-FEWS, sliv Save, Sava HIS, hidrološki modeli, hidraulički modeli, numerička prognoza vremena, vodostaj, proticaj, padavine, temperature, sneg, GIS podaci, diseminacija prognoza

<sup>1</sup> Deltares, [klaasjan.vanheeringen@deltares.nl](mailto:klaasjan.vanheeringen@deltares.nl)

<sup>2</sup> Royal HaskoningDHV, [hanneke.schuurmans@rhdhv.com](mailto:hanneke.schuurmans@rhdhv.com)

<sup>3</sup> Mihailo Anđelić, [mandjelic007@yahoo.co.uk](mailto:mandjelic007@yahoo.co.uk)

<sup>4</sup> Eptisa, [imra.hodzic@gmail.com](mailto:imra.hodzic@gmail.com), [viktor.simoncic@gmail.com](mailto:viktor.simoncic@gmail.com)

<sup>5</sup> HEIS, [sabina.hadziahmetovic@heis.ba](mailto:sabina.hadziahmetovic@heis.ba)

### 1 Introduction

The Sava River basin covers an area of approximately 97,700 km<sup>2</sup> including large parts of Bosnia and Herzegovina, Croatia, Montenegro, Serbia and Slovenia (see Figure 1 below). It is the largest tributary by discharge to the Danube River, with an average discharge of about 1700 m<sup>3</sup>/s, which accounts for almost 30% of the Danube's total discharge at their confluence in Belgrade. The length of the Sava River, from its source in the western Slovenian mountains to the confluence with the Danube River, is well over 900 km [ISRBC 2017].

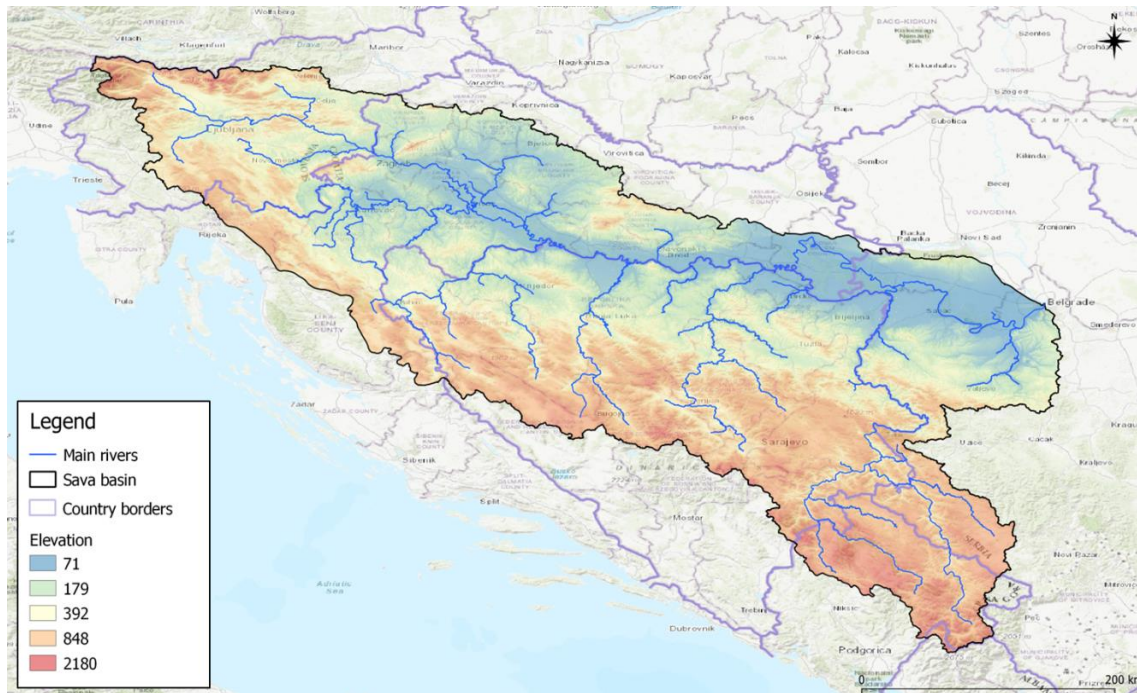


Figure 1. Sava River basin (data displayed on map is from the Sava GIS portal)

Slika 1. Sliv reke Save (podaci prikazani na mapi preuzeti sa Sava GIS portala)

Disastrous floods in May 2014 in Sava River basin resulted in 79 casualties and substantial economic damage in Croatia, Bosnia, Herzegovina, and Serbia [ICPDR 2015]. Assessments of the total damage in the area range up to 3.8 billion Euros. Distressing is the fact that besides flooding the Balkan region recently suffered from severe droughts as well. In order to be more resilient to flood and drought events, data and model output sharing is key. Better information will lead to better decisions. The Flood Forecasting and Warning System (Sava-FFWS) in which five countries jointly work together is at the forefront of transboundary cooperation. This system performs a number of sophisticated tasks and provides ample information to users that enables them to make right management decisions and implement operational measures to prevent and mitigate severe flood and drought situations on the basis of reliable forecasts of flows and discharges with a long lead time of forecast.

Starting from June 2016 onward, Deltares, along with Royal HaskoningDHV, Eptisa, the Hydro-Engineering Institute of Sarajevo and Mihailo Anđelić has been implementing the World Bank-funded regional project entitled “Joint Flood Forecasting and Management in the Sava River Basin”. The project’s main objective is to develop and establish an integrated real-time flood forecasting and warning system for the entire Sava River Basin (the so called Sava FFWS), which is jointly operated and maintained by the 5 Sava riparian countries (Bosnia and Herzegovina, Croatia, Montenegro,



Serbia and Slovenia) in close cooperation, coordination and support of the Secretariat of the International Sava River Basin Commission (ISRBC).

Operational forecasting is not only dependent on the availability of a proper forecasting system, but also on skilled, well-trained staff and good coordination between its users. Because of the complex hydrographic network of the Sava basin, many hydrological links exist between the riparian countries, while some of these links are multiple in nature. This is also reflected in the large number of beneficiary institutions (19 in total) involved in the project. This means that there is a strong need for international cooperation and requires to set-up a mature organization with well-defined and mutually agreed upon set of working procedures.

## 2 Stakeholders

The five riparian countries of the Sava River basin are Bosnia and Herzegovina, Croatia, Montenegro, Serbia and Slovenia. These countries with the exception of Montenegro, are members of the International Sava River Basin Commission (ISRBC) that has been established to implement the Framework Agreement on the Sava River Basin (FASRB). The ISRBC Secretariat is the administrative and executive body of the ISRBC. In addition to the ISRBC, Table 1 provides an overview of the national organizations that are (direct) stakeholders in the Sava FFWS project.

For efficient stakeholder interaction, project management and decision making the following organizational structure has been established within the project:

- Steering board.
- International Working Group.
- Country Working Groups.

The Steering Board, the International Working Group and the Country Working Groups were established for the general purpose of management, monitoring and coordination of the Sava FFWS project implementation.

The purpose of the Steering Board has been to monitor and make decisions about the FFWS project and its progress. The Steering Board members have been responsible for final decisions and resolving issues arising. They also comment on and approve conclusions of the International Working Group, and share their opinion about the deliverables with the World Bank.

The purpose of the International Working Group has been to harmonize and verify the input of the Country Working Groups, discuss international elements of the Sava FFWS and test the milestone products before the products were considered sufficiently mature to be presented at the Steering Board meetings.

The general purpose of the Country Working Groups has been to secure the input of the local interests, knowledge and workflows of each country.

Nominated representatives from all five riparian countries have actively participated in the work of the above three project management bodies. As far as it has been practical and possible, the countries' specialists who were already active in the existing ISRBC technical bodies have also been nominated to serve in these project bodies.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 1. Stakeholders in the Sava-FFWS Project

Tabela 1. Učesnici u realizaciji Sava-FFWS projecta

Country	Organization	Role
Bosnia and Herzegovina	Federal Ministry of Agriculture, Water Management and Forestry	Policy making
	Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management of Republic of Srpska	Policy making
	Federal Hydrometeorological Institute	Operational forecasting for BiH
	Republic Hydrometeorological Institute	Operational forecasting for BiH
	Public Institution JU "Vode Srpske"	Operational forecasting for BiH
	Sava River Watershed Agency	Operational forecasting for BiH
	Brčko District Government: <ul style="list-style-type: none"> <li>Department of Public Safety District,</li> <li>Department for agriculture, forestry and water management.</li> </ul>	Direct use of forecasts
Croatia	Ministry of Environment and Energy	Policy making
	Meteorological and Hydrological Service	Operational forecasting for Croatia
	Croatian Waters	Public water management institution, legal entity for water management, in cooperation with DHMZ developing and making the forecasts
Montenegro	Ministry of Agriculture and Rural Development, Water Management Directorate	Policy making and water management, makes use of forecasts
	Institute of Hydrometeorology and Seismology of Montenegro	Operational forecasting for Montenegro
Serbia	Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management, Water Directorate	Policy making
	Republic Hydrometeorological Service of Serbia	Operational forecasting for Serbia
	Public Water Management Company "Srbijavode"	Public water management organization, makes use of forecasts
	Public Water Management Company "Vode Vojvodine"	Public water management organization, makes use of forecasts
Slovenia	Ministry of the Environment and Spatial Planning	Policy making
	Slovenian Environment Agency	Operational forecasting for Slovenia
	Slovenian Water Agency	Public water management organization, makes use of forecasts
-	International Sava River Basin Commission	Coordination

### 3 Flood Risk Management and Operational Forecasting

Disaster Risk Management (DRM) as well as Flood Risk Management (FRM) itself can be presented in the cycle (shown in Figure 1) and it consists of 4 phases: response, recovery, mitigation and preparation. The response phase starts right after a disaster/flooding and includes all emergency activities related to rescue, first aid as well as evacuation. Through restoration and reconstruction the second phase of recovery starts, where all activities should be implemented based on disaster/flood risk reduction. The third phase is a phase of mitigation. This phase consists of structural and non-structural measures and activities, which should mitigate impacts of all future natural hazards/floods, like dikes construction. The last phase is related to the preparedness for upcoming flooding events.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

This phase covers operational flood forecasting and setting up of early warning systems. By building the Sava FFWS and capacity development, Sava River basin countries are implementing one of the non-structural measures in order to become more resilient to future possible upcoming events.

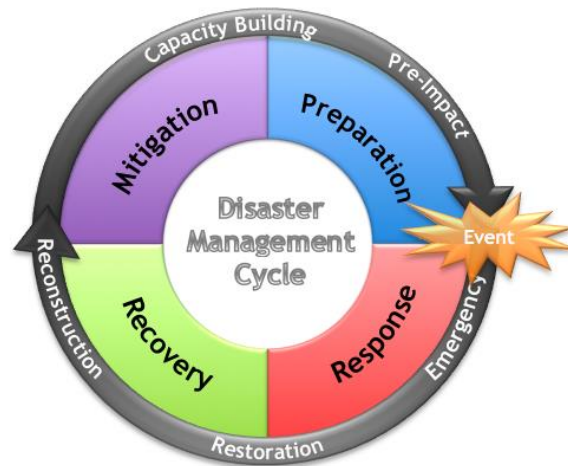


Figure 1. The Disaster Risk Management cycle

Slika 2. Ciklus upravljanja rizikom od katastrofa

One of the most important factors regarding real-time flood forecasting and warning systems is lead time of forecasts and warnings. WMO (2011) issued a separate manual on flood forecasting and warning. As stated in this publication, there are no hard and fast rules regarding the provision of lead time for warnings. The requirement depends on specific operational needs and rests on a number of considerations, principally:

- The size of the catchment and nature of flooding: large catchments with extensive flood plains have slow response time, while, conversely, headwater catchments in steep hilly areas afford little potential to provide advance warning of flooding;
- The nature of the risk and impacts, and whether or not evacuation or physical protection (for example sandbagging, embankment strengthening) needs to be provided;
- Whether or not staged alerts and warnings are used.

**Lead times are dependent not only on the appropriate action related to the flood warning, but also to the type and accuracy of information available.**

Figure 2 shows schematically the source of information needed for flood forecasting, projected on the lead time scale bar.

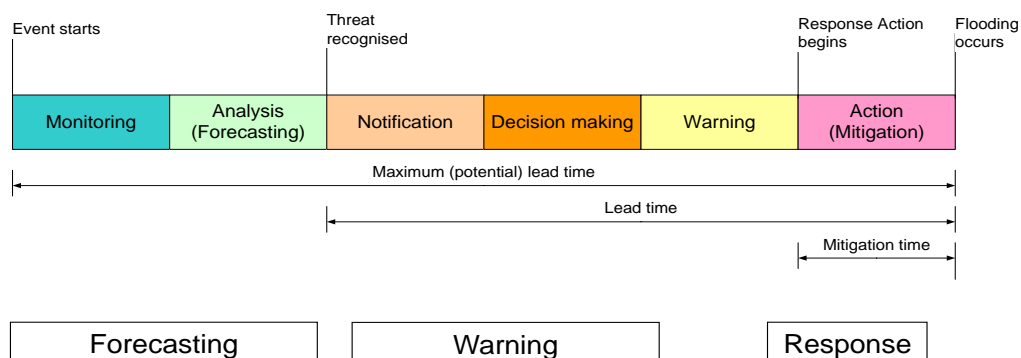


Figure 2. Lead times available for forecasting, warning and mitigation response

Slika 3. Vreme raspoloživo za prognozu, upozorenje i preduzimanje potrebnih mera

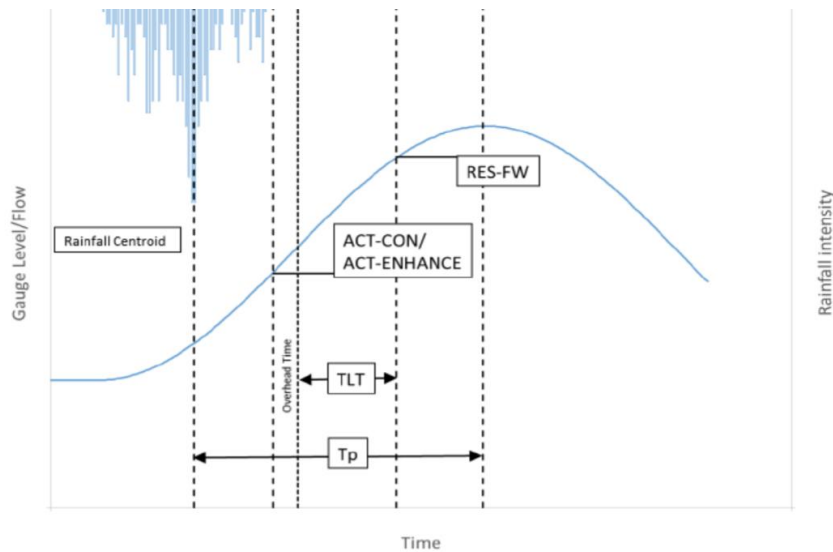
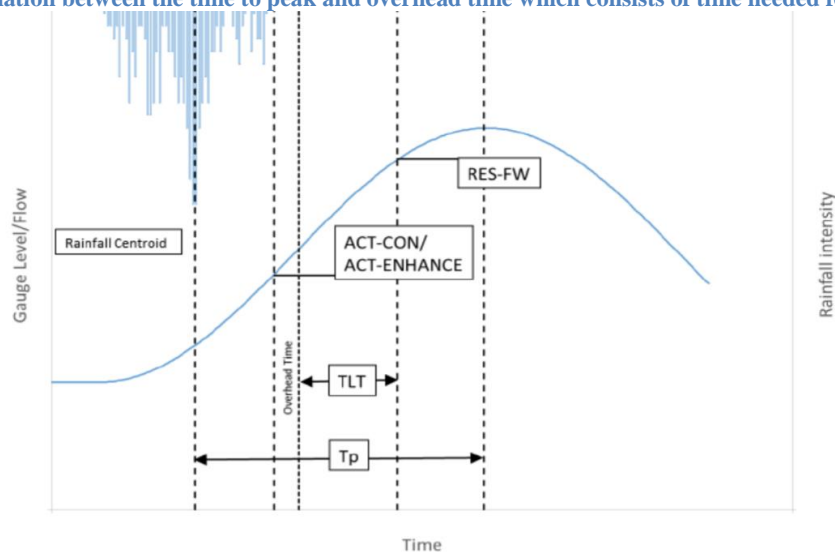


Figure 3. Theoretical illustration of target lead time (TLT) compared to time to peak ( $T_p$ ), including relevant flood warning thresholds (Environment Agency, 2017)

Slika 4. Ilustracija ciljnog prognosnog vremena (TLT) u poređenju sa vremenom do špica hidrograma ( $T_p$ ), uključujući i dva relevantna praga za izdavanje upozorenja o nailasku velikih voda (Environment Agency, 2017)

The target lead time, is a combination between the time to peak and overhead time which consists of time needed for



the forecaster and the warner (

Figure 3). Target lead times are often agreed in consultation with civil protection authorities, or defined nationally as part of a service level agreement. In general, the complexity of forecasting and early warning systems is reflected in the interdependency between forecast accuracy and timeliness (lead time).

The development of the accuracy curve in relation to lead time depends on two main aspects:

1. Accuracy of meteorological forecast;
2. Accuracy of hydrological/hydraulic model and thus flood forecast.

The inclusion of hydrological/hydraulic models, fed by quantitative precipitation forecast, is essential as rainfall forecast is not the same as forecasting of floods. Based on the outcomes of the hydraulic/hydrological models and the setup of thresholds for warnings per location one is able to operationally monitor and disseminate the flood warnings.

## 4 System setup

### 4.1 Delft-FEWS software

In developing the Sava FFWS, the Consortium has used the well-known Delft-FEWS as the core software package [Werner, 2013]. Delft-FEWS is made by Deltares, the Netherlands, and consists of a sophisticated set of configurable modules for building a hydrological forecasting system that can easily be customized to suit specific users' needs and requirements; it is freely available expert software that handles efficiently large amounts of data, integrates various hydrological and/or hydraulic models with the real time observations and the most recent meteorological forecasts, and enables consistent data quality control, standardized work processes, visualization and reporting. In addition, the Delft-FEWS can orchestrate massive computations - on dedicated hardware and/or in cloud - and allows for remote collaboration between multiple experts and parties working and interacting with the same data. This means the countries independently can use the models in operational mode, forced with the different meteorological input used by the riparian countries.

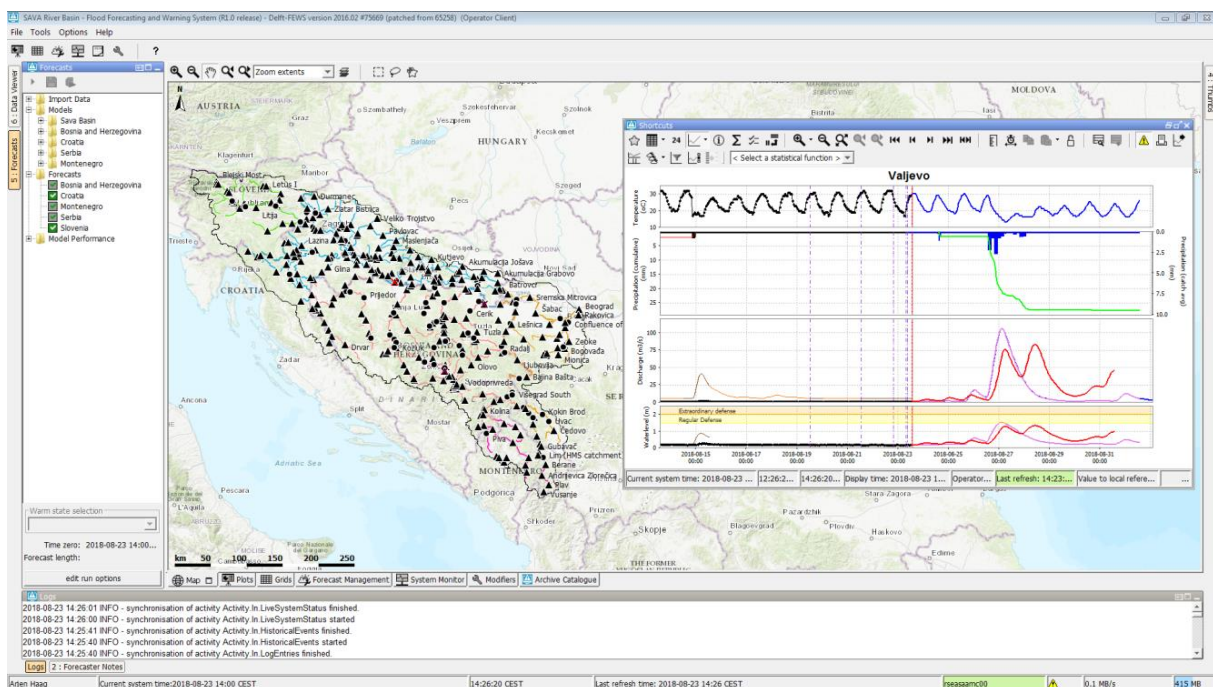


Figure 1. Sava FFWS user interface, showing GIS map with warning status per forecasting location detailed hydrographs, meteorological and hydrological parameters like precipitation, temperature as well as observed and forecasted discharges and water levels (profile Valjevo in this example)

Slika 5. Korisnički interfejs Sava FFWS sa GIS mapom, pragovima za upozorenje na velike vode i grafičkim prikazom osmotrenih i prognoziranih hidroloških i meteoroloških parametara uključujući osmotrene i prognozirane vodostaje i proticaje (profil Valjevo u ovom primeru)

As of February 2018, the Sava FFWS is in an advanced stage of development with one primary and three backup systems and is scheduled to be completed by the end of October 2018, by which time it will start to be routinely used and maintained in the whole region.

### 4.2 Sava FFWS as client-server application and its hosting

The post project organization of the Sava FFWS, concerned in particular with its support and maintenance, depends to a degree on the system architecture and the agreed arrangements for hosting

the Sava FFWS. To this effect, the Sava FFWS consists of four hosting locations, i.e. one Primary and three Backup locations. Under normal conditions, the Backup systems will retrieve data from the Primary system through an automatic data synchronization process. The Primary system is the only system that is used to carry out operational tasks under normal circumstances, such as the running of forecasts or the uploading of changes to the configuration. A separate set of servers is configured to host the additional functionality, such as the archive and web dissemination.

The responsibilities with respect to hosting of these systems have been distributed as follows:

- ARSO Slovenia: Primary System and Sava HIS-RT
- AVP Sava Bosnia and Herzegovina: 1<sup>st</sup> Backup System
- DHMZ Croatia: 2<sup>nd</sup> Backup System
- RHMZ Serbia: 3<sup>rd</sup> Backup System
- ISRBC Secretariat: Archive, Web Portal and Sava HIS

For the purpose of the future development and for the testing of new features of the Sava FFWS before their inclusion into the operational system, a 100% independent operational testing system of the Sava FFWS is available, next to a Stand-Alone (SA) application. This SA runs on any suitably configured desktop computer, and has no interaction with any other application or the live system.

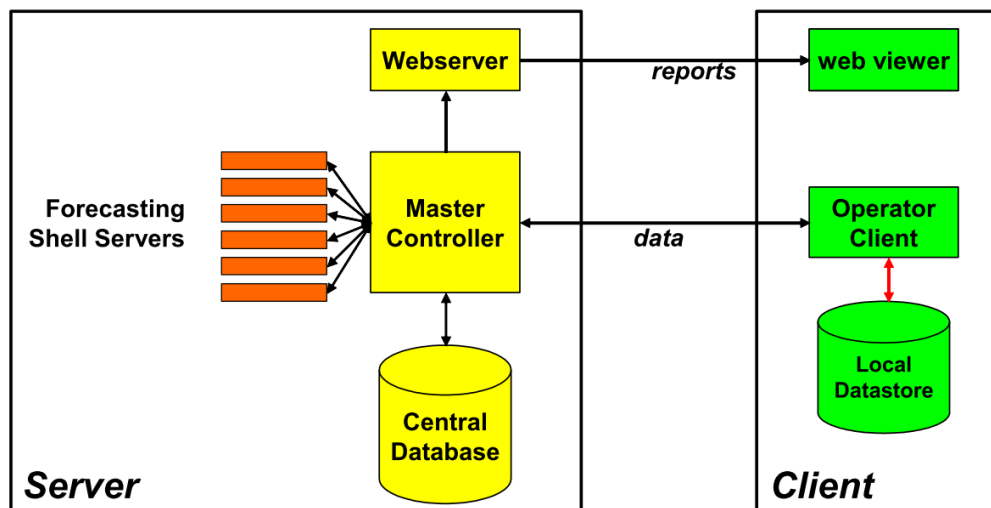


Figure 2. Components in a Delft-FEWS client-server application

Slika 6. Delft-FEWS komponente u klijent-server aplikaciji

The Delft-FEWS software comprises the several components as illustrated in Figure 2. Note that this figure just shows the components of one single system. These components can be separated in two groups: components on the server and components on the client.

On the server side the main component is the Master Controller (MC). This is in fact the agent that monitors status of all components and distributes tasks to the so-called Forecasting Shell Servers (FSS). Actual tasks, like importing data or running of models are performed on the FSS. The system uses a central database which can be Oracle, MS SQL Server or PostgreSQL.

On the client (a laptop or PC where the users use the system), the so-called Operator Client (OC) is run. This is a thick-client, Java based application, that connects to the Master Controller through https over the internet. Data is read and cached in a local data repository (referred to as the LocalDataStore).

### 4.3 Operational data and numerical weather predictions

The Sava FFWS connects to the real-time operational telemetry data which is automatically collected in the already existing Sava HIS application. Sava HIS is hosted by the ISRBC and provides

a web service based on the WaterML2 protocol. The telemetry data consist of water levels and discharges at 345 fluvial gauges and precipitation, air temperature and snow depths at 257 meteorological gauges. Automatic validations on doubtful or unreliable measurements are done, based on exceeding of hard or soft validation limits, same readings or too high rates of changes. Thresholds based on operational warning levels have been implemented to visualize warnings.

The weather forecast is derived from various Numerical Weather Prediction (NWP) products that provide up to 5-day and 10-day forecasts of precipitation, temperatures, snow information, soil moisture etc. The NWPs include Aladin, NMMB, WRF and ECMWF deterministic models, next to the ECMWF ensemble forecasts for the whole basin. The NWP products and their characteristics have been listed in Table 1.

The relevant meteorological information is transformed to catchment average data that is used as input to the hydrological models. Various aggregations have been realized to assist the duty forecasters in easily interpreting the current situation and the expected situation to come. To this respect, also precipitation radar and satellite images have been implemented, although this data is not used for model input.

Table 1. NWP products in the Sava FFWS

Tabela 2. Produkti modela za numericku prognozu vremena (NPV) u Sava FFWS

Model/ Source	Spatial Resolution	Temporal Resolution	Forecasting period	Updated every...
ECMWF	8 *10 km	1 h	10 days	12 h
ECMWF EPS	16 *20 km	1 h	10 days	12 h
Aladin	4.5 km	1 h	3 days	6 h
Aladin HR	4 km	1 h	3 days	6 h
NMMB	3 * 4 km	3 h	3 days	12 h
WRF SRB	4 * 6 km	3 h	3 days	12 h
WRF BiH	2.5 km	1 h	4 days	24 h
WRF MNE	1 km	1 h	5 days	12 h
WRF MNE	3 km	3 h	5 days	24 h

#### 4.4 Hydrological and hydraulic simulation models

Within the Sava FFWS a large number of hydrological, hydraulic and Numerical Weather Prediction (NWP) models have been implemented. Most of them are based upon pre-existing models available in the beneficiary countries. Where applicable, these have been adapted and made compatible with the Delft-FEWS operational forecasting system. The detailed hydraulic models are coupled with the most suitable hydrological model, and the results of both are stored within the system. Within the Sava FFWS, distinction can be made between *default runs*, which are scheduled to run automatically at certain predefined time intervals, and the *manual user runs*, which can only be run manually.

Table 2. Forecast workflows with NWP and model combinations within Sava FFWS

Tabela 3. Prognozne radne procedure - kombinacije NPV i hidroloških/hidrauličkih modela u Sava FFWS

Models	NWP		Default Run			Manual User Run				
	Hydrological	Hydraulic	Aladin SI + ECMWF	Aladin HR + ECMWF	ECMWF EPS	NMMB	WRF BiH	WRF MNE 1km	WRF MNE 3km	WRF SRB
Basin BA/RS/ME	HEC-HMS Sava	HEC-RAS Sava	X		X	X			X	X
	WFlow (BA/RS/MNE)		X		X	X			X	X
Local	Mike-NAM (HR)	Mike 11 Croatia		X						
	Mike-NAM Una (BA)	Mike 11 Una		X						
	HBV-light Bosna (BA)		X		X	X	X		X	X
	HEC-HMS Sava	HEC-RAS Bosna (SRBC)	X		X	X			X	X
	HEC-HMS Sava	HEC-RAS (BA) [9]	X		X	X			X	X
	Mike-NAM Vrbas	Mike 11 Vrbas	X		X	X	X		X	X
	WFlow MNE		X		X	X		X	X	X
	HEC-HMS Kolubara (SRB)	HEC-RAS Kolubara (SRB) [17]	X		X	X			X	X
	HBV (SRB) [5] Jadar, Kolubara, Tamnava, Ub, Ljig		X		X	X			X	X

## 4.5 Hydrological distributed wflow model

Deltares and Royal HaskoningDHV built a catchment-wide hydrological model for the main beneficiaries: Bosnia and Herzegovina, Serbia and Montenegro, the so-called Wflow Sava model. WFlow is a framework that can contain different hydrological models. The WFlow Sava model is based on the HBV model. WFlow is based on multiple grid layers, which result together in a hydrological model. The spatial resolution of WFlow is 250 meters. The meteorological input is grid based. The advantage of this grid based principle is that all available precipitation and temperature stations can be used for the creation of the grid. Also, the model generates output at every location within the river basin, which can be obtained easily from the Delft-FEWS spatial display.

The WFlow model is coupled with the data assimilation package openDA, as well as with the RTC-Tools package for reservoirs. To simplify the setup for openDA, and to accommodate forcing the model with the Croatian flow boundaries, the WFlow model is split up in 6 subcatchments (Figure 3). The Vrbas (Bocac Dam, Jajce I), Bosna (Modrac) and Drina (Piva, Visegrad, Bajina Basta, Kokin Brod, Potpec, uvac, and Zvornik) models are coupled online with a reservoir model build in RTC-tools. The SavaDown model is forced with external boundary flows from Croatia (Sava, Bosut and Spacva river) as well as the flows from WFlow Kolubara and WFlow Drina. There are 4 geographically disconnected parts of the Sava watershed that are included in the model as well. These basins drain directly to the Sava River, and are included to calculate local flows for forecasting location within the basins.

A completely separate and independent model has been setup for Montenegro, since the hydrometeorological service in this country did not have any other hydrological simulation model.

This model has been setup at a later stage in the project, which enabled using new datasets [Imhoff, 2018].

In general the performance of the models is not very high. The sometimes very karstic hydrology in the region makes it difficult to building models without deep analysis in the water balances of the catchments [Bouaziz, 2018].



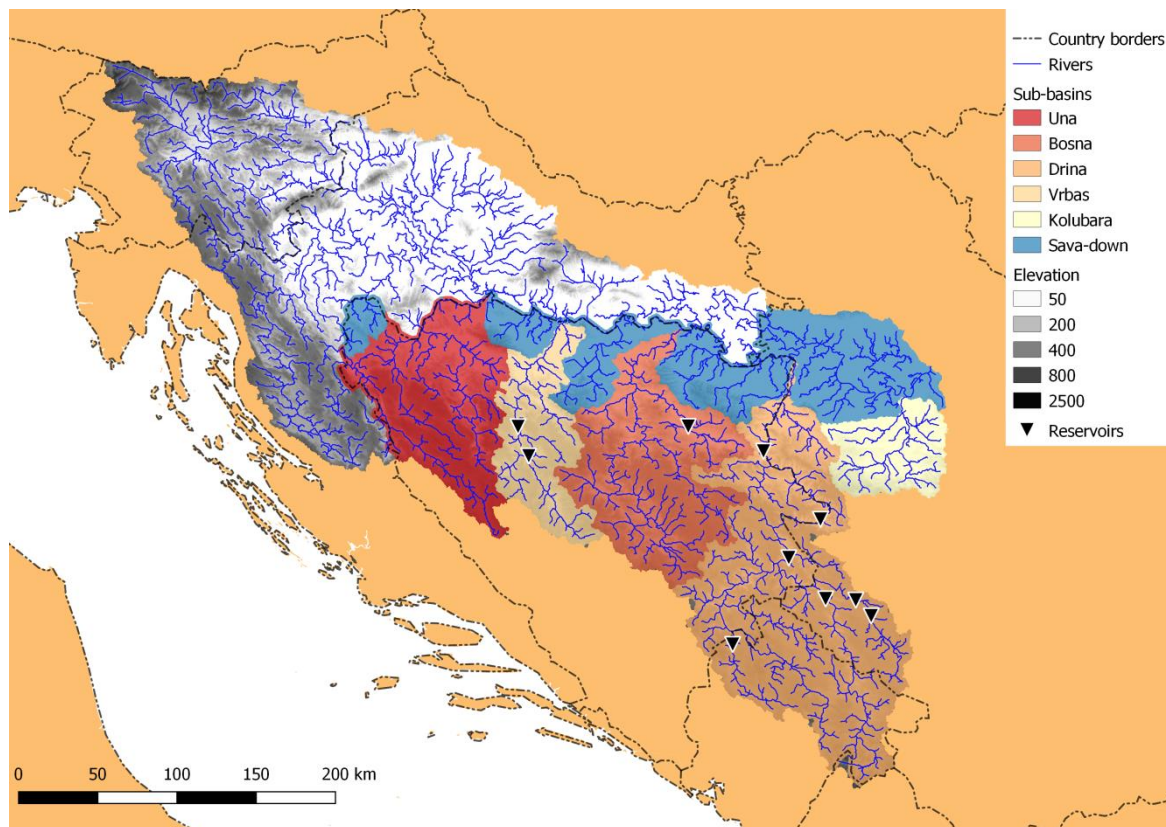


Figure 3. Six Sava sub-catchments modelled in WFlow coupled with OpenDA and RTC-Tools

Slika 7. Šest savskih podslivova koji su obuhvaćeni Wflow modelom u sprezi sa OpenDA i RTC alatima

#### 4.6 Data assimilation

Deltares has co-developed an open source data assimilation platform, OpenDA [Weerts 2006, Rakovec 2015], which includes a variety of data assimilation algorithms and that can be linked Delft-FEWS. For the Sava project, the Asynchronous Ensemble Kalman Filter (AEnKF) algorithm is used to update the initial conditions for the WFlow hydrologic model to meet the observed discharges over the last couple of days as good as possible. As such, the performance of the forecasts is improved. Once other relevant data becomes operationally available, like satellite soil moisture maps, these can be included in the platform as well.

#### 4.7 Predictive uncertainties

For the HEC-HMS Sava model with the ECMWF Ensemble plots, a statistical post-processing approach [Verkade, 2015] is used to dress a confidence band around the ARMA corrected streamflow ensemble traces. This band is a result of adding an estimate of hydrological uncertainty (using Quantile Regression algorithms) to each individual streamflow ensemble member, where the estimate is based on an historical hindcast (2010-2015) analysis in which daily streamflow forecasts are generated using perfect meteorological boundary conditions. In this way an estimate of the 'total predictive uncertainties is produced that captures both the meteorological and hydrological uncertainties.

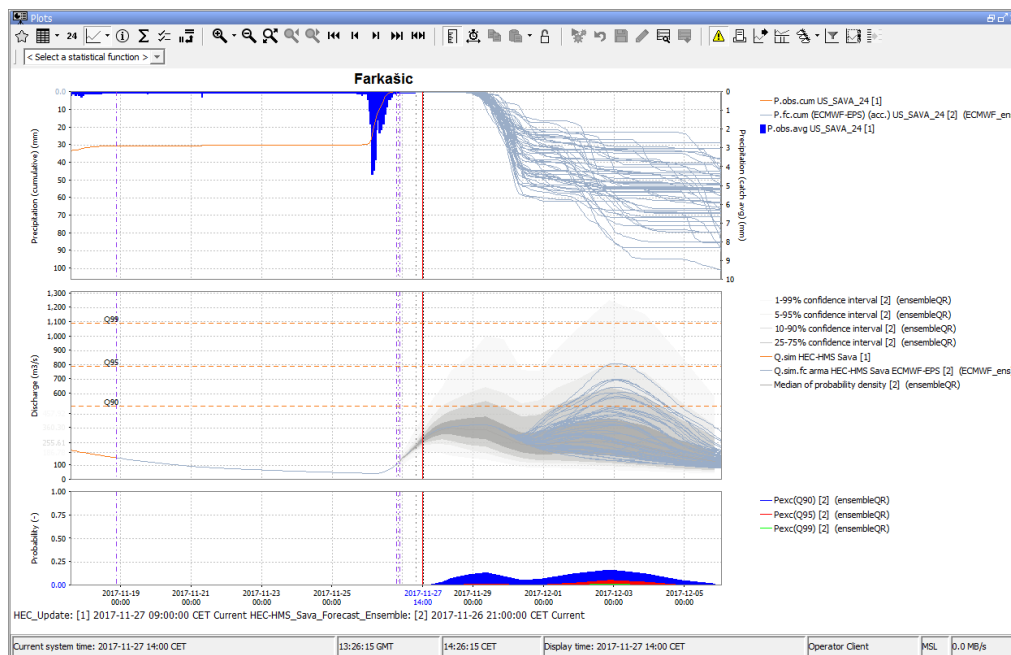


Figure 4. Example of Ensemble Dressing of HEC-HMS Streamflow ensembles, showing confidence interval bands (2<sup>nd</sup> subplot) and Q90-95-99 exceedance probability

Slika 8. Primer HEC-HMS ansambla protoka, pokazujući intervale poverenja (2. grafikon) za 90%, 95% i 99% verovatnoće prevazilaženja prognoziranih proticaja

### 4.8 Performance indicators

Sava FFWS calculates daily the NWP and hydraulic/hydrological model performance for preconfigured lead times by comparing stored predictions with later obtained observed data. Performance is expressed with two indicators; the absolute bias and the root-mean-squared-error (RMSE). The RMSE gives a good indication of overall performance, while the bias also shows whether the error is a result of over- or underestimation. For each lead time, the performance is assessed over all forecasts available for a configured period of time.

The results of the performance assessment can be used in a later stage to decide on the operational use and further developments needed for the NWP and simulations models.

## 5 Using the system & Transboundary cooperation

In close cooperation with the beneficiaries, an organizational structure has been established, where the real-time operations, support and maintenance and development activities have been identified. All these three components need both national and international cooperation.

One of the large benefits of the FFWS is that all forecasters in the Sava basin have the same information and full insight in what happens in the other countries, as such enabling transboundary flow forecasting.

The Sava FFWS has proven to be a comprehensive system that includes all data and models contributed by the individual countries. This makes it a unique system when it comes to transboundary cooperation on flood forecasting.

## 6 Knowledge transfer and capacity building

During the entire phase of the project, regular workshops and trainings were organized at various levels of expertise. These included training sessions on the use of the Sava FFWS, the configuration of the Delft-FEWS software and the backend IT infrastructure required to keep everything in the system running. Training courses on the use of the Sava FFWS also included topics on the general principles of hydrological forecasting. The courses were hosted by the various national forecasting institutions throughout the region.

During the operational testing phase, regular two-weekly webinars were held for all users of the Sava FFWS. The main goal of these webinars was to give users the opportunity to directly ask specific questions to the consultants and actively participate in discussions. The use of such a format had the additional benefit that other users could either learn from the answers (which they would have missed if an e-mail or phone call was used) or even help with answering questions posed (as the answer would sometimes require knowledge from other forecasting agencies). Another important goal of the webinars was to share insights between users and allow for the transfer of knowledge and know-how in using the system as well as on forecasting procedures. In this regard, on multiple occasions users were asked to give a presentation on their daily forecasting routine (or what this looked like under specific circumstances, such as during flood). These often led to fruitful discussions about general practices and how things are done at other forecasting institutions.

## 7 Conclusions

The principal objective of the Flood Forecasting and Warning System of the Sava River basin is to provide more information and support the stakeholders in taking balanced decisions in emergency situations of upcoming floods. The Sava FFWS enables the five riparian countries to take the right management decisions and carry out measures to prevent and mitigate severe flood events, based on accurate forecasts of flows and discharges with a sufficiently long lead time. This requires close cooperation with relevant stakeholders, managing the data and models on country level which is crucial for successful development of the system. The Sava FFWS is of key importance in this cooperation.

The Sava FFWS provides the forecasters of the hydrometeorological services an expert tool, enabling them to generate hydrological forecasts based on observed telemetry data from hydrological and meteorological gauges and Numerical Weather Predictions (NWP). The Sava FFWS uses hydrological and hydraulic models to compute the catchment runoff and river flows and water levels and these models can be updated and improved at any time within the existing Sava FFWS platform.

## References

### Papers:

1. Bouaziz, L., Weerts, A., Schellekens, J., Sprokkereef, E., Stam, J., Savenije, H., and Hrachowitz, M.: Redressing the balance: quantifying net intercatchment groundwater flows, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2018-370>, in review, 2018.
2. ICPDR 2015, Floods in May 2014 in the Sava River Basin, Brief overview of key events and lessons learned. ICPDR and ISRBC, 2015. [https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/nodes/documents/sava\\_floods\\_report.pdf](https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/nodes/documents/sava_floods_report.pdf)
3. Imhoff, R., W. van Verseveld, B. van Osnabrugge, A.H. Weerts, 2018. Distributed hydrologic modelling of the Rhine river: towards high resolution calibration-free hydrological models with seamless large-domain parameter estimates. *Water Resour. Res.* (in review).
4. ISRBC 2017, 2nd Sava River Basin Analysis Report

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

5. [http://www.savacommission.org/dms/docs/dokumenti/documents\\_publications/publications/other\\_publications/2nd\\_sava\\_river\\_basin\\_analysis\\_report.pdf](http://www.savacommission.org/dms/docs/dokumenti/documents_publications/publications/other_publications/2nd_sava_river_basin_analysis_report.pdf)
6. Verkade, J.S., 2015: Estimating real-time predictive hydrological uncertainty. Doctoral thesis Delft University of Technology. <http://dx.doi.org/10.4233/uuid:a7e8ac36-4bdb-4231-a11e-d46778b2ae4a>
7. Werner, M, Schellekens, Gijsbers, Van Dijk, Van Den Akker, Heynert, The Delft-FEWS flow forecasting system, *Environmental Modelling & Software*, Volume 40, 2013, Pages 65-77, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.07.010>.
8. Verkade J.S., Brown J.D, Davids F, Reggiani P, Weerts A.H (2017) Estimating predictive hydrological uncertainty by dressing deterministic and ensemble forecasts; a comparison, with application to Meuse and Rhine, *Journal of Hydrology*, Volume 555, Pages 257-277 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.024>
9. Rakovec, O., Weerts, A. H., Sumihar, J., and Uijlenhoet, R.: Operational aspects of asynchronous filtering for flood forecasting, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2911-2924, <https://doi.org/10.5194/hess-19-2911-2015>, 2015
10. Weerts, A.H., El Serafy, G.Y.H.: Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 42. doi:10.1029/2005WR004093, 2006.

### Websites:

(last access: 1 September 2018)

11. OpenDA: The OpenDA data-assimilation toolbox, <http://www.openda.org>
12. Wflow, Jaap Schellekens, Willem van Verseveld, Tanja Euser, Hessel Winsemius, Christophe Thiange, Laurene Bouaziz, Daniel Tollenaar, Sander de Vries, 2016. [openstreams/wflow: 2016.04](https://openstreams.wflow.org/2016.04) Test release. doi:10.5281/zenodo.167057
13. RTC-Tools: <https://www.deltares.nl/en/software/rtc-tools/> and <https://oss.deltares.nl/web/RTC-Tools>
14. WaterML2: <http://www.waterml2.org/>

## **Sava-FFWS: integrisana platforma za unapređenje sistema za hidrološku prognozu na slivu reke Save, primena u RHMZ**

Marija Ivković<sup>1</sup>, Samir Čatović<sup>1</sup>, Srđan Marjanović<sup>1</sup>, Predrag Živadinović<sup>1</sup>, Vida Despotović<sup>1</sup>

APSTRAKT: Inicijativa da se unapredi upravljanje poplavama, a naročito nakon katastrofalnih poplava u slivu reke Save u maju 2014. godine, rezultirala je pokretanjem projekta „Razvoj sistema prognoze i ranog upozoravanja na pojavu poplava u slivu reke Save“. Cilj projekta je uspostavljanje prognostičke platforme koja će biti podrška donosiocima odluka za vreme vanrednih situacija prouzrokovanih poplavama. Ranije je, u cilju dostupnosti izmerenih hidrometeoroloških podataka na slivu reke Save u realnom vremenu svim službama koje se bave operativnom hidrološkom prognozom na reci Savi, formiran hidrološki informacioni sistem za sliv Save (Sava-HIS). Za ove potrebe izabrana je platforma zasnovana na sistemu Delft-FEWS, koja objedinjuje podatke iz Sava-HIS i prognostičkih hidroloških i hidrauličkih modela za pritoke i glavni tok Save povezanih sa dostupnim modelima za prognozu vremena. Kao rezultat, uspostavljena je platforma Sava-FFWS u koju su uključeni i hidrološki modeli koji se ranije nisu koristili kao kontinualni ili prognostički i gde dodatnu vrednost predstavljaju i implementirane napredne metode za asimilaciju podataka, korekciju greške prognoze, procenu neizvesnosti hidroloških prognoza i mapiranje plavnih zona. Integracijom hidroloških i meteoroloških podataka, informacija i produkata kroz Sava-FFWS, očekuje se bolja koordinacija, razmena podataka i informacija i njihova harmonizacija, a time bolja priprema i procena akcija za donosiocima odluka kada postoji opasnost od poplava. U ovom radu će biti prikazano učešće hidrologa iz RHMZ, kao jednog od predstavnika Srbije na projektu, u formiranju i operativnoj primeni platforme u okviru svojih nadležnosti.

Ključne reči: Sava, poplave, prognoza, Sava-FFWS

## **SAVA-FFWS: Integrated Platform for Improving the Operational Sava River Flood Forecasting System in RHMSS**

ABSTRACT: Initiative to improve flood management, especially after catastrophic floods in the Sava River Basin in May 2014, resulted in the launch of the project "Development of a forecast and early warning system for the occurrence of floods in the Sava River Basin". The goal of the project is to establish a prognostic platform that will support decision-makers during emergency situations caused by floods. In the past, in order to provide measured hydrometeorological data in real time assessable to all services dealing with the operational hydrological forecast on Sava River Basin a hydro-information system (Sava-HIS) has been created. Platform based on Delft-FEWS has been chosen and it unites data from Sava-HIS and prognostic hydrological and hydraulic models for Sava and its tributaries together with the data from weather forecast models. The Sava-FFWS platform has been developed and it includes hydrological models that have not been used as a continuous or prognostic model together with advanced methods for data assimilation, error correction of the forecasts, assessment of the uncertainty in the hydrological forecasts and mapping of the floodplains. The integration of hydrological and meteorological data, information and products through the Sava-FFWS is expected to improve coordination, data exchange and information and to harmonize them providing better preparedness and actions for decision-makers whenever there is a risk of flooding. This paper will show the activities taken by the hydrologists from RHMSS, as one of the representatives of Serbia in the project, in the creation and operational application of the platform within its competencies.

Keywords: Sava, floods, forecast, Sava-FFWS

---

<sup>1</sup> [marija.ivkovic@hidmet.gov.rs](mailto:marija.ivkovic@hidmet.gov.rs), [samir.catovic@hidmet.gov.rs](mailto:samir.catovic@hidmet.gov.rs), [srdjan.marjanovic@hidmet.gov.rs](mailto:srdjan.marjanovic@hidmet.gov.rs), [predrag.zivadinovic@hidmet.gov.rs](mailto:predrag.zivadinovic@hidmet.gov.rs), [vida.despotovic@hidmet.gov.rs](mailto:vida.despotovic@hidmet.gov.rs), Republički hidrometeorološki zavod Srbije

### 1 Uvod

U situacijama kada postoji opasnost od plavljenja na teritoriji više zemalja, regionalna saradnja na razmeni informacija o trenutnim i budućim hidrometeorološkim uslovima predstavlja važnu ulogu. Razmena omogućava sagledavanje obima poplavnih talasa kao i pravovremeno sprovođenje odbrane od poplava. Iskustvo iz poplava koje su se dogodile u maju 2014. godine na slivu Save, ukazalo je da je postojeći nivo saradnje država koje dele ovaj sliv potrebno unaprediti da bi se poboljšalo preventivno delovanje i smanjila materijalna šteta i broj ljudskih žrtava prouzrokovana potencijalnim budućim plavljenjima. Bolja razmena i dostupnost podataka i informacija u ekstremnim situacijama je svakako u interesu Srbije, kao najnižvodnije zemlje u slivu Save.

Prvi korak u objedinjavanju informacija potrebnih za sinhronizovani rad prognostičkih hidroloških službi na reci Savi napravljen je formiranjem hidrološko-informacionog sistema Sava-HIS pod pokriviteljstvom Savske Komisije. Naredni korak napravljen je u okviru projekta „Razvoj sistema prognoze i ranog upozoravanja na pojavu poplava u slivu reke Save“ [3] u pravcu razvoja objedinjenog prognostičkog sistema Sava-FFWS. Sistem je baziran na Delft-FFWS platformi za manipulaciju vremenskim serijama razvijenoj u Institutu Deltares iz Delfta. Osmotreni hidrološki i meteorološki podaci iz Sava-HIS su u okviru platforme korišćeni za kalibraciju parametara i verifikaciju rezultata hidroloških i hidrauličkih modela integrisanih u sistem, praćenje stanja voda na slivu Save u realnom vremenu, izdavanje i korigovanje hidroloških prognoza, kao i za verifikaciju modela za prognozu vremena.

U ovom radu će biti prikazano učešće stručnjaka iz RHMZ, kao jednog od predstavnika Srbije, u formiranju i operativnoj primeni platforme u okviru svojih nadležnosti.

### 2 Aktivnosti RHMZ u formiranju Sava-FFWS platforme

Prvi korak u formiranju prognostičke platforme za reku Savu zasnivao se na unošenju metapodataka lokacija na kojima se vrše hidrološka i meteorološka merenja kao i povezivanje platforme sa Sava-HIS radi obezbeđivanja kontinualnog pristizanja izmerenih podataka u vremenu bliskom realnom. U sistem su uvrštene i lokacije na kojima će u skorijem periodu početi merenja padavina i temperatura. U Sava-FFWS iz osmatračke mreže RHMZ trenutno stižu podaci sa 10 automatskih meteoroloških stanica. Podaci o vodostaju i protoku u realnom vremenu dostupni su sa 20 hidroloških stanica reke Save i njenih pritoka na teritoriji Srbije (Slika 1).

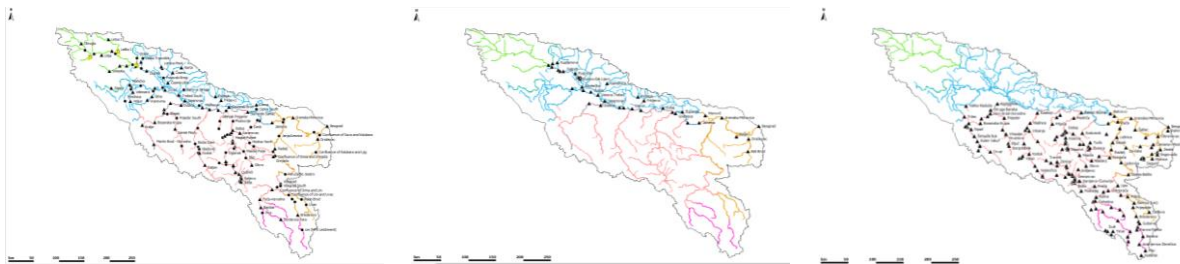


Slika 1: Lokacije meteoroloških i hidroloških stanica dostupnih na Sava-FFWS, ceo sliv (levo), RHMZ (desno)

Figure 1. Location of the hydrometeorological stations in Sava-FFWS, whole catchment (left), RHMSS (right)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2: Hidrološki profili na kojima se računa proticaj/vodostaj modelima HEC-HMS (levo), HEC-RAS (sredina) i Wflow\_hbv (desno) u Sava-FFWS

Figure 2. Forecasting locations in HEC-HMS (left), HEC-RAS (center), and Wflow\_hbv (right) in Sava-FFWS

Obezbeđivanjem prostorne raspodele padavina i temperatura na celom slivu Save omogućeno je da se na platformu uključe hidrološki i hidraulički modeli dostupni za reku Savu i njene pritoke kao i modeli za prognozu vremena. Hidrološki modeli koji obuhvataju ceo sliv Save su HEC-HMS [1] i Wflow\_hbv [6], a hidraulički HEC-RAS [2] (Slika 2). Modeli HEC-HMS i HEC-RAS formirani su i kalibrisani u saradnji Savske Komisije i US Army Corps of Engineers (USACE) korišćenjem istorijskih podataka koje je RHMZ zajedno sa ostalim hidrometeorološkim službama u slivu obezbedio. Wflow\_hbv model nije kalibrisan u okviru projekta i biće ga neophodno naknadno kalibrisati

Za reku Kolubaru integrisan je hidraulički model HEC-RAS i više hidroloških modela koji na različite načine simuliraju procese na slivu: HEC-HMS i IHMS/HBV. Institut „Jaroslav Černi“ je HEC-HMS i HEC-RAS modele formirao i kalibrisao za potrebe izrade “Studije unapređenja zaštite od voda u slive reke Kolubare“, nakon poplave iz maja 2014. godine i oni obuhvataju ceo sliv reke do rečnog profila kod hidrološke stanice Draževac. IHMS/HBV modeli formirani u RHMZ za potrebe najave poplavnih talasa na podslivovima reke Kolubare su: Kolubara do profila kod h.s. Slovac, Ljig do profila kod h.s. Bogovađa, Tamnava do profila kod h.s. Čemanov Most i reka Ub do profila kod h.s. Ub. Modeli imaju dnevnu vremensku rezoluciju. IHMS/HBV model reke Jadar je takođe implementiran na Sava-FFWS.

U delu koji se odnosi na numeričku prognozu vremena, RHMZ je za potrebe ovog projekta obezbedio prognoze padavina i temperatura iz WRF-NMM i NMMB modela. Kao član EUMETSAT obezbeđene su i prognoze iz modela za prognozu vremena Evropskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF) kao i ECMWF ansambl od 50 numeričkih prognoza vremena.

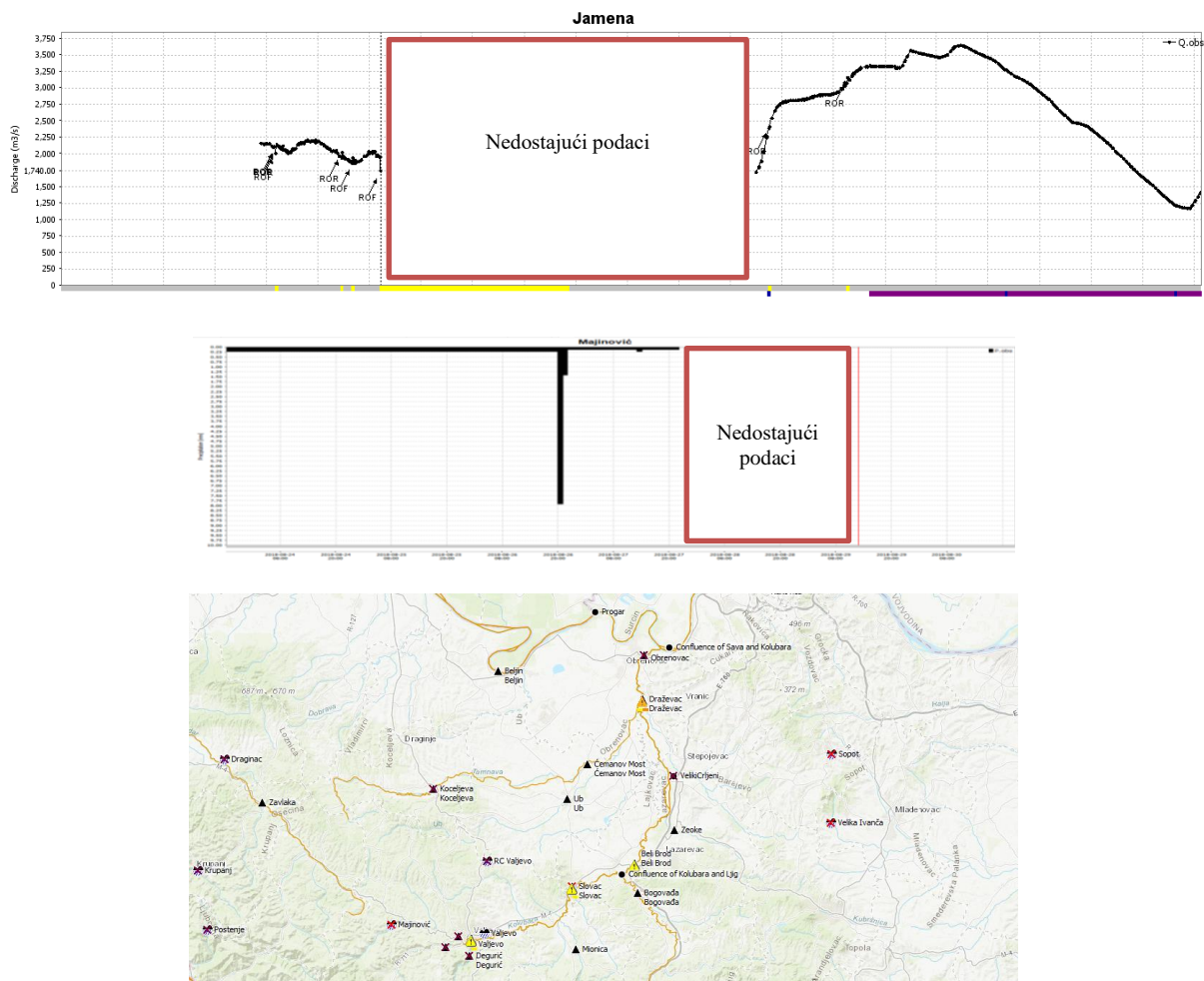
Informacionu osnovu Sava-FFWS-a čine 4 lokacije sa po 5 nameskih servera. Jedna od lokacija je glavna (predlog je da bude u Ljubljani), a 3 su bekap (Zagreb, Sarajevo i Beograd). Sinergijom projekta Sava-FFWS i projekta koju predvodi USACE, isporučena je oprema informacione tehnologije za tehničku podršku. Oprema i instalirano programsko i aplikativno okruženje (operativni sistemi, aplikativni programi i relaciona baza podataka) će biti korišćeni kao podrška/bekap centar u slučaju ispada glavnog informacionog centra u Ljubljani.

U martu 2018. godine Institut Deltares je završio formiranje Sava-FFWS platforme verzije 1.0, koja je sadržala sve komponente potrebne za njeno operativno korišćenje čime je u RHMZ i drugim institucijama mogla da se započne šestomesečna faza predoperativnog testiranja sistema. Ona je u RHMZ podrazumevala: svakodnevnu kontrolu stabilnosti sistema, praćenje rada automatskih hidroloških i meteoroloških stanica, optimizaciju vremena izvršenja radnog toka hidrološkog/hidrauličkog modela i modela za prognozu vremena, analizu kvaliteta dobijenih prognoza kao i sagledavanje nedostataka koje je moguće ispraviti/dopuniti do kraja projekta ili u postprojektnom periodu. Takođe, započeto je kontrolno praćenje hidroloških prognoza za stanice na Savi: Jamena, Sremska Mitrovica i Šabac kao i praćenje stanja voda na slivu reke Kolubara.

### 3 Unapređenja postignuta korišćenjem Sava-FFWS platforme u procesu formiranja hidroloških prognoza na slivu reke Sava

U procesu izdavanja hidroloških prognoza jedan od prvih aktivnosti je provera kvaliteta pristiglih hidroloških i meteoroloških podataka. Ova aktivnost van Sava-FFWS platforme zahteva posedovanje i pokretanje više različitih aplikacija koje imaju mogućnost manipulacije sa podacima koji dolaze iz različitih izvora i imaju različite formate. Grafički alati u okviru Sava-FFWS omogućavaju lako uočavanje nedostajućih podataka ili podataka koji imaju neuobičajeno velike/male promene vrednosti u odnosu na očekivane (validacija) i njihovo korigovanje ukoliko za to ima potrebe (Slika 3).

Prognozirane vrednosti padavina i temperatura, kao glavnih pokretača hidrološkog procesa na slivu, moguće je prikazati u okviru sistema u rezoluciji modela za prognozu vremena, ali i kao osrednjenu vrednost nad slivom (Slika 4). Kako bi se dobila bolja slika o prirodi padavina moguće je posebno pregledati konvektivne i ukupne padavine. U prolećnom periodu, kada je opasnost od plavljenja otopljenim snegom najveća, moguće je analizirati prognozirane vrednosti vlažnosti tla i količine otopljenog snega.



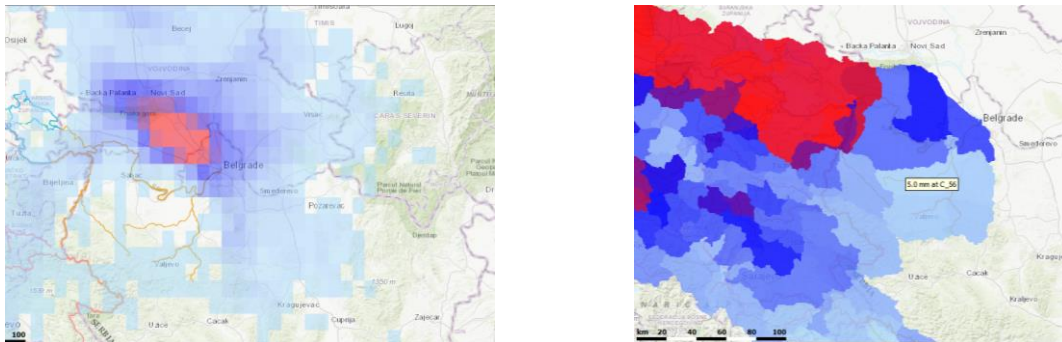
Slika 3: Primer simbola koji ukazuju na nedostajuće podatke ili neočekivane promene vrednosti hidroloških i meteoroloških parametara

Figure 3. Example of the symbols showing missing data or unexpected values of the hydrometeorological parameters



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 4: Raspodela padavina u rezoluciji modela (levo) i osrednjena vrednost padavina nad slivom (desno)

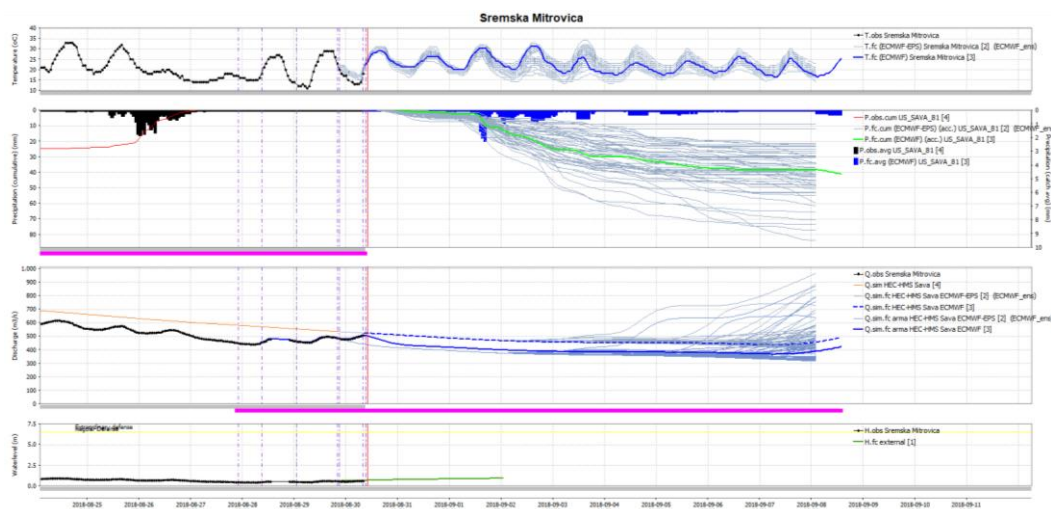
Figure 4. Rainfall distribution in native resolution of the NWP model (left) and catchment averaged (right)

Dosadašnja praksa u formiranju prognoze vodostaja unapređena je smanjenjem vremena potrebnog da se sagleda sadašnje i buduće stanje voda na slivu. Sve prognoze vodostaja/protoka za izabrani hidrološki model moguće je videti u okviru zajedničkih grafikona (Slika 5). Osim pojedinačnih prognoza dostupne su i prognoze protoka formirane korišćenjem ansambla prognoza padavina ECMWF čime se dobija raspon u kom se vrednosti protoka mogu očekivati.

Hidrološki model HEC-HMS, formiran je korišćenjem svih dostupnih časovnih vrednosti padavina i temperatura od 2011. do 2015. godine. Talasi izolovani u tom periodu poslužili su za kalibraciju parametara modela. Wflow\_hbv model ima formiran statički deo modela zajedno sa OpenDA komponentom [4] i RCT alatima [5] za manipulaciju rada akumulacija na pritokama Save, ali kalibracija modela nije još urađena.

Platforma nudi mogućnost automatske izrade hidroloških prognoza za unapred definisane lokacije, kojih na slivu Save na teritoriji Republike Srbije ima 30. U RHMZ prognoze za tri profila hidroloških stanica na Savi izrađuju se za tri naredna dana, dok platforma nudi informacije na osnovu kojih je to vreme moguće produžiti na 10 dana.

U toku test perioda koji je trajao od marta do juna 2018. godine došlo je do pojave složenog talasa na reci Savi. Poplavni talas je iniciran značajnim količinama kiše nad celim slivom izazivajući plavljenja u Jasenovcu u Hrvatskoj 18. marta (Slika 6). Pad temperature u narednim danima uslovio je da se od padavina formira snežni pokrivač, koji se nakon toga dosta brzo istopio na celom slivu i uslovio pojavu još jednog vrha na već postojećem talasu (Slika 7).

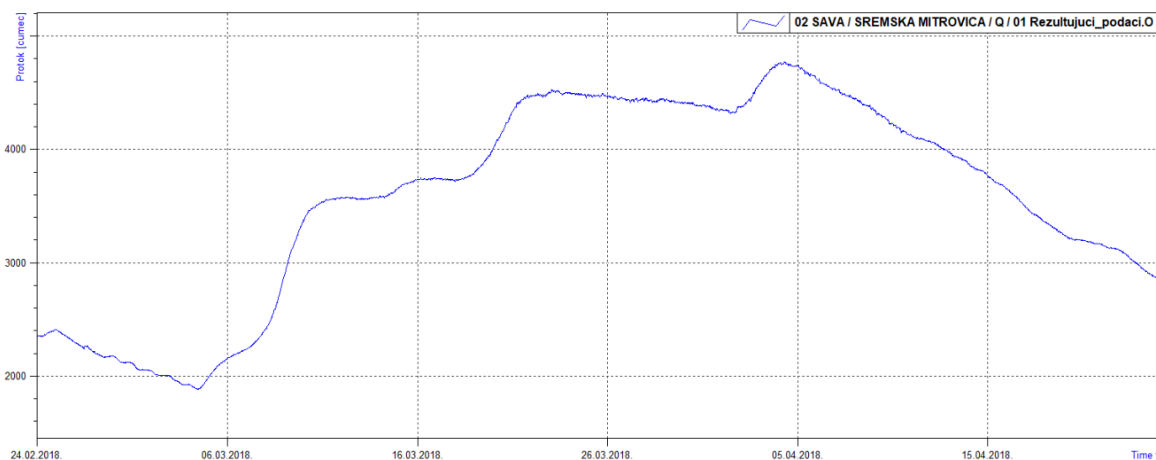


Slika 5: Vrednosti sadašnjih i budućih hidrometeoroloških parametara za rečni profil Sremska Mitrovica

Figure 5. Current and future hydrometeorological parameter values for river profile Sremska Mitrovica

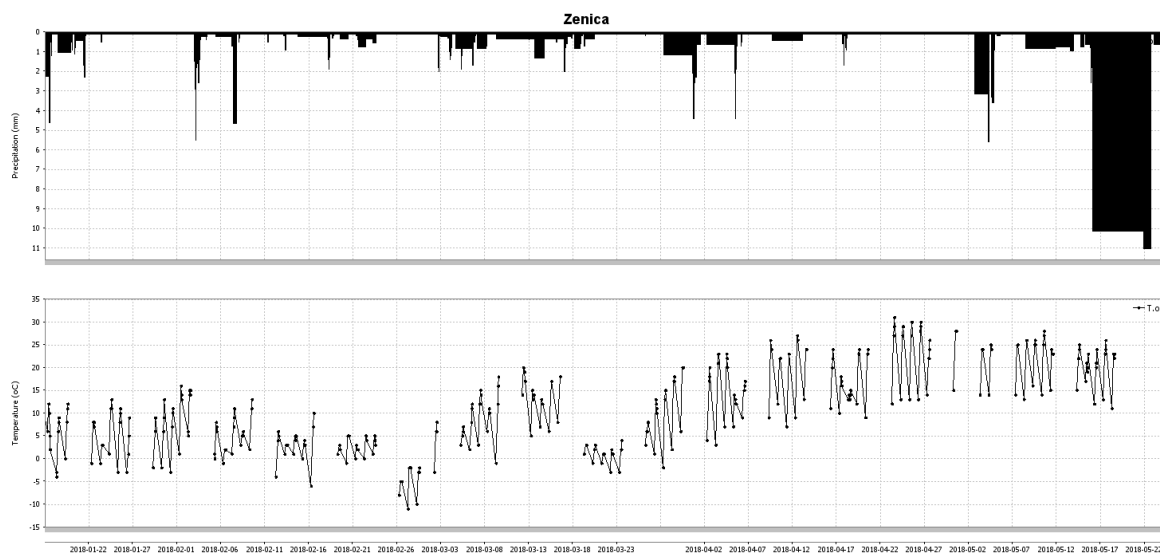
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 6: Hidrogram, hidrološka stanica Sremska Mitrovica za period od 24.02. do 24.04.2018. godine

Figure 6. Hydrograph, hydrological station Sremska Mitrovica for period from 24.02. till 24.04.2018.



Slika 7: Padavine i temperature registrovane na meteorološkoj stanici Zenica

Figure 7. Rainfall and temperature measured at meteorological station Zenica

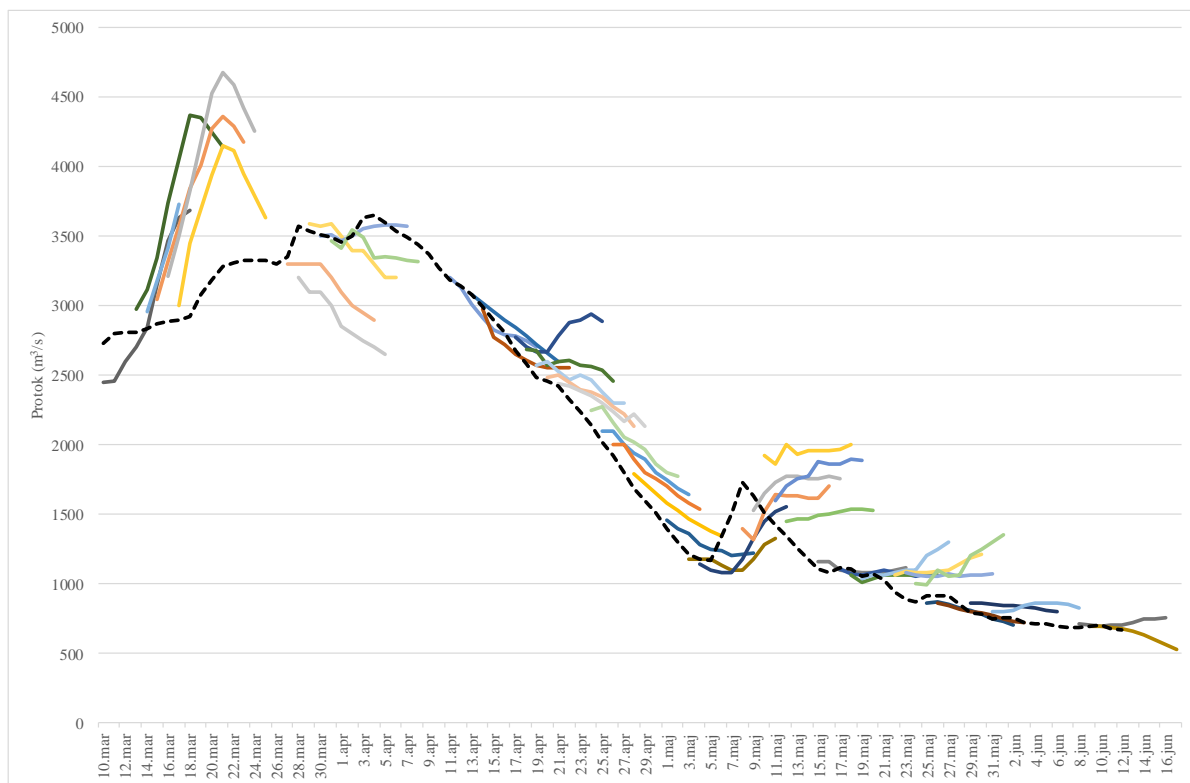
Prognoze vodostaja za profile kod hidroloških stanica Jamena, Sremska Mitrovica i Šabac formirane su korišćenjem rezultata HEC-HMS modela koji je trenutno jedini kalibrisani model koji pokriva ceo sliv. Prognoze padavina i temperatura Evropskog centra za kratkoročnu prognozu vremena omogućile su izdavanje desetodnevni hidrolških prognoza (Slika 8).

U periodima porasta protoka u koritu, model je prognozirao znatno više poraste protoka od ostvarenih sa brzim dostizanjem vrha talasa i naglim opadanjem protoka šestog ili sedmog dana prognoze. U ovom periodu je teško tačno oceniti tačnost prognoze, jer je bilo značajnog izlivanja vode u području Jasenovca. U periodu stagnacije vrha talasa, HEC-HMS model je predviđao ranije opadanje talasa od ostvarenog. Bolji rezultati ostvareni su u periodu opadanja vrednosti protoka u koritu. Model nije na vreme predvideo porast protoka ostvarenog 8. maja već je taj porast prognozirao tek 10. maja.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Po završetku test perioda urađena je ocena tačnosti izdatih prognoza za sv tri profila hidroloških stanica posebno za svaki dan prognoze, poređenjem sa ostvarenim protokom (Tabela1). Korišćeni su Neš-Satklifov koeficijent efikasnosti (NS), srednja greška (bias) i srednja kvadratna greška (RMSE).



Slika 8: Hidrogram osmotrenog protoka rečni profil Sremska Mitrovica (isprekidana linija) i desetodnevne prognoze izdate u test periodu Sava-FFWS platforme

Figure 8. Hydrograph of the observed discharge river profile Sremska Mitrovica (dashed line) and ten-days forecasts issued in the test period of Sava-FFWS platform

Tabela 1. Ocene desetodnevni prognoza za rečni profil kod hs Jamena, Sremska Mitrovica i Šabac za period od 10.marta do 8.juna 2018. godine

Table 1. Scores for ten-days forecasts for river profile at hydrological stations Jamena, Sremska Mitrovica and Šabac for period form March 10th till June 8th 2018.

	Jamena			Sremska Mitrovica			Šabac		
	NS (-)	bias (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	NS (-)	bias (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	NS (-)	bias (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)
1.dan prognoze	0.902	-79	255	0.894	-58	326	0.922	-87	306
2.dan prognoze	0.814	-92	284	0.836	-75	328	0.868	-92	316
3.dan prognoze	0.778	-80	258	0.802	-75	299	0.838	-84	292
4.dan prognoze	0.702	-74	265	0.793	-67	273	0.828	-70	267
5.dan prognoze	0.648	-72	287	0.764	-67	295	0.789	-72	295
6.dan prognoze	0.593	-69	289	0.751	-63	287	0.779	-61	283
7.dan prognoze	0.598	-60	272	0.751	-58	274	0.772	-59	273
8.dan prognoze	0.604	-59	273	0.734	-56	287	0.749	-62	289
9.dan prognoze	0.627	-39	213	0.745	-48	268	0.749	-56	274

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Neš-Satklifov koeficijent u slučaju sva tri rečna profila opada sa porastom dana prognoze i devetog dana ima vrednost blizu 0,75 za profile Sremska Mitrovica i Šabac, dok za Jamenu ovaj koeficijent brže opada i poslednjeg dana ima vrednost 0,62.

Prognoze za profile Sremska Mitrovica i Šabac se mogu smatrati „odličnim“ do četvrtog dana prognoze a „umereno dobrim“ za dane do kraja prognoze. U slučaju profila Jamena prognoze se mogu smatrati „umereno dobrim“ do četvrtog dana prognoze, nakon toga „dobrim“. Srednja geška prognoze za sve rečne profile i sve dane prognoze je negativna, što znači da su prognozirane vrednosti više od osmotrenih u proseku za  $67 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dosta ujednačene su i vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja i u proseku iznose  $282 \text{ m}^3/\text{s}$  (Slika 8). Ova vrednost niža je od polovine standardne devijacije osmotrenih vrednosti te se može smatrati da su prognoze u kategoriji „dobrih“.



Slika 8: Prikaz ocena greške prognoze Neš-Satklifovim koeficijentom efikasnosti (NS), srednjom greškom (bias) i srednjom kvadratnom greškom (RMSE) za sve dane prognoze

Figure 8. Forecast error scores using Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS), bias (bias) and root mean square error (RMSE) for all forecast days

## 4 Naredni koraci

Period od marta do oktobra 2018. godine bio je predviđen za operativno testiranje Sava-FFWS platforme i formiranje njenog završnog izgleda i sadržaja. U RHMZ testiranje je podrazumevalo praćenje stabilnosti rada sistema i priliva podataka neophodnih za svakodnevno izdavanje hidroloških prognoza.

U tom periodu uočeni nedostaci na implementiranim alatima su otklonjeni, dok će se novi izvori podataka i modeli, koji su prepoznati kao neophodni za kvalitetno izdavanje prognoza, implementirati u postprojektnom periodu. Jedno od prvih prepoznatih neophodnih unapređenja je zamena pojedinačnih dnevnih modela IHMS/HBV za podslivove reke Kolubare integralnim časovnim

modelom KolubaraTotal koji pokriva ceo sliv reke. Model je formiran, kalibrisan i ulazi u fazu testiranja.

Na početku projekta značajno manji broj lokacija na kojima se mere padavine i temperature je bio dostupan. Tokom vremena, broj novih lokacija sa dostupnošću podataka u realnom vremenu je rastao, čime se upotpunjavala informacija o prostornoj raspodeli tih meteoroloških veličina. U septembru 2018. godine pokrenuta je inicijativa da se HEC-HMS model rekalibriše zbog dodatnih hidroloških i meteoroloških podataka, ali i zbog specifičnosti prirode HEC-HMS modela kao epizodnog hidrološkog modela koji se u Sava-FFWS koristi kao kontinualni model.

Tokom trajanja test perioda, nije bilo moguće koristiti HEC-RAS model, te je faza njegovog testiranja predviđena za period nakon završetka projekta. U planu je uspostavljanje i jednog fizičkog modela za sliv reke Save, TOPKAPI, koji je u fazi formiranja, a čija implementacija se očekuje krajem godine.

## 5 Zaključak

Integralna platforma za izdavanje prognoza na reci Savi značajno je unapredila i modernizovala rad hidrološke službe u RHMZ. Mogućnost jednostavnog sagledavanja sadašnjih i budućih stanja voda na Savi i njenim pritokama najznačajnija je karakteristika ove platforme. Aktivnost predviđene nakon projekta takodje će unaprediti proces izdavanja kvalitetnih i blagovremenih hidroloških prognoza: međunarodna saradnja prognostičara, održavanje i dalji razvoj sistema. Znanja stečena tokom trajanja projekta „Razvoj sistema prognoze i ranog upozoravanja na pojavu poplava u slivu reke Save“ omogućila su stručnjacima iz RHMZ da nastave sa razvijanjem alata potrebnih za još kvalitetnije formiranje hidroloških prognoza. To podrazumeva uvođenje novih izvora hidroloških i meteoroloških podataka i novih hidroloških/hidrauličkih modela.

## Literatura

1. HEC-HMS model, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> (pristupljeno: 1.09.2018.godine)
2. HEC-RAS model, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (pristupljeno: 1.09.2018.godine)
3. Ivković M., Čatović S., Vujanović A., Živadinović P., Marjanović S., Despotović V., Stevanović S. (2018) Razvoj sistema prognoze i ranog upozoravanja na pojavu poplava na slivu reke Save, *Zbornik radova 6. Međunarodne konferencije „Savremena dostignuća u građevinarstvu 2018“*, 2018, str.409-416, doi: 10.14415/konferencijaGFS2018.040
4. Liu Y., et al. (2012) Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3863–3887, 2012, [www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3863/2012/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3863/2012/)doi:10.5194/hess-16-3863-2012
5. RCT-Tools, <https://www.deltares.nl/en/software/rct-tools/> (pristupljeno: 1.09.2018.godine)
6. Schellekens, J. (2016) OpenStream wflow documentation release 1.0.2016.03.1, <https://wflow.readthedocs.io/en/2016.03/> (pristupljeno: 1.09.2018.godine)

## **Praćenje promene saliniteta vode u nezasićenom zemljištu i stanja ekosistema kao odgovor na depolderovanje Rammegorsa**

Nikola Stanić<sup>1</sup>, Perry G.B. de Louw<sup>2</sup>

APSTRAKT: Istočni Scheldt pogađa takozvana 'glad za peskom', pri čemu nestaje sve više slanih močvara i uvala. Zbog toga je Rijkswaterstaat, deo holandskog ministarstva za infrastrukturu i životnu sredinu, 2014. godine naložio prosecanje nasipa koji okružuje Rammegors polder i tako dopustio prodiranje slane vode. Rammegors je bio prirodni rezervat za ptice, koji je bio zatvoren više od 40 godina od Istočnog Schelda izgradnjom Scheldt-Rhine kanala. Ovaj polder pruža jedinstvenu priliku za monitoring i proučavanje promena tj. transformacije slatkovodnog zemljišta u zaslanjeno zemljište pogođeno plimom i osekom. Daljim proučavanjem saliniteta zemljišta u Rammegorsu može se doći do korisnih informacija neophodnih za razumevanje trenda salinizacije u polderima sličnih karakteristika, i može poslužiti kao osnova za buduću praksu upravljanja vodnim resursima. Ovo istraživanje ima za cilj: (i) identifikovanje stepena i raspodelu saliniteta u tlu u vremenu u gornjem sloju zemljišta; razumevanje dinamike (ii) pokazatelja stanja ekosistema (npr. flore i bentos vrsta) pogođenog salinizacijom tla i (iii) zemljišta, pre svega saliniteta nezasićenog i zasićenog zemljišta. U ovom radu je predstavljen sistem in-situ monitoringa, što je preduslov za integralno upravljanje vodnim resursima u polderu Rammegors.

Ključne reči: Benots; In-situ merenja; Podzemne vode; Salinizacija; Tolerancija biljaka na slanoću

## **Monitoring of Vadose Zone Salinity Change and Dynamics of the Ecosystem in Response to Depoldering of Rammegors**

ABSTRACT: Eastern Scheldt suffers from 'sand hunger', as a result more swales and salt marshes disappear in the Eastern Scheldt. Therefore, in 2014 Rijkswaterstaat, a part of the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment, has brought the tide back to the Rammegors polder thus allowed saltwater intrusion. Rammegors was natural reserve for birds that was closed off from the Eastern Scheldt by construction of the Scheldt-Rhine Canal for more than 40 years. This project provides a unique opportunity to monitor and study the changes *i.e.* transformation from a freshwater area to a tidal saltwater natural area. Further, the studying of soil salinity in Rammegors can provide valuable information for understanding salinization trend in polders with similar situation and may serve as a basis for future water management practice. This research aims at (i) identifying the extent and distribution of soil salinity over the time in the upper soil horizons, (ii) understanding the dynamics of the ecosystem (*e.g.* vegetation and benthos species) development due to changing soil salinity, and (iii) determining temporal evolution of soil, and vadose and phreatic water salinity due to saltwater intrusion. Overall, it can be noted that *in-situ* monitoring is the first stage of proper water management.

Keywords: Benthos; Groundwater; *In-situ* measurements; Plant salt tolerance; Salinization.

<sup>1</sup> Dr. Nikola Stanić, lecturer and researcher, HZ University of Applied Sciences, n.stanic@hz.nl

<sup>2</sup> Dr. Perry de Louw, Expert groundwater management, Deltares, Perry.deLouw@deltares.nl

## 1 Introduction

Saltwater intrusion occurs naturally to some degree in coastal areas across the world (*e.g.* due to sea-level rise). However, human activities (*e.g.* groundwater extraction, building of irrigation and drainage channel networks) contribute significantly to the saltwater intrusion (Barlow 2003). Therefore, natural and/or anthropogenic impact may lead to a change in the hydrology of the coastal zone thus degrading groundwater quality through the landward movement of seawater. It seems that more and more, everyday human activities contribute to climate change (*e.g.* IPCC 2007) which leads to sea-level rise. Yet, it is surprising that only few quantitative studies investigated the impact of sea-level rise on sea water intrusion (*e.g.* Meisler *et al.* 1984; Oude Essink 1999; Sherif and Singh 1999; Bobba 2002). For instance, in The Netherlands, where approximately one-quarter of the country lies below mean sea-level (MSL), salinity control becomes relevant matter with future climate change. The major part of The Netherlands economy *i.e.* agriculture and horticulture may face diminishing yields due to rise of soil salinity. Adequate water management is required to avoid this, *e.g.* aimed at flushing salts from the root zone on a regular basis (Richards *et al.*, 1954; Schoups *et al.*, 2005).

Decision-makers need confidence that all technical estimates and data provided to them are reliable and robust, as economic and social effects of over- or underestimating the extent, magnitude, and spatial distribution of salinity can be severe. Nevertheless, an understanding of changes in processes and status of soil salinity is essential for achieving effective water management in coastal regions. To this end, information on relevant soil/water conditions should be collected at appropriate study locations over time in order to better understand the changes in the soil salinity and its environmental impact.

For instance, Rammegors is a nature reserve for birds in the Dutch province of Zeeland (Figure 1). It is a former shore, which was isolated from tidal influence in 1971 with the construction of the Scheldt-Rhine channel. However, in 2014 Rijkswaterstaat, part of the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment, gave back the polder to Eastern Scheldt (*i.e.* interaction of ebb and flood) due to 'sand hunger'. Overall, this reclaiming/returning land to water is potential representative study location for the future MSL rise and climate change. The progress of changes in soil salinity, ecosystem and erosion can be monitored. Further, flora and fauna change and adapt to emerging environmental conditions. Therefore, monitoring of change in vegetation and in benthos species over time would contribute to a better understanding of impact of advancing saltwater intrusion on ecosystems in coastal regions of The Netherlands. Moreover, monitoring of tidal changes *i.e.* tidal flooding characteristics with known soil characteristics may provide information about the salinity progression. Monitoring is needed so that proper and timely decisions can be made to modify the management practices or undertake reclamation and/or rehabilitation. Overall, it can be noted that monitoring is the first stage of proper water management.

The main idea of this research project is to further understand the process of salinization due to tidal change and its effect on the coastal ecosystems. This research will contribute to better understanding of salinization process and its effect on vadose zone; hence it may serve as a basis from which water management can benefit. This research aims at (i) identifying the extent and distribution of soil salinity over the time in the upper soil horizons, (ii) understanding the dynamics of the ecosystem (*e.g.* reeds and benthos species) development due to changing soil salinity, and (iii) determining temporal evolution of soil and phreatic water salinity due to seawater intrusion.

## 2 Materials and Methods

As a result of the Delta Works, a defence system of dams and barriers in the southwest of The Netherlands, the natural balance between erosion and sedimentation in the Eastern Scheldt has been disrupted. The mudflats and salt marshes in the south-west Delta have greatly diminished due to the construction of the storm surge barrier. The tide is reduced, which disturbs balance between

erosion and sedimentation. This is called the ‘sand hunger’ of the Eastern Scheldt. It should be noted that these tidal areas have important ecological function. In the context of the European Water Framework Directive, Rijkswaterstaat carries out projects to improve quality of nature in the Eastern Scheldt. This is done by creating new, and by protecting existing marshes. One of these projects is the Rammegors project *i.e.* prevention of further erosion of the existing salt marsh at Sint-Annaland, and creation of the new salt marshes in the Rammegors area. Water level at Sint-Annaland harbor can fluctuate, two times a day, between -160 cm and 205 cm NAP (normal Amsterdam water level) looking at the atmospheric tide estimation, while water level in Rammegors fluctuate on average between 33 cm and 136 cm based on the measurements (Figure 1 and 2).

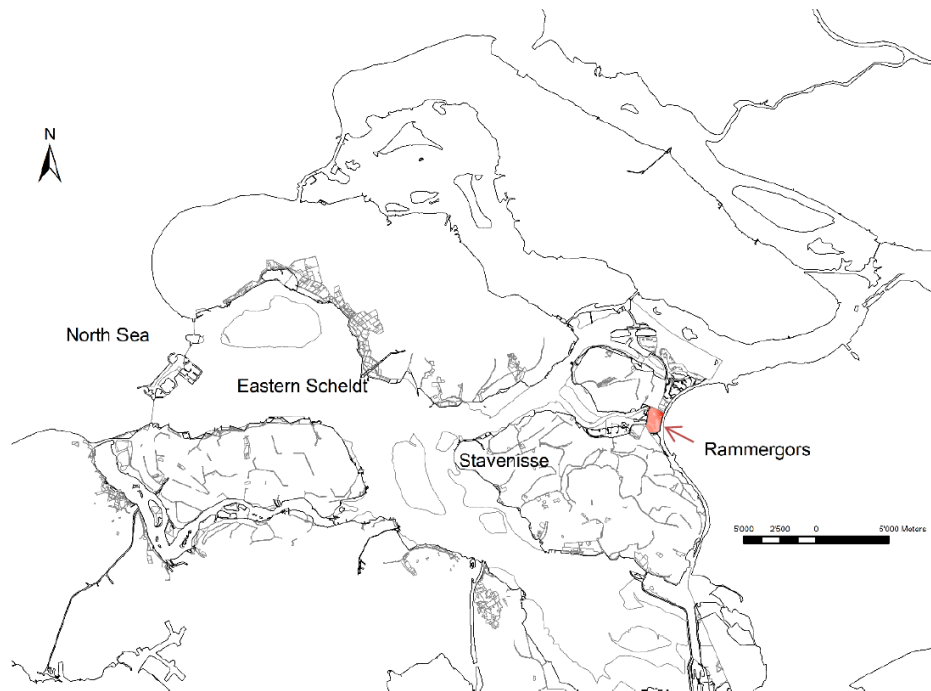


Figure 1. Study area Rammegors located in the south-west delta region of The Netherlands.

Rammegors is a polder, an extensive marshland area (approximately 145 ha), east of the Krabbenkreek, between Tholen and Sint Philipsland in the south-west Province of Zeeland, The Netherlands. It is a former silt depot, created in 1971 as a result of the construction of the Scheldt-Rhine canal. Over the time the freshwater lens was created by excess precipitation (Pauw, 2015). Eventually it became a natural reserve rich with flora and fauna. The opening of lock at Krabbenkreekdam in 2014 allowed saltwater, from the Eastern Scheldt, to enter the natural reserve. In short period of time problems occurred *i.e.* erosion of the bed, and lock had to be temporarily closed and repair works were carried out. The lock/inlet structure was reopened in December 2016 (Elschot *et al.*, 2016). Overall, the Rammegors project is depoldering project that reconnects a former freshwater wetland/polder to the Eastern Scheldt, which will eventually create a new marsh and mudflat area, sandbanks and creeks.

The general hydrogeological situation at the study area is characterized by an Holocene confining layer (HCL) at the top *i.e.* aquitard consisting of Holocene loam and clay deposits with low hydraulic conductivity (De Louw, 2013). Saline groundwater in the south-west Netherlands delta originates from Holocene transgressions and the reclamation history producing a wide range of salinity distributions (Oude Essink, 1996; Post, 2004; Vos and Zeiler, 2008). It is possible that the compacted peat and overlying loam and clay deposits have been eroded in Rammegors by streams and tidal channels during the Holocene (see, Van der Valk, 1996; Hijma *et al.*, 2009) thus reducing the hydraulic resistance of the HCL. Rammegors polder, for instance, was temporary isolated from the



Eastern Scheldt, and fresh rainwater recharged the upper part of the aquifer, displacing the saline groundwater. This saline seepage system in sub-recent transgression areas occurs also in the northern Netherlands.

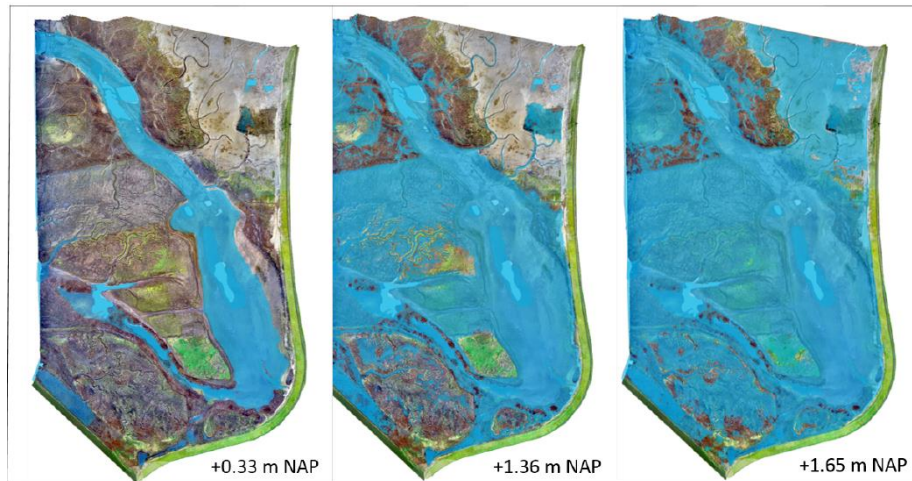


Figure 2. Tidal situations in Rammegors. Left figure is during low tide with a water level of +0.33 m NAP. Middle figure is during high tide with a water level of +1.36 m NAP. Right figure is during spring tide with +1.65 m NAP (source: Rijkswaterstaat).

Eventually flora and fauna in Rammegors will adapt to the new salinity and new ecosystem equilibrium is going to be reached. The area will most likely look like other nature reserves in the area *e.g.* Saeftinghe. Effects of salinization on the vegetation are already visible in the entire area. Common reed (*Phragmites australis*) covers large parts of the polder and may have made use of the ecosystem disruption to further develop. Vegetation that is not salt-tolerant has partly died and this gave reed the chance to spread to new locations. In the absence of reed on higher parts of the polder plant species that are moderately salt-tolerant became dominant. In some higher parts of the Rammegors still could be found non-salt-tolerant species (*i.e.* *Glycophytes*) (Elschot *et al.*, 2016). Overall, non-salt-tolerant plant species decline in favor of halophytes (*e.g.* common glasswort (*Salicornia europaea*)) (Esselink *et al.* 2015). This trend will continue to prevail.

Deer tracks and fox tracks were observed throughout the area. Especially the presence of foxes in the area can pose a risk for ground-nesting birds. However, with tidal fluctuations this area is expected to become less accessible to ground predators. Further, this would make the area less suitable for ground-breeding bird species (Mandema *et al.* 2015). Moreover, a fast colonization of the benthic macro-fauna was observed in Rammegors. The development shows a relation with elevation. Regarding the ecological richness a gradient was observed with higher richness further from the inlet structure/lock (Wallis *et al.*, 2017).

## 2.1 Monitoring pathway

The first step considered in the monitoring program involved selection of representative experimental pathways along which sampling locations will be defined. The experimental pathways in Rammegors were selected with intention that they overlap, or pass close by, several sampling locations of Royal Netherlands Institute for Sea Research (monitoring vegetation), Wageningen Marine Research (monitoring benthos species) and Deltares (monitoring groundwater salinity). Moreover, variation in elevation and habitat characteristics along the experimental trajectory were taken into account during selection. Finally, two experimental routes are defined (see, Figure 3): Pathway I with 13 sampling location (approximately linear pathway); and Pathway II with 7 sampling location (to some extent dispersed pathway).

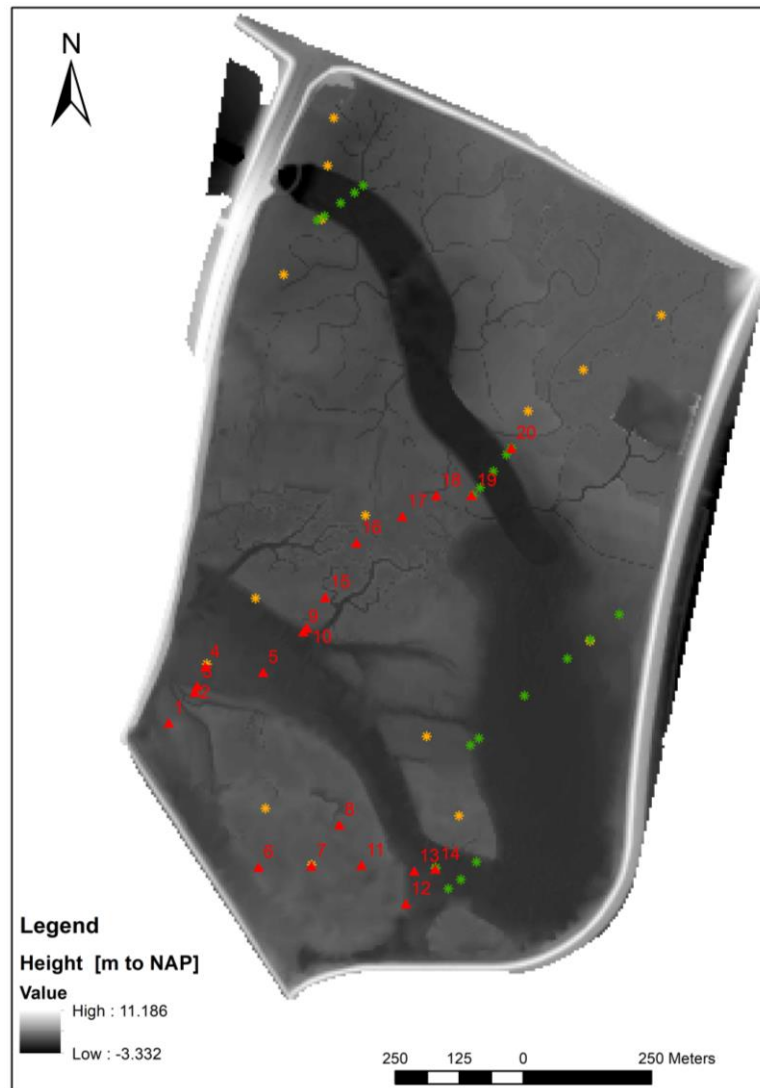


Figure 3. Rammegors GIS map with defined experimental paths, and monitoring location (red points) including the monitoring locations of Royal Netherlands Institute for Sea Research – NOIZ (orange points) and Wageningen Marine Research – WMR (green points) and Deltares (red points 1 and 2).

Preparation of the experimental paths as well as testing of equipment and some field monitoring preceded the actual experiments/monitoring. The first results were obtained in July 2018. Monitoring will be carried out for 3 years at about 2 months intervals to track changes in Rammegors over period of time.

## 2.2 Materials and sampling locations

At each sampling location were installed groundwater observation wells (HDPE pipes, Ø 32x25mm with an average well depth between 1.3 and 1.5 m from surface) to quantify the water levels (Figure 4). Precise coordinates of the well were obtained using Leica Viva GS08plus DGPS with accuracy of 3 mm (see, Leica Viva GS08plus Data sheet). Further, water level data-loggers Micro-Divers and Cera-Divers (see, Van Essen Instruments Product Manual Divers) were installed at 10 sampling locations. The diver is an autonomous data-logger (measurements are stored in the diver's internal memory) that were programmed to measure water pressure and temperature. Divers measure the water pressure using the built-in pressure sensor, and measure the temperature using a semiconductor sensor. They are installed below water level using the vectran cable attached to well cap. Both of the used

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

diver types are capable of storing a maximum of 48,000 measurements and measuring up to 10 m of water column. Divers are set to take a measurement on every 10 min. They can tolerate temperatures between -20 and +80 °C. Micro-Divers and Cera-Divers pressure accuracy is  $\pm 3$  cm H<sub>2</sub>O and  $\pm 2$  cm H<sub>2</sub>O respectively, while temperature accuracy for both divers is  $\pm 0.2$  °C (according to manufacturer specifications).

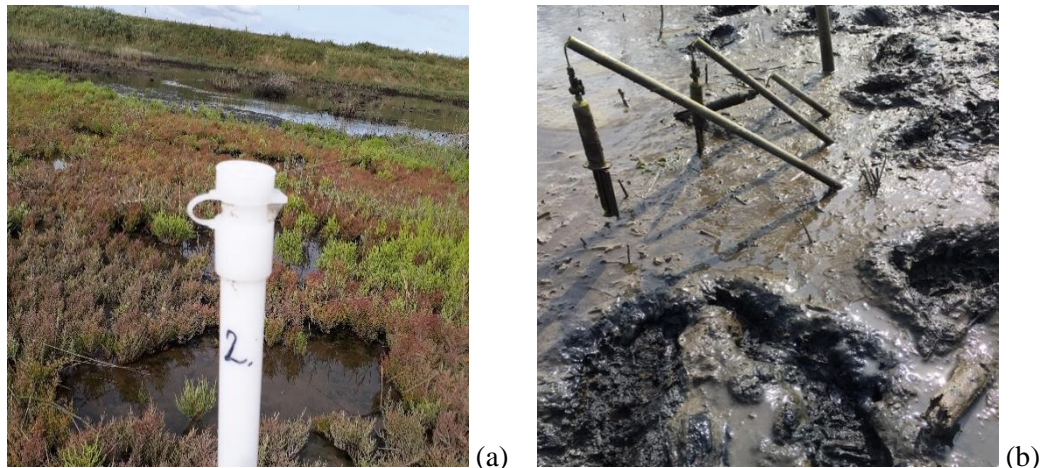


Figure 4. Sampling location 2 and monitoring well (a); Macro-Rhizon soil moisture samplers monitoring location 12 (b).

Next to the observation wells at each location were installed 3 Eijkelkamp Macro-Rhizon soil moisture samplers (MR) at 3 different depth ranges *i.e.* 0-10 cm, 15-25 cm and 35-45 cm below surface level (see, Figure 4). Rhizon field samplers are reliable equipment for sampling of all dissolved components in the soil solution. Dissolved organic and inorganic matter will not adsorb on the soil moisture sampler. The sampler porous plastic material length of 9 cm,  $\varnothing$  4.5 mm wets spontaneously and has standard pore size of 0.15  $\mu$ m which assure a high bubble point pressure creating a complete vacuum. The hollow porous part is reinforced with a glass-fibre reinforced core. MR are housed in PVC tubing and at the sampling locations are installed samplers of 3 different housing lengths *i.e.* 30, 60 and 90 cm. Installation at an angle of around 45° in a drilled and gouged out small-diameter hole guarantees good contact between the soil and the porous element (see, Eijkelkamp Soil Moisture Catalogue). A sample is obtained by placing the sampler under vacuum using a 30 ml syringe.

### 2.3 Data collection and processing

Diver operation, data display, processing and storing is done with the help of the Diver-Office® software package. Acquired raw data is absolute pressure at sampling location. This pressure is equal to the 'weight' of the water column above the measuring instrument plus the prevailing air pressure. Consequently, these air pressure measurements should be compensated, due to air pressure variations, from the absolute pressure measurement. This barometric compensation is done using Diver-Office®. Atmospheric pressure and temperature data from the neighbouring Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) Wilheminer meteorological station are assigned to each (barometric) monitoring point/well. Water levels are compensated with respect to a vertical reference datum (*i.e.* cable length and a top of casing).

Further, pore water is sampled by the MR and the pore electrical conductivity (EC) was measured using the Hanna HI-98195 Multi-parameter Waterproof Meter. Besides EC other water quality parameters were measured *i.e.* pH, temperature (T), total dissolved solids (TDS) and oxidation reduction potential (ORP). The measurement accuracy are  $\pm 0.02$  pH,  $\pm 0.15$  °C, for EC  $\pm 1$   $\mu$ S/cm, for TDS  $\pm 1$  ppm and for ORP  $\pm 1.0$  mV (see, Hanna HI-98195 Multi-parameter Waterproof Meter Manual). Samples taken by MR syringe are placed in sampling cups and instantly measured by the HI-

98195 meter. Moreover, because the electrical conductivity is strongly dependent on the temperature of the sample the measuring results from the different temperatures need be corrected to 25 °C (the reference temperature) by using temperature correction coefficients. Conversion to the EC at 25 °C, is made by using the equation (SFS-EN27888, 1994):

$$EC_{ref} = \frac{EC_T}{1 + \left(\frac{\theta}{100}\right) \cdot (T - T_{ref})} \quad (1)$$

where  $\theta$  = temperature correction coefficient of natural waters taken from the SFS-Standard; T = measuring temperature; EC = electrical conductivity of the sample at T,  $T_{ref}$  = Reference temperature 25 °C;  $EC_{ref}$  = electrical conductivity of the sample at  $T_{ref}$ .

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Hydraulic head

Figure 5 show the observed hydraulic heads during August 2018 for three piezometers (1, 5 and 18) on the Pathway I and observed tides at nearby Stavenisse harbour. The piezometer *i.e.* observation well 18 is closest to the lock/inlet structure, while piezometer 5 is further from the lock and piezometer 1 the furthest (see, Figure 3). Consequently, from Figure 5 it can be seen that there is difference in the heads from piezometer 18, 5 to 1 due to time delay of inundation that depends on local bathymetry and tides together (the head drops for about 10 cm between two piezometers, see Figure 6). This determines the locations where saline water can infiltrate. Further, it can be seen that head in the observation wells doesn't drop below approximately 45-46 cm NAP during the neap tide. Therefore, it can be assumed that at this elevation is the separation point between vadose and phreatic zone in Rammegors. Moreover, while looking at the water level fluctuations in the wells it can be noted that the permeability at observation well 5 is higher in comparison to the well 1 and 18. Local lithological characteristics determines the rate of saltwater infiltration. Figure 7 shows lithological cross-section of the Pathway I that was made with the help of lithological borehole descriptions of the HCL derived from the Geological Survey of the Netherlands' database ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)). The cross-section is derived from a detailed 3D geological model of Zeeland based on 5 drillings per 1 km<sup>2</sup> that were classified into geological units (GeoTOP, Stafleu *et al.*, 2011). Overall, different factors influence salinization process *e.g.* bathymetry, lithology, tides and local groundwater flow.

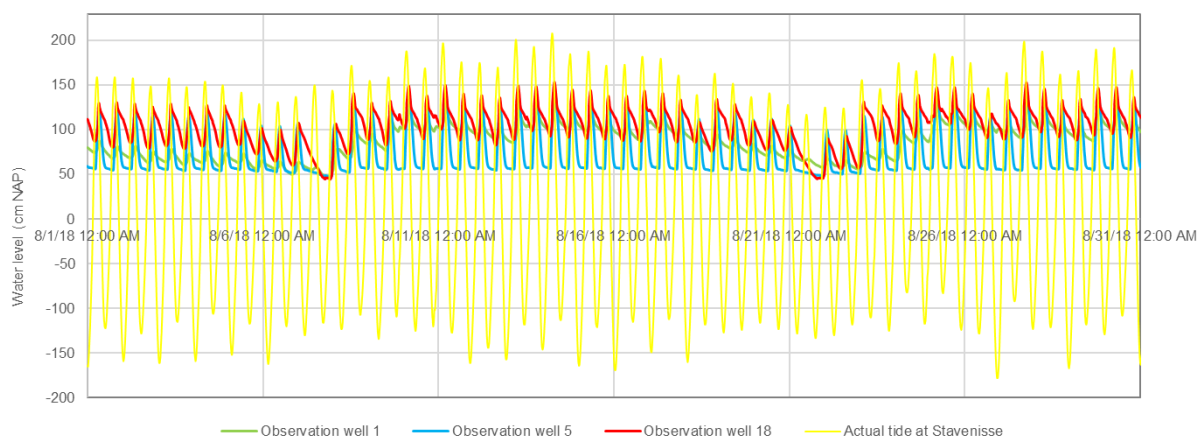


Figure 5. Observed heads in the monitoring wells (1, 5 and 18) and observed tides at Stavenisse harbour during August 2018.

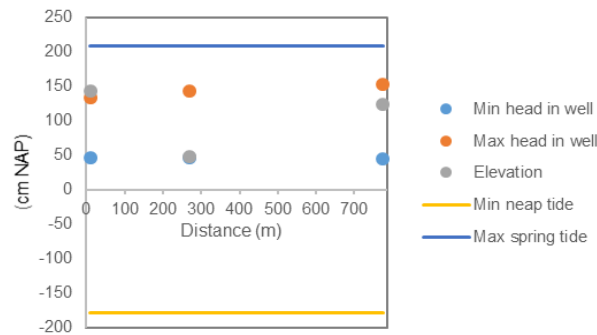


Figure 6. Maximum and minimum water levels at the piezometers 1, 5 and 18 vs. max and min tides and the elevation of the wells.

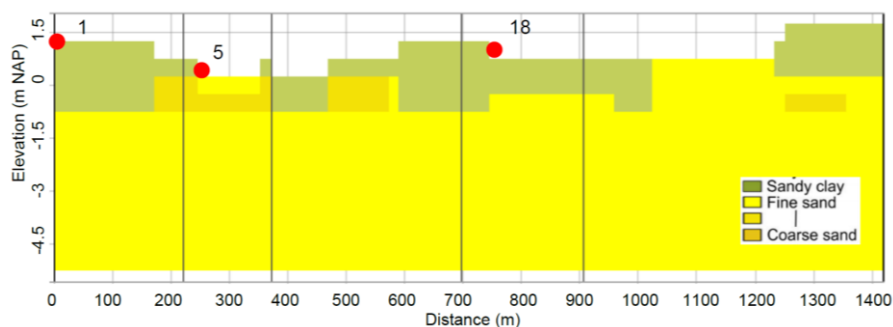


Figure 7. A lithological cross-section of the of the experimental Pathway I in Rammegors with indicated locations (red points) of observation wells 1, 5 and 18.

America (2018) investigated the salinization process in Rammegors with the help of 2D and 3D models and came to conclusion that lithology has the largest influence on the salinization process, followed by bathymetry and tides respectively. Also, model results contributed to a better understanding of the free convection process. Overall, farmers from surrounding polders should be concerned because in the near future ditches will become more saline due to saline seepage.

### 3.2 Macro-Rhizon soil moisture samples

Figure 8 shows variation of pH in pore water over the distance (Pathway I) with depth and with time. On average pH value of water in soil is 7.5, while values can fluctuate between 5.7 and 10. Vegetation and soil properties can impart soil pH. Measured pH value of surface water in Rammegors is around 8.2. Overall, different physical, chemical and biochemical processes can influence pH fluctuation. Further research is needed in order to be able to draw some conclusions.

Figure 9 shows the correlation between conductivity and total dissolved solids of pore water samples in Rammegors. It can be seen that there is strong linear correlation between EC and TDS. This implies that this is natural water *i.e.* uncontaminated, especially by human activities. Furthermore, these two parameters are correlated, however, this relationship is not always linear; it depends on the activity of specific dissolved ions average activity of all ions in the liquid, and ionic strength (Hem, 1985; Hayashi, 2004; Siosemarde *et al.*, 2010). TDS analysis explain the groundwater quality in a more complex manner, particularly in understanding the effect of salinization better than EC analysis (Khaki, *et al.*, 2015).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Figure 8. Change of pH measurements over the distance and elevation along the Pathway I during sampling event on: (a) 12/07/2018; (b) 31/08/2018. Zero values are the missing measurements.

Figure 10 shows box plots for the EC results for 3 different MR sampling depths at the monitoring locations. As can be seen there is large spatial and temporal variability. The ranges for the EC indicate that EC drops with depth, at most of the locations, implying that the salt concentration increases in the uppermost soil layer, which forms a dense saline layer (see, Figure 11). Probably, lithological characteristics at locations lead to this phenomenon; however, with time this influence will diminish. Further, this drop of EC with depth is more obvious for the measurements from August than from the ones in July (Figure 10 and 11). This was to be expected due to a long dry summer periods *i.e.* no precipitation during June and July. On the other hand, August had somewhat days with precipitation. Data about the precipitation was obtained from the local Stavenisse KNMI precipitation station. Overall, it can be noted that precipitation can influence soil salinity concentrations in the area, however, this influence is minor on long term. Further, there are few EC result outliers and they are located at the sampling location 5 and 9. Monitoring locations 5 and 9 are neighbouring locations along Pathway I and at relatively low elevation (see, Figure 6); hence implying that they are inundated for a long period of time. Consequently, water should be more saline, but this is not the case (see, Figure 11). Assuming that top layer at this locations is clayey *i.e.* of low-permeability free convection slows down, thus preventing the entry of saline water at the top of the aquifer system and obstructing the vertical passage of saline water as it moves through the aquifer (Post *et al.*, 2004). However, lithology at this monitoring sites (see, Figure 7) imply that soil is sandy and less clayey; hence with higher permeability. Therefore, it is possible that a freshwater seepage phenomenon takes place in the vicinity of piezometer 5 and 9. Probably local lithological characteristics, salt water progression and position of freshwater lens lead to freshwater discharge. In order to confirm this hypothesis additional study of the area needs to take place.

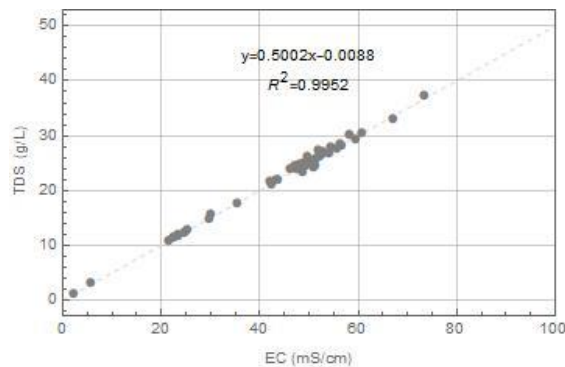


Figure 9. Electrical conductivity – total dissolved solids correlation of pore water in Rammegors.

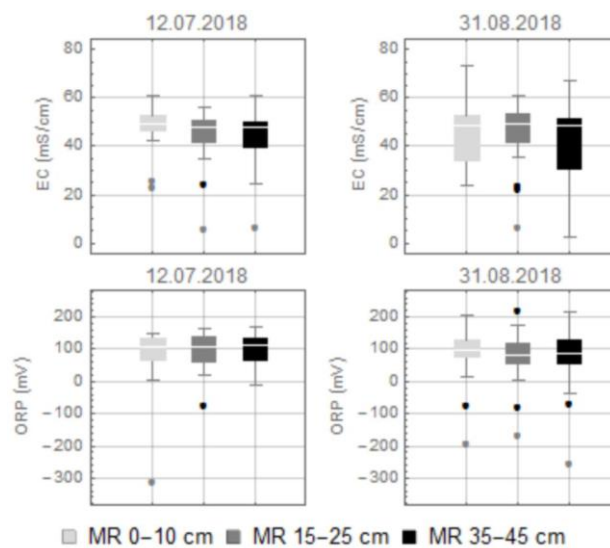


Figure 10. Boxplot for the EC and ORP measurements at the 3 different MR sampling depths on two sampling events. On each box, the central mark is the median, the edges of the box are the 25th and 75th percentiles, the whiskers extend to the most extreme data points not considered outliers (approximately  $\pm 2.7\sigma$ ), and outliers are plotted individual.

Further, while looking at the boxplot (Figure 10) it can be noted that there is a rather large variability of ORP results. ORP measures an aqueous systems capacity to either release or accept electrons from chemical reactions *i.e.* measures oxidising or reducing potential of water. Depending on the ORP values different physical, chemical and biochemical processes can occur in soil, thus having different impact on abiotic and biotic factors. Overall, ORP results suggest that in Rammegors soil predominate aerobic conditions. ORP values from August drop slightly with MR depth, which is expected due to decrease of oxygen content with depth. However, opposite trend was noticed for the values from July. At some monitoring location conditions are anoxic (between +50 and -50 mV), while negative outliers in boxplot (see, Figure 12) suggest presence of anaerobic conditions in soil. Measurements from July and August suggest that these anaerobic soil conditions move with location and depth. Consequently, suggesting that aerobic and anaerobic processes are shifting in soil over period of time. Probably this shift is occurring due to local biome activity in water and soil. These processes depend of multiple abiotic and biotic factors. For instance, a lot of parts of Rammegors are covered with biofilm that obviously contains oxygen producing diatoms (common saltwater species) that reerate water. Further, Van Colen (2012) notes that activity of bioturbating organisms (*e.g.* benthic species) can have a great impact on soil reaeration and thus on the several ecosystem processes.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

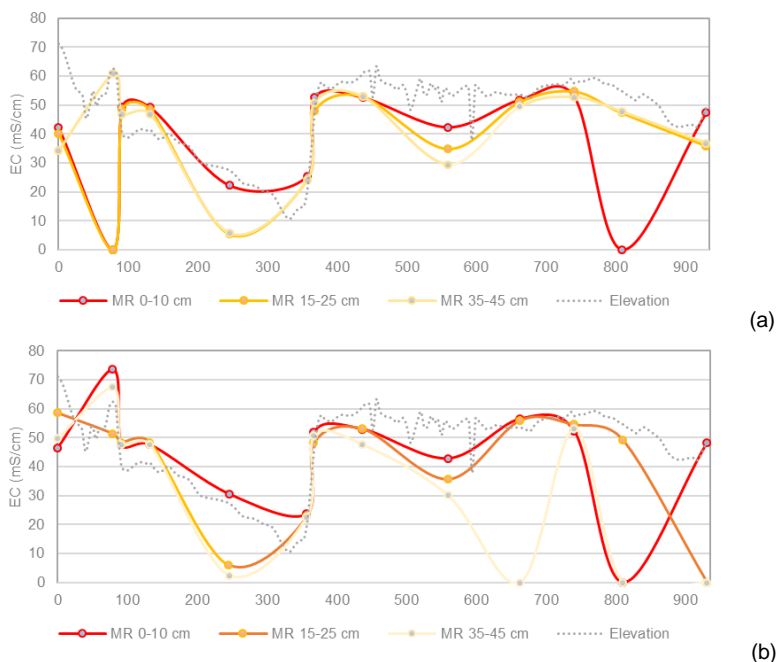


Figure 11. Change of EC measurements over the distance and elevation along the Pathway I during sampling event on: (a) 12/07/2018; (b) 31/08/2018. Zero values are the missing measurements.

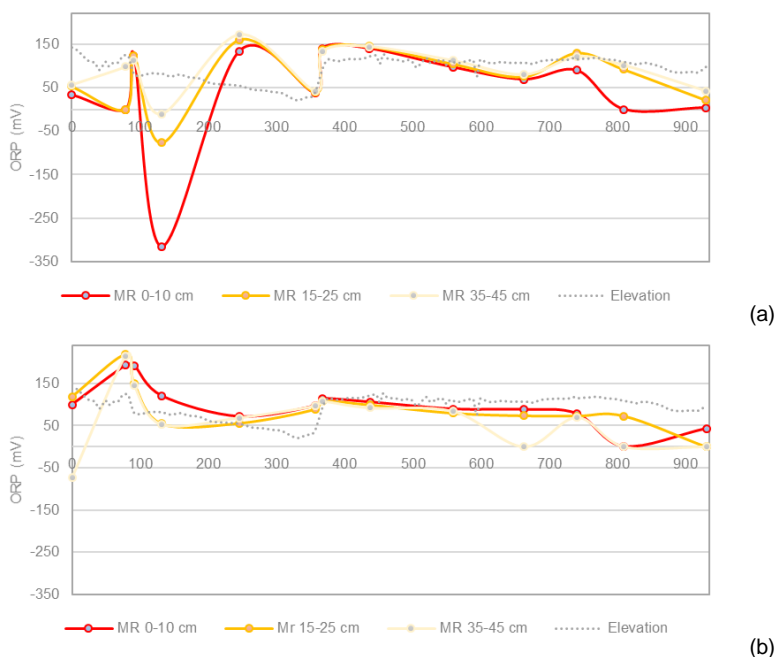


Figure 12. Change of ORP measurements over the distance and elevation along the Pathway I during sampling event on: (a) 12/07/2018; (b) 31/08/2018. Zero values are the missing measurements.

At some locations with measured maximum ORP values was seen colloidal iron in the collected samples and a red tint in water. This implies that pore water and soil are rich with iron, suggesting also the presence of iron-oxidizing microorganisms. Furthermore, the soil at these locations is visibly reddish and in the areas where there is stagnant water a rainbow-like or iridescent sheen can be seen. With poke test it was confirmed that this is a bog sheen *i.e.* naturally produced thin film on top of the water is a combination of bacteria and oxidized iron or manganese. On the other hand, at locations with measured minimum ORP values water samples were greenish and with a 'rotten egg' smell



implying presence of H<sub>2</sub>S gas. Overall, the ‘rotten egg’ smell was noticed at these locations. In addition, soil at this location had the dark colour of sludge. This suggests that sulfate-reducing microorganisms are present in water and soil. Moreover, because of possible seasonal hypoxia (*i.e.* oxygen depletion) it is likely that ‘cable bacteria’ are present in the Rammegors. They strongly influence the sediment geochemical properties of the coastal systems. Electrogenic metabolism of cable bacteria promotes the oxidation of iron at the surface of the sediment. Also, they are capable to transport electrons, derived from sulfide oxidation, to oxygen as the final electron acceptor. Further, the iron oxides can act as a ‘firewall’, which can have a substantial impact on iron-sulfur-phosphorus cycling, and thus on marine ecosystems in coastal areas (Seitaj *et al.*, 2015; Sulu-Gambari *et al.*, 2016). Overall, in order to prove these assumptions it is necessary to carry out additional chemical and microbiological sample analysis in laboratory.

## 4 Summary and Further Research

Already, after two monitoring events results have contributed to better understanding of salinization process and its effect on the vadose zone in Rammegors. With time freshwater lens will become more saline via process of infiltration. Rate of saltwater intrusion depends on the various local area characteristics (*e.g.* lithology) and on tidal fluctuation. Furthermore, different physical, chemical and biochemical processes influence the soil water quality in the studied vadose zone. Overall, the predominating processes will have an effect on the local ecosystem. Monitoring program will last for few years and the obtained results will contribute to further understanding of salinization phenomenon. Moreover, additional laboratory analysis will be carried out. For instance, soil samples were also collected during excavation of observation wells. Next research step will be to analyse samples in laboratory and determine the soil properties as well as total salt content in soil (EC<sub>tot</sub>). Additional chemical and microbiological analysis of soil water samples will be done in laboratory.

In addition, to this increased knowledge about Rammegors environment also it is important to monitor ecosystem performance. Information and knowledge will be shared between institutions (*i.e.* HZ University of Applied Sciences, NIOZ, WMR and Deltares) that are carrying out different types of research in Rammegors. Overall, understanding of how do biotic and abiotic factors interact in the ecosystem will contribute to the increased confidence in the decision making process on future water management needs.

## Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the funding by (in alphabetic order) Deltares, Province of Zeeland, Rijkswaterstaat, Royal Netherlands Institute for Sea Research, Wageningen Marine Research as part of the Rammegors research program. In addition, the authors would like to thank Tim van Oijen and João Salvador de Paiva for the fruitful discussions and useful suggestions.

## References

1. America I. (2018) *Modelling the salinization process in nature area the Rammegors*. MSc Thesis. Wageningen University, Wageningen.
2. Barlow, P.M. (2003). *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. USGS. Retrieved 2009-03-21.
3. Bobba, A.G. (2002). *Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level change in the Godavari Delta, India*. Hydrological Sciences 47(S), S67–S80.
4. De Louw P.G.B. (2013) *Saline seepage in deltaic areas*. PhD Thesis. VU University, Amsterdam.
5. Elschot, K., Tangelder, M., IJzerloo, L., van der Wal, J.T., and Ysebaert, T. (2016) Getijherstel in het Rammegors : een quick-scan van de effecten van een tijdelijke zoutwaterinstroom op een zoetwater

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- natuurgebied [Tide recovery in the Rammegors: a quick scan of the effects of a temporary saltwater inflow on a freshwater nature reserve], *Wageningen Marine Research report (C123/16)*.
6. Esselink, P., D. Bos, P. Daniels, W.E. Van Duin, and Veeneklaas, R.M. (2015) Van Polder naar kwelder : tien jaar kwelderherstel Noorderleech (From polder to salt marsh: ten years of salt marsh repair Noorderleech). *Feanwalden*.
  7. Hem D. (1985) Study and Interpretation the Chemical of Natural of Characteristics Natural Water 3rd edition *USGS Water Supply Paper 2254* 66-69 US Govt Printing Office Washington DC.
  8. Hijma, M.P., Cohen, K.M., Hoffmann, G., Van der Spek, A.J.F., Stouthamer, E., (2009) *From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene (western Netherlands, Rhine-Meuse delta)*. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw* 88-1, 13-53.
  9. Hayashi M. (2004) *Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion Environ. Monit. Assess.* 96 119–128.
  10. IPCC (2007) In: Solomon SD, Qin M, Manning Z, Chen M, Marquis KB, Averyt M, Tignor, Miller HL (eds) *Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, United States*.
  11. Khaki M., Yusoff I. and Ismalami N. (2015) *Application of the artificial neural network and neurofuzzy system for assessment of groundwater quality*, *Clean - Soil, Air, Water* 43(4) 551-560.
  12. Mandema, F. S., J. M. Tinbergen, B. J. Ens, K. Koffijberg, K. S. Dijkema, and J. P. Bakker. (2015) *Moderate livestock grazing of salt, & brackish marshes benefits breeding birds along the mainland coast of the Wadden Sea*. *Wilson Journal of Ornithology* 127:467–476.
  13. Meisler, H., P.P. Leahy, and L.L. Knobel. (1984). *Effect of eustatic sea-level changes on saltwater-freshwater in the Northern Atlantic Coastal Plain. USGS Water Supply Paper 2255*. Reston, Virginia: USGS.
  14. Metternicht, G.I., Zinck, J.A., (2003). *Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints*. *Remote Sens. Environ.* 85 (1), 1–2.
  15. Oude Essink, G.H.P., (1996) *Impact of sea level rise on groundwater flow regimes. A sensitivity analysis for the Netherlands*. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.
  16. Oude Essink, G.H.P. (1999). *Impact of sea level rise in the Netherlands*. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers— Concepts, Methods, and Practices*, ed. J. Bear, A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera, 507–530. Dordrecht, The Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*.
  17. Pauw, P. S., (2015) *Field and model investigations of freshwater lenses in coastal aquifers*. Wageningen University.
  18. Post, V.E.A., (2004) *Groundwater Salinization Processes in the Coastal Area of The Netherlands due to Transgressions during the Holocene*. PhD thesis, Free University Amsterdam, Amsterdam.
  19. Richards, L. A., et al. (1954), *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Handbook, vol. 60, 160 pp., *U.S. Dep. Agric., U.S. Gov. Print. Off.*, Washington, D. C.
  20. Rhoades, J.D, Chanduvi, F., Lesch, S.M., (1999). *Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.
  21. Sherif, M.M., and V.P. Singh. (1999). *Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. Hydrological Processes* 13(8), 1277–1287.
  22. Schoups, G., J. W. Hopmans, C. A. Young, J. A. Vrugt, W. W. Wallender, K. K. Tanji, and S. Panday (2005), *Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 102, 15,352–15,356.
  23. Seitaj D., Schauer R., Sulu-Gambari F., Hidalgo-Martinez S., Malkin S.Y., Burdorf L.D.W., Slomp C.P., and Meysman F.J.R. (2015) *Cable bacteria generate a firewall against euxinia in seasonally hypoxic basins*. *Proc Natl Acad Sci USA* 112: 13278–13283. doi:10.1073/pnas.1510152112
  24. SFS-EN27888, (1994) *Water quality: Determination of electrical conductivity, Painokartano Ky, Helsinki (In Finnish)*.
  25. Siosemarde M., Kave F., Pazira E., Sedghi H. and Ghaderi S.J. (2010) *Determine of constant coefficients to relate total dissolved solids to electrical conductivity* *Int. J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys. Eng.* 4 457–459.
  26. Stafleu, J., Maljers, D.M., Gunnink, J.L., Menkovic, A., Busschers, F.S., (2011) *3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands*. *Netherlands Journal of Geosciences* 90-4, 293-310.
  27. Sulu-Gambari F., Seitaj D., Meysman F.J.R., Schauer R., Polerecky L., Slomp C.P. (2016) *Cable Bacteria Control Iron-Phosphorus Dynamics in Sediments of a Coastal Hypoxic Basin. Environ Sci Technol* 50: 1227–1233. doi:10.1021/acs.est.5b04369.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

28. Van Colen C, Rossi F, Montserrat F, Andersson M, Gribsholt B, Hermans P, Degraer S, Vincx M, Ysebaert T, Middelburg J. (2012). *Organism-sediment interactions govern post-hypoxia recovery of ecosystem functioning*. PLoS ONE 7(11): e49795.
29. Van der Valk, L., (1996) Geology and sedimentology of Late Atlantic sandy, wave-dominated 173 deposits near The Hague (Zuid-Holland, The Netherlands): a reconstruction of an early prograding coastal sequence. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 57, 201–228.
30. Vos, P., Zeiler, F., (2008) Holocene transgressions of southwestern Netherlands, interaction between natural and anthropogenic processes. *Grondboor & Hamer 3-4* (in Dutch).
31. Walles, B. Brummelhuis, E. and Ysebaert, T. (2017) Development of the benthic macrofauna community after tidal restoration at Rammegors. *Wageningen Marine Research report (C110/17)*.
32. Walther, G.R. et al. (2002) *Ecological responses to recent climate change*. Nature 416, 389–395.
33. Zinck, J. A. (2001). *Monitoring salinity from remote sensing data*. In R. Goossens, & B. M. De Vlieghe (Eds.), Proceedings of the 1st Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries ( pp. 359 – 368). Belgium: Ghent University.

## **Nagnuti oštroični preliv za merenje hidrograma oticaja**

Lajoš Hovanj<sup>1</sup>

APSTRAKT: Važeći međunarodni standard ne definiše način osposobljavanja nepotopljenog, oštroičnog preliva za merenje hidrograma oticaja. Suština osposobljavanja je fiksiranje tačke nalepljenja na zid preliva i tačke odvajanja od zida preliva. Zbog ovog problema 2015-e godine u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Subotici započeta je serija ispitivanja za utvrđivanje načina aerisanja mlaza prelivne vode. U ranije objavljenim radovima ovog autora prikazani su rezultati dva rešenja: a) vertikalni, nesuženi, oštroični preliv raznih visina P je snabdeven aeratorom mlaza zvanim veštački prst i b) vertikalni, suženi preliv visine  $P=0,2$  m i suženosti  $b/B=0,3$ . U ovom radu je prikazan rezultat za još jedno, novo rešenje: nesuženi, nagnuti preliv raznih visina P.

Ključne reči: hidrogram, nepotopljeno prelivanje, oštroični preliv, nagnuti preliv

## **Titled thin-plate weir for measuring runoff hydrograph**

ABSTRACT: The relevant international standard does not specify how a free-flow thin-plate weir can be made suitable for measuring runoff hydrograph. The essence is in fixing the points of adherence and separation. For this, series of experiments in order to determine the appropriate way of weir aeration has been carried out in the Hydraulic Laboratory of the Faculty of Civil Engineering Subotica in 2015. In the papers published by this author earlier results of two solutions are presented: a) vertical thin-plate weir of various heights P without side contraction, equipped with an aeration device called "artificial finger", and b) vertical thin-plate weir of height  $P=0,2$  m with side contraction  $b/B=0,3$ . This paper presents an additional, new solution: tilted free-flow thin-plate weir of various heights P, without side contraction.

Keywords: hydrograph, free-flow, thin-plate weir, tilted weir

---

<sup>1</sup> Dr Lajoš Hovanj, vanredni profesor, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, hovanyl@gf.uns.ac.rs

## 1 Uvod

Kanal pravougaonog poprečnog preseka (širine  $B$ ) pregrađen je oštroičnim prelivom visine  $P$  i širine  $b=B$ . Preliv je u pravcu strujanja nagnut za ugao  $\alpha$  (Slika 1).

Pri nepotopljenom prelivanju voda se preliva ili aerisanim ili neaerisanim mlazom [8-12]. U prvom slučaju mlaz nije nalepljen na nizvodnu stranu preliva, dok je u drugom slučaju on nalepljen na preliv. Za smanjujući proticaj ova dva stanja razdvaja tačka nalepljenja, a za rastući proticaj tačka odvajanja. Nedovoljna aerisanost prelivnog mlaza sprečava stabilizaciju ove dve tačke. Tada je preliv neadekvatan za merenje hidrograma oticaja. Za merenje hidrograma oticaja znači treba obezbediti dovoljnu aerisanost prelivnog mlaza.

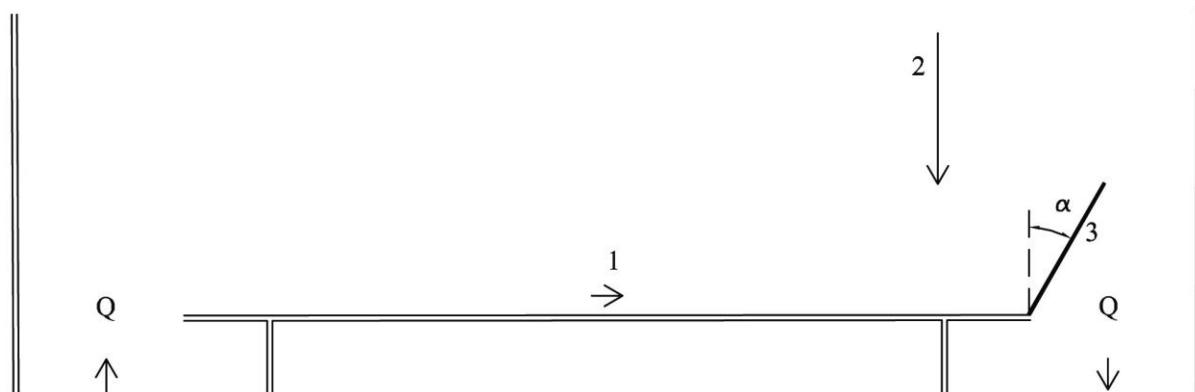
U opštem slučaju proticaj vode  $Q$  pri aerisanom prelivanju u Republici Srbiji se računa pomoću sledeće jednačine:

$$Q = m \sqrt{2g} b H^{3/2} \quad (1)$$

gde su  $m$  koeficijent prelivanja,  $g$  ubrzanje Zemljine sile teže,  $b \leq B$  širina i  $H$  visina prelivnog mlaza. Koeficijent prelivanja je funkcija  $m = f(H/P, b/B, H/b, \alpha, We, Re)$ , gde su  $We = (2\rho g H b) / \sigma$  i  $Re = ((2gH)^{0.5} (bH)^{0.5}) / \nu$  Weberov i Reynoldsov broj,  $\rho$  gustina,  $\sigma$  koeficijent površinskog napona a  $\nu$  kinematski koeficijent viskoznosti vode [1-4, 6-12, 15]. Uticaj Weberovog i Reynoldsovog broja na koeficijent prelivanja se javlja pri maloj vrednosti ili  $b$ , ili  $H$ , ili  $b$  i  $H$ .

Važeći međunarodni standard se odnosi na utvrđivanje proticaja vode pri aerisanom mlazu vertikalnog preliva ( $\alpha = 0^\circ$ ) [13, 14]. On ne rešava fiksiranje tačke nalepljenja i tačke odvajanja.

Stručna literatura za aeraciju mlaza preporučuje otvaranje rupice ispod mlaza na zidovima kanala, ili korišćenje cevi za dovod vazduha [5, 10]. Na osnovu iskustva stečenog u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Subotici ovako ne može da se reši fiksiranje tačke nalepljenja i tačke odvajanja [10]. Zbog ove problematike u Subotici su 2015-e godine započeta nova istraživanja za osposobljavanje oštroičnog preliva za merenje hidrograma oticaja. Do sada su objavljena dva rešenja.



Slika 1. Eksperimentalna instalacija. 1 – kanal, 2 – merna igla, 3 – oštroični preliv nagnut za ugao  $\alpha$

Figure 1. Experimental rig. 1 – channel, 2 – water level gage, 3 – thin-plate weir tilted by angle  $\alpha$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 1. Funkcije za proračun proticaja preliivanja kroz vertikalni oštroivični preliv prema međunarodnom standardu.

Table 1. Functional relationship for calculation of discharge over vertical thin-plate weir according to the international standard.

<i>Kindsvater-Carter</i>	<i>Rehbock</i>
$Q=C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g_n} b_e h_e^{3/2}$	$Q=C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g_n} B h_e^{3/2}$
b/B=1: $C_d=0,602+0,075 \frac{H}{P}$	b/B=1: $C_e=0,602+0,083 \frac{H}{P}$
b/B=0,8: $C_d=0,596+0,045 \frac{H}{P}$	
b/B=0,6: $C_d=0,593+0,018 \frac{H}{P}$	
b/B=0,5: $C_d=0,592+0,01 \frac{H}{P}$	
b/B=0,4: $C_d=0,591+0,0058 \frac{H}{P}$	
b/B=0,2: $C_d=0,589-0,0018 \frac{H}{P}$	
b/B=1: $b_e=B-0,0009$ (m)	
b/B=0,8: $b_e=b+0,0042$ (m)	
b/B=0,6: $b_e=b+0,0036$ (m)	
b/B=0,4: $b_e=b+0,0027$ (m)	
b/B=0,2: $b_e=b+0,0024$ (m)	
$h_e=H+0,001$ (m)	$h_e=H+0,0012$ (m)
$H/P < 2,5$	$H/P \leq 4$
$H \geq 0,03$ m	$0,03 \text{ m} \leq H \leq 1$ m
$b \geq 0,15$ m	$B \geq 0,3$ m
$P \geq 0,10$ m	$0,06 \text{ m} \leq P \leq 1$ m
$(B-b)/2 \geq 0,1$ m	

Za prvo rešenje je ispitivan vertikalni oštroivični preliv širine  $b=B=0,1$  m i visine  $P=10, 15$  i  $20$  cm [9-12]. Preliv je bio lociran na nizvodni kraj kanala, posle čega se nalazila kaskada. Preliv je bio snabdeven aeratorom mlaza nazvanim veštački prst ili traka za aeraciju. Veštački prst je metalni lim širine 3 cm, savijen u obliku slova L – sa horizontalnim i vertikalnim krakom. Dužina horizontalnog kraka veštačkog prsta je 0,065 m. Za obezbeđenje dovoda dovoljne količine vazduha za aeracije mlaza ravnomerno po širini preliiva i da se preliivanje vode vrši bez usporavanja preliivanja potrebni su: a) razmak konstantne širine od  $\delta=0,0015$  m između horizontalnog kraka veštačkog prsta i nizvodne

strane oštroičnog preliva i b) denivelacija između kote krune preliva i horizontalnog dela veštačkog prsta  $\Delta z=0,016$  m. Bez obzira na visinu preliva tačka nalepljenja se javila pri  $H=0,01$  m. Vezu između proticaja vode i visine aerisanog mlaza su opisale funkcije međunarodnog standarda: za rastući proticaj pri  $H \geq 0,0182 (P=0,2m) \leftrightarrow 0,0194 (P=0,1m)$  m, a za smanjujući proticaj pri  $H \geq 0,01$  m:

- prema Kindsvater-Carteru za ceo ispitivani dijapazon (za  $P=0,1$  i  $0,15$  m), odn. za  $0,01$  m  $\leq H \leq 0,0182$  m (za  $P=0,2$  m), i
- prema Rehbocku za  $0,0182$  m  $< H < 0,04$  m (za  $P=0,2$  m).

Greške koeficijenta preliivanja su između  $-2,3$  i  $+4,8\%$  (za  $P=0,1$  m),  $-1$  i  $+3,6\%$  (za  $P=0,15$  m) i za dijapazon  $0,01$  m  $\leq H \leq 0,0182$  m računata po Kindsvater-Carteru su između  $-1,5$  i  $+1,6\%$ , a za dijapazon  $0,0182$  m  $< H < 0,04$  m prema Rehbocku su između  $-1$  i  $+1,1\%$  za  $P=0,2$  m. Zbog granice primenljivosti spomenute funkcije kod proračuna aerisanog mlaza važno je znači znati da li je reč o rastućem, ili o smanjujućem proticaju.

Ova konstatacija je važna i za neaerisani mlaz. Kod oštroičnog preliva opremljenog veštačkim prstom uticaj Weberovog i Reynoldsovog broja na preliivanje je značajan za rastući proticaj do tačke odvajanja  $[H \leq 0,0167 (P=0,2m) \leftrightarrow 0,0178 (P=0,1m)]$  m, a za smanjujući proticaj od tačke nalepljenja ( $H \leq 0,01$  m) [9-12]. Bez obzira da li proticaj raste ili se smanjuje za neaerisano preliivanje važi jedna funkcija:  $Q=f(H)$ . Ova funkcija je ispitivana u dve varijante za nesušeni, vertikalni preliv:

- varijanta A:  $Q/[B(P+H)] = f([Re^2/We]^{1/3}/20000) = f[(\sigma H)/(\rho v^2)]^{1/3}/20000$  i
- varijanta B:  $m/m_{\text{Kindsvater-Carter}} = f(1000(We/Re^2)^{1/3}) = f(1000[(\rho v^2)/(\sigma H)]^{1/3})$ , koju treba koristiti uz jednačinu (1).

Kod neaerisanog mlaza za  $H \geq 0,005$  m (za  $P=0,1$  m),  $H \geq 0,0048$  m (za  $P=0,15$  m) i  $H \geq 0,0053$  m (za  $P=0,2$  m) greška za utvrđivanje proticaja vode (varijanta A), odn. koeficijenta preliivanja (varijanta B) je:

- između  $-1,6$  i  $+1,6\%$  (za  $P=0,1$  m),  $-2,1$  i  $+2,4\%$  (za  $P=0,15$  m) i  $-2$  i  $+2\%$  (za  $P=0,2$  m) kod varijante A, odn.
- između  $-2,8$  i  $+2\%$  (za  $P=0,1$  m),  $-3$  i  $+1,8\%$  (za  $P=0,15$  m) i  $-1,2$  i  $+2,8\%$  (za  $P=0,2$  m) kod varijante B.

Za neaerisani mlaz dobije se znači manja greška korišćenjem funkcije opisane varijantom A.

Za drugo rešenje za osposobljavanje oštroičnog preliva za merenje hidrograma oticaja ispitivan je sušeni preliv, lociran na nizvodni kraj kanala širine  $B=0,1$  m, posle čega se nalazi kaskada [8]. Ispitivan je preliv visine  $P=0,2$  m sa širinom suženog dela  $b=3, 4, 5, 6$  i  $7$  cm. Tačka odvajanja i tačka nalepljenja su bile stabilne samo za sušeni preliv  $b/B=0,3$ . Za razliku od ranijih ispitivanja, ove tačke su se spojile kod proticaja  $0,00019$  m<sup>3</sup>/s i visine prelivnog mlaza  $H=0,023$  m. Koeficijenti preliivanja aerisanog suženog preliva su pratili funkciju Gharahjeh et al. 2015 [7], a greške koeficijenta preliivanja su bile između  $-0,68\%$  i  $+2,68\%$ . Za neaerisani mlaz, po varijanti A, za  $H \geq 0,0052$  m greške za utvrđivanje proticaja vode se nalaze između  $-3,99$  i  $+6,56\%$ .

Aeraciju preliva može da obezbedi i nesušeni oštroični preliv, nagnut za ugao  $\alpha > 0^\circ$  (Slika 1) [6]. Za merenje hidrograma oticaja znači – kao treću mogućnost – treba koristiti nepotopljeni, nesušeni, nagnuti oštroični preliv.

Cilj ovog rada je provera stabilnosti tačke nalepljenja i tačke odvajanja nesuženog nagnutog oštroičnog preliva lociranog na nizvodni kraj kanala, posle čega se nalazi kaskada. Pored navedena dva rešenja za aeraciju prelivnog mlaza ovo je treće, novo rešenje za osposobljavanje oštroičnog preliva za merenje hidrograma oticaja vode.

## 2 Opis instalacije

U hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Subotici oštroični preliv je ugrađen na nizvodni kraj kanala širine  $B=0,1$  m dužine  $2,2$  m (Slika 1).

Ispitivani su prelive visine  $P=10, 15$  i  $20$  cm, širine  $b=B=10$  cm sa uglom nagnutosti  $\alpha=10, 20$  i  $30^\circ$ .

Ostali deo načina ispitivanja je pratio metod opisan u radovima objavljanim 2016-e, 2017-e i 2018-e godine [8-12].

Preliv od pleksiglasa je imao debljinu 5 mm sa oštricom debljine 2 mm, a kosina sa nizvodne strane je bila pod uglom od 45°.

Nivo vode je meren 0,18 m uzvodno od preliva mernom iglom tačnosti ±0,1 mm.

Zahvatanje vode je trajalo najmanje 25 sekundi. Težina vode je izmerena vagom tačnosti od 5 grama (do 15 kg-a težine) i od 10 grama tačnosti (do 150 kg-a).

Tokom zahvatanja vode u blizini uzvodnog preseka izmerena je temperatura vode. Temperatura vode tokom celog merenja je varirala između 19 i 21, prosečno 19,91°C. Gustina vode je merena menzutom zapremine 1 dm<sup>3</sup>, namenjenom za vodu temperature 20°C. Gustina vode je bila 1 kg/dm<sup>3</sup>. Zbog ove činjenice proticaj vode je računat pomoću jednačine:  $Q (l/s) = (G_{sud+voda} - G_{sud})/t$ , gde su  $G_{sud+voda}$  težina suda i zahvaćene vode (kg),  $G_{sud}$  težina suda (kg) i  $t$  vreme zahvatanja vode (s).

Greška određivanja koeficijenta preliivanja je računata pomoću jednačine:  $Error (\%) = 100(m_j - m_{(1)})/m_{(1)}$ , gde su  $m_j$  koeficijent preliivanja računat po nekoj od funkcija navedenih u tabeli 1, i  $m_{(1)}$  koeficijent preliivanja računat pomoću jednačine (1).

### 3 Rezultati merenja

Merenja su vršena između 20. oktobra 2017. godine i 24. jula 2018. godine. Broj merenja se menjao između 21 i 74 po serijama (Tabela 2).

Tabela 2. Broj merenja po ispitivanim serijama.

Table 2. Number of measurements in the investigated series.

<i>P (m)</i>	0,2	0,2	0,2	0,15	0,1
<i>α (°)</i>	6	20	31	28,5	26
<i>Broj merenja</i>	21	25	74	61	60

Ispitivanje je vršeno tako da je proticaj vode sa nule do maksimuma povećavan malim koracima, pa je sličnim postupkom smanjen do nule. Kod tačke odvajanja visina prelivnog mlaza se skokovito povećala.

Prvo je ispitan preliv visine  $P=0,2$  m. Za svaku varijantu stabilnost tačke odvajanja i tačke nalepljenja su proveravane ponavljanjem merenja pet puta. Od svih ispitivanih varijanti tačka odvajanja je bila stabilna za ugao nagnutosti  $\alpha=31^\circ$  (Slika 2). Tačka odvajanja se javila pri proticaju  $Q_{P=0,2m}=0,00067$  m<sup>3</sup>/s, kada se visina prelivnog mlaza povećala sa  $H_{P=0,2m}=0,0193$  m na  $H=0,0219$  m. Prelaz iz aerisanog u neaerisano stanje se javio pri proticaju  $Q_{P=0,2m}=0,00014-0,00015$  m<sup>3</sup>/s i visini prelivnog mlaza  $H_{P=0,2m}=0,0074-0,0077$  m.

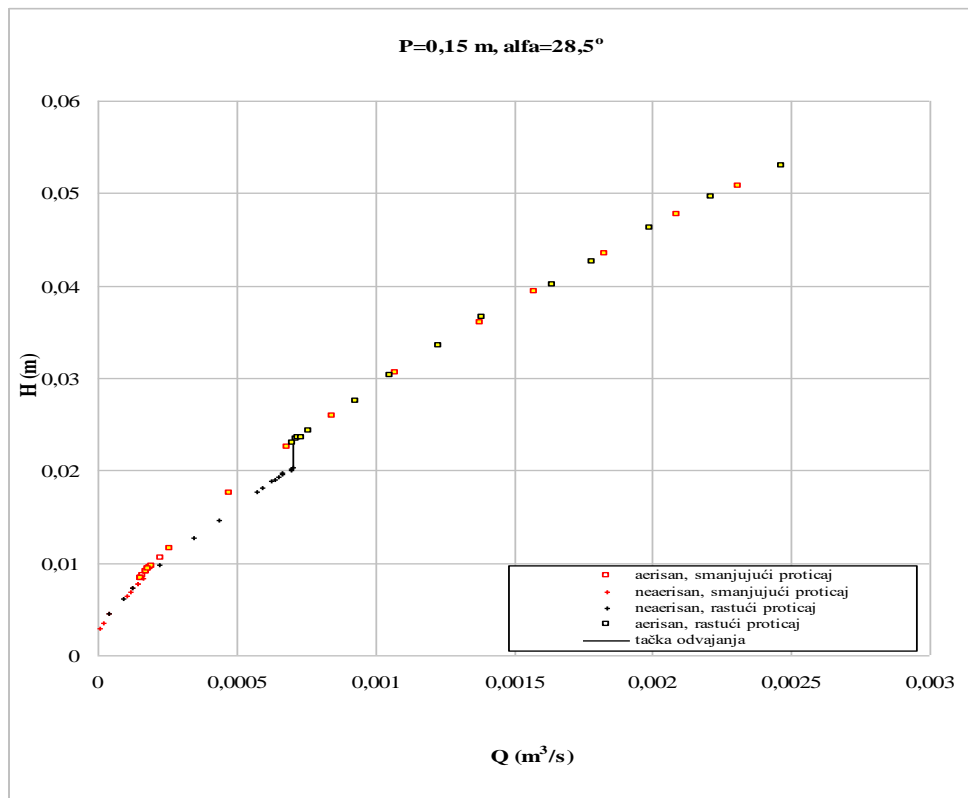
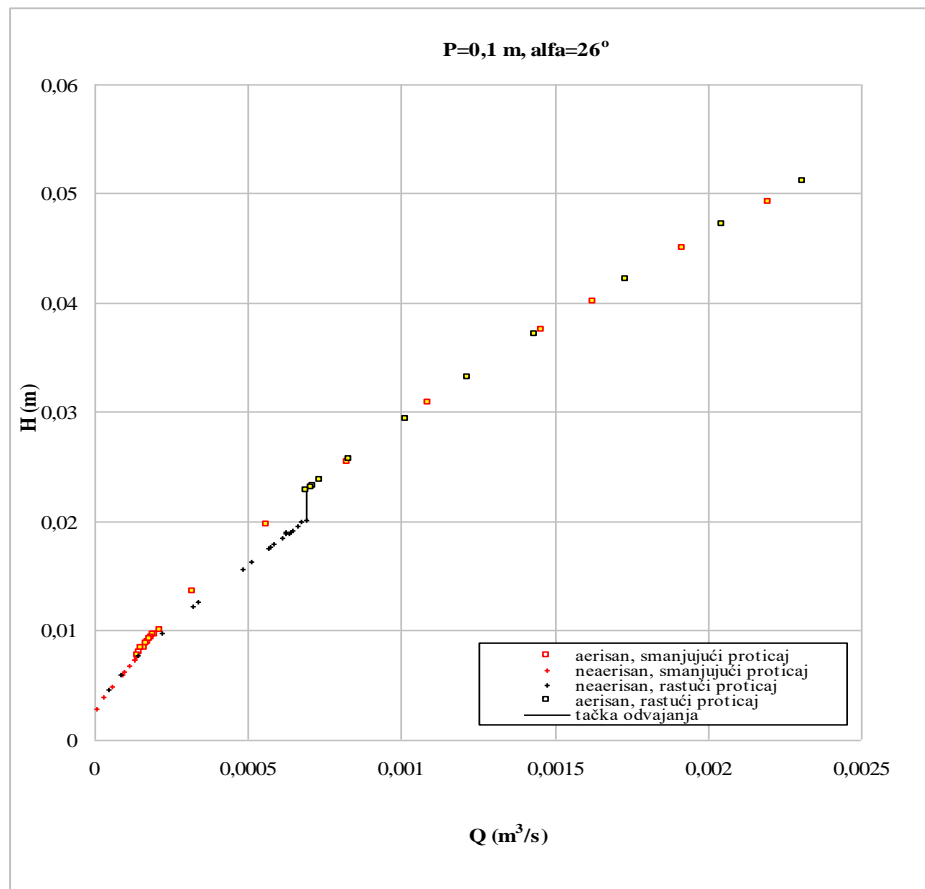
Prelivi visine  $P=0,1$  i  $0,15$  m su ispitivani samo za ugao nagnutosti oko  $\alpha=30^\circ$  (Slika 2). Tačka odvajanja se javila pri proticaju  $Q_{P=0,1m}=0,00069$  i  $Q_{P=0,15m}=0,00070$  m<sup>3</sup>/s, kada se visina prelivnog mlaza povećala sa  $H_{P=0,1m}=0,0201$  i  $H_{P=0,15m}=0,0203$  m na  $H_{P=0,1m}=0,0229$  i  $H_{P=0,15m}=0,0230$  m. Prelaz iz aerisanog u neaerisano stanje se javio pri proticaju  $Q_{P=0,1m}=0,00013-0,00014$  i  $Q_{P=0,15m}=0,00015-0,00016$  m<sup>3</sup>/s i visini prelivnog mlaza  $H_{P=0,1m}=0,0073-0,0078$  i  $H_{P=0,15m}=0,0083-0,0084$  m.

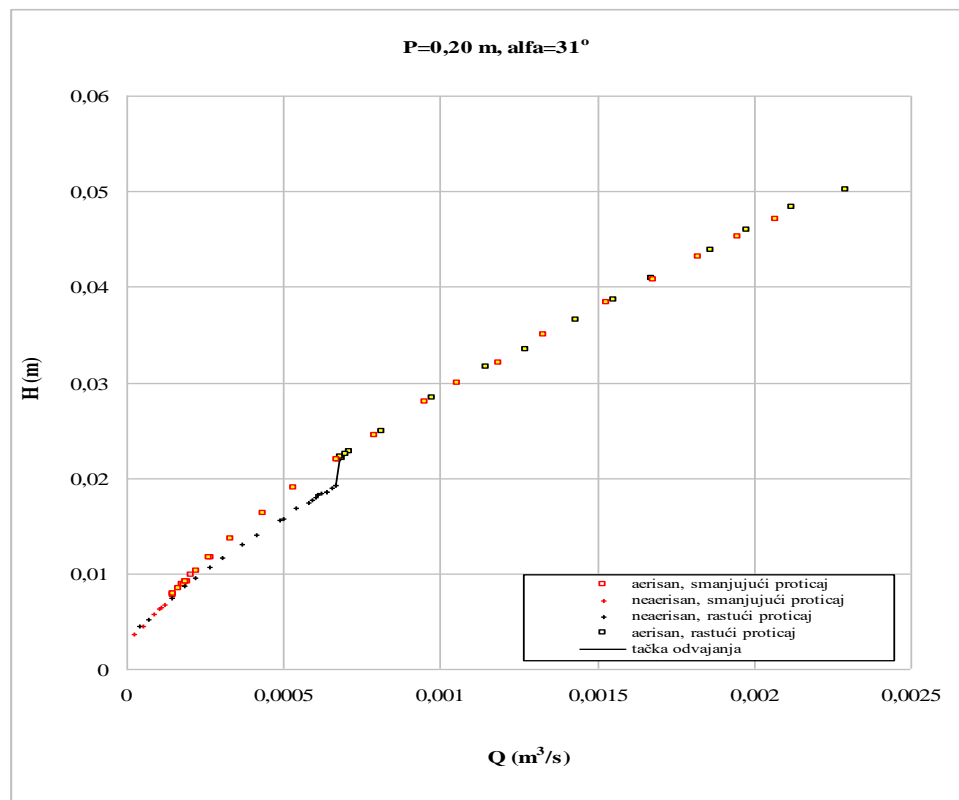
Rezultati merenja koeficijenta preliivanja za aerisano stanje prikazani su na slici 3.

Za neaerisani mlaz, po varijanti A, rezultati su prikazani na slici 4.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.





Slika 2. Zavisnost između visine prelivnog mlaza  $H$  i proticaja vode  $Q$  za prelive visine  $P=10, 15$  i  $20$  cm i ugla nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$ .

Figure 2. The head  $H$  and discharge  $Q$  relationship corresponding to weir heights  $P=10, 15$  and  $20$  cm, and tilt angles  $\alpha=26-31^\circ$ .

## 4 Diskusija

Za istu visinu preliva, u odnosu na nesuženi, vertikalni preliv za nagnuti preliv tačka odvajanja se javlja pri većoj, a tačka nalepljenja pri manjoj visini prelivnog mlaza.

Kod nagnutog preliva povećanjem visine preliva povećava se potreban ugao nagnutosti  $\alpha$  za stabilizaciju tačke odvajanja i nalepljenja (Tabela 3).

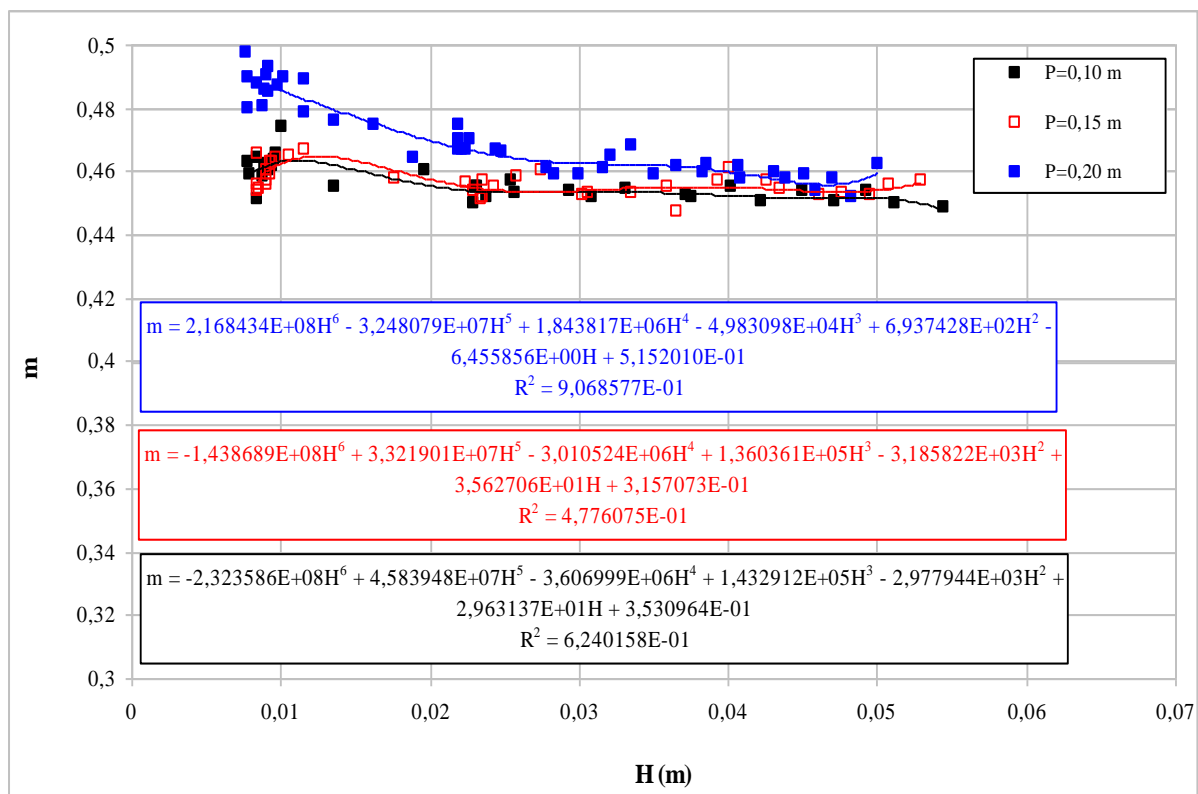
Tabela 3. Zavisnost između visine preliva  $P$  i potrebnog ugla nagnutosti  $\alpha$  za osposobljavanje nagnutog preliva za merenje hidrograma oticaja.

Table 3. Dependence between the height of the weir  $P$  and the required angle of inclination  $\alpha$  of the titled weir for measuring runoff hydrograph.

Visina preliva $P$ (m)	0,1	0,15	0,2
Potreban ugao nagnutosti $\alpha$ ( $^\circ$ )	26	28,5	31

Funkcije međunarodnog standarda su namenjene za vertikalni preliv. Za merene rezultate nagnutog preliva date su nove funkcije za  $m=f(H, \alpha)$  (Slika 3).

Greške koeficijenta prelivanja aerisanog mlaza su bile između  $-2,2\%$  i  $+2,09\%$  (za  $P=0,1$  m),  $-1,83\%$  i  $+1,79\%$  (za  $P=0,15$  m) i  $-1,69$  i  $+1,85\%$  (za  $P=0,2$  m) (Slika 5).



Slika 3. Koeficijent preliivanja aerisanog mlaza  $m$  u funkciji visine prelivnog mlaza  $H$  za prelive visine  $P=0,1-0,2$  m i ugla nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$ .

Figure 3. Discharge coefficient in case of aerated jet of head  $H$  for weir heights  $P=0,1-0,2$  m and tilt angle  $\alpha=26-31^\circ$ .

Prema nama dostupnoj literaturi ovde objavljeni rezultati ispitivanja su prvi u vezi osposobljavanja nagnutog preliiva za merenje hidrograma oticaja.

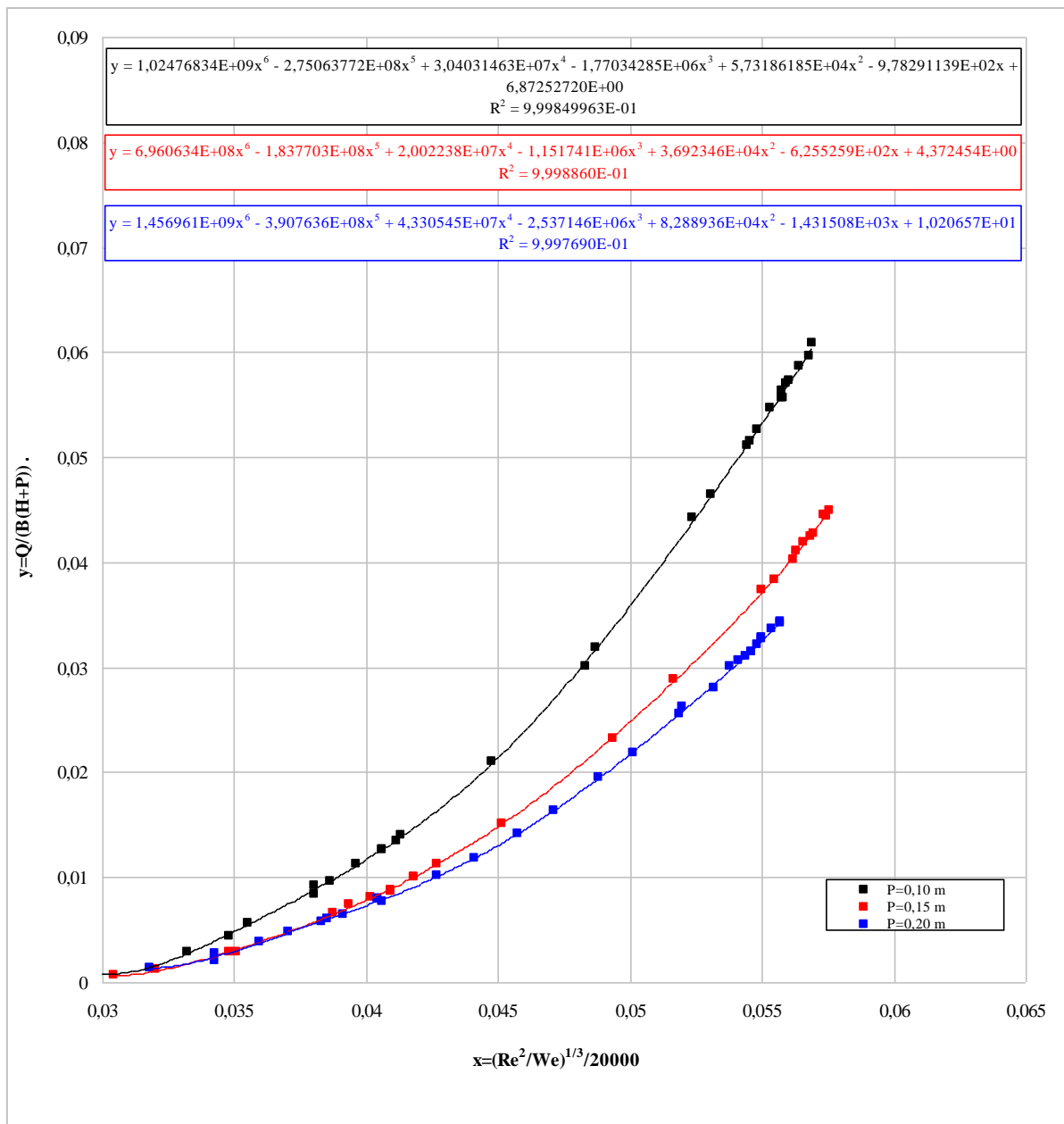
Kod neaerisanog mlaza za  $H \geq 0,006$  m (za  $P=0,1$  m),  $H \geq 0,0062$  m (za  $P=0,15$  m) i  $H \geq 0,0052$  m (za  $P=0,2$  m) greške za utvrđivanje proticaja vode se nalaze između -3,68 i +4,51% (za  $P=0,1$  m), -3,51 i +3,18% (za  $P=0,15$  m) i -2,27 i +2,45% (za  $P=0,2$  m) kod preliiva nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$  (Slika 6).

Ovi rezultati su potvrdili već objavljene naše rezultate: pri neaerisanom preliivanju proticaj vode se utvrđuje jednom jednačinom, uz zadate granice grešaka.

Upoređenjem granice grešaka za sva tri rešenja pri utvrđivanju proticaja vode, suženi preliv obezbeđuje najslabije rezultate (Tabela 4).

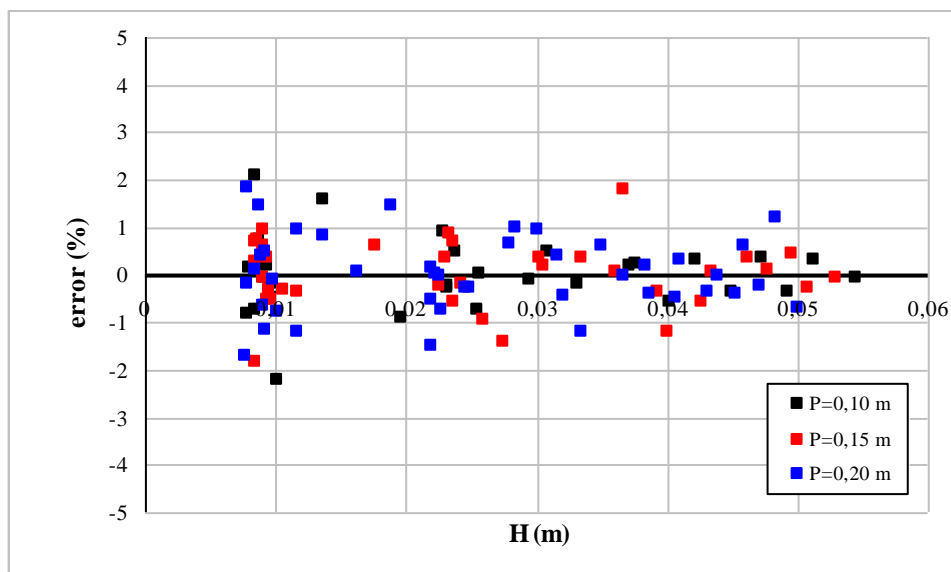
Pored ovog, ako se uzimaju u obzir i potrebni poslovi za osposobljavanje oštroiivnog preliiva  $P=0,2$  m za merenje hidrograma oticaja, od ispitivanih rešenja za upotrebu u praksi se preporučuje upotreba nagnutog preliiva, pri uglu nagnutosti  $\alpha=31^\circ$ .

Dobijeno rešenje nagnutog preliiva je provereno i za  $P=0,1$  i  $0,15$  m. Rezultati u vezi granice grešaka su prikazani u tabeli 5.



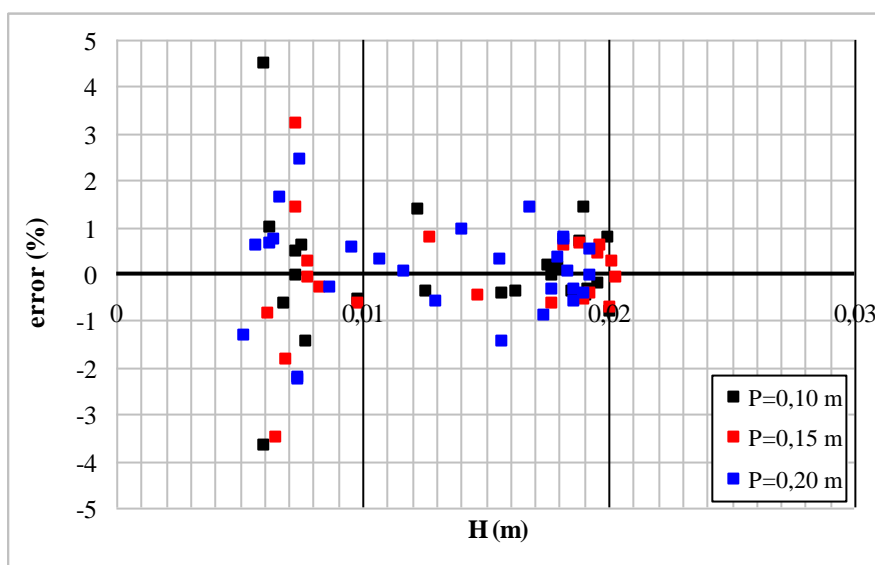
Slika 4. Funkcija  $Q/[B(P+H)] = f([Re^2/We]^{1/3}/20000) = f([(σH)/(ρv^2)]^{1/3}/20000)$  za neaerisani prelivni mlaz nagnutog preliva ugla nagnutosti  $α=26-31°$  (visina preliva  $P=0,1-0,2$  m).

Figure 4. Function  $Q/[B(P+H)] = f([Re^2/We]^{1/3}/20000) = f([(σH)/(ρv^2)]^{1/3}/20000)$  for the not aerated thin-plate weir tilted by  $α=26-31°$  (height of the weir  $P=0,1-0,2$  m).



Slika 5. Greška koeficijenta prelivanja  $m$  u funkciji visine prelivnog mlaza  $H$  za oštroični preliv visine  $P=0,1-0,2$  m i ugla nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$  (aerisani mlaz).

Figure 5. Error of the discharge coefficient in function of head  $H$  in case of thin-plate weir of height  $P=0,1-0,2$  m and tilt angle  $\alpha=26-31^\circ$  (aerated jet).



Slika 6. Greška utvrđivanja proticaja  $Q$  u funkciji visine prelivnog mlaza  $H$  za oštroični preliv visine  $P=0,1-0,2$  m i ugla nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$  (ne aerisani mlaz).

Figure 6. Error in discharge  $Q$  in function of head  $H$  in case of thin-plate weir of height  $P=0,1-0,2$  m and tilt angle  $\alpha=26-31^\circ$  (not aerated jet).

Tabela 4. Vrednosti granice grešaka za utvrđivanje proticaja oštroičnog preliva visine  $P=0,2$  m prema rešenjima za osposobljavanje ovog preliva za merenje hidrograma oticaja.

Table 4. Error limits of discharge in case of thin-plate weir of height  $P=0,2$  m, corresponding to solutions for measuring runoff hydrographs.

<i>Ispitivana rešenja</i>	<i>Neaerisan mlaz donja (%)</i>	<i>Neaerisan mlaz gornja (%)</i>	<i>Aerisan mlaz donja (%)</i>	<i>Aerisan mlaz gornja (%)</i>
<i>Veštački prst</i>	-2	+2	-1 i -1,5	+1,1 i +1,6
<i>b/B=0,3</i>	-3,99	+6,56	-0,68	+2,68
<i><math>\alpha=31^\circ</math></i>	-2,27	+2,45	-1,69	+1,85

Tabela 5. Vrednosti granice grešaka za utvrđivanje proticaja oštroičnog preliva visine  $P=0,1-0,2$  m i ugla nagnutosti  $\alpha=26-31^\circ$ .

Table 5. Error limits of discharge in case of thin-plate weir of height  $P=0,1-0,2$  m and tilt angle  $\alpha=26-31^\circ$ .

<i>Visina preliva P (m)</i>	<i>Neaerisan mlaz donja (%)</i>	<i>Neaerisan mlaz gornja (%)</i>	<i>Aerisan mlaz donja (%)</i>	<i>Aerisan mlaz gornja (%)</i>
0,1	-3,68	+4,51	-2,20	+2,09
0,15	-3,51	+3,18	-1,83	+1,79
0,2	-2,27	+2,45	-1,69	+1,85

## 5 Zaključak

U hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta u Subotici nastavljeno je ispitivanje nepotopljenog oštroičnog preliva u vezi njegovog osposobljavanja za merenje hidrograma oticaja. Za nesuženi, nagnuti preliv visine  $P=0,2$  m utvrđeno je da su tačka odvajanja i tačka nalepljenja stabilne kod preliva čiji je ugao nagnutosti  $\alpha=31^\circ$ . Upoređenjem granice greške i dodatnih poslova za osposobljavanje oštroičnog preliva  $P=0,2$  m za merenje hidrograma oticaja, od ispitivanih rešenja za upotrebu u praksi se preporučuje korišćenja nagnutog preliva  $\alpha=31^\circ$ . Povećanjem visine preliva  $P=0,1-0,2$  m povećava se tačnost merenja hidrograma oticaja.

## Literatura

1. Aydin I., Altan-Sakarya A. B., Ger A. M. (2006) Performance of Slit Weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(9): 987-989.
2. Aydin I., Altan-Sakarya A. B., Sisman C. (2011) Discharge formula for rectangular sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22: 144-151.
3. Aydin I., Ger A. M., Hincal O. (2002) Measurement of small discharges in open channels by Stil Weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2): 234-237.
4. Bagheri S., Kabiri-Samani A. R., Heidarpour M. (2014) Discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. Part I: Traditional weir equation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 35: 109-115.
5. Bos M. G. (1987) *Discharge Measurement Structures*. Third revised edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
6. Budinski Lj., Hovanj L. (2002) Modelsko ispitivanje nagnutog oštroičnog preliva. Zbornik radova sa 13. savetovanja Jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja. Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Sokobanja. 09.-11. oktobar 2002: II-33–II-38.
7. Gharahjeh S., Aydin I., Altan-Sakarya A. B. (2015) Weir velocity formulation for sharp-crested rectangular weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41: 50-56.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

8. Hovany L. (2018) Contracted thin-plate weir for measuring discharge hydrographs. Contemporary Achievements in Civil Engineering 2018. 6<sup>th</sup> International Conference. Faculty of Civil Engineering, Subotica. 20. April 2018: 417-427.
9. Hovány L. (2017) Different Height Thin-plate Weirs for Measuring Discharge Hydrographs. Contemporary Achievements in Civil Engineering 2017. 5<sup>th</sup> International Conference. Faculty of Civil Engineering, Subotica. 21. April 2017: 661-673.
10. Hovány L. (2016) Discharge Measurement by Full-Width Ventilated Thin-Plate Weir. Conference Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering 2016. Faculty of Civil Engineering, Subotica. 22<sup>nd</sup> April 2016: 669-677.
11. Hovany L. (2017) New method for discharge hydrograph measurement of the free overflow with full-width, thin-plate weir. *Current Science*, 113(1): 148-154.
12. Hovanj L. (2017) Oštroivični prelivi različite visine osposobljeni za merenje hidrograma oticaja. *Vodoprivreda*, 288-290: 329-335.
13. International standard ISO 1438:2008(E). Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs. Switzerland: International Organization for Standardization 2008.
14. International standard ISO 1438:2008 Technical Corrigendum 1. Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs Switzerland: International Organization for Standardization 2008.
15. Ramamurthy A. S., Qu J., Zhai Ch., Vo D. (2007) Multislit Weir Characteristics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(2): 198-200.

## Bezkontaktno merenje protoka u otvorenim tokovima

Predrag Vojt<sup>1</sup>, Dušan Prodanović<sup>2</sup>, Jasna Plavšić<sup>3</sup>

**APSTRAKT:** U hidrotehničkoj praksi se često susrećemo sa merenjem protoka u otvorenim tokovima. Standardna metoda merenja protoka je pomoću hidrometrijskih krila, gde se tačku po tačku mere brzine u poprečnom preseku i na osnovu poprečnog preseka računa protok. U novije vreme se standardno koristi i ultrazvučna metoda (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP) kod koje se pomeranjem senzora po profilu snima raspored brzina po dubini kao i dubina vode u preseku, pa se na osnovu merenih podataka računa protok. U poslednje vreme se dosta eksperimentiše i sa bezkontaktnim metodama gde merni senzor nije u direktnom kontaktu sa vodom. Jedan od korišćenih principa zasniva se na doplerovom efektu radarskog signala za merenje površinskih brzina. Za proračun protoka je neophodno poznavati poprečni presek rečnog korita i način ekstrapolovanja izmerene površinske brzine po dubini. Sa masovnijom primenom dronova postaje popularna i druga metoda, zasnovana na obradi video snimaka površine vode i praćenju kretanja čestica (Particle Image Velocimetry - PIV) pri čemu opet treba poznavati poprečni presek i ekstrapolaciju površinskih brzina po dubini da bi se izračunao protok. U praksi nove metode još nisu doživele potrebnu verifikaciju da bi ušle u standardnu upotrebu, mada su obe metode u skladu sa sadašnjim ubrzanim načinom života jer dopuštaju laka i brza merenja. U radu će biti opisane ove dve metode za bezkontaktno merenje protoka, daće se njihova primena kao i procena pouzdanosti u različitim uslovima rada.

**Ključne reči:** hidraulika, hidrometrija, merenje protoka, PIV, radar, brzina, protok

## Contactless discharge measurement in open channels

**ABSTRACT:** In hydrotechnical practice, they often encounter measurements of flows in open channel. The standard flow measurement method is by means of hydrometric current meter, with a point at the point of velocity in the cross-section and on the basis of the flow rate. In recent years, an ultrasonic method (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP) is used, where the movement of the sensors per profile records the schedule of velocities in depth as well as the depth of water in the intersection and based on the measured data the flow is calculated. Lately, a lot of experiments have been conducted without contacting methods where the sensor is not in direct contact with water. One of the applied principles is based on the Doppler effect of a radar signal for surface speed measurements. For the flow calculation, it is necessary to know the depth of the river and the method of extrapolating the measured surface velocities in depth. With the massive application of drones, it is becoming popular and another method, based on the processing of video images of surface water and particle tracking (PIV), whereby it is necessary to know the depth of the river and the extrapolation of the surface depth velocities in order to calculate the flow. In practice, new methods have not yet undergone the necessary verification to go into standard use, but both methods are in line with the current accelerated lifestyle because they enable easy and fast measurement. The paper will describe these two methods for contactless flow measurement, their application and assessment of reliability in different operating conditions.

**Keywords:** hydraulic, hydrometry, flow measurement, PIV, radar, speed, flow

<sup>1</sup> Predrag Vojt, dipl. građ. inž., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [predrag.vojt@jcerni.co.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.co.rs)

<sup>2</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> V. prof. dr Jasna Plavšić, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [jplavsic@grf.bg.ac.rs](mailto:jplavsic@grf.bg.ac.rs)



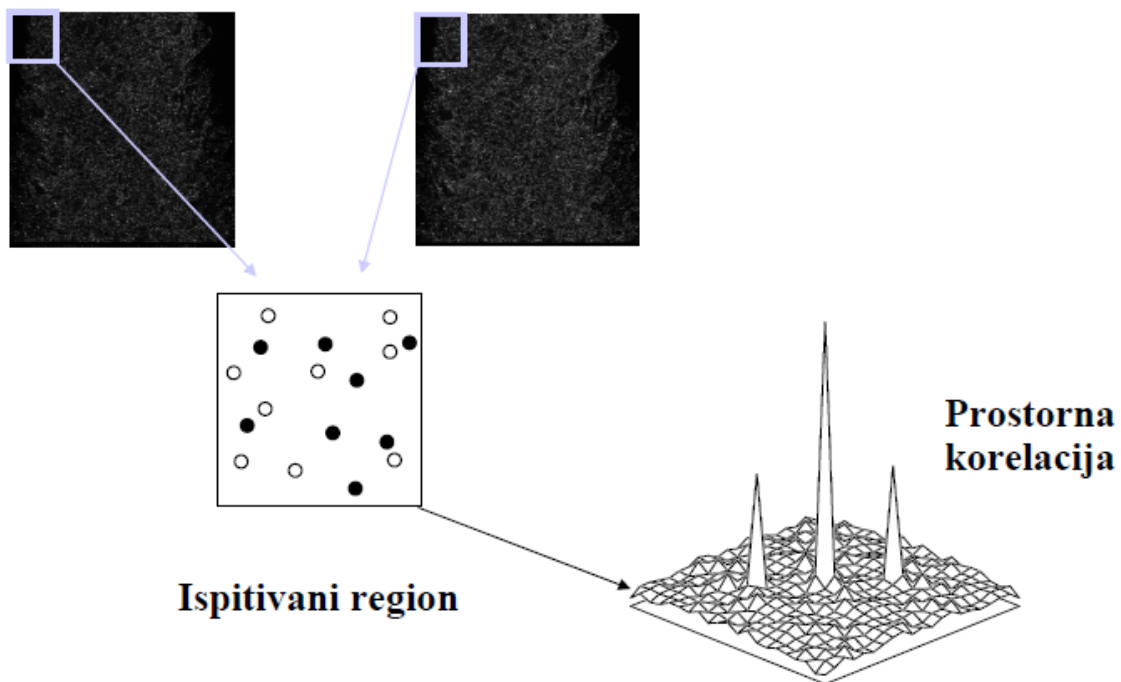
## 1 Uvod

U ovom radu nastojeno je da se pri merenju protoka ne koriste uobičajne metode koje zahtevaju kontakt sa vodom već da se bez fizičkog kontakta dobije protok. U hidrotehničkoj praksi se često susrećemo sa merenjem protoka u otvorenim tokovima tako da je ovim radom pokušao neobičan način merenja na otvorenom toku. Korišćen princip zasniva se na Doplerovom efektu radarskog signala i obradi video snimaka površine vode zasejanom traserima i praćenju kretanja čestica (Particle Image Velocimetry - PIV). Za obe metode treba poznavati poprečni presek i ekstrapolaciju površinskih brzina po dubini da bi se izračunao protok.

## 2 Metoda PIV

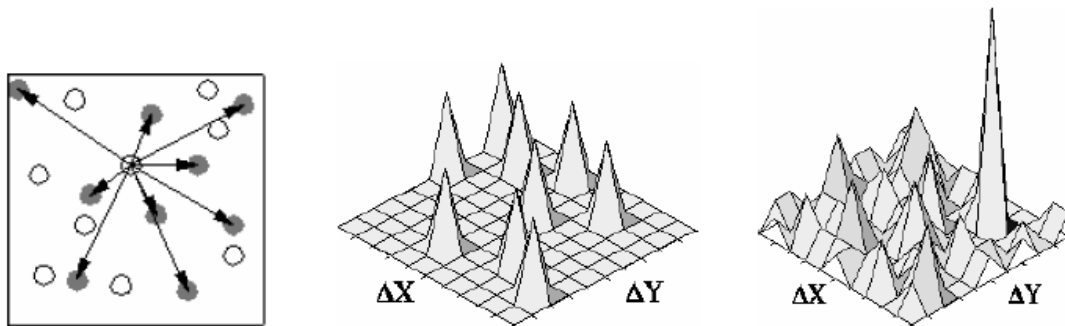
Procedura PIV tehnike [1]:

- Zasejavanje struje malim traserima koji se kreću zajedno sa tokom fluida
- Osvetljava se poprečni presek koji se ispituje laserskom svetlošću
- Slika se poprečni presek, sa rezolucijom koja nam omogućava da vidimo trasere, dva puta u susednim vremenskim trenucima
- Delimo slike na polja za ispitivanje i principom kroskorelacije za svako polje određujemo vektor brzine
- Uklanjanje pogrešnih i vektora i buke
- Postprocesiranje (računanje veličina koje nas interesuju)



Slika 1. PIV analiza

Figure 1. PIV Analysis



**Prostorna korelacija:**

$$C(\Delta X, \Delta Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [f_1(X_i, Y_j) - \bar{f}_1] [f_2(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - \bar{f}_2]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [f_1(X_i, Y_j) - \bar{f}_1]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [f_2(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - \bar{f}_2]^2}}$$

Slika 2. PIV računanje

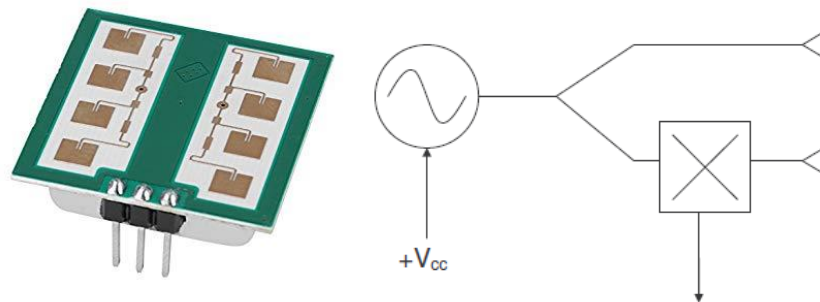
Figure 2. PIV calculation

Za PIV analizu potrebno je da:

- Traseri prate struju fluida
- su traseri raspoređeni homogeno po preseku
- su traseri ravnomerno raspoređeni u ispitivanom regionu
- se uradi kalibracija

**3 Metoda dopler radar**

Radarska metoda merenje brzina zasniva sa se na doplerovom efektu radarskog signala od površine vode. Korišćeni radar CDM324, slika 3, ima jedan mikser signala (slika 3 desno x u kvadratiću) zbog koje ne može da izmeri smer kretanja ali postoje verzije sa dva miksera koje to mogu. Pomenuti radar radi u K opsegu tj ima frekvenciju oscilovanja od 24 GHz. Signal koji radar vraća je svega par mV pa se signal mora pojačati i propustiti kroz „band pass“ filter slika 4.



Slika 3. CDM324 radar

Figure 3. CDM324 radar

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Frekvencija signala koju daje pomenuti radar možemo jednostavno proceniti koristeći doplerovu formulu prikazanu u nastavku

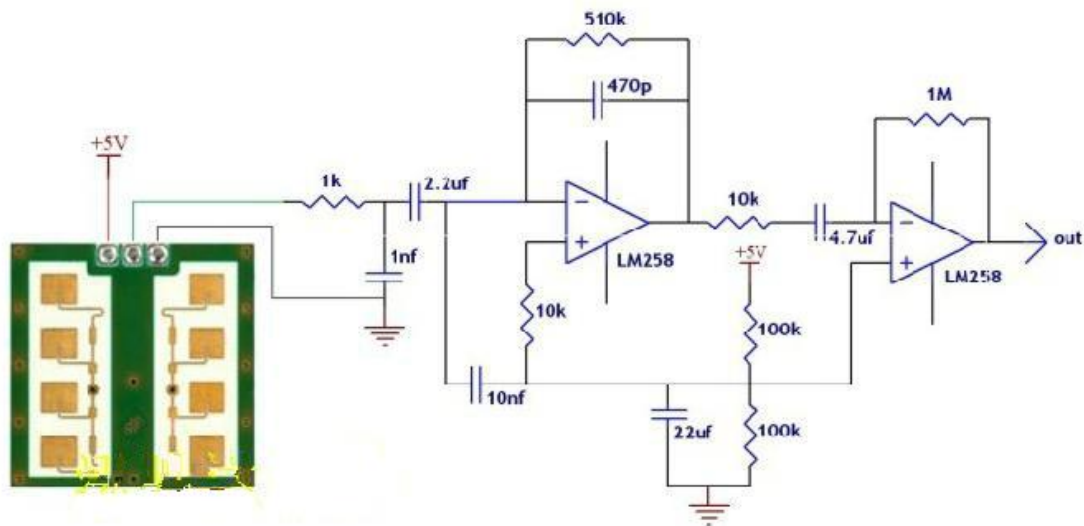
$$f_d = 2 \cdot f_0 \cdot \frac{v}{c_0} \cdot \cos \alpha$$

Gde su  $f_d$  doplerova frekvencija,  $f_0$  poslata frekvencija,  $v$  brzina kretanja posmatranog objekta (u našem slučaju voda),  $c_0$  brzina svetlosti,  $\alpha$  ugao između pravca kretanja objekta i pravca radara.

Kada uzmemo nominalnu frekvenciju korišćenog radara, 24 GHz, za upravan pravac radara na objekat a koristeći prethodnu formulu dobija se

$$f_d = 44 \frac{\text{Hz}}{\text{km/h}} = 158.4 \frac{\text{Hz}}{\text{m/s}}$$

Ako usvojimo da je minimalna brzina vode 0.1 m/s odnosno maksimalna brzina vode oko 5 m/s pri nagibu senzora ka vodi od 45o dobija se opseg frekvencija od 10 do 600 Hz pa se taj frekventni opseg koristi da ga filter propušta.



Slika 4. CDM324 radar sa pojačalom i „band pass“ filterom  
Figure 4. CDM324 radar with amplifire and band pass filter



Slika 5. CDM324 radarski komplet  
Figure 5. CDM324 radar

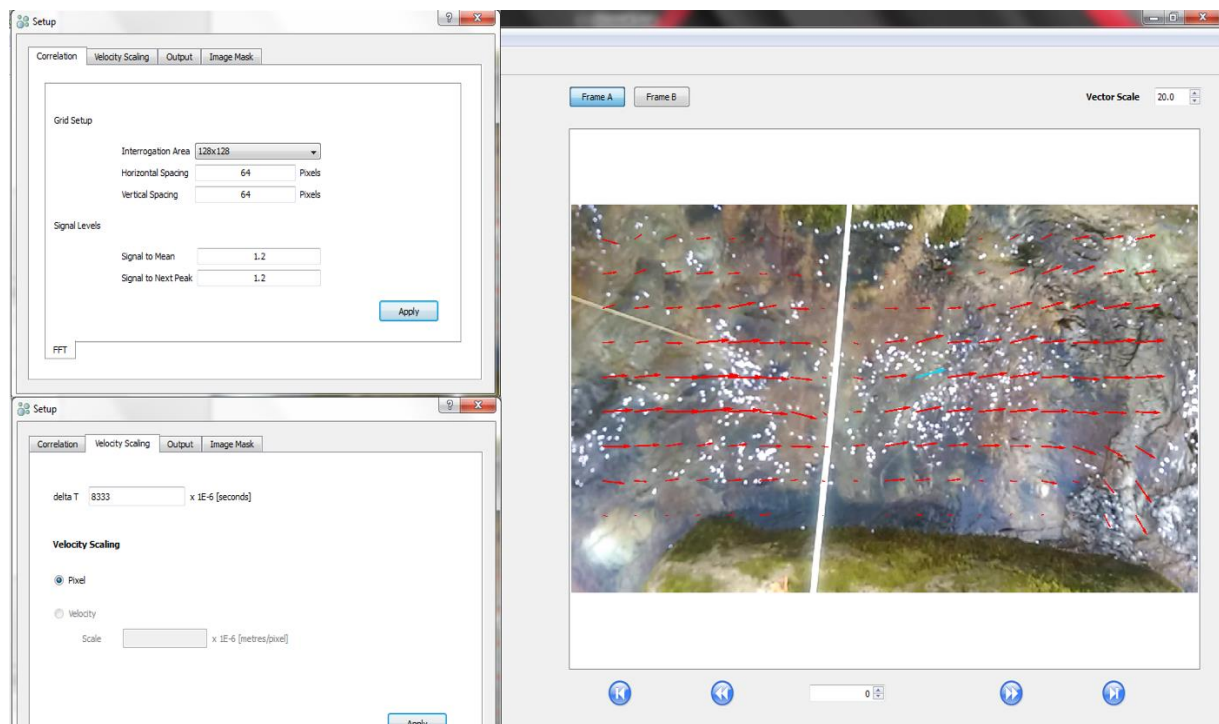
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na kraju kada se doda pojačalo sa filterom ostaje nam da premerimo frekvenciju. Frekvencija u ovom slučaju merena je sa arduino pro mini koji šalje podatke preko bluetooth na aplikaciju za mobilni koji snima podatke koji se kasnije obrađuju u excelu. Kompletan merni komplet prikazan je u nastavku.

## 4 Merenja i obrada - PIV

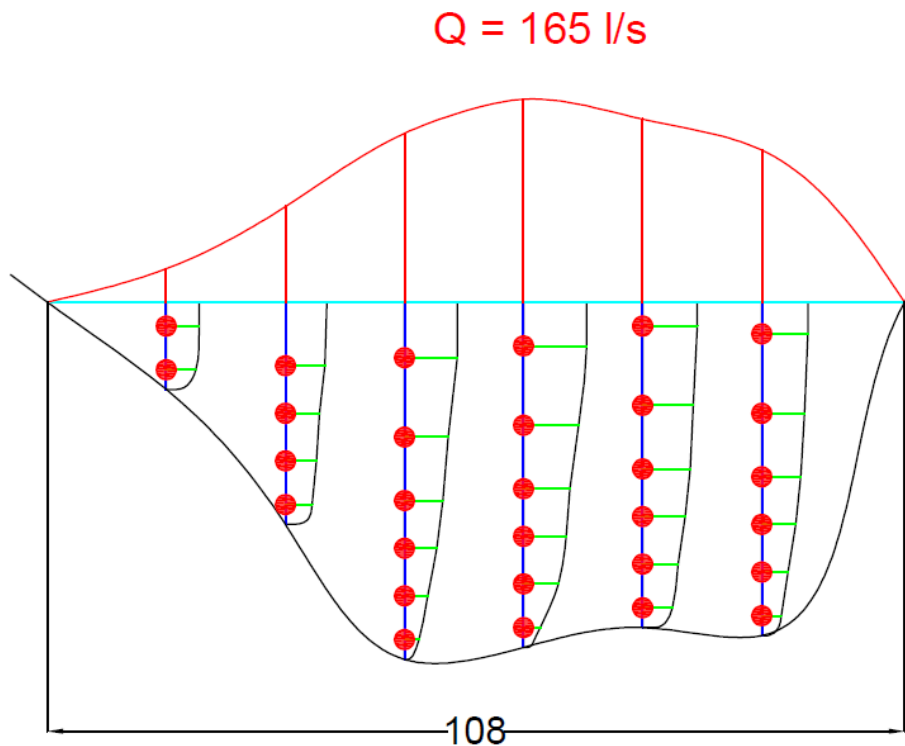
Rezultati uporednog merenja prikupljeni su u decembru 2015 godine na Golemoj reci, mereno je standardnim postupkom hidrometrijskim krilom i snimanjem kamerom sa mobilnog telefona HTC M8. Za proračun korišćen je program "URAPIV" koji je bio aktuelan 2015 godine, trenutno aktivan opensource program koji se može koristiti besplatno je OPENPIV ali u ovom radu nije korišćen.

Izmereni rezultati moraju da se kalibrišu ili na osnovu piksela i metra (kako je urađeno u ovom slučaju) ili poznatim pomeranjem predmeta ili podloge što ovde nije bilo moguće. Rezultati pokazuju lepa poklapanja sa standardnim merenjima hidrometrijskim krilom. Ova metoda ima potencijal za korišćenje na bespilotnim letelicama gde bi se bezbedno pri poplavnom talasu mogao meriti protok.



Slika 6. Obrada sa programom URAPIV

Figure 6. Calculation with URAPIV



Razmera za protok po vertikali

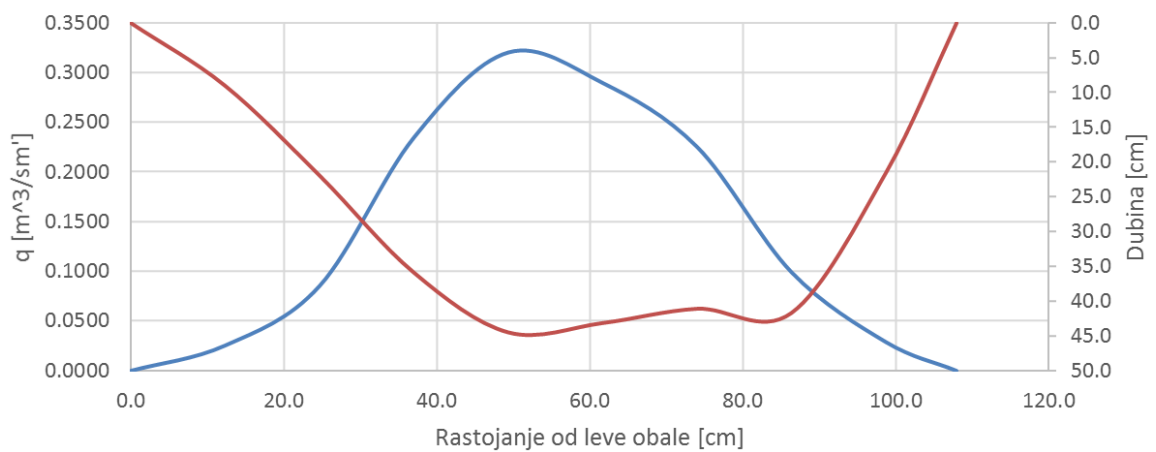
$$q = 0.5 \text{ m}^2/\text{sec}$$

Razmera za brzine

$$V = 1 \text{ m/sec}$$

Hsr. [m]	Hvl. [m]	Q [m <sup>3</sup> /s]	A [m <sup>2</sup> ]	Vs [m/s]
0.35	0.30	0.165	0.333	0.494

Merenje protoka PIV metodom na Golemoj reci,  $Q_{piv}=161 \text{ L/s}$



Slika 7. Hidrometrija (gore) i PIV rezultati (dole)

Figure 7. Hydrometry (up) and PIV results (down)

## 5 Merenja i obrada - dopler radar

Rezultati uporednog merenja (slika ) prikupljeni su u februaru 2018 godine na Golemoj reci, mereno je standardnim postupkom hidrometrijskim krilom i snimanjem radarom CDM324.

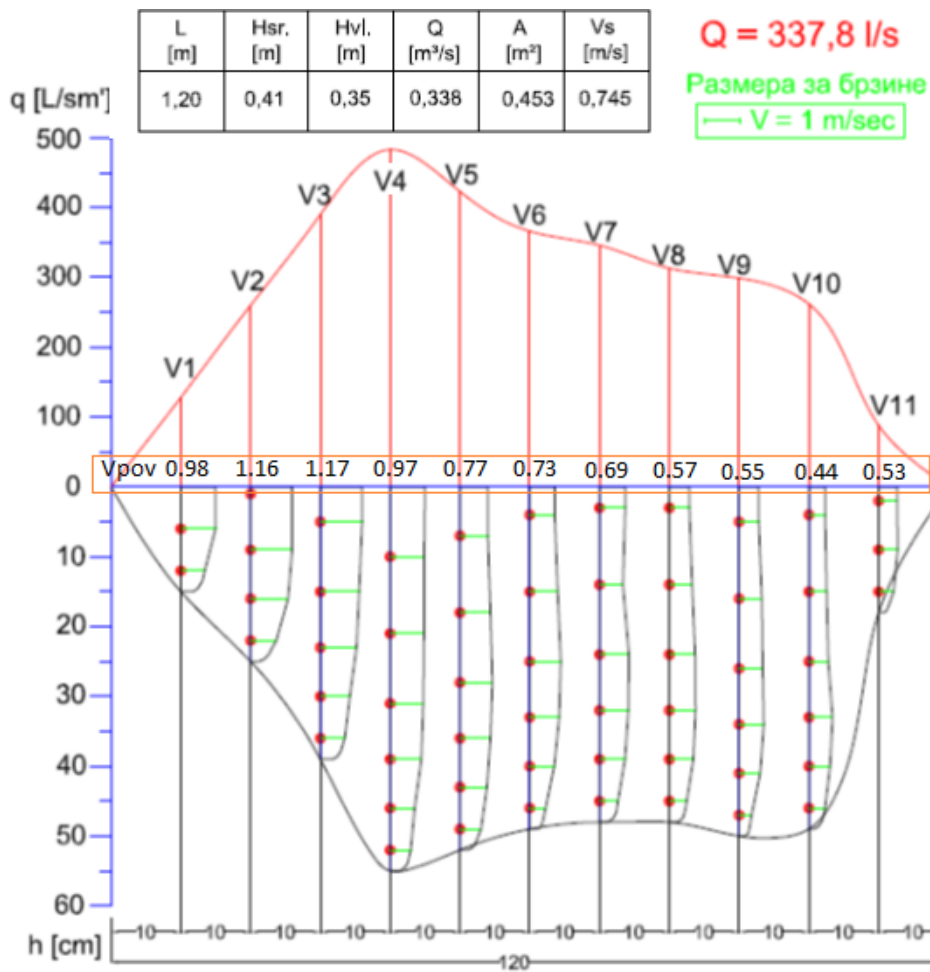
Merenja radarom obaljena su na dva načina, prvo stajanjem u vertikalama a posle i pomeranjem radara sa leve na desnu obalu. Oba načina mogu da daju protok mada je u ovom radu sračunat samo na osnovu merenja po vertikalama dok je drugi prikazan samo da se vidi kako se može dobiti brzina slično kao što ADCP meri ali samo po površini vode. Zanimljivi su rezultati mereni standardno hidrometrijskim krilom jer su brzine na desnoj strani pri površini otprilike na nivou srednje u vertikali. U radu su korišćeni samo koeficijenti 0.85 za odnos  $V_{sr}/V_{pov}$  jer se pretpostavlja da se ne poznaje raspored kao što je slučaj pri pomenutom merenju sa krilima. Merenja protoka radarskom metodom deluju razočarajuće ali se napominje da u procesiranju nije vršena kalibracija već su uzete osnove teorije i tako sračunat protok, mada se može napraviti neka kalibracija i dobiti bolja poklapanja koja u ovom radu nisu urađena. Zanimljivo je da se raspored brzina može dobiti upravnim pomeranjem na tok što bi značilo da se rada može primeniti na bespilotnim letelicama i tako na bezbedan način pri poplavnom talasu dobio protok.



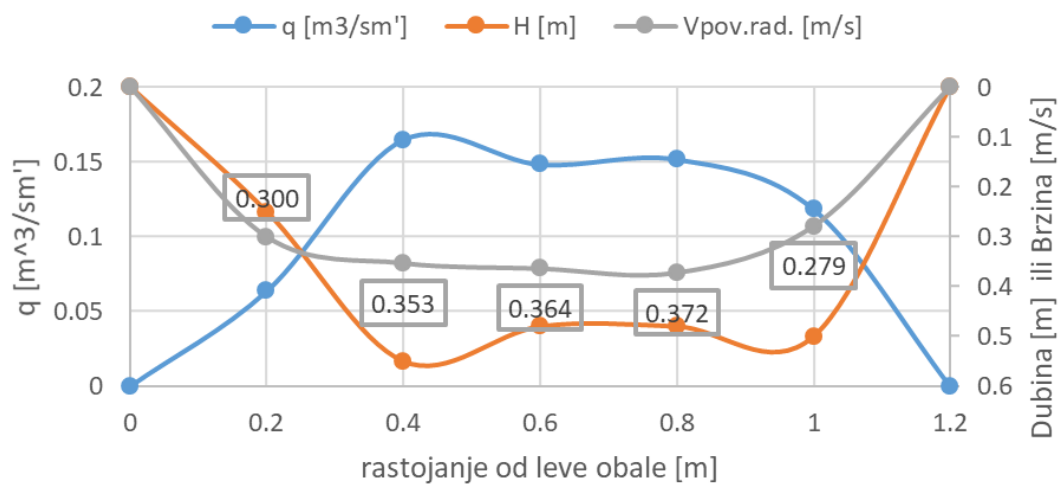
Slika 8. Merenje radarom na Golemoj reci

Figure 8. Radar measurment ad Golema reka

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Merenje protoka radarskom metodom na Golemoj reci, Q=130 L/s



Slika 9. Hidrometrija (gore) i Radar rezultati (dole)

Figure 9. Hydrometry (up) and radar results (down)



Slika 10. Radar rezultati pomeranjem senzora sa jedne na drugu obalu

Figure 10. Radar results moving from left to right bank

## 6 Zaključak

Iako su merenja sa metodom PIV pokazala bolja slaganja i ta metoda ima nedostatke jer se nemi ceo raspored brzina već samo površinska brzina pa raspored brzina po dubini treba računski nadomestiti a merenja hidrometrijskim krilom su pokazala da raspored brzina može po površini da ima čak i srednju vrednost u vertikali. Radarska metoda nije pokazala lepa slaganja ali bi sa kalibracijom moguće davala bolje rezultate ali i dalje ostaje nepoznanica raspored brzina po dubini ali ova metoda ima potencijal u primeni sa bespilotnim letelicama.

## 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. D Prodanović, N Branislavljević (2008) Vežba 7 kursa Merenja u hidrotehnici sa Građevinskog fakulteta u Beogradu
2. Inno Sent Innovative sensor technology (2006), Application Note III - IPM-165 – a universal Low Cost K-Band Transceiver for Motion Detection in various Applications
3. Technical spec. HB 100 MICROWAVE SENSOR MODULE
4. Pulsar, Manual micro flow i radar
5. M Welber (2017), Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR)



## Laboratorijsko određivanje merne neodređenosti ravnih EM senzora

Damjan Ivetić<sup>1</sup>, Dušan Prodanović<sup>2</sup>, Luka Stojadinović<sup>3</sup>

APSTRAKT: Da bi se ostvarilo efikasno upravljanje hidrotehničkim sistemima neophodno je poznavati podatak o protoku. Merenje protoka u tokovima sa slobodnom površinom je generalno komplikovan zadatak koji zahteva znanja iz hidraulike i tehnologije merne opreme. Izbor optimalne merne metode je uslovljen specifičnostima svakog pojedinog mernog mesta, prvenstveno u vidu hidrauličkih parametara, fizičkih karakteristika fluida i provodnika. Najčešće se koristi pristup Brzina – Proticajni Presek, gde se paralelnim određivanjem dve veličine, Srednje profilske brzine i površine proticajnog preseka, dolazi do podatka o protoku. Ključan problem u primeni ove metode je obezbeđivanje dovoljno tačne procene srednje profilske brzine, imajući u vidu da se površina proticajnog preseka može relativno lako odrediti sa merenjem dubine. U većini slučajeva, za merenje srednje profilske brzine, se koriste akustični Dopler uređaji dok u znatno manjoj meri Elektro Magnetni (EM) senzori. U ovom radu su analizirane tehničke karakteristike ravnih EM senzora za merenje brzine u tokovima sa slobodnom površinom. Na osnovu laboratorijskih ispitivanja i poređenja sa etalonskim uređajima veće tačnosti, određene su komponente merne neodređenosti: sistematska, statistička i kombinovana neodređenost. Sračunate vrednosti su upoređene sa rezultatima za akustične Dopler uređaje, dobijene po sličnoj proceduri, čime je omogućeno nepristrasno poređenje dve merne tehnologije.

Ključne reči: merenje protoka, merenje brzine, elektromagnetni senzori, laboratorijska ispitivanja, merna neodređenost

## Laboratory assessment of the flat Electro Magnetic meter's measurement uncertainty

ABSTRACT: In order to achieve the efficient management of the hydraulic systems, it is necessary to acquire the flow data. In general, flow measurements in the open channel or a partially filled pipe, is a troublesome task that requires knowledge of the flow characteristics and the operating principle of the measuring device. The choice of the optimal flow measuring approach is governed by the specifics of each measurement location, mainly in terms of the hydraulic parameters and physical characteristics of the fluid and the conduit. Commonly, Velocity - Area method is used, where based on the flow depth and mean flow velocity measurements, the flow data is acquired. The assessment of the mean flow velocity presents the main issue in the application of this approach, since the value of the cross-sectional area can be easily obtained through the depth measurements. Most frequently, Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) are used for the mean flow velocity measurements, while Electro Magnetic (EM) meters are rarely employed. In this paper, technical characteristics of the flat EM meters, used for velocity measurements in free surface flows, are assessed. Based on the laboratory benchmarking tests, measurement uncertainty components are assessed: bias, precision and combined uncertainty. Based on the computed values, an unbiased comparison with the ADV technology is performed.

Keywords: flow measurements, velocity measurements, electromagnetic meters, laboratory tests, measurement uncertainty

<sup>1</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Luka Stojadinović, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [st\\_luka@hotmail.com](mailto:st_luka@hotmail.com)

## 1 Uvod

Razvoj svesti javnosti, po pitanju zaštite životne sredine, doveo je do povećanja trenutnih znanja o hidrotehničkim infrastrukturnim sistemima. Da bi se procenile količine zagađenja koje napuštaju npr. kanalizacione sisteme i samim tim omogućilo kvantifikovanje negativnog uticaja na životnu sredinu, neophodni su podaci o protoku sa niskom mernom neodređenošću (Roy i saradnici, 2008). Upravo kanalizacioni sistemi su najnepovoljniji tip hidrotehničkih sistema, sa stanovišta postavljanja i održavanja merne opreme. Imajući u vidu spektar nepovoljnih uticaja koji se mogu javiti, kao npr. visok sadržaj vlage, prisustvo agresivnih i korozivnih gasova, nanosa, otpada itd., može se zaključiti da opravdano nose taj epitet.

Za privremena, a i stalna merna mesta za merenje protoka, u kanalizacionim sistemima se najčešće koristi pristup Brzina-Proticajni Presek (B-PP). U okviru ovog pristupa, inženjeri se uglavnom odlučuju za primenu papučastih ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimeters) uređaja (Larrarte i saradnici, 2008), koji su trenutno dominantni na globalnom tržištu. Međutim, pokazano je da ovi uređaji imaju problema u obezbeđivanju podatka o protoku sa niskom mernom neodređenošću, pogotovo u uslovima sedimentacija kao i niskih dubina i malih brzina (Maheepala i saradnici, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016). Ravni EM senzori, analizirani u ovom radu, se svakako mogu pozicionirati kao alternativna ili dopunska metoda za merenje protoka. Međutim, eksperimentalni podaci koji bi podržali ovu konstataciju nedostaju u literaturi.

Za kvantifikaciju sposobnosti proizvoljnog mernog uređaja da izmeri neku fizičku veličinu, u poslednje vreme se koristi parametar merne neodređenosti (JCGM, 2008), koji se vezuje za izmeren podatak. Da bi se došlo do vrednosti merne neodređenosti izmerenog podatka, neophodno je etaloniranje odnosno poređenje sa etalonskom vrednošću, koja ima barem za red veličine nižu neodređenost. Generalno, etalonska merenja srednje profilske brzine  $V$  ili protoka  $Q$  nisu dostupna na terenu, zbog čega je neophodno izvršiti analizu merne neodređenosti u laboratorijskim uslovima. Nekoliko laboratorijskih ispitivanja je izvršeno sa ciljem analize merne neodređenosti senzora protoka u otvorenim tokovima, ili greške merenja. Maheepala i saradnici (2001) su kalibrisali samo papučaste ADV senzore u mernom kanalu, nakon čega su ih postavili u kolektore kišne kanalizacije. Heiner i Vermeyen (2012) su ispitali 9 različitih senzora, uključujući jedan EM senzor, u pravougaonim, kružnim i trapezoidnim mernim kanalima. Međutim, koristili su veoma mali broj protoka. Aguilar i saradnici (2016) su razvili laboratorijsku proceduru za etaloniranje merne neodređenosti koju su primenili na dva različita papučasta ADV senzora. Iako su ova istraživanja dovela do novih saznanja o procesu merenja protoka u otvorenim tokovima, nijedna se nije detaljno bavila EM senzorima.

Da bi se nadomestila ova praznina, sprovedena je serija eksperimenata u hidrauličkoj laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Analiziran je rad ravnih EM senzora u standardnim uslovima, odnosno bez prisustva sedimenta. Za etaloniranje merne neodređenosti korišćena je unapređena verzija procedure predložene od Aguilar-a i saradnika (2016). Na ovaj način omogućeno je direktno poređenje rezultata dobijenih za ravne EM senzore sa rezultatima dobijenim za dva papučasta ADV senzora (iz Aguilar i saradnici, 2016).

Struktura ovog rada je formirana na sledeći način: U okviru poglavlja 2. Metodologija, ukratko je opisana analizirana merna metoda, korišćena laboratorijska instalacija, eksperimentalna procedura za ispitivanje kao i metodologija za procenu komponenata merne neodređenosti. Na kraju poglavlja 2. uveden je i parametar faktor umanjenja merne neodređenosti, na osnovu kojeg je izvršeno poređenje sa papučastim ADV uređajima. U okviru poglavlja 3. prikazani su rezultati kao i odgovarajuća diskusija. Konačno u poglavlju 4. predstavljeni su zaključci izvedeni iz prikazane analize kao i pravci budućih istraživanja.

## 2 Metodologija

### 2.1 Merenje srednje profilske brzine pomoću EM sonde

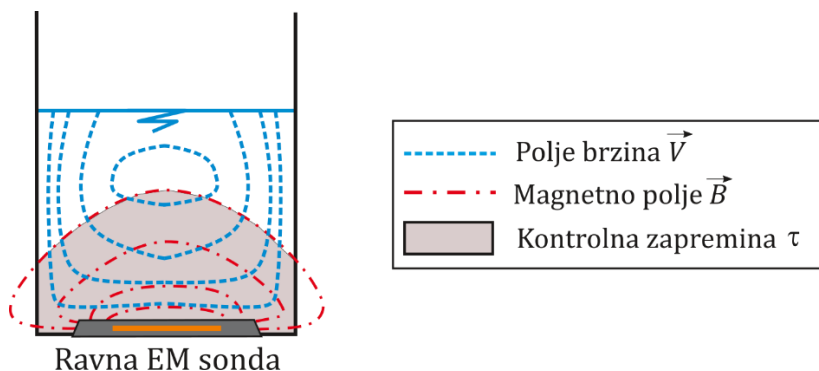
Određivanje srednje profilske brzine, u okviru primene B-PP metode, je komplikovan zadatak kojem treba pristupiti sa posebnom pažnjom (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011). Generalno, EM sonde se retko koriste u kanizacionim sistemima, zbog čega su u nastavku predstavljene osnove principa rada ovih uređaja. Takođe, u nastavku su prikazane i osnovne karakteristike ispitivanih uređaja, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“.

#### 2.1.1 Teorijske osnove principa rada EM sonde

Princip rada EM senzora brzine (ili protoka) se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije, prema kojem kretanje provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje, indukuje razliku potencijala na elektrodama uređaja odnosno pojavu elektromotorne sile  $E$ . Prvu matematičku relaciju kojom se opisuje primena Faradejevog zakona za merenje protoka tečnosti, predstavljena je od strane Kolin-a (1939). Na osnovu navedene analize, opšta osetljivost EM senzora je opisana vektorskim proizvodom brzine tečenja  $\vec{V}$  i jačine magnetnog polja  $\vec{B}$  u određenoj tački (Bevir, 1970). Takođe, koristeći konceptualne analize električnih mreža, predložena je relacija kojom se opisuje kako svaki deo toka doprinosi izlaznom naponu  $E$ , koristeći tzv. težinsku funkciju  $w$  (Shercliff, 1962), odnosno u rigoroznijoj formi težinski vektor  $\vec{W}$  (Bevir, 1970):

$$E = \int_{\tau} (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} d\tau = \int_{\tau} \vec{W} \cdot \vec{V} d\tau \quad (1)$$

gde vektorski proizvod  $\vec{B} \times \vec{j}$  definiše Bevirovu težinsku funkciju  $\vec{W}$ ,  $\tau$  je kontrolna zapremina EM senzora (zapremina toka koja doprinosi generisanju izlaznog napona  $E$ ) i  $\vec{j}$  je zapreminska gustina virtualne struje (gustina struje koja bi se javila u slučaju protoka jedinične struje između dve elektrode EM senzora). Za razliku od konvencionalnih EM senzora protoka, kakvi se standardno koriste u sistemima pod pritiskom, EM senzori brzine su polu-integrativni uređaji (Steinbock i saradnici, 2016), čija kontrolna zapremina  $\tau$  najčešće obuhvata samo deo proticajnog profila (Slika 1).

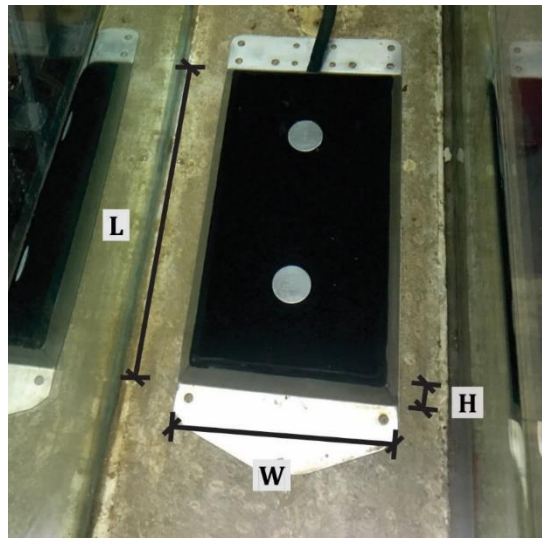


Slika 1. Shematizovan prikaz principa rada ispitivanih Ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“

#### 2.1.2 Ravne EM sonde

Tokom 20. veka predloženi su različiti koncepti EM sonde za merenje brzine ili protoka u otvorenim tokovima (Gils, 1970, Michalski, 2002). Primena ravnih (spljoštenih) kalemova je prvobitno razmatrana iz čisto ekonomskih, odnosno praktičnih razloga (Herschly, 1978). Ravna EM sonda DC-2 domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, korišćena u istraživanjima predstavljenim u

ovom radu, upravo koristi 2 pobudna kalema ravnog oblika. Ravna EM sonda je prvenstveno namenjena upotrebi u kanalizacionim sistemima, za merenje podužne komponente brzine. Ovaj tip senzora se obično postavlja na dno provodnika ili na zidove (kada se koristi više od jedne sonde na jednom mernom mestu).



Slika 2. Ravna EM sonda DC-2 u laboratorijskom kanalu Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu

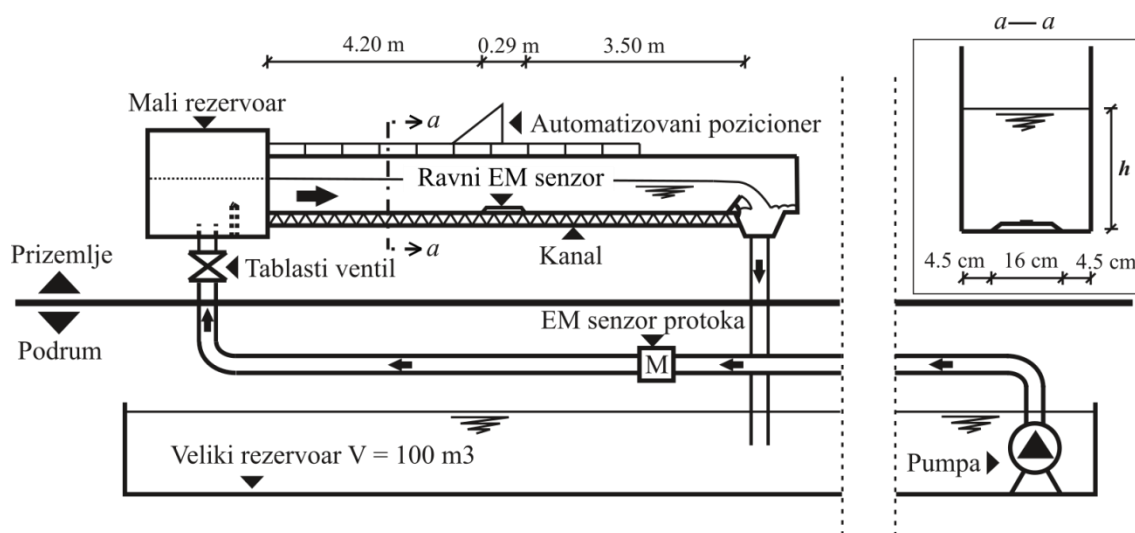
Ravan oblik sonde, dimenzija  $L = 280$  mm,  $W = 160$  mm i  $H = 23$  mm (Slika 2.) omogućava minimalno remećenje fluidne struje. Sama sonda je povezana za eksterni loger i napajanje, smešteno u jedno kućište. Podaci se mogu prikupljati bežično preko GPRS veze ili preko standardne serijske (RS-232) veze. Proizvođač navodi da je tačnost DC-2 jedinice  $\pm 1\%$ , ponovljivost  $0.001$  m/s, a operativni opseg bidirekcionog karaktera  $\pm 15$  m/s. Fabrička kalibracija svake ravne EM sonde se sprovodi u kanalu sa vučenim kolicima. Indukovani napon  $E$  pokazuje linearnu vezu sa srednjom profilskom brzinom  $V$ . Potrošnja električne energije se može kontrolisati, gde jača pobudna struja i duži period osrednjavanja vodi ka povećanoj potrošnji ali i stabilnijim rezultatima (bolji odnos signal/šum). DC-2 ravna EM sonda ima pulsnu bipolarnu pobudu sa dvojnjom frekvencijom, gde je glavna frekvencija komutacije  $12.5$  Hz. Ovaj tip pobude omogućava dobru stabilnost nule kao i minimizaciju pojave šuma (Kuromori i saradnici, 1994). Visoka unutrašnja otpornost uređaja, reda veličine oko  $20$  M $\Omega$ , omogućava minimizaciju uticaja varijacije elektroprovodnosti vode na merenja brzine. Očekuje se da će u ekstremnim slučajevima, unutrašnja otpornost uređaja biti barem 1000 puta veća od otpornosti vode.

## 2.2 Laboratorijska instalacija

Za potrebe etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora u standardnim uslovima korišćena je adaptirana laboratorijska instalacija u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (Slika 3).

Budući da su ravni EM senzori prvenstveno namenjeni upotrebi u otvorenim tokovima, za potrebe ispitivanja adaptiran je najveći, raspoloživi merni kanal koji se nalazi u prizemlju hidrauličke laboratorije. U merni kanal dužine  $8.0$  m i širine  $0.25$  m, instalirana je Flat DC-2 EM sonda, na nekih  $4.20$  m od uzvodnog malog rezervoara, odnosno  $3.50$  m od nizvodne prelivne klapne (Slika 3). EM sonda je postavljena duž osovine kanala, na udaljenost od  $4.5$  cm od bočnih zidova kanala. Nagib kanala je  $0.01$  %, dok je efektivni Manningov koeficijent hrapovosti varirao oko vrednosti od  $0.010$  m<sup>1/3</sup>s. Protok u kanalu je kontrolisan pomoću pumpe sa frekventnom regulacijom obrtaja i pomoću tablastog ventila na dovodnom cevovodu. Etalonska merenja protoka  $Q_{EMF}$  sa usvojenom neodređenošću od  $0.6\%$  za prošireni opseg protoka od  $2 - 212$  L/s (max u ispitivanju oko  $40$  L/s), su

dobijena pomoću EM senzora protoka instaliranom na dovodnom cevovodu. Merna igla sa nonijusom, postavljena upravno na kanal iznad ravnog EM senzora, je korišćena za etalonsko čitanje dubine ( $h_B$ ) u opsegu 0 – 40 cm sa etaloniranom neodređenošću od 0.2 cm. Budući da je predstavljena instalacija zatvorena, elektroprovodnost vode je aproksimirana kao uniformna i konstantna. Loger ravne EM sonde je bio priključen na konstantan izvor napajanja od 12 V, dok su podaci sa logera prikupljeni pomoću standardne RS-232 veze.



Slika 3. Šematski prikaz laboratorijske instalacije korišćene za ispitivanje rada Ravnih EM senzora u okviru hidrauličke laboratorije, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

### 2.3 Laboratorijska procedura

Eksperimentalna procedura korišćena u ovoj analizi predstavlja unapređenu verziju procedure predložene od strane Aguilar-a i saradnika (2016). Za svaki od ispitanih protoka, u mernom kanalu je dostignuta početna dubina za  $Q = 0$  a zatim je protok uvećavan ili povećanjem broja obrtaja na pumpi ili korišćenjem tablastog ventila. Imajući u vidu da je fokus istraživanja na merenjima srednje profilske brzine, etalonska srednja profilska brzina  $V_B$  (EMF brzina) je sračunata iz etalonskog merenja protoka  $Q_{EMF}$ , dubine  $h_B$  i poznate relacije  $A(h_B)$ :

$$V_B = \frac{Q_{EMF}}{A(h_B)} \quad (2)$$

Pre samih merenja, dostignuti su ustaljeni uslovi tečenja za svaki od ispitanih protoka. U proseku je za obezbeđivanje ustaljenosti u mernom kanalu bilo potrebno između 5 i 10 minuta. Jednom kad bi se postigla ustaljenost toka, održavana je u periodu trajanja minimum 2 minuta – ovaj period je nazvan „merni period“ i označen je sa  $j$ . Dubina  $h_{b,j}$  je zabeležena za svaki merni period a svakih 30 s zabeleženo je  $i$ -to merenje sa ravnim EM senzorom -  $V_{EMV,i,j}$ . Porelno, protok na etalonskom EM senzoru protoka je beležen sa frekvencijom od 1 Hz i uprosečen, kako bi se dobila vrednost  $Q_{EMF,i,j}$ . Broj merenja  $i$  za svaki merni period  $j$ , je bio  $n = 4$ . Ovde je napravljen otklon od originalne procedure, budući da je korišćeno kraće vreme između dva uzastopna merenja od 30 s umesto 60 s (Aguilar i saradnici, 2016). Maheepala i saradnici (2001), čak predlažu 120 s, međutim rukovođeni idejom da se sa kraćim vremenskim periodom mogu dobiti dodatne informacije o dinamici tečenja, a ujedno je i nepovoljniji slučaj, odlučeno je da se koristi interval od 30 s.

Nad svakim mernim periodom  $j$  sprovedena je statistička analiza, tako da su  $i$ -ta merenja agregirana u  $j = 1 \rightarrow N$  mernih perioda. Srednja vrednost i standardna devijacija  $i$ -tih merenja brzine

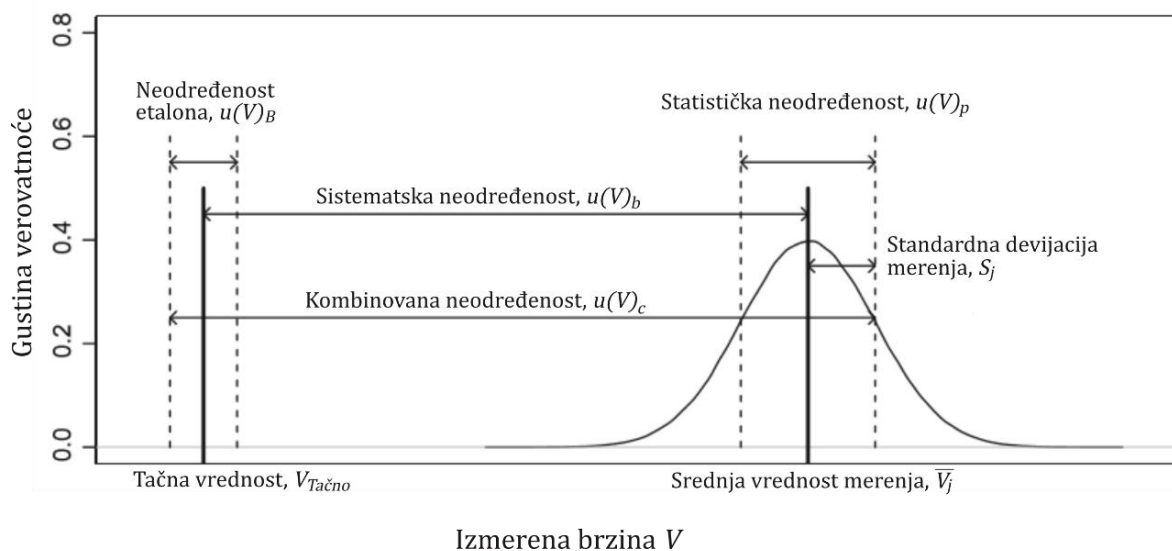
u mernom periodu  $j$  su sračunate i obeležene sa  $\overline{V_{EMV,j}}$  i  $S_{EMV,j}$ , respektivno. Na sličan način je sračunata i srednja etalonska EMF brzina od  $i$  merenja u mernom periodu  $j$  ( $j$ -na 2), i označena sa  $\overline{V_{B,j}}$ .

### 2.4 Procena merne neodređenosti

Slično kao i u slučaju eksperimentalne procedure, osnove metode za etaloniranje merne neodređenosti senzora brzine su postavili Aguilar i saradnici (2016). Metoda se zasniva na proračunu sistematske, statističke i etalonske neodređenosti izmerenog podatka o brzini. Za potrebe disertacije, predložena procedura je dodatno unapređena kako bi se smanjila etalonska neodređenost. Međutim, osnova procedure je ostala ista što je omogućilo direktno poređenje karakteristika između, ovde analiziranih ravnih EM senzora i papučastih ADV senzora.

Za kvantitativnu ocenu tačnosti ravnih EM senzora, a i papučastih ADV senzora, korišćen je podatak o mernoj neodređenosti merenja, prema predlogu „Uputstva za procenu neodređenosti u merenjima“ (eng. „Guide to the expression of Uncertainty in Measurements“ iliti GUM) (JCGM, 2008). Do nedavno, uobičajena je praksa bila da se izmerenim vrednosti dodeli vrednost „greške“ merenja, koja je definisana kao razlika između tačne i izmerene vrednosti. Budući da je tačna vrednost fiktivna veličina, odnosno teško se može ikad zaista poznavati, pokrenuta je debata kako parametar „greške“ može imati operativni značaj. Zbog toga je u analizu merenja uvedena „merna neodređenost“ koja se definiše kao „parametar dodeljen rezultatu merenja koji opisuje rasipanje vrednosti koje se mogu opravdano dodeliti merenju“ (JCGM, 2008). Prvenstveno su Coleman i Steele (1995) definisali dve komponente merne neodređenosti, (1) sistematska neodređenost (eng. bias uncertainty)  $u(V)_b$  i (2) statistička neodređenost (eng. precision uncertainty)  $u(V)_p$ , koju su Bertrand-Krajewsky i Muste (2008) primenili na hidrotehnička merenja (Slika 4).

Pored navedenih komponenti merne neodređenosti, neophodno je sračunati i neodređenost etalona (eng. benchmark uncertainty)  $u(V)_B$ . Ova vrednost se može tumačiti kao minimalna neodređenost koja se može obezbediti za određeni podatak na određenoj laboratorijskoj instalaciji.



Slika 4. Grafički prikaz komponenti merne neodređenosti i kombinovane merne neodređenosti, dodeljenih merenjima srednje profilske brzine  $V$ , adaptirano od Coleman i Steele (1995) i Aguilar i saradnici (2016)

#### 2.4.1 Neodređenost etalona

Neodređenost etalona  $u(V)_B$  je takođe poznata i kao epistemska neodređenost, odnosno granica poznavanja jednog sistema. Nasuprot epistemskoj neodređenosti postoji „prirodna“ ili statistička neodređenost (Merz i Thieken, 2005). Kao što je i ranije navedeno, etalonsku neodređenost merenja srednje profilske brzine nije moguće odrediti u terenskim uslovima. Zbog toga, neophodno je ovu

vrednost kvantifikovati u laboratorijskim uslovima uz napomenu da ona predstavlja gornju granicu tačnosti koja se može obezbediti na terenu. Na osnovu toga, pretpostavlja se da su uređaji za merenje srednje profilske brzine na terenu, neodređeni barem kao oni koji su korišćeni u laboratoriji.

U predstavljenim laboratorijskim istraživanjima, etalonska vrednost srednje profilske brzine je dobijena koristeći jednačinu (2), etalonski EM senzor protoka i mernu iglu sa nonijusom. Etalonski EM senzor protoka može da obezbedi podatke o protoku sa niskom mernom neodređenošću u cevima pod pritiskom, ukoliko je redovno kalibrisan prema standardu (ISO9104, 1991) i ako su zadovoljene preporuke proizvođača o nizvodnoj i uzvodnoj udaljenosti promena geometrije cevovoda. Glavna prednost u odnosu na primenu Venturijevog suženja (Aguilar i saradnici, 2016) se ogleda u tome što je na ovaj način moguće dobiti stabilna merenja protoka za širok spektar uslova u kanalu, uključujući i za vrednosti Frudovog broja blizu 1.

Budući da je etalonska vrednost srednje profilske brzine  $V_{B,i,j}$  dobijena na osnovu merenja protoka  $Q_{EMF,i,j}$ , podeljenim sa površinom proticajnog preseka sračunatom pomoću  $h_{B,j}$ , neodređenost etalona srednje profilske brzine se definiše po principu propagacije neodređenosti etalona za protok i dubinu (Coleman i Steele, 1995; JCGM, 2008). Primenom principa propagacije neodređenosti dobija se sledeća jednačina za proračun etalona:

$$u(V)_B = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial Q}\right)^2 u(Q)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 u(h)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial W}\right)^2 u(W)^2} \quad (3)$$

gde je sa  $V$  označena brzina u [m/s],  $h$  je dubina u kanalu u [m],  $w$  je širina kanala u [m] a  $Q$  protok u [m<sup>3</sup>/s]. Prema j-ni (3) može se zaključiti da vrednost neodređenosti etalona brzine varira sa izmerenim dubinama i protocima. Zbog toga, za neodređenost etalona je usvojena vrednost koja odgovara gornjoj granici intervala poverenja od 95%, odnosno vrednost  $u(V)_B = 0.015$  m/s.

## 2.4.2 Sistematska neodređenost

Sistematska neodređenost izmerenog podatka o brzini se definiše kao razlika između etalonske vrednosti ( $\overline{V_{B,j}}$ ) i srednje vrednosti  $i$  merenja u  $j$ -tom mernom periodu ( $\overline{V_{EMV,j}}$ ). Vrednost sistematske neodređenosti se može sračunati kao standardna greška reziduala merenja koja vodi do jednačine za kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja:

$$u(V)_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{V_{B,j}} - \overline{V_{EMV,j}})^2}{N - 2}} \quad (4)$$

Prvi korak u analizi sistematske neodređenosti, prema preporuci Aguilar-a i saradnika (2016) je vizualno poređenje izmerenih vrednosti  $\overline{V_{EMV,j}}$  i odgovarajućih etalonskih vrednosti  $\overline{V_{B,j}}$ , koristeći referentnu liniju idealnog slaganja (linija 1:1). Nakon toga, da bi se sagledali uticaji hidrauličkih parametara, reziduali merenja ( $\overline{V_{B,j}} - \overline{V_{EMV,j}}$ ) se nanose na grafike kao funkcije dubine u kanalu, srednje profilske brzine i Frudovog broja. Navedeni hidraulički parametri su tretirani kao sistematski uticaji na merenja srednje profilske brzine, na osnovu čega su 1:1 grafici kao i grafici sa rezidualima merenja ispitani za prisustvo trenda. Da bi se uklonili sistematski uticaji od navedenih parametara izvode se odgovarajuće korekcione ili transformacione funkcije za  $\overline{V_{B,j}}$ , kao funkcije  $\overline{V_{EMV,j}}$ . Imajući u vidu linearnost ravnih EM senzora, za izvođenje ovih funkcija dovoljno je koristiti isključivo linearnu regresionu analizu. Korekcione funkcije, dobijene na ovaj način su primenjene na originalna merenja kako bi se korigovane vrednosti približile referentnoj liniji savršenog uklapanja (linija 1:1). Na osnovu j-ne (3) sračunata je korigovana sistematska neodređenost, transformisanih merenja,  $u(V)_{b,adj}$ . Treba imati u vidu da redokovanjem sistematske neodređenosti, ravni EM senzori su praktično „lokalno“ kalibrisani (ili rekaliobrisani) na uslove u mernom kanalu.

### 2.4.3 Statistička neodređenost

Statistička neodređenost  $u(V)_p$ , se definiše kao slučajno odstupanje izmerenih brzina pomoću ravnog EM senzora oko srednje vrednosti, usled stohastičnosti električnih uslova i uslova sredine (Merz i Thieken, 2005). Laboratorijski eksperimenti su, po pravilu, u mogućnosti da minimizuju navedenu stohastičnost, međutim određene uticaje nije moguće kontrolisati, kao što su varijacije Zemljinog magnetnog polja ili uticaj kućišta senzora na indukovanje turbulencije. Međutim, budući da se ovi uticaji javljaju i na terenu, smatrani su prihvatljivim.

Vrednosti statističke neodređenosti su procenjene kao standardna devijacija  $S_{EMV,j}$  od  $n > 3$  merenja srednje profilske brzine za  $N$  mernih perioda pri ustaljenim uslovima. Na ovaj način sračunate se standardne devijacije za merne periode koji pokrivaju ceo analizirani opseg srednjih profilskih brzina. Pre konačnog definisanja integralne vrednosti statističke neodređenosti  $u(V)_p$ , izvršena je vizuelna inspekcija grafika koji prikazuju zavisnost  $S_{EMV,j}$  od hidrauličkih parametara: dubine u kanalu, etalonske brzine i Frudovog broja. Ukoliko ne postoji trend između navedenih veličina, statistička neodređenost se može sračunati kao medijana svih sračunatih  $S_{EMV,j}$ , budući da je medijana robusna na granične slučajeve.

### 2.4.4 Kombinovana neodređenost

Konačno, vrednost kombinovane neodređenosti izmerene srednje profilske brzine  $u(V)_c$  se može sračunati kao kvadratni koren zbira kvadrata komponenata neodređenosti, nekorigovane  $u(V)_b$  ili korigovane  $u(V)_{b,adj}$  sistematske neodređenosti, statističke neodređenosti  $u(V)_p$  i neodređenosti etalona  $u(V)_B$ :

$$u(V)_c = \sqrt{u(V)_{b,adj}^2 + u(V)_p^2 + u(V)_B^2} \quad (5)$$

### 2.4.5 Poređenje sa ADV uređajima

Budući da je procedura korišćena za etaloniranje merne neodređenosti ravnih EM senzora, zasnovana na proceduri korišćenoj za analizu dva papučasta ADV senzora (Aguilar i saradnici, 2016), omogućeno je direktno poređenja ova dva uređaja. Kao kvantitativan i relativan parametar poređenja, uvodi se Faktor Smanjenja Neodređenosti (eng. Uncertainty Reduction Factor -  $URF_x$ ). Parametar  $URF_x$  se definiše kao odnos odgovarajućih komponenata merne neodređenosti kao i kombinovane neodređenosti (Ivetić i saradnici, 2018):

$$URF_x = \frac{u(V)_{x,ADV}}{u(V)_{x,EMV}} \quad (6)$$

gde  $x$  predstavlja oznaku za jednu od analiziranih mernih neodređenosti ( $B$  - etalonska,  $b$  - sistematska,  $p$  - statistička,  $c$  - kombinovana).

## 3 Rezultati i diskusija

Nakon obavljenih eksperimentalnih istraživanja, prvi korak je vizualna inspekcija rezultata. Mereni podaci dobijeni sa ravnog EM senzora su pokazali da je sonda adekvatno reagovala na promene protoka, kao i da je postoji linearna zavisnost između izmerenih i etalonskih brzina. Takođe, ustanovljeno je da nije bilo prekida u snimljenim podacima, odnosno da su uslovi omogućili kontinualan rada senzora.

U narednim poglavljima, predstavljeni su rezultati etaloniranja sistematske, statističke i kombinovane neodređenosti merenja dobijenih korišćenjem ravnog EM senzora. Neodređenost etalona

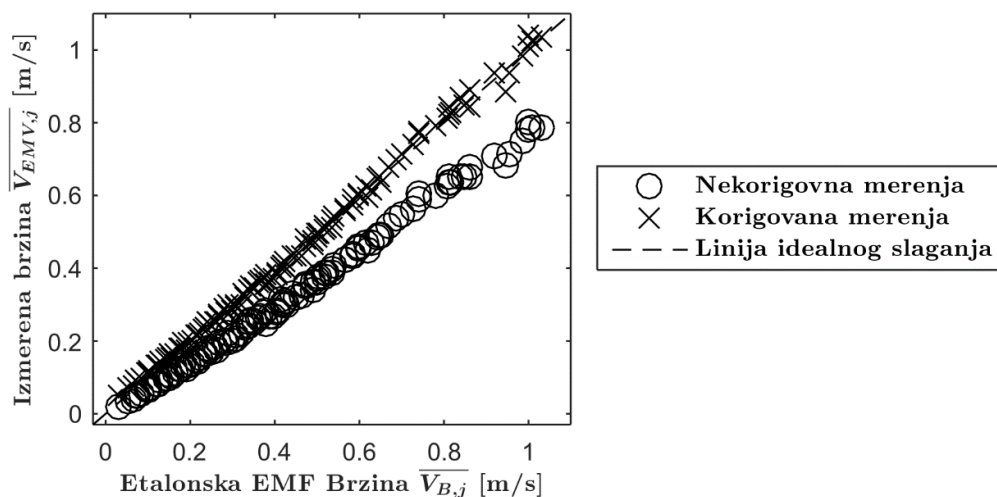


nije posebno razmatrano ovde, budući da je već prethodno sračunata i definisana u okviru poglavlja 2.4.1. Dobijene vrednosti neodređenosti merenja srednje profilske brzine ravnim EM senzorima su upoređeni sa rezultatima, predstavljenim u Aguilar i saradnici (2016), za dva papučasta ADV uređaja. Konačno, razmatran je i praktični značaj dobijenih rezultata.

### 3.1 Sistematska neodređenost

Prva razmatrana komponenta merne neodređenosti je sistematska neodređenost. Prethodno je napomenuto da redukovanje, odnosno korekcija, sistematske neodređenosti može da se tumači kao lokalna kalibracija (rekalibracija) ravnih EM senzora. Razlog za primenu ovakve terminologije leži u činjenici da je mapiranjem magnetnog polja ravne EM sonde ustanovljeno da širina kanala nije dovoljna da cela kontrolna zapremina EM senzora stane u kanal (Slika 1). Naime na taj način, ravna EM sonda je radila sa manjom efektivnom kontrolnom zapreminom u odnosu na uslove pri fabričkoj kalibraciji, što je konačno imalo sistematski uticaj na izlazni signal.

U skladu sa procedurom predstavljenom u poglavlju 2.4.2, izvedene su odgovarajuće korekcione (transformacione) funkcije za redukovanje sistematske neodređenosti i dobijanje  $\overline{V}_{EMVadj,j}$ . Rezultujući kvadratni koren iz srednjeg kvadratnog odstupanja korigovanih merenja je sračunat i označen sa  $u(V)_{b,adj}$  (korigovana sistematska neodređenost). Vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti su zajedno za odgovarajućom korekcionom funkcijom prikazani u okviru Tabele 1. Pored toga, na Slici 5 su prikazane izmerene vrednosti brzine pomoću ravne EM sonde, pre korekcije  $\overline{V}_{EMV,j}$  i nakon  $\overline{V}_{EMVadj,j}$  u funkciji od etalonskih merenja srednje brzine  $\overline{V}_{B,j}$ , sa referentnom 1:1 linijom idealnog slaganja. Može se primetiti da nekorigovana i korigovana merenja brzine sa ravnim EM sondom pokazuju jasnu linearnu vezu sa etalonskim merenjima srednje profilske brzine, unutar ispitnog opsega brzine (nažalost, na laboratorijskoj instalaciji nije bilo moguće ispitati pun radni opseg definisan od strane proizvođača).



Slika 5. Nekorigovana i korigovana merenja brzine pomoću ravne EM sonde naspram etalonske EMF brzine su 1:1 linijom idealnog slaganja

Linearnost ravnih EM senzora omogućava primenu jednostavnih linearnih korekcionih funkcija (za razliku od papučastih ADV senzora – Tabela 1), definisanih sa samo dva parametra, za redukovanje sistematskih uticaja na merenja. Takođe, može se uočiti da je za korigovanje merenja, potrebno povećati nagib kalibracione krive. Na ovaj način potvrđena je hipoteza da je širina mernog kanala nedovoljna da prihvati celu kontrolnu zapreminu ravnog EM senzora, što posledično dovodi do sistematskog slabljenja signala. Konačno, na osnovu navedenih činjenica, može se zaključiti da je pre instalacije ovih uređaja u terenskim uslovima, potrebno sprovesti lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora kojim bi se uklonio uticaj geometrijskih karakteristika provodnika na profil brzine i na kontrolnu zapreminu.

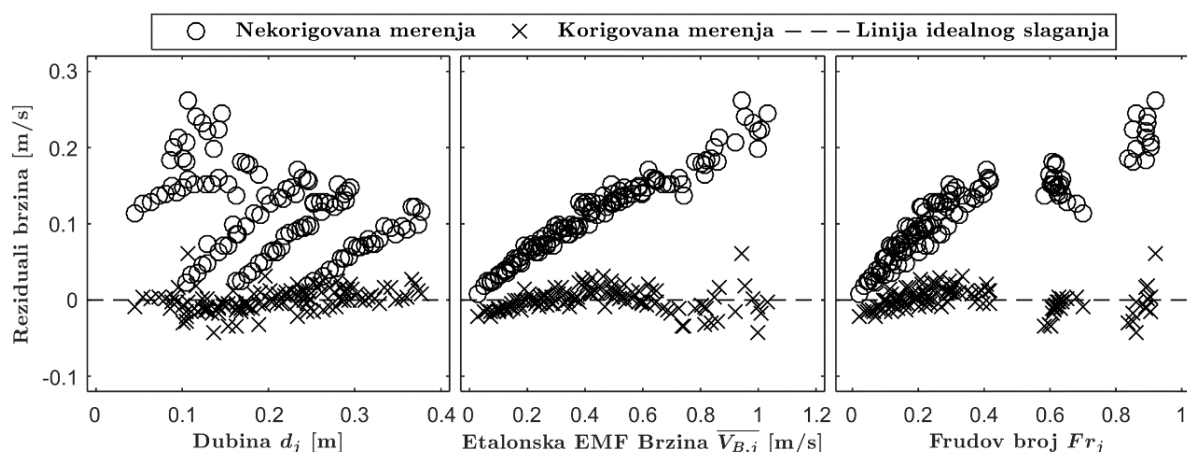
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 1. Poređenje rezultata etaloniranja merne neodređenosti između ravnih EM senzora i dva papučasta ADV-a (Aguilar i saradnici, 2016)

Senzor	Tip	Broj mernih perioda	Korekciona funkcija	Nekorigovana sistematska neodređenost * [m/s]	Korigovana sistematska neodređenost [m/s]	Statistička neodređenost [m/s]
1	ravna EM	114	$(V - 0.020)/0.790$	0.128	0.015	0.006
2	ADV	287	$0.875 \cdot V^{0.968}$	0.096	0.048	0.015
3	ADV	349	$0.692 \cdot V^{0.912}$	0.439	0.179	0.067
			$URF_{x,A}$	0.75	3.13	2.41
Faktor smanjenja neodređenosti			$URF_{x,B}$	3.43	11.57	10.63
Senzor	Tip	Broj mernih perioda	Korekciona funkcija	Etalonska neodređenost [m/s]	Nekorigovana kombinovana neodređenost * [m/s]	Korigovana kombinovana neodređenost [m/s]
1	ravna EM	114	$(V - 0.020)/0.790$	0.015	0.129	0.023
2	ADV	287	$0.875 \cdot V^{0.968}$	0.017	0.098	0.054
3	ADV	349	$0.692 \cdot V^{0.912}$	0.017	0.444	0.192
			$URF_{x,A}$	1.13	0.76	2.38
Faktor smanjenja neodređenosti			$URF_{x,B}$	1.13	3.45	8.52

\* Direktno poređenje nije primereno zbog različitih izvora neodređenosti



Slika 6. Reziduali merenja brzina pomoću ravnih EM sondi sa linijom idealnog slaganja u zavisnosti od dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja

Da bi se ustanovila priroda, odnosno poreklo, sistematskog uticaja hidrauličkih parametara, na Slici 6, su prikazane zavisnosti između reziduala merenja i vrednosti dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja. Može se uočiti jasna zavisnost između reziduala i etalonske EMF brzine, koja je naknadno eliminisana primenom linearnih korekcionih funkcija. Takođe može se uočiti da vrednosti

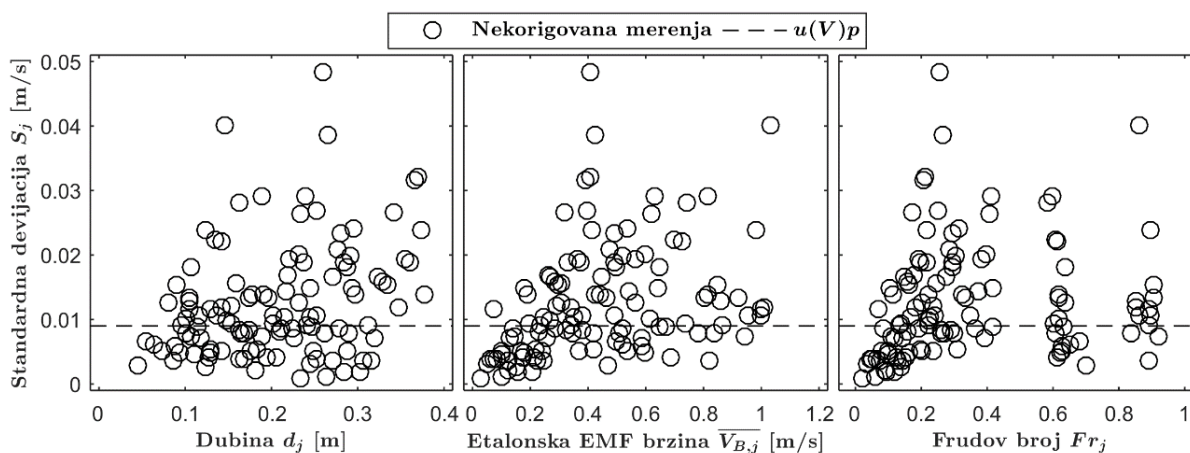
rezidula imaju opadajući trend sa porastom dubine, što se može pripisati činjenici da su manje brzine zabeležene pri višim dubinama.

Vrednosti nekorigovane i korigovane sistematske neodređenosti su u Tabeli 1, upoređene sa rezultatima dobijenim za dva papučasta ADV senzora, ispitana u okviru istraživanja Aguilar-a i saradnika (2016). Treba imati na umu, da direktno poređenje nekorigovanih sistematskih neodređenosti nije primereno, budući da je u slučaju ravnih EM senzora jasan sistematski uticaj smanjenja kontrolne zapremine, što nije slučaj kod papučastih ADV senzora. Sa druge strane, vrednosti korigovane sistematske neodređenosti praktično pružaju uvid u potencijal primene ravnih EM senzora. Može se videti da ukoliko se ravni EM senzor lokalno kalibriše (rekalibriše), može da radi sa značajno manjom sistematskom neodređenošću u odnosu na ADV senzore. Vrednosti faktora smanjenja sistematske neodređenosti  $URF_{B,adj}$  su 3.1 i 11.5 u poređenju sa sensorima ADV A i B respektivno.

Rezultati analiza predstavljenih u ovom poglavlju ukazuju na dodatne pogodnosti primene ravnih EM senzora, koje imaju jasan praktičan značaj. Prethodne analize papučastih ADV senzora su ukazale (Maheepala, 2001; McIntyre i Marshall, 2008; Aguilar i saradnici, 2016) na probleme sa minimalnom granicom detekcije i mrtvom zonom, koje za posledice dovode do loših merenja pri malim brzinama i dubinama. Ovi problemi nisu uočeni u primeni ravnih EM senzora. Tako se na Slici 6, može videti da su zabeležena adekvatna merenja brzine pri dubinama od vode od samo 4 cm (~2 cm odstojanja između nivoa vode i elektroda). Pored toga, brzine od samo 3 cm/s su adekvatno izmerene, što je posebno korisno u slučaju merenja brzine u kolektorima sa blagim nagibom ili pod uticajem uspora.

### 3.2 Statistička neodređenost

Statistička neodređenost merenja dobijenih pomoću ravnih EM senzora je definisana kao standardna devijacija od  $n > 3$  merenja pri ustaljenim uslovima tečenja u mernom kanalu. Pre procene konačne vrednosti statističke neodređenosti, izvršena je vizuelna inspekcija sračunatih standardnih devijacija ( $S_{V,EMV,j}$ ) kao funkcije izmerene dubine, etalonske brzine i Frudovog broja (Slika 7). Na dijagramima se može primetiti da ne postoje jasna korelacija između standardne devijacije i ispitanih parametara, osim u slučaju poređenja sa etalonskom brzinom. Ovde je uočen blagi uzlazni trend, koji se može pripisati ne-hidraulički oblikovanim ivicama ravnog EM senzora, međutim dalja istraživanja su neophodna pre donošenja konačnog zaključka. Pretpostavlja se da sa porastom srednje profilske brzine, odvajanje koherentnih turbulentnih vrtloga počinje značajnije da utiče na merenje brzine. Uprkos tome, u Tabeli 1 se može videti da je statistička neodređenost ravnih EM senzora dosta niža nego kod ADV senzora. Faktor smanjenja neodređenosti  $URF_p$  iznosi 2.4 i 10.6 u poređenju sa ADV senzorom A i B, respektivno.



Slika 7. Standardne devijacije merenja brzina pomoću ravnih EM sonde sa statističkom neodređenošću u zavisnosti od dubine, etalonske EMF brzine i Frudovog broja

### 3.3 Kombinovana neodređenost

Doprinosi od komponenata merne neodređenosti, etalonske, sistematske i statističke su agregirani u jedinstvenu vrednost kombinovane merne neodređenosti. U Tabeli 1 se može videti da je faktor smanjenja neodređenosti, u poređenju ravnih EM senzora i papučastih ADV senzora A i B, 2.4 i 8.5, respektivno. NA osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da ravni EM senzori imaju određene značajne prednosti u odnosu na papučaste ADV. Glavni razlog, verovatno leži u prirodi mernih tehnologija, gde kod EM senzora postoji jasan i relativno robustan integrativni princip rada, što se ne može reći i za ADV uređaje.

### 3.4 Praktični aspekt rezultata istraživanja

Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti ravnih EM senzora ukazuju na značajne prednosti u primeni ove metode za merenje protoka u hidrotehničkim sistemima sa otvorenim tokovima. Korišćenjem, u osnovi iste, procedure za etaloniranje koja je prethodno primenjena na papučastim ADV sensorima, omogućila je nepristrasno poređenje karakteristika ova dva tipa mernih uređaja. Iako se ovde diskutuje samo o laboratorijskim ispitivanjima, ona su dovoljna za formiranje hipoteze da ravni EM senzori mogu da pruže dodatne prednosti u merenjima protoka u otvorenim tokovima. Najbitnije karakteristike istražene i verifikovane ovim istraživanjem su navedene u nastavku:

Ravni EM senzori mogu da mere srednju profilsku brzinu, sa niskom mernom neodređenošću u širem opsegu hidrauličkih uslova nego papučasti ADV uređaji. Prvenstveno, može da radi sa dubinama od svega nekoliko cm (4 cm) kao i pri malim brzinama (3 cm/s) (Slike 5 i 6, Tabela 1).

- Ravni EM senzori su linearni u ispitanom opsegu brzina (0 – 1.1 m/s). Ova bitna osobina, omogućava primenu jednostavnih linearnih korekcionih funkcija (Tabela 1) za uklanjanje sistematske neodređenosti mernih podataka. Linearnost je još jedna prednost u odnosu na papučaste ADV senzore.
- U odnosu na papučaste ADV senzore, merenja pomoću ravnih EM uređaja su stabilnija i ponovljivija, što je dokazano vrednostima Faktora smanjenja statističke neodređenosti  $URF_p > 2.4$ , uprkos tome što su korišćeni kraći merni intervali (Slika 7 i Tabela 1).
- Nakon instalacije ravnih EM senzora, potrebno je sprovesti lokalnu kalibraciju (rekalibraciju) uređaja kako bi se minimizirali sistematski uticaji geometrije na merenja srednje profilske brzine.
- Konačno, nakon lokalne kalibracije (rekalibracije) iliti uklanjanja sistematske neodređenosti u izmerenim podacima, ravni EM senzori su pokazali veću tačnost nego papučasti ADV uređaji ( $URF_c > 2.3$ ) (Tabela 1).

Razlog za ovakve rezultate u poređenju dve metode, treba potražiti u prirodi merne metode. EM tehnologija ima jasniji i robusniji princip rada koji omogućava kako veću tačnost tako i veću stabilnost u merenjima. Pored toga, princip rada metode omogućava i merenja u dosta širem spektru hidrauličkih uslova.

## 4 Zaključci

U ovom radu su prikazani rezultati laboratorijskog etaloniranja neodređenosti merenja srednje profilske brzine u otvorenim tokovima, korišćenjem ravne EM sonde proizvođača „Svet instrumenata“. Upotrebom laboratorijske procedure slične kao u prethodnim istraživanjima (Aguilar i saradnici, 2016), omogućeno je nepristrasno poređenje EM sonde sa popularnijim ADV sensorima. Rezultati laboratorijskog etaloniranja merne neodređenosti su nedvosmisleno ukazali da EM senzori mogu da se koriste kao alternativa ili suplementarna tehnologija, ADV sensorima. Ravni EM senzori su pokazali bolju ponovljivost (preciznost) i višu tačnost merenja srednje profilske brzine, ukoliko se kalibrišu prema uslovima na lokalnom mernom mestu. Pored toga, uočeno je da ovi senzori mogu

adekvatno da rade u širem spektru hidrauličkih uslova nego ADV senzori, u pogledu dubina i brzina. Konačno ravni EM senzori su pokazali dobru linearnost u ispitanom opsegu brzina (0 – 1.1 m/s).

Međutim iako je pokazano da su ravne EM sonde superiorne po brojnim parametrima u odnosu na papučaste ADV senzore, glavna mana im je relativno mala kontrolna zapremina. Na ovaj način ravna EM sonda dolazi do podatka o brzini na osnovu relativno malog udela celokupnog proticajnog preseka što na terenu može dovesti do pristustva značajne sistematske neodređenosti. Zbog toga se predlaže da se pre instaliranja ovih uređaja, sprovede neka vrsta pred-pozicione analize iliti kalibracija prema lokalnim uslovima, kojom bi se omogućila redukcija ovog i ostalih sistematskih uticaja. Primenom ove procedure, omogućilo bi se iskorišćenje punog potencijala ravnih EM senzora na terenu, prvenstveno u pogledu tačnosti, stabilnosti i ponovljivosti.

## Literatura

1. Aguilar, M.F., McDonald, W.M. and Dymond, R.L., 2016. Benchmarking laboratory observation uncertainty for in-pipe storm sewer discharge measurements. *Journal of Hydrology*, 534, pp.73-86.
2. Maheepala, U.K., Takyi, A.K. and Perera, B.J.C., 2001. Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems. *Journal of Hydrology*, 245(1-4), pp.32-47.
3. McIntyre, N. and Marshall, M., 2008, August. Field verification of bed-mounted ADV meters. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 161, No. 4, pp. 199-206). ICE Publishing.
4. Larrarte, F., Bardiaux, J.B., Battaglia, P. and Joannis, C., 2008. Acoustic Doppler flow-meters: A proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), pp.261-267.
5. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
6. Heiner, B.J. and Vermeyen, T.B., 2012. Laboratory evaluation of open channel area-velocity meters. US Bureau of Reclamation, Denver, CO, p.15.
7. Bonakdari, H. and Zinatizadeh, A.A., 2011. Influence of position and type of Doppler flow meters on flow-rate measurement in sewers using computational fluid dynamic. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(3), pp.225-234.
8. Kolin, A., 1936. An electromagnetic flowmeter. Principle of the method and its application to bloodflow measurements. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 35(1), pp.53-56.
9. Bevir, M.K., 1970. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.
10. Shercliff, J.A., 1962. The theory of electromagnetic flow-measurement. CUP Archive.
11. Michalski, A., Starzynski, J. and Wincenciak, S., 2001. Electromagnetic flowmeters for open channels: two-dimensional approach to design procedures. *IEEE sensors journal*, 1(1), pp.52-61.
12. Herschy, R.W., 1978. Accuracy in Hydrometry. Wiley, New York.
13. Gils, H., 1970. Discharge measurement in open water by means of magnetic induction. *In Symposium on hydrometry*, Koblenz.
14. Kuromori, K., Gotoh, S. and Matunaga, Y., 1994. An electromagnetic flowmeter with dual frequency excitation. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 30(9), pp.1020-1026.
15. Merz, B. and Thieken, A.H., 2005. Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), pp.114-132.
16. Bertrand-Krajewski, J.L. and Muste, M., 2008. Understanding and managing uncertainty. *Data requirements for integrated urban water management*. Edited by: Tim Fletcher and Ana Deleti? (Vol. 1). Paris: UNESCO Publishing and Taylor & Francis.
17. Coleman, H.W. and Steele, W.G., 1995. Engineering application of experimental uncertainty analysis. *AIAA journal*, 33(10), pp.1888-1896.
18. Ivetić, D., Prodanović, D. and Stojadinović, L., 2018. Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566(11), pp.455-469.

## Analiza primene akustičnih metoda za merenje suspendovanog nanosa

Predrag Vojt<sup>1</sup>, Nevena Cvijanović<sup>2</sup>, Dimitrije Mladenović<sup>3</sup>, Mladen Kostić<sup>4</sup>, Nikola Rosić<sup>5</sup>, Mira Ivljanin<sup>6</sup>

APSTRAKT: Nanos je sastavni i veoma važan deo svakog rečnog sliva. Sa aspekta rečnih akumulacija važno je kontinualno prikupljati podatke o suspendovanom nanosu koji u velikoj meri doprinosi njihovom zasipanju. Standardna metoda merenja suspendovanog nanosa zasnovana je na zahvatanju uzoraka u mernim profilima uz istovremeno merenje brzina tečenja hidrometrijskim krilom. Merenja se vrše u tačkama duž vertikala poprečnog profila dok se srednji profilski parametri dobijaju integracijom merenih veličina duž profila. Standardna metodologija osmatranja suspendovanog nanosa predstavlja pravi izazov u pogledu uloženog truda i vremena u prikupljanje uzoraka i obradu podataka. Osim toga, tokom trajanja poplavnog talasa nije moguće prikupiti podatke sa terena pa samim tim izostaju podaci u periodima velikih voda. U susjednim zemljama i inostranstvu masovno se prelazi na kontinualno merenje nanosa optičkim (Optical backscatter point sensor, OBS) i akustičnim (Acoustic backscatter profiling sensors, ABS) metodama, uspostavljanjem korelacija između standardne metode i kontinualnog merenja koristeći indeksnu metodu. U novije vreme se za merenje protoka koristi i ultrazvučna metoda (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) kod koje se pomeranjem senzora po profilu snima raspor brzina po dubini kao i dubina vode u preseku, a na osnovu dobijenih podataka računa protok. Rezultati merenja akustičnim uređajima (povratni signali) i analize zahvaćenih uzoraka (koncentracije nanosa) mogu se korelisati i ekstrapolovati po celom poprečnom preseku. Istovremena merenja tradicionalnim i novijim akustičnim metodama trebalo bi izvoditi dok korelacija među merenim veličinama ne postigne zadovoljavajuću pouzdanost i pokrije ceo opseg mogućih protoka. U radu će biti opisane akustične metode za merenje suspendovanog nanosa kao i procena pouzdanosti njihovih rezultata u različitim uslovima merenja.

Ključne reči: suspendovani nanos, akustične metode za merenje nanosa, unapređenje sistema za monitoring nanosa

## Application of acoustic methods in suspended sediment measurement

ABSTRACT: Suspended sediment is very important component of every river basin. In terms of river reservoirs, it is important to continuously monitor the suspended sediment transport, considering the inevitable sediment deposition process in reservoirs. Present data collection method includes discrete water sampling as well as velocity measurements with current meter. Measurements are performed at various points and verticals across the monitoring profile, while the mean cross-sectional values are obtained by integration of discrete values along the profile. Traditional suspended sediment monitoring methodology is a real challenge considering the time and effort to collect and analyse data. Furthermore, it is often unachievable to perform measurements during the floods, which leads to a lack of data in this range of flow. Nowadays, Optical backscatter point sensor (OBS) and Acoustic backscatter profiling sensors (ABS) are widely used all around world in hydrometric measurements, as well as in modern sediment monitoring programs. The ultrasound method (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) is used to record a velocity distribution and a water depth along the monitoring profile. These data are then used to determine the mean discharge value. The results of acoustic device measurements (backscatter signals) and analysis of water samples (sediment concentrations) can be correlated and then extrapolated across the entire cross-section. These parallel investigations will continue until the correlation between considered variables becomes reliable and covers the whole range of flows. The application of acoustic methods in suspended sediment monitoring will be presented in this paper, as well as the reliability assessment in different operating conditions.

Keywords: suspended sediment monitoring, acoustic sensors, correlations, suspended sediment load

<sup>1</sup> Predrag Vojt, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [predrag.vojt@jcerni.co.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.co.rs)

<sup>2</sup> Nevena Cvijanović, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [nevena.cvijanovic@jcerni.co.rs](mailto:nevena.cvijanovic@jcerni.co.rs)

<sup>3</sup> Dimitrije Mladenović, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [dimitrije.mladenovic@jcerni.co.rs](mailto:dimitrije.mladenovic@jcerni.co.rs)

<sup>4</sup> Mladen Kostić, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [mladenkostic.jcerni@gmail.com](mailto:mladenkostic.jcerni@gmail.com)

<sup>5</sup> Nikola Rosić, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [ntrosic@grf.bg.ac.rs](mailto:ntrosic@grf.bg.ac.rs)

<sup>6</sup> Mira Ivljanin, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, Beograd, [mira.ivljanin@hidmet.gov.rs](mailto:mira.ivljanin@hidmet.gov.rs)

## 1 Uvod

Merenje koncentracije suspendovanog nanosa (SSC) predstavlja prvi korak u analizi transporta nanosa u rečnim tokovima. Standardna metoda merenja suspendovanog nanosa zasnovana je na zahvatanju uzoraka (sa laboratorijskim analizama) u mernim profilima uz istovremeno merenje brzina tečenja hidrometrijskim krilom. Merenja se vrše u tačkama poprečnog profila dok se parametri dobijaju integracijom duž profila. U novije vreme se za merenje protoka masovno koriste ultrazvučni uređaji (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP), pri čemu se rezultati merenja mogu iskoristiti i za određivanje koncentracije suspendovanog nanosa. U ovom radu su iskorišćeni rezultati standardne metodologije merenja i korelisani sa merenjima ADCP uređaja (koncentracija-povratni signal po dubini) i ekstrapolovati po celom poprečnom preseku kako bi se dobio pronos suspendovanog nanosa. Standardna metoda zahteva veliki broj uzoraka i brzina u svakoj od tačaka uzorkovanja. Korišćenjem ADCP-a zahvatanje uzoraka svodi se na što manju meru, a samim tim se skraćuje uloženo vreme u merenje suspendovanog nanosa. Primena akustične tehnologije za kvantifikaciju SSC daje veću pokrivenost detaljima jer je standardna metoda ograničena na tačke u par vertikalala.

Korišćenjem ADCP-a za određivanje SSC, metodologija se svodi na proces korišćenja amplitude intenziteta vraćenog eha koji se preračunava u SSC na osnovu korelacione veze definisane zasnovanom na principu sonarnih jednačina [8]. Proces kalibracije je urađen upoređivanjem intenziteta vraćenog eha sa laboratorijskim analizama SSC na pojedinim tačkama po dubini koristeći linearnu regresiju.

U radu će biti opisane metode za merenje suspendovanog nanosa akustičnim metodama, njihova primena na terenu kao i procena pouzdanosti rezultata u različitim uslovima rada. Za potrebe analize, vršena su paralelna merenja hidrometrijskim krilom (vlasništvo Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“) sa prikupljanjem uzoraka (koji su obrađeni u laboratoriji Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“) i dva ADCP uređaja (TRDI Rio Grande – vlasništva RHMZ Srbije i Sontek M9 – vlasništva Građevinskog fakulteta u Beogradu). TRDI Rio Grande radi na frekvenciji od 1200 HZ i koristi „Firmware“ 10.16 dok Sontek M9 radi na frekvenciji od 1000 Hz ili 3000 Hz i koristi instaliran „Firmware“ 4.02.

## 2 Osnove

Srednje profilske vrednosti protoka vode i pronosa suspendovanog nanosa dobijaju se integracijom karakterističnih veličina po poprečnom preseku korišćenjem sledećih jednačina:

$$q = \int_0^h v \cdot dh \left[ \frac{m^3}{s \cdot m'} \right]$$

gde je:  $q$  - jedinični protok u vertikali,  $v$  - brzina vode u tački,  $h$  - dubina vode u vertikali,

$$Q = \iint_{00}^{hB} v \cdot dh \cdot dx \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

gde je:  $Q$  - srednji protok u profilu,  $v$  - brzina vode u tački,  $h$  - dubina vode,  $B$  - širina profila,

$$\rho_0 = v_i \cdot c_i \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right], \rho = \int_0^h \rho_0 \cdot dh \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

gde je:  $\rho_0$  - pronos nanosa u tački,  $v_i$  - brzina vode u tački,  $c_i$  - koncentracija nanosa u tački,  $\rho$  - jedinični pronos nanosa u vertikali,  $h$  - dubina vode u vertikali

$$P = \iint_{00}^{hB} v \cdot c \cdot dh \cdot dx \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

gde je:  $P$  - srednji pronos nanosa u profilu.

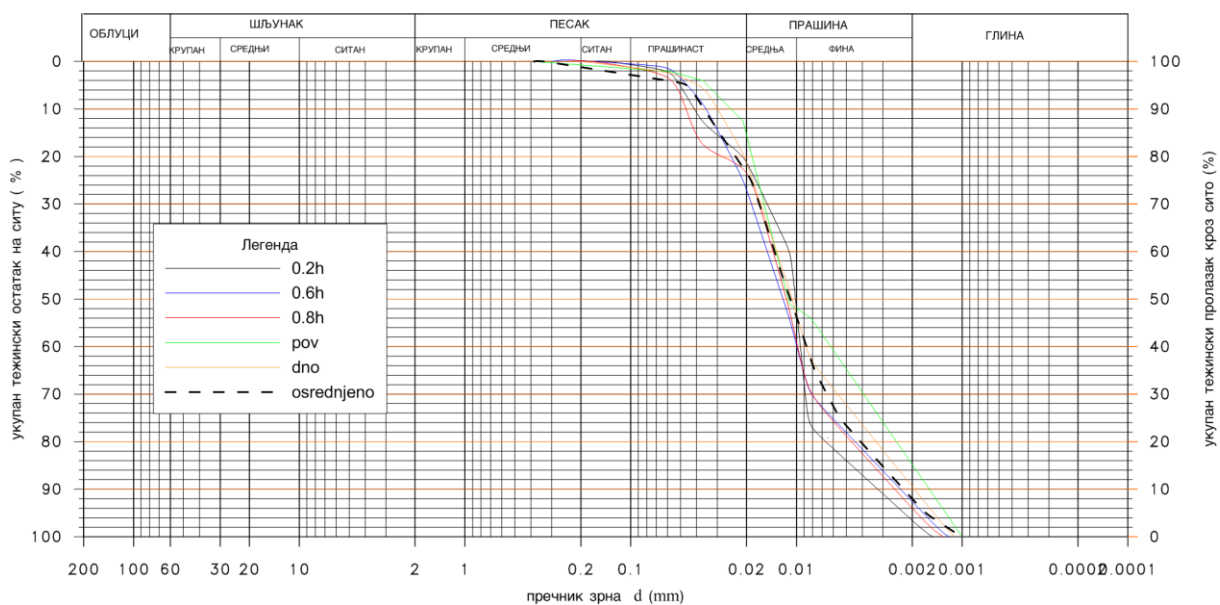
## 3 Metodologija merenja ADCP uređajima

Prikupljanje uzoraka vode i podataka sa dva ADCP uređaja i hidrometrijskim krilom obavljena su na profilu Novi Beograd na reci Savi u 2018. godini. Za laboratorijsku analizu bilo je dostupno 25 uzoraka od po 40 litara koji su zahvaćeni u 5 mernih vertikalala. Prikupljanje podataka sa ADCP uređajem obavljena su prelaženjem sa jedne na drugu obalu i obrnuto, kao i stajanjem u vertikali i prikupljanjem podataka u periodu od par minuta kako bi se vrednosti što bolje osrednjile na isti način kao i prilikom merenja sa hidrometrijskim krilom.

Snimanja sa ADCP uređajem su urađena sa dve frekvencije za merenje na većim dubinama (1 MHz i 1.2 MHz), i jedna od 3 MHz za merenja na manjim dubinama. Frekvencija uređaja je važan faktor u analizi jer niža frekvencija daje manji gubitak po dubini i jači odziv za veće čestice dok više frekvencije daju veći gubitak po dubini i jači odziv za manje čestice, pa se tako sa optičkim uređajima za merenje mutnoće (koncentracije), koji rade na visokim frekvencijama, daju jači odziv za najmanje čestice.

Teorijski modeli za određivanje brzine propagacije zvuka i slabljenje signala kao funkcije koncentracije i veličine čestica izvedeni su na osnovu interakcije dolaznog zvučnog signala sa česticama. Ovi modeli mogu se pojednostaviti klasifikacijom različitih režima talasnih dužina zavisnosti od veličine čestica i talasne dužine dolaznog talasa. U akustičnim metodama koriste se frekvencije od 200 kHz do oko 3 MHz što odgovara jačem odzivu za čestice između 500 i 0.5 um. Iz tog razloga, za sve prikupljene uzorke definisana je granulometrijska kriva kako bi se imao u vidu procenat čestica koje utiču na merenja u datim uslovima.

**КРИВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЈСКОГ САСТАВА НАНОСА V1**

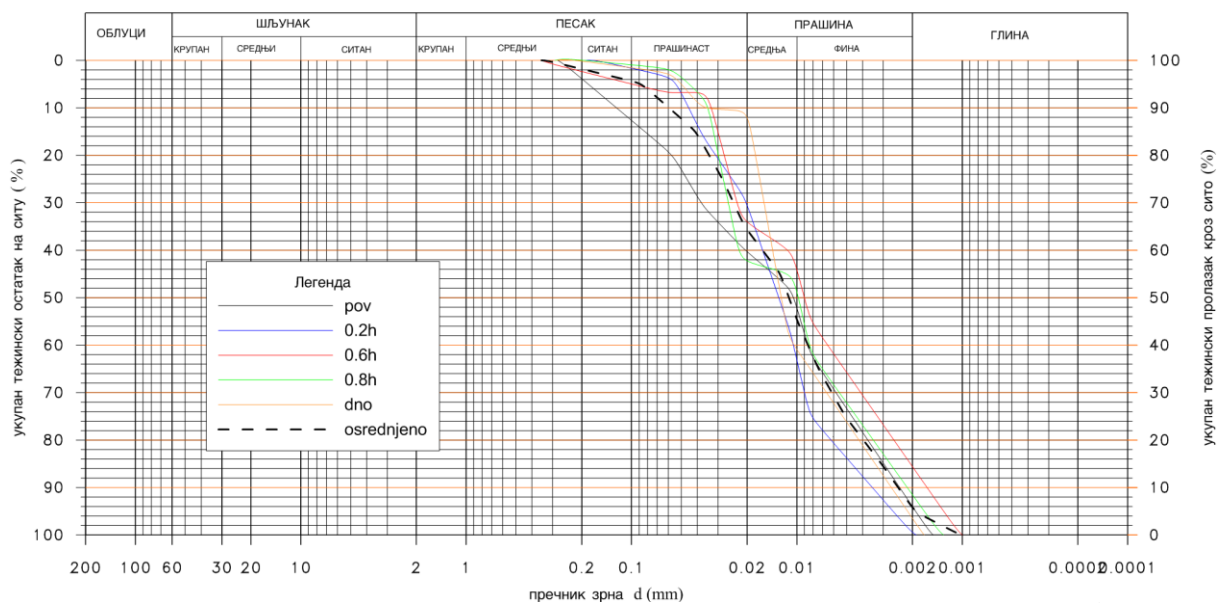


Slika 1. Krive granulometrijskog sastava za različite dubine na vertikali 1

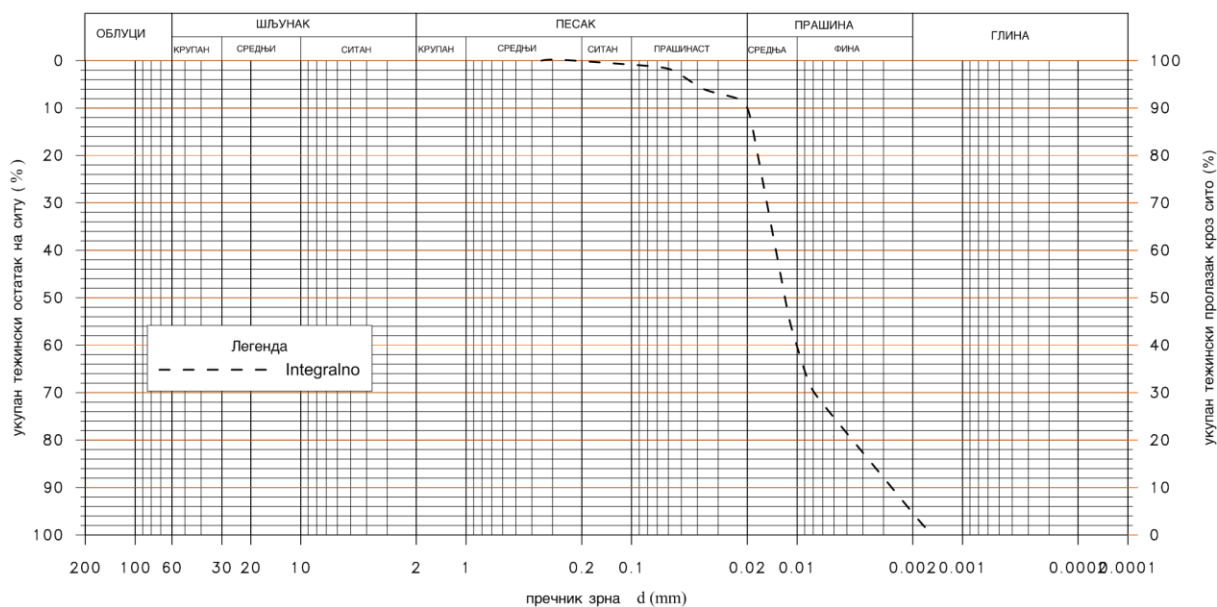
Figure 1. Particle size distribution for different water samples in depth of column 1



КРИВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЈСКОГ САСТАВА НАНОСА V2



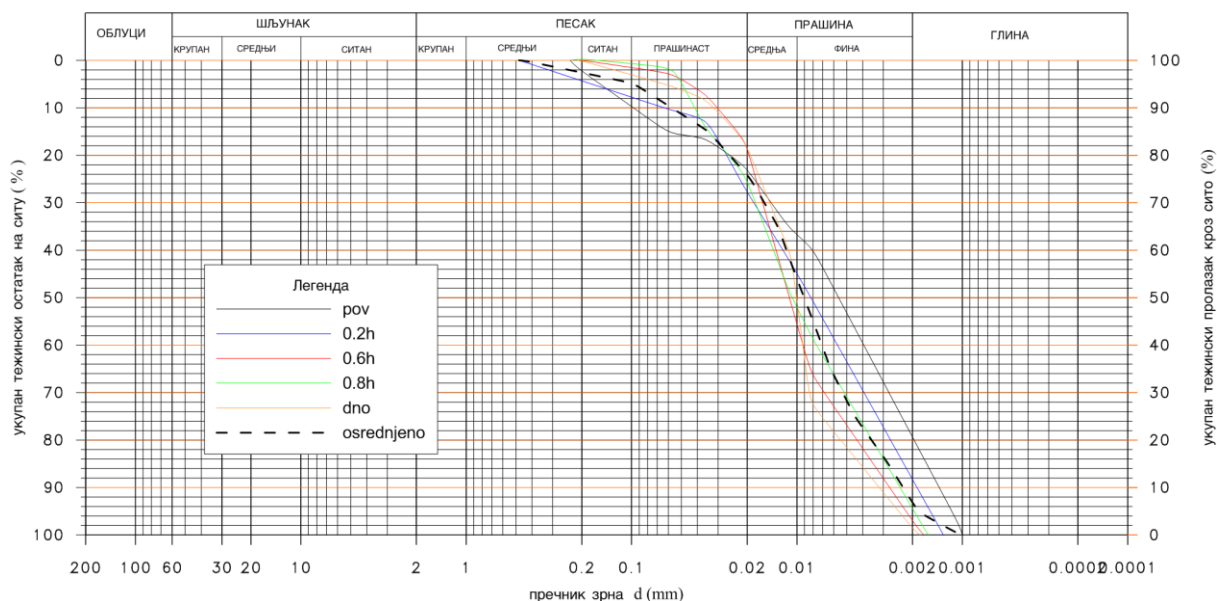
КРИВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЈСКОГ САСТАВА НАНОСА V3



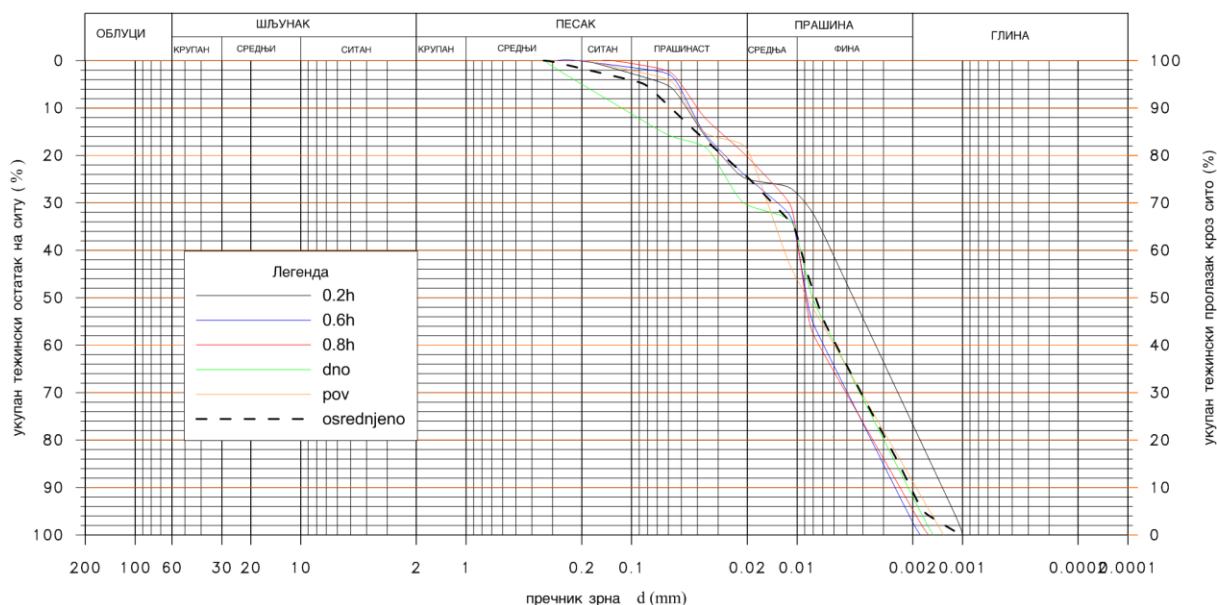
Slika 2. Krive granulometrijskog sastava za različite dubine na vertikalama 2 i 3

Figure 2. Particle size distribution for different water samples in depth of columns 2 and 3

### КРИВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЈСКОГ САСТАВА НАНОСА V4



### КРИВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЈСКОГ САСТАВА НАНОСА V5



Slika 3. Krive granulometrijskog sastava za različite dubine na vertikalama 4 i 5

Figure 3. Particle size distribution for different water samples in depth of columns 4 and 5

### 3.1 Obrada podataka

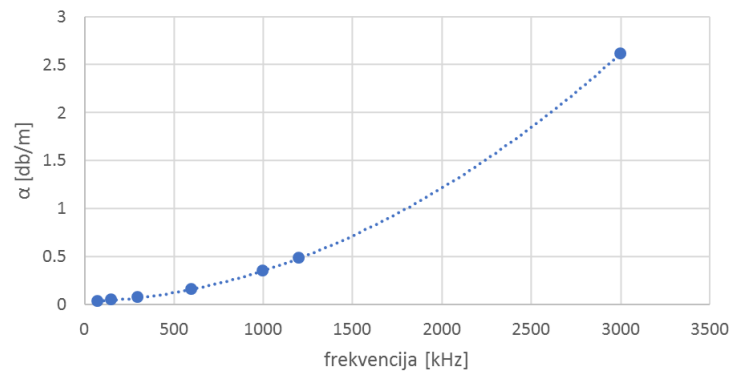
Nekoliko koraka je neophodno za pretvaranje sirovih podataka koje je ADCP zabeležio, na primer, promena snage zbog udaljenosti, apsorpcije zvuka u česticama, širenje zvučnog talasa. Problem se koriguje izračunavanjem TL

$$TL = 20 \log_{10} R + \alpha \cdot R$$

gde je  $\alpha$  koeficijent apsorpcije (dB/m) i R rastojanje između ADCP i merene ćelije (m). ADCP instrument može meriti koncentraciju suspendovanog nanosa na različitim dubinama. Ovo istraživanje

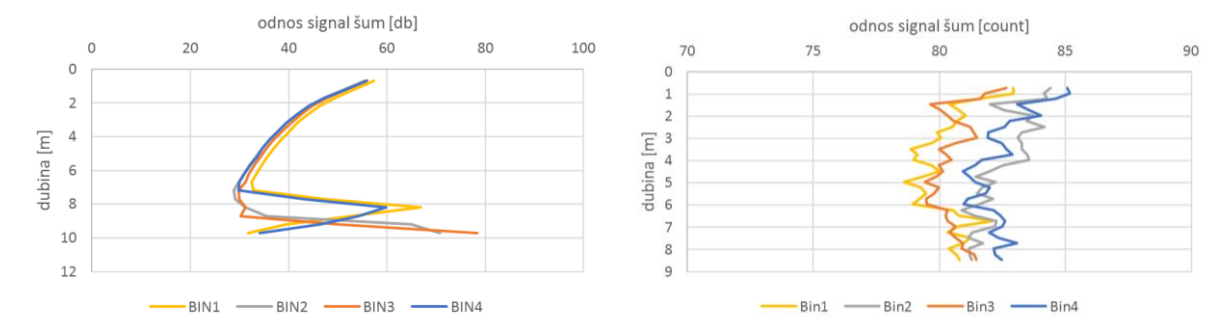
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

obavljeno je sa jednim „binom“ (jedan senzorski zrak od 4 moguća na ADCP). Vrednosti TL su zavise od frekvencije jer smo koristili dve različite frekvencije odnosno ADCP. Uobičajna vrednosti koeficijenta apsorpcije u zavisnosti od korišćene frekvencije prikazani su nastavku. Koeficijent apsorpcije veoma je zavistan [2] od temperature, saliniteta, pH i prisustva materijala koji mogu apsorbovati zvučne talase ali se u ovom radu nije mnogo osvrtao na tu promenu i koeficijenti koji su korišćeni u ovom radu prikazani su na narednoj slici.



Slika 4. Zavisnost koeficijenta apsorpcije od frekvencije

Figure 4. Absorption coefficient over frequency



Slika 5. Gubitak signala po dubunu za vertikalnu 1, Sontek (levo) i TRDI (desno)

Figure 5. Signal attenuation vs depth at vertical 1, Sontek (left) and TRDI (right)

TRDI ADCP snima zvučni signal eha u „count“ (slika 5 desno), dok Sontek ADCP snima zvučni signal eha u „db“ (slika 5 levo). Izmerena vrednost signala eha  $E$  za TRDI treba se preračunati u „db“ prema jednačini dole odnosno, preračunate su smanjivanjem za intenzitet šuma  $E_r$  za svaku ćeliju odnosno dubinu u jedinici „count“, a zatim pomnožene sa  $K_c$ . Vrednosti eha moraju biti mnogo veće od šuma. Vrednost šuma  $E_r$  u ovom radu je 40 „count“.

$$RL = K_c \cdot (E - E_r)$$

U vrednost  $RL$  ulazi i uticaj temperature jer  $K_c$  zavisi od temperature ali je to relativno konstantna vrednost po dubini za svako merno mesto. U ovom radu koeficijent  $K_c$  iznosi 0.43.

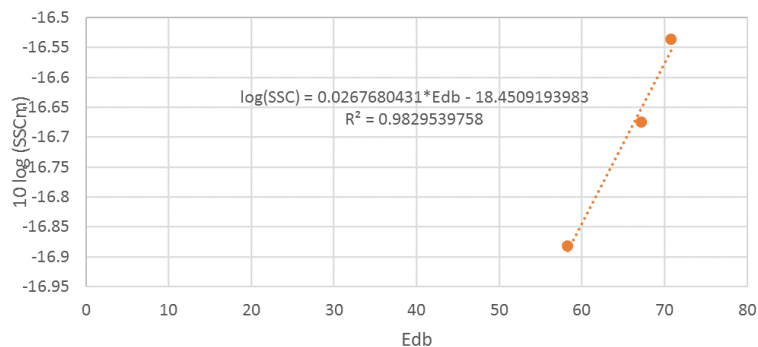
$$K_c = \frac{127.3}{T_e + 273}$$

gde je  $K_c$  koeficijent koji se koristi za pretvaranje „count“ izmerenih sa ADCP u „db“. Relativni zvučni signal  $RB$  može se odrediti sabiranjem  $RL$  i  $TL$  ali pošto je ADCP aktivni sonar dodaje se  $2TL$  pa se  $RB$  može sračunati narednom formulom

$$RB = RL + 2 \cdot TL$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 6. Kalibracija ADCP relativnog zvučnog signala kalibrisana lab. analizom za Sontek na mernom mestu Sava Beograd

Figure 6. Calibration of ADCP relative acoustic backscatter data using the lab. Analyzed SSC for Sontek at place Sava Belgrade

Proces konverzije od intenziteta eha u „count“ do „db“ bio bi pojednostavljen sledećom jednačinom, ali i dalje stoji napomena da ADCP Sontek već daje „db“ pa se član  $K_c(E - E_r)$  gubi kod korišćenja Sontek ADCP.

$$E_{db} = K_c \cdot (E - E_r) + 40 \cdot \log_{10} R + 2 \cdot \alpha \cdot R$$

Pretvaranje izmerenih signala sa ADCP u SSC zahteva vezu relativnog zvučnog signala u sprezi sa kretanjem suspendovanih čestica i količinom suspendovanog nanosa. Ovaj odnos se zasniva na sledećoj jednačini

$$\log_{10} SSC = A + B \cdot E_{db}$$

Vrednosti A i B treba naći iz jednostavne linearne regresije sa tačkama iz laboratorijske analize zahvaćenog uzorka na određenoj dubini i osmotrenih eha sa ADCP. U ovom radu uzete su tri tačke za pronalaženje koeficijenata A i B od 25 koliko je bilo potrebno za standardnu metodologiju sa hidrometrijskim krilima. U nastavku je prikazana kalibracija ADCP relativnog zvučnog signala sa laboratorijskim analizama SSC.

Za svaki ADCP urađena je posebna kalibracija gde su se dobili A i B koeficijenti. Za Sontek kalibracija je obaljena na vertikali 1 u tri tačke po dubini dok je za TRDI kalibracija urađena u vertikali 2 takođe u tri tačke po dubini. Sa dobijenim koeficijentima proračun je urađen za svaku od posebno snimljenih vertikala a na kraju i za snimak prelaženja sa jedne na drugu obalu. Rezultati po vertikalama dati su u nastavku teksta gde su prikazane prvo uporedne brzine (i teorijska eksponencijalna) po dubini jer su one neophodne za proračun protoka suspendovanog nanosa, nakon toga prikazani su uporedno rasporedi koncentracije SSC i na kraju uporedno prikazani rasporedi specifičnog pronosa nanosa sa kojima se računao ukupan protok suspendovanog nanosa. Bitno je napomenuti da ADCP snima brzine u određenom opsegu dubina i da svaki ADCP mora imati teorijski raspored na osnovu koga može da nadomesti nemerani deo. Standardno i za Sontek i za TRDI pri računanju protoka koristi se eksponencijalni raspored brzine prema sledećoj jednačini

$$\frac{u}{u_*} = 9.5 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^b$$

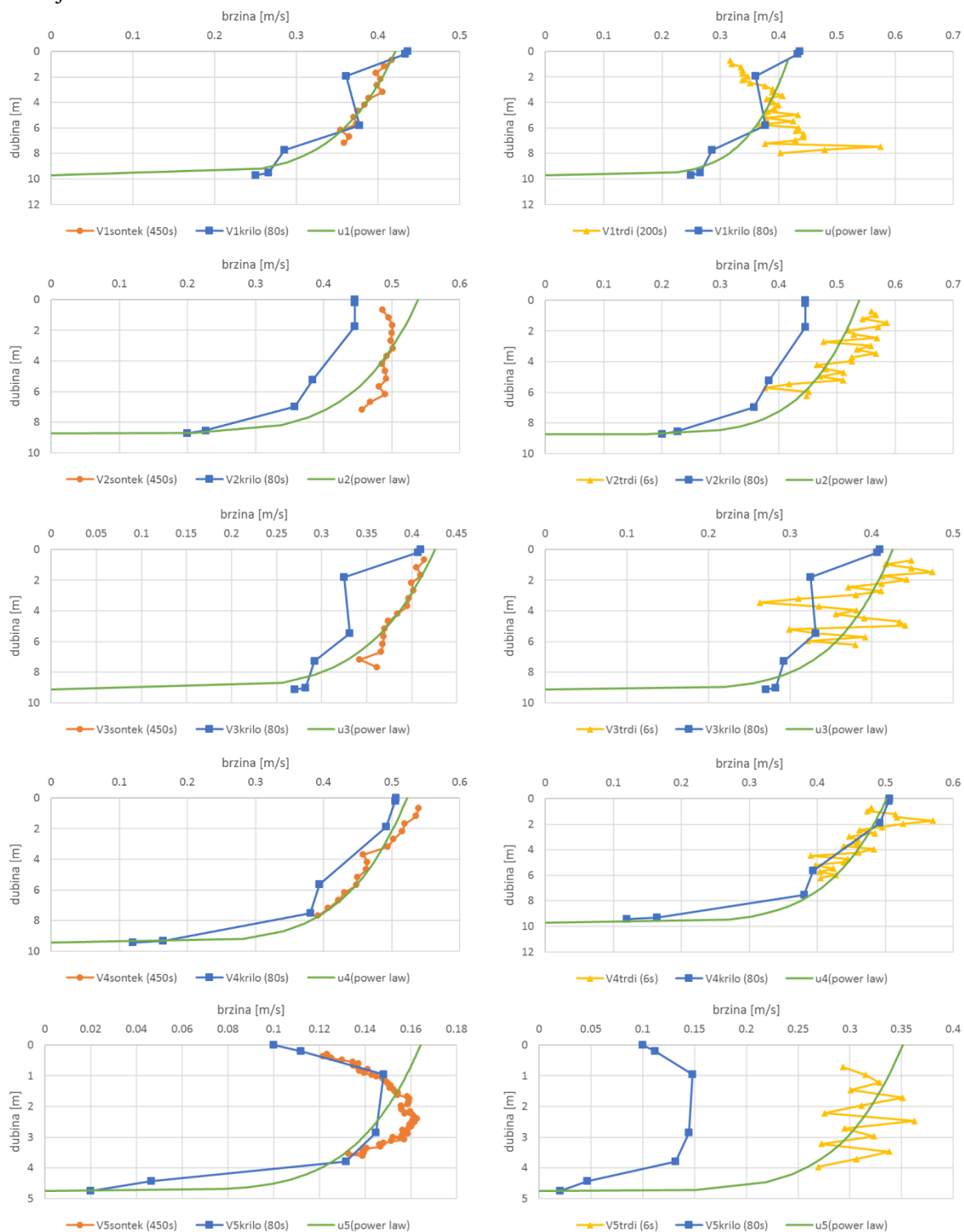
gde je u brzina na rastojanju z merenog od dna reke,  $u_*$  je brzina trenja,  $z_0$  je referentno rastojanje od dna na kome je brzina jednaka nuli i b konstanta koja je prema Chen 1991 jednako 1/6.

Pomenuti nemerani deo brzina, a prema eksponencijalnoj zavisnosti, koristi se u ovom radu da bi se izračunao specifični pronos pri dnu i površini gde ADCP nemi brzinu ali ima vraćen eho. Nakon dobijanja specifičnog pronosa za svaku od vertikala sračunat je ukupan pronos suspendovanog nanosa standardnim postupkom dok se za merenje ADCP prelaženjem sa jedne na drugu obalu integracija po širini obavila na svakoj snimljenoj vertikali tj na oko 300 vertikala. Međutim ADCP

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

takođe ne meri deo uz obale koji se za proračun protoka dodaje pa se tako i u ovom radu koristi to uvećanje za SSC.

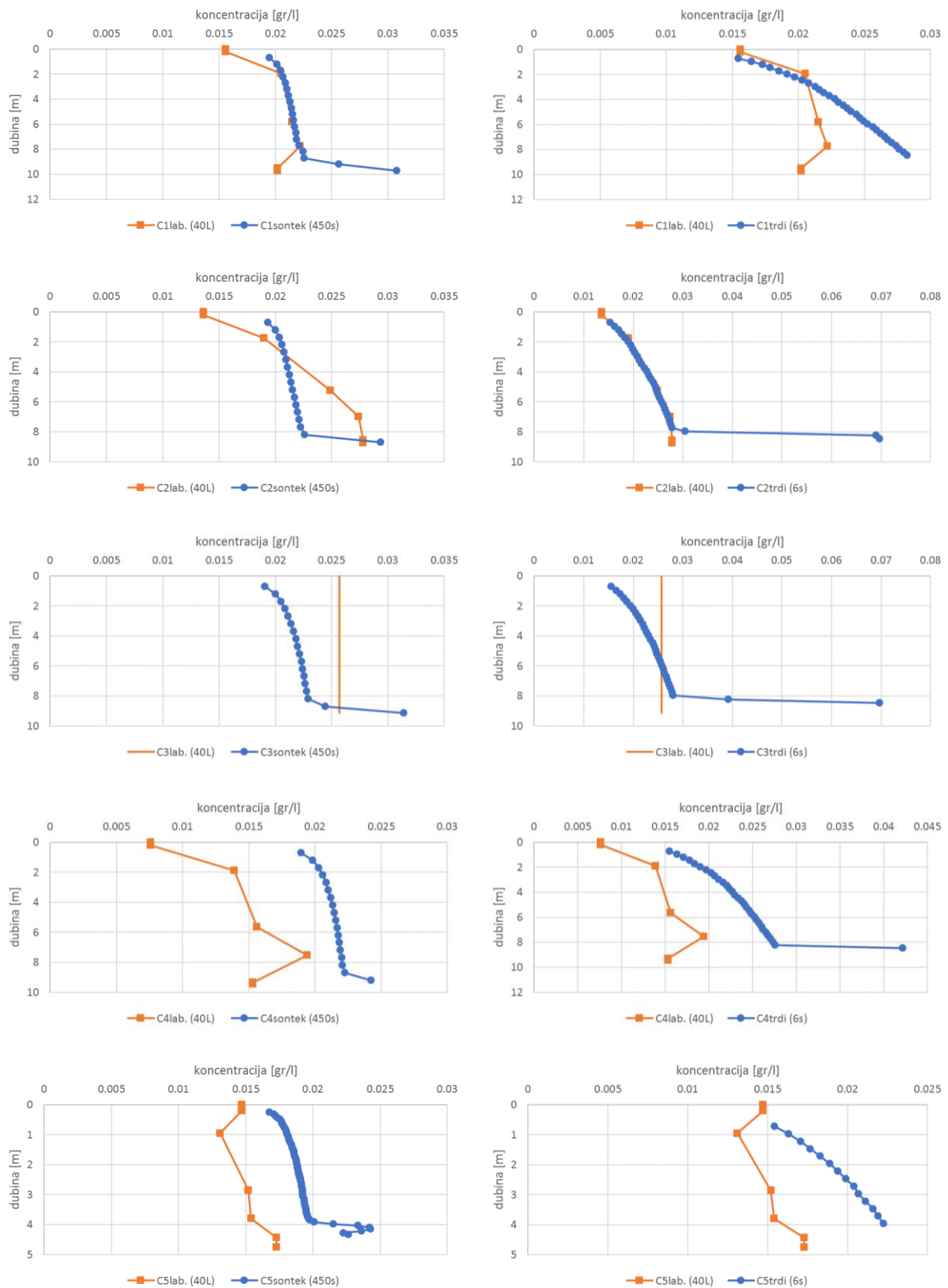


Slika 7. Uporedni raspored brzina krilom po dubunu po vertikalama sa exponencijalnom teorijskom zavisnosti, Sontek (levo) i TRDI (desno)

Figure 7. Velocity profile (measured with current meter) at verticals with teoretical power law velocity profile, Sontek (left) and TRDI (right)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

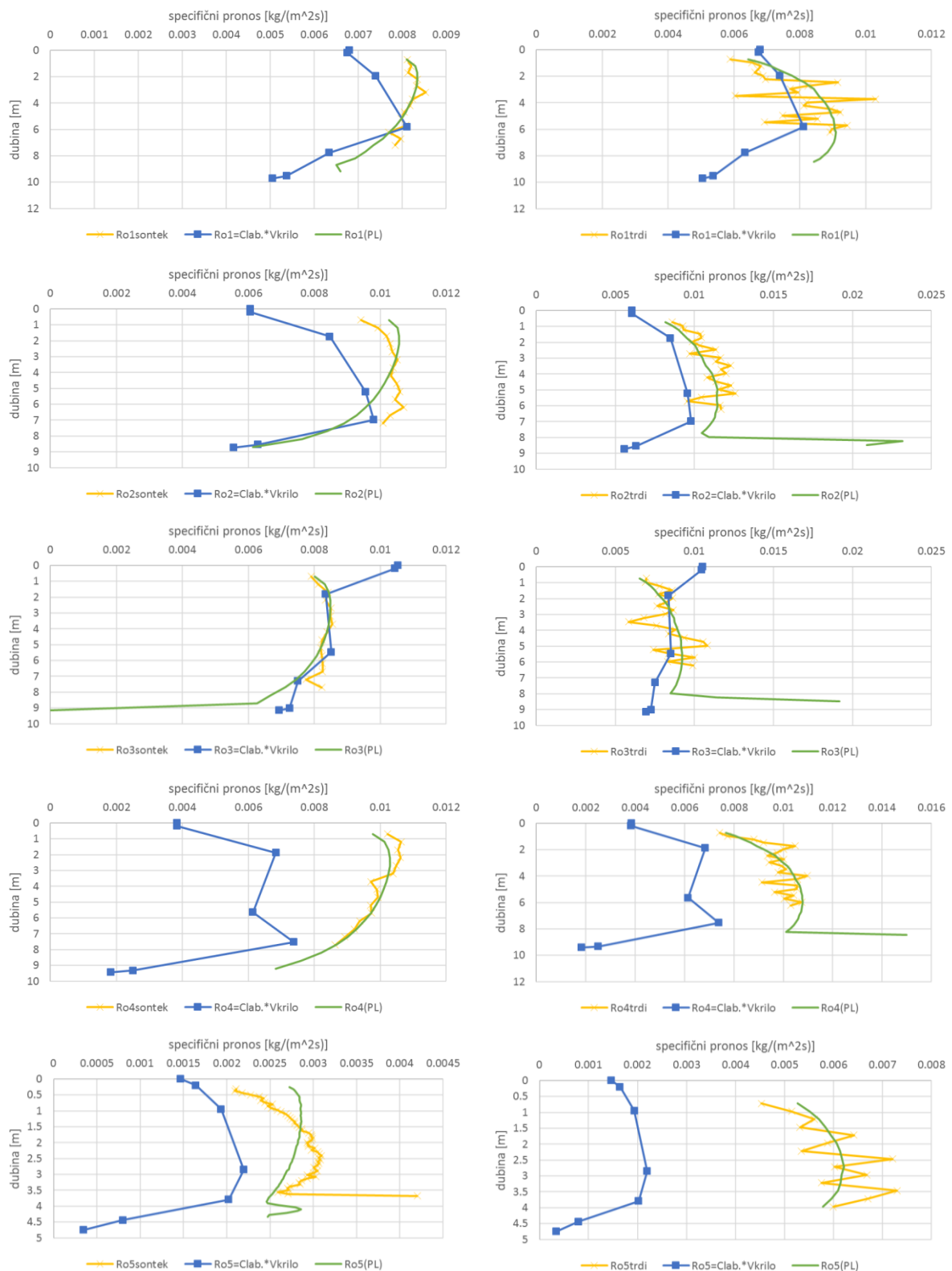


Slika 8. Uporedni raspored koncentracije (uzorkovan) po dubunu po vertikalama, stračunat sa ADCP Sontek (levo) i TRDI (desno)

Figure 8. Concentration (sampled) profile at verticals , calculated by Sontek (left) and TRDI (right)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

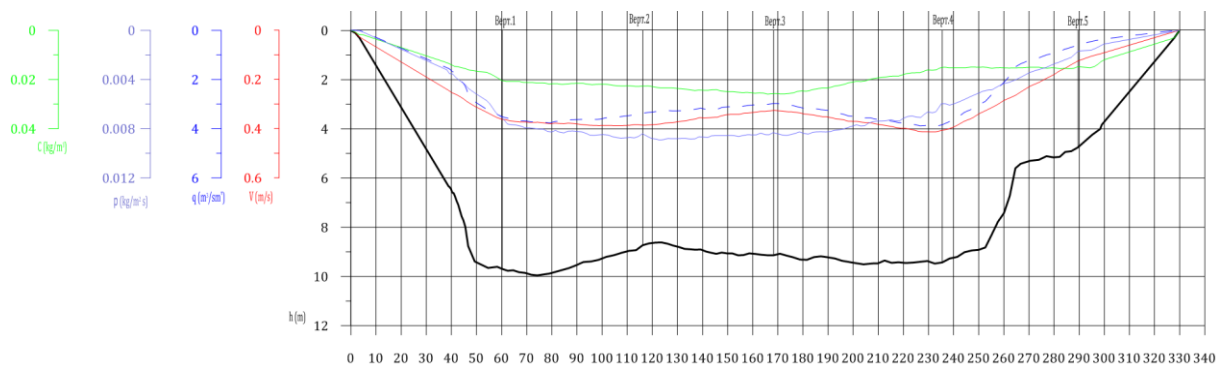


Slika 9. Uporedni raspored specifičnog pronosa merenog krilom i uzrokom po dubunu po vertikalama, Sontek (levo) i TRDI (desno)

Figure 9. Specific concentration (sampled and measured by current meter) profile at verticals , Sontek (left) and TRDI (right)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



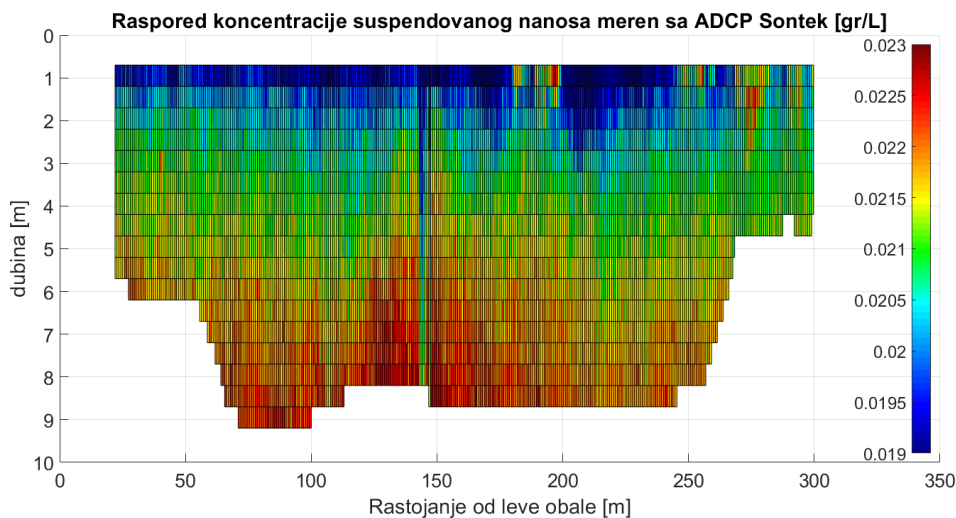
Slika 10. Rezultati merenja pronosa nanosa, brzine vode krilom i nanosa uzorcima od 40L

Figure 10. Measurement results SSC, standard method measurement

Na međukoraku standardne metode merenja SSC dobijaju se jedinične veličine koje prikazuju stanje protoka i protoka nanosa po poprečnom profilu koje se mogu videti u nastavku na slici 10.

Za merenje ADCP u slučaju prelaženja sa jedna obale na drugu na raspolaganju su oko 300 snimljenih vertikalna pa samim tim mogu se uočiti detalji rasporeda koncentracije prikazani na slici 11.

Kada se upotrebe merenja sa ADCP, laboratorijske analize zahvaćenih uzoraka, sve jednačine i kalibracije dobija se rezultat koji se može uporediti sa standardnim metodom za merenje SSC prikazan u tabeli 1. Kada izmerene podatke nanese na niz od oko 30 godina merenja pronosa suspendovanog nanosa dobijaju se odlična poklapanja što se može videti na narednoj slici 12.



Slika 11. Poprečni profil koncentracije suspendovanog nanosa [gr/L] izmeren ADCP Sontek uređajem

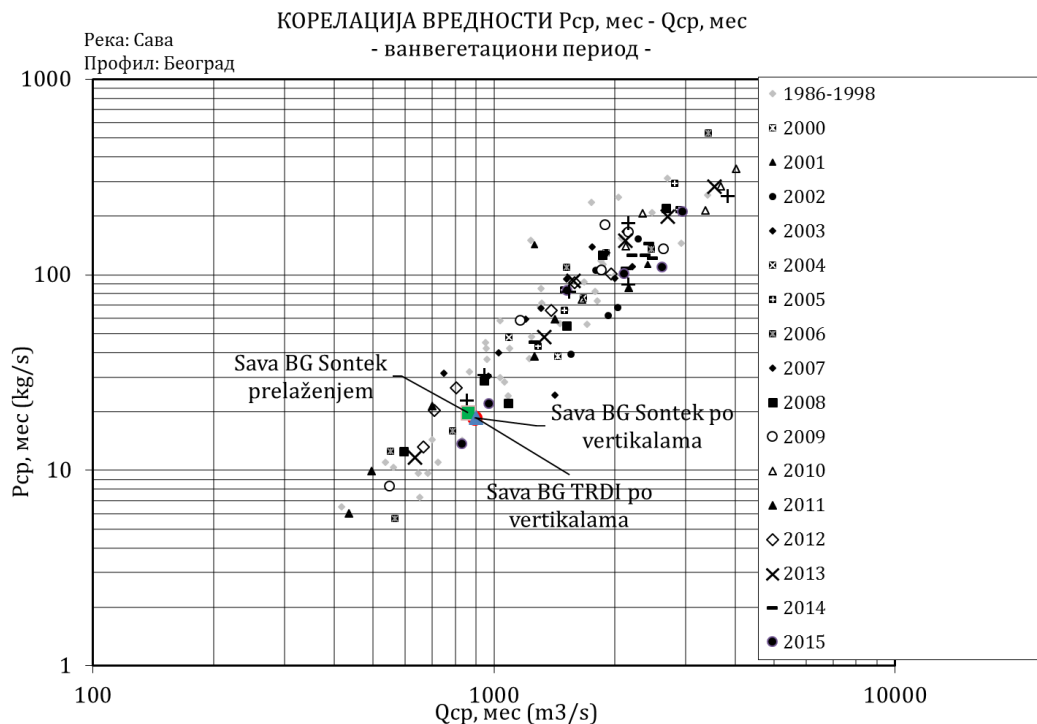
Figure 11. Cross section suspend sediment concentration [gr/L] measured by ADCP Sontek

Tabela 1. Rezultati merenja

Table 1. Measurement result

tip merenja i merno mesto			Sava BG Krila+lab. po vertikalama	Sava BG Sontek po vertikalama	Sava BG Sontek prelaženjem	Sava BG TRDI po vertikalama	Sava BG TRDI prelaženjem
Protok	Vode	Q	805.6	893	860	901.83	838
	Suspendovanog nanosa	P	16.35	18.54	19.7	18.60	/





Slika 12. Korelacija vrednosti pronosa suspendovanog nanosa i protoka vode na mernom profilu izmerenih ADCP uređajima

Figure 12. Correlation between suspended sediment load and water discharge measured by ADCPs in monitoring profile

## 4 Zaključak

Na osnovu malog broja rezultata može se zaključiti da ova metoda ima potencijal kako u pogledu brzine rada tako i u finansijskom smislu jer zahteva dosta manji broj uzoraka i pošto zahteva kraće vreme angažovanja moguće je prikupiti protoke suspendovanog nanosa i pri nekim od poplavnih talasa za koje nije moguće izmeriti standardnim metodom. Metodu bi trebalo verifikovati na većem broju merenja i možda dodati još neka poboljšanja kako bi se dobila veća poklapanja sa standardnom metodom.

## 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. Gruber P (2016) Acoustic measuring techniques for suspended sediment, 28th IAHR symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Grenoble-France
2. Angga Dwinovantyo (2017), Quantification and Analysis of Suspended Sediments Concentration Using Mobile and Static Acoustic Doppler Current Profiler Instruments, Advances in Acoustics and Vibration, Volume 2017, Article ID 4890421, 14 pages

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

3. Kent L. Deines (2017), Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, IEEE
- Jeffrey W. Gartner (2014), Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay California, *Marine Geology* 211:169–187
4. Water Survey of Canada, Water and Climate Services, Meteorological Service of Canada, Environment Canada and Government of Canada (2013), *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat*, Ottawa Ontario
5. David S. Mueller and Chad R. Wagner (2008), *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving-Boat*, Techniques and Methods Report 2008, Reston Virginia
6. Venditti J. G. (2015), *Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach*, Water Resources Research
7. Teledyne RDI (2018), *WINRIVER II SOFTWARE USER'S GUIDE*
8. SonTek a Xylem brand (2017), *RiverSurveyor S5/M9 - System Manual - Firmware Version 4.02 C*.
9. Sahin, R. Verney, A. Sheremet, and G. Voulgaris (2017), "Acoustic backscatter by suspended cohesive sediments: Field observations, Seine Estuary, France," *Continental Shelf Research*, vol. 134, pp. 39–51

## **Merenje protoka vode u tunelima pri kombinovanim uslovima tečenja: primer tunela Dabarsko Polje – Fatničko polje**

Damjan Ivetić<sup>1</sup>, Dušan Prodanović<sup>2</sup>, Mile Cvitkovic<sup>3</sup>

**APSTRAKT:** U opštem slučaju, metode za merenje protoka se mogu klasifikovati prema uslovima tečenja na mernom mestu, pa se tako određene metode koriste u sistemima pod pritiskom dok nešto drugačije u sistemima gde se javlja tečenje sa slobodnom površinom. U određenim slučajevima, na mernom mestu se može javiti i tečenje pod pritiskom i sa slobodnom površinom, odnosno tzv. kombinovani uslovi tečenja. U ovom radu analiziran je jedan upravo takav slučaj, derivacioni tunel između Dabarskog i Fatničkog Polja u okviru sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (HET). Glavne karakteristike ovog tunela, pored kombinovanih uslova tečenja, su i imponantne dimenzije, gde prečnik varira od 5,0 m do oko 5,6 m, kao i bidirekcionni raspon protoka od -40 do ~50 m<sup>3</sup>/s. Za potrebe merenja protoka projektovano je i izvedeno jedno merno mesto unutar tunela, neposredno uz izlazno/ulaznu građevinu u Fatničkom polju, opremljeno sa četiri ravne EM sonde, dva logera pritiska i dve kontrolne EM sonde „Ajkulino krilo“. Imajući u vidu karakteristike tunela kao i merne metode, neophodno je pažljivo uspostaviti korelaciju između izmerene brzine i srednje profilske, odnosno lokalno kalibrisati ravne EM senzore brzine. U radu je analizirana mogućnost lokalne kalibracije ravnih EM senzora brzine pomoću kontrolnih EM sonda „Ajkulino krilo“. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima „suve kalibracije“ sprovedene korišćenjem teorijskog rasporeda brzine i jednodimenzionalne težinske funkcije.

**Ključne reči:** merenje protoka, merenje brzine, elektro magnetni senzori, lokalna kalibracija, derivacioni tunel, kombinovani uslovi tečenja

## **Flow measurements in large conduits with combined flow conditions: case study Dabarsko polje – Fatničko polje tunnel**

**ABSTRACT:** In general, flow measuring methods can be classified according to the flow conditions at the measurement location, hence specific approaches are used for the pressurized flows while different for the free surface flows. In certain cases, both pressurized and free surface flow conditions can occur at the single measurement location, the so-called combined flow conditions. In this paper, flow measurements in the combined flow conditions are analysed through the case study of the derivational tunnel connecting Dabarsko Polje and Fatničko Polje, within the system “Hidroelektrane na Trebišnjici“ (HET). Besides the combined flow conditions, key features of this tunnel are large dimensions, diameter varying from 5,0 to 5,6 m, and the bidirectional flow range, from -40 to ~50 m<sup>3</sup>/s. For the flow measurements, single measurement location within the tunnel, near the inlet/outlet structure in Fatničko Polje, was equipped with four flat Electro Magnetic (EM) probes, two pressure transducers and two EM control probes “Shark fin”. Due to the specifics of both the tunnel and the measurement technique, it was necessary to carefully establish the correlation between the measured velocity and the mean flow velocity. This procedure is also known as the local calibration of the flat EM velocity probes. In this paper, a local calibration approach, based on the usage of the EM control probes „Shark fin“, is analyzed. Obtained results are compared with the data from the Dry calibration procedure, acquired through the usage of the theoretical velocity distribution and one-dimensional weighting function.

**Keywords:** flow measurements, velocity measurements, electro magnetic meters, local calibration, derivational tunnel, combined flow conditions

<sup>1</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Luka Stojadinović, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [st\\_luka@hotmail.com](mailto:st_luka@hotmail.com)

## 1 Uvod

Jedan od preduslova za efikasno upravljanje velikim hidrotehničkim sistemima je poznavanje protoka, odnosno kontrolisanje bilansa vode u okviru sistema. Imajući u vidu značaj podatka o protoku, kao i specifičnosti različitih tipova hidrotehničkih sistema, vremenom su se razvili brojni i raznovrsni pristupi, odnosno metode za merenje protoka tečnosti. Generalno, izbor optimalne metode za merenje protoka u okviru određenog hidrotehničkog sistema je povezan sa brojnim uslovima koji karakterišu određeni sistem. Iz navedenog spektra uslova, moguće je izdvojiti dominantne koje svakako treba uzeti u razmatranje pri izboru merne opreme (Godley, 2002): hidraulički uslovi, karakteristike fluida, fizičke karakteristike provodnika (cevovoda, kanala ili tunela) i karakteristike sredine.

Ukoliko se razmatraju hidraulički uslovi na planiranom mernom mestu (Prodanović i saradnici, 2011), na izbor adekvatne merne metode najviše utiče tip tečenja koji se javlja: tečenje sa slobodnom površinom, tečenje pod pritiskom ili kombinovani uslovi tečenja (kombinacija prethodna dva). U većini slučajeva, merni instrumenti su specijalizovani ili za sisteme pod pritiskom ili za otvorene tokove. U opštem slučaju, merenje protoka u otvorenim tokovima je kompleksniji i zahtevniji zadatak (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011), budući da je površina proticajnog preseka promenljiva i može da varira u veoma širokom spektru (npr kombinovani kanalizacioni sistemi, Harramoses i saradnici, 1993). Poseban slučaj, predstavljaju sistemi u kojima se javljaju kombinovani uslovi tečenja, gde je manevarski prostor pri izboru adekvatne merne metode dodatno sužen, usled pojave tečenja pod pritiskom.

Kombinovani uslovi tečenja se u praksi najčešće javljaju u atmosferskim ili kombinovanim kanalizacionim sistemima, a nešto ređe i u derivacionim tunelima hidroenergetskih sistema. Kako bi se obezbedili adekvatni mereni podaci o protoku, najčešće se u ovim slučajevima koristi pristup Brzina – Proticajni Presek (B-PP) (Campisano i saradnici, 2012). U okviru primene B-PP, podatak o protoku se dobija paralelnim merenjem dubine i brzine. Merenjem dubine, i korišćenjem stabilne  $A(h)$  relacije, dobija se podatak o površini proticajnog preseka. Sa druge strane, problemi se javljaju kada je potrebno izmerenu brzinu  $V_{mer}$ , korelisati sa srednjom profilskom brzinom  $V$ . U analizi neodređenosti (JCGM, 2008), ili greški, konačne procene protoka  $Q$ , dominantan uticaj ima upravo neodređenost srednje profilске brzine. Neodređenost podatka o srednjoj profilskoj brzini ima dvojaki karakter, zbog čega je za definisanje odgovarajuće korelacije  $V = K(V_{mer})$  potrebno poznavanje hidrauličkih uslova na mernom mestu kao i same merne tehnologije (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011).

U ovom radu je analiziran jedan od praktičnih primera merenja protoka metodom B-PP, u kombinovanim uslovima tečenja. Merenja su obavljena u okviru sistema Hidroelektrane na Trebišnjici (HET) na derivacionom tunelu koji povezuje Dabarsko i Fatničko Polje. Za merenje dubine, odnosno pritiska, korišćene su dve pjezorezistivne sonde, dok su za određivanje srednje profilске brzine instalirane 4 ravne EM sonde i 2 kontrolne EM sonde „Ajkulino krilo“. Fokus rada je na ispitivanju mogućnosti lokalne kalibracije 4 ravne EM sonde na zidu tunela, tj. definisanja adekvatne korekcionе funkcije  $K$  za određivanje srednje profilске brzine  $V$ . Postupak lokalne kalibracije je sproveden na dva načina: 1.) primenom tzv. „Suve“ kalibracije koji se zasniva na upotrebi teorijskog rasporeda brzine koji se može pretpostiviti u mernom profilu kao i jednodimenzionalne težinske funkcije i 2.) primenom redundantnog, kontrolnog, mernog sistema kao etalona tokom početnog perioda eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata, razmatrani su praktični aspekti primene predloženih procedura.

## 2 Metodologija

### 2.1 Merenje protoka metodom B-PP

Sistemi za merenje protoka metodom B-PP, zahtevaju paralelno merenje dubine  $h$  i brzine  $V_{mer}$ . Određivanje srednje profilске brzine  $V$ , samim tim i korekcionе funkcije  $K$ , je komplikovan zadatak

kojem treba pristupiti sa posebnom pažnjom (Bonakdari i Zinatizadeh, 2011). Konačan podatak o protoku  $Q$  se dobija množenjem površine proticajnog preseka  $A$ , sračunate pomoću izmerene dubine  $h$ , i srednje profilske brzine  $V$ :

$$Q = A(h) \cdot V = A(h) \cdot K \cdot V_{mer} \quad (1)$$

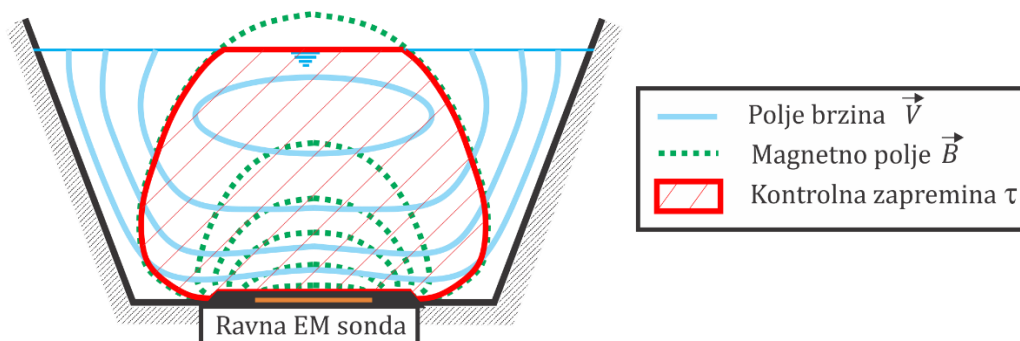
U okviru projektovanog i izvedenog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP, korišćene su 4 ravne EM sonde (Cvitkovic i saradnici, 2010; Ivetić i saradnici, 2018) i dve kontrolne EM sonde „Ajkulino krilo“, za merenje brzine. Budući da se EM sonde koriste ređe u praksi, u nastavku su predstavljene osnove principa rada ovih uređaja. Nakon toga, prikazane su i osnovne karakteristike korišćenih uređaja, domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“.

### 2.1.1 Teorijske osnove principa rada EM sonde

Princip rada EM senzora brzine (ili protoka) se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije, prema kojem kretanje provodne tečnosti kroz upravno magnetno polje, indukuje razliku potencijala na elektrodama uređaja odnosno pojavu elektromotorne sile  $E$ . Opšta osetljivost EM senzora je opisana vektorskim proizvodom brzine tečenja  $\vec{V}$  i jačine magnetnog polja  $\vec{B}$  u određenoj tački (Bevir, 1970). Slično, koristeći konceptualne analize električnih mreža, predložena je relacija kojom se opisuje kako svaki deo toka doprinosi izlaznom naponu  $E$ , koristeći tzv. težinsku funkciju  $w$  (Shercliff, 1962), odnosno u rigoroznijoj formi težinski vektor  $\vec{W}$  (Bevir, 1970):

$$E = \int_{\tau} (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} d\tau = \int_{\tau} \vec{W} \cdot \vec{V} d\tau \sim \int_{\tau} w \cdot \vec{V} d\tau \quad (2)$$

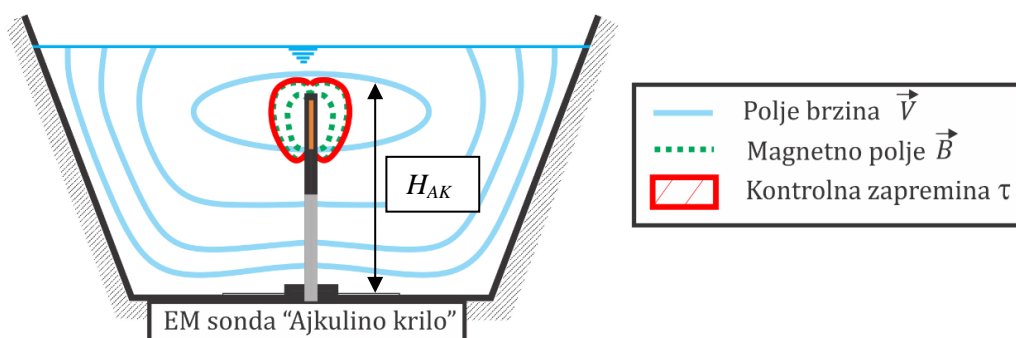
gde vektorski proizvod  $\vec{B} \times \vec{j}$  definiše Bevirovu težinsku funkciju  $\vec{W}$ ,  $\tau$  je kontrolna zapremina EM senzora (zapremina toka koja doprinosi generisanju izlaznog napona  $E$ ) i  $\vec{j}$  je zapreminska gustina virtualne struje (gustina struje koja bi se javila u slučaju protoka jedinične struje između dve elektrode EM senzora). Za praktične potrebe, umesto težinskog vektora  $\vec{W}$  koristi se jednostavna jednodimenzionalna (Ivetić i saradnici, 2017) ili dvodimenzionalna težinska funkcija  $w$  (Shercliff, 1962). Za razliku od konvencionalnih EM senzora protoka, kakvi se standardno koriste u sistemima pod pritiskom, EM senzori brzine su polu-integrativni uređaji (Steinbock i saradnici, 2016), čija kontrolna zapremina  $\tau$  najčešće obuhvata samo deo proticajnog profila (Slika 1). Zahvaljujući „fizički baziranom“ mernom sistemu, EM senzori mogu da mere od jako malih brzina vode (Prodanović, 2006) od par mm/s do brzina od preko 10 m/s.



Slika 1. Shematizovan prikaz principa rada Ravnih EM senzora, proizvođača „Svet instrumenata“

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

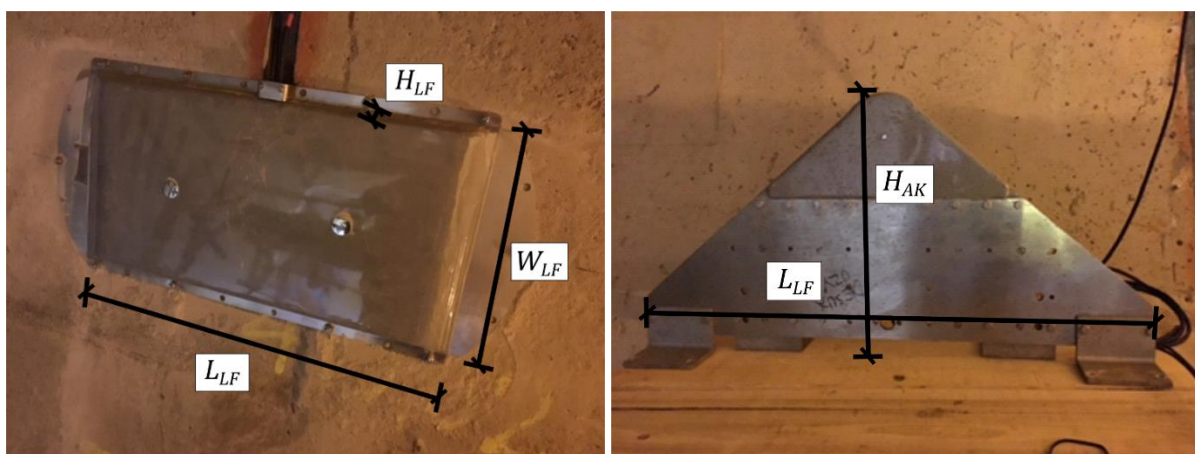


Slika 2. Shematizovan prikaz principa rada EM senzora „Ajkulino krilo“, proizvođača „Svet instrumenata“

### 2.1.2 Ravne EM sonde i EM sonde „Ajkulino krilo“

Tokom 20. veka predloženi su različiti koncepti EM sondi za merenje brzine ili protoka u otvorenim tokovima (Gils, 1970, Michalski, 2002). Primena ravnih (spljoštenih) kalemova je prvobitno razmatrana iz čisto ekonomskih, odnosno praktičnih razloga (Hersch, 1978). Oba korišćena tipa EM senzora: velike ravne EM sonde DC-2, kao i EM sonde „Ajkulino krilo“ domaćeg proizvođača „Svet instrumenata“, upravo koriste pobudne kaleme ravnog oblika. Takođe, oba tipa senzora se koriste za merenje podužne komponente brzine, s tim što je kontrolna zapremina ravnih senzora veća u odnosu na kontrolnu zapreminu „Ajkulinog krila“ (Slika 1 i Slika 2).

Konstrukcija senzora je takva da omogućava minimalno remećenje fluidne struje. Velike ravne EM sonde su dimenzija  $L_{LF} = 800$  mm,  $W_{LF} = 380$  mm i  $H_{LF} = 25$  mm (Slika 3 Levo.), dok su dimenzije sonde „Ajkulino krilo“  $L_{AK} = 700$  mm,  $W_{AK} = 15$  mm i  $H_{AK} = 300$  mm (Slika 3 Desno.). Proizvođač navodi da je tačnost senzora  $\pm 1\%$ , ponovljivost 1 mm/s, a operativni opseg bidirekcionog karaktera  $\pm 15$  m/s. Fabrička kalibracija EM sondi se sprovodi u kanalu sa vučenim kolicima. Indukovani napon  $E$  pokazuje linearnu vezu sa srednjom profilskom brzinom  $V$ . Korišćene EM sonde imaju pulsnu bipolarnu pobudu sa dvojnoum frekvencijom, gde je glavna frekvencija komutacije 12.5 Hz. Ovaj tip pobude omogućava dobru stabilnost nule kao i minimizaciju pojave šuma (Kuromori i saradnici, 1994). Visoka unutrašnja otpornost uređaja, reda veličine oko 20 M $\Omega$ , omogućava minimizaciju uticaja varijacije elektroprovodnosti vode na merenja brzine. Očekuje se da će u ekstremnim slučajevima, unutrašnja otpornost uređaja biti barem 1000 puta veća od otpornosti vode. Takođe treba napomenuti da su jednodimenzionalne težinske funkcije  $w$  korišćenih uređaja poznate, čime se omogućava postupak tzv. „suve“ kalibracije.



Slika 3. Dimenzije EM sondi: Velika ravna EM sonda DC-2 (Levo), EM sonda „Ajkulino krilo“ (Desno)

## 2.2 Lokalna kalibracija EM senzora

Imajući u vidu princip rada korišćenih EM senzora, odnosno koncept nelinearne integracije polja brzina unutar kontrolne zapremine senzora  $\tau$ , može se zaključiti da su EM senzori osetljivi na promene rasporeda brzina. Budući da se fabrička kalibracija senzora obavlja u kanalu sa vučenim kolicima gde se pretpostavlja da je raspored brzina uniforman, jasno je da se u realnim uslovima retko mogu sresti slični uslovi, zbog čega se javlja potreba za lokalnom (re)kalibracijom EM senzora. Takođe, pokazano je da (Ivetić i saradnici, 2018) i sami geometrijski uslovi mogu uticati na veličinu efektivne kontrolne zapremine (koja efektivno doprinosi izlaznom signalu) i konačno na izlazni signal.

Pod pojmom lokalne kalibracije senzora, smatra se adaptacija postojeće kalibracione krive EM senzora ili izvođenje nove odnosno dodatne, kako bi se kompenzovali sistematski uticaji hidrauličkih i geometrijskih uslova na mernom mestu, na sam izlazni signal EM senzora. U slučaju kada se EM senzori koriste za merenje protoka  $Q$  u okviru primene metode B-PP, od interesa je kalibrisati senzore tako da se obezbedi pouzdano merenje srednje profilske brzine  $V$ . Praktično, postupak lokalne kalibracije se svodi na definisanje nepoznate korekcionne funkcije  $K$ , kojom se koreliše izmerena brzina  $V_{mer}$  sa srednjom profilskom brzinom  $V$  prema hidrauličkim i geometrijskim uslovima na samom mernom mestu. Oblik same korekcionne funkcije  $K$  zavisi od merne tehnologije, principa rada samog uređaja i naravno prirode sistematskog uticaja na izlazni signal uređaja, gde u slučaju jednostavnih geometrijskih uticaja na ravne EM senzore, ove funkcije mogu biti linearne (Ivetić i saradnici, 2018), dok su u ostalim slučajevima uglavnom nelinearne.

### 2.2.1 „Suva“ kalibracija

Kalibracija mernog instrumenta koja ne uključuje poređenje rezultata merenja ispitivanog uređaja, sa rezultatima merenja iste veličine pomoću drugog etalonskog mernog instrumenta se naziva „Suva“ kalibracija. U analizi EM senzora protoka, prvenstveno popularnijih konvencionalnih EM senzora namenjenih primeni u sistemima pod pritiskom, postupak „Suve“ kalibracije je razmatran od 80tih godina 20. veka (Bevir i saradnici, 1981, Al Rabeih i Baker, 1986, Luntta i Halttunen, 1989). Za potrebe „Suve“ kalibracije, neophodno je poznavati težinsku funkciju senzora  $w$  (jednačina 2) kao i raspored podužne komponente brzine unutar kontrolne zapremine uređaja, za različite vrednosti protoka. Najčešće se raspored brzina procenjuje analitičkim ili empirijskim obrazcima (Al Rabeih i Baker, 1986, Luntta i Halttunen, 1989) dok se u slučajevima kada ovi obrasci nisu primenjivi, mogu koristiti numeričke simulacije prostornog turbulentnog tečenja (Steinbock i saradnici, 2016, Jaroslav Černi, Građevinski fakultet, Svet instrumenata, 2017). Integracijom proizvoda ove dve veličine ( $j$ -na 2), dobija se procenjeni izlazni signal za ispitani opseg protoka, koji se uz pomoć odgovarajuće korekcionne funkcije  $K$  koreliše sa željenim vrednostima merene veličine. Procenjuje se da je primenom „Suve“ kalibracije moguće obezbediti tačnost konvencionalnog EM senzora protoka od približno 1%.

Sa druge strane, primena postupka „Suve“ kalibracije nije prijavljena za ravne ili slične polu-integrativne EM senzore, namenjene primeni u otvorenim tokovima nije do sada razmatrana u naučnim i stručnim radovima. Michalski i saradnici (2001) su razmatrali „Suvu“ kalibraciju za potpuno integrativan EM senzor za otvorene kanale, međutim ovaj tip uređaja se retko koristi zbog značajne potrošnje energije. Koncept procedure za „Suvu“ kalibraciju ravnih EM senzora, predstavljen u ovom radu se oslanja na postupak korišćen i za konvencionalne EM senzore protoka.

Težinske funkcije  $w$  kako velikih ravnih EM senzora, tako i EM senzora „Ajkulino krilo“ su poznate i definisane od strane proizvođača „Svet instrumenata“ (Ivetić i saradnici, 2017). Za procenu rasporeda brzina u kombinovanim uslovima tečenja, neophodno je uzeti u razmatranje nekoliko faktora. Prvenstveno, neophodno je identifikovati deo proticajnog preseka koji je od interesa, odnosno u kojem se nalaze kontrolne zapremine ispitivanih EM senzora. Nakon toga, treba razmotriti uticaj geometrijskih karakteristika provodnika na raspored brzina u ciljnom delu proticajnog preseka. Konačno, imajući u vidu prethodna dva faktora potrebno je odlučiti se za pristup u procenjuvanju rasporeda brzina: 1.) primena analitičkih i/ili empirijskih obrazaca 2.) primena numeričkih simulacija

prostornog turbulentnog tečenja. Budući da je drugi pristup prethodno analiziran (Ivetić i saradnici, 2017) u ovom radu se razmatra prvi pristup.

Deo proticajnog preseka tunela u kojem je potrebno proceniti raspored brzina je ograničen na region uz čvrstu konturu, konkretno na 40 cm od zidova, budući da se u tom regionu nalaze kontrolne zapremine velikih ravnih EM senzora i EM senzora „Ajkulino krilo“. U analizama kombinovanih uslova tečenja, treba imati na umu da se drugačiji obrasci koriste za opisivanje rasporeda brzina u slučaju tečenja pod pritiskom i tečenja sa slobodnom površinom. Međutim, u većini vremena rada mernog sistema, analiziranog u ovom radu, javlja se tečenje pod pritiskom, zbog čega je raspored brzina modeliran uz pomoć tzv. Stepenog zakona za kružni provodnik (Pope, 2008):

$$V_x(y) = V \left( \frac{2y}{D} \right)^{1/n} \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \quad (3)$$

gde je  $V_x(y)$  podužna komponenta brzine,  $y$  odstojanje od zida a  $D$  prečnik provodnika. Za procenu vrednosti eksponenta  $n$ , ispitana su dva obrazca (Nikuradze, 1932; Pope, 2008):

$$n_1 = 0.5261(\log Re)^2 - 3.853 \log Re + 13.1537 \quad (4)$$

$$n_2 = 1 + \sqrt[6]{\frac{Re}{60}} \quad (5)$$

Integracijom proizvoda rasporeda brzina i težinske funkcije  $w$  ravnog EM senzora dobija se procenjena izmerena vrednost brzine  $V_{mer}^s$ . Slično, za EM senzore „Ajkulino krilo“, se može dobiti  $V_{kont,mer}^s$ . Odnos srednje profilske brzine  $V$  i sračunate vrednosti definiše vrednost korekcionne funkcije  $K^s$ , odnosno  $K_{kont}^s$ , dobijenih postupkom „Suve“ kalibracije.

### 2.2.2 Kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema

Iako „Suva“ kalibracija poseduje određene prednosti, prvenstveno u vidu manjeg utroška resursa i vremena, u većini slučajeva merni instrumenti se kalibrišu poređenjem sa etalonskom mernom opremom. Pod etalonskim uređajem se smatra instrument koji je za red veličine tačniji (pouzdaniji) od instrumenta koji se kalibriše i obično je potpuno nezavistan od ispitivanog uređaja. Etalonskim uređajima, se obezbeđuje pouzdanija procena željene veličine sa kojom se u postupku kalibracije koreliše izlazni signal ispitivanog uređaja. Generalno, standardnom kalibracijom se obezbeđuje veća tačnost i pouzdanost kalibrisanog instrumenta nego u slučaju „Suve“ kalibracije.

Kalibracija merne opreme se tradicionalno sprovodi u kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Međutim, u ovom radu je analizirana lokalna kalibracija koja se sprovodi na samom mernom mestu, a kojom se minimiziraju sistematski uticaji lokalnih hidrauličkih i geometrijskih karakteristika u radnom opsegu instalirane merne opreme. U određenim slučajevima lokalne kalibracije, kao što je primer derivacionog tunela DP-FP, specifičnosti geometrijskih i hidrauličkih uslova otežavaju sprovođenje etalonskog merenja željene veličine – budući da je teško obezbediti etalonski uređaj koji može u radnom opsegu i nepovoljnim uslovima, održati željeni nivo tačnosti. Zbog toga, u ovom radu je ispitana mogućnost upotrebe kontrolnog mernog sistema, koji može da obezbedi tačnije merenje željene veličine, međutim nije nezavistan budući da se zasniva na istom mernom pristupu.

Lokalna kalibracija, analizirana u ovom radu je sprovedena za velike ravne EM sonde, pomoću kontrolnih EM senzora „Ajkulino krilo“. Praktično u okviru postupka lokalne kalibracije pomoću kontrolnih EM senzora, korelišu se merenja pomoću ravnih EM senzora i merenja pomoću „Ajkulino krila“. Međutim, treba imati na umu da lokalni hidraulički i geometrijski uslovi utiču na merenja oba uređaja. Samim tim za određivanje srednje profilske brzine  $V$ , kao željene veličine, potrebno je poznavanje odgovarajućih korekcionnih funkcija:



$$V = K \cdot V_{mer} = K_{kont} \cdot V_{kont,mer} \quad (6)$$

gde je  $K_{kont}$  korekciona funkcija za EM senzor „Ajkulino krilo“. Imajući u vidu da se u periodu rada oba uređaja na mernom mestu dobijaju izmerene vrednosti brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , odnos ove dve veličine će definsati odnos korekcionih funkcija:

$$\frac{K}{K_{kont}} = \frac{V_{kont,mer}}{V_{mer}} \quad (7)$$

Dobijeni odnos korekcionih funkcija je osrednjen na časovnom nivou, kako bi se eliminisao uticaj fluktuacija, i poređen sa ekvivalentom dobijenim u postupku „Suve“ kalibracije  $K^S/K_{kont}^S$ .

### 2.3 Merenje protoka na derivacionom tunelu DP-FP

Za potrebe bilansiranja vode u okviru sistema HET, posebno hidroenergetskog sistema koji čine Dabarsko i Fatničko Polje (DP i FP), kao i Bilećka akumulacija (BA), projektovana su i izvedena tri zasebna sistema za merenje protoka, od toga jedan u okviru derivacionog tunela DP – FP i dva u tunelu FP – BA. Svi instalirani sistemi za merenje protoka se zasnivaju na primeni B-PP metode. Analizama predstavljenim u ovom članku je obuhvaćen merni sistem u tunelu DP – FP. Poseban fokus je stavljen na merenja obavljena pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema u periodu od 3.2.-22.4.2018.



Slika 4. Merni sistemi u okviru derivacionog tunela Dabarsko polje – Fatničko polje: Izlazno/Ulazna građevina u Fatničkom Polju (Levo); Veliki ravni EM senzor u okviru osnovnog mernog sistema (Desno, gore); EM senzor „Ajkulino krilo“ u okviru kontrolnog mernog sistema (Desno, dole)

Derivacioni tunel koji spaja Dabarsko i Fatničko polje je deo velikog sistema HET u Republici Srpskoj, BiH. Tunel je pušten u rad 1986. sa osnovnim ciljem da omogući evakuaciju vode iz Dabarskog Polja u Fatničko i dalje ka Bilećkoj akumulaciji u periodima velikih voda. Dužina tunela iznosi oko 3250 m, dok se u samom tunelu smenjuju naizmenično obloženi i neobloženi delovi.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

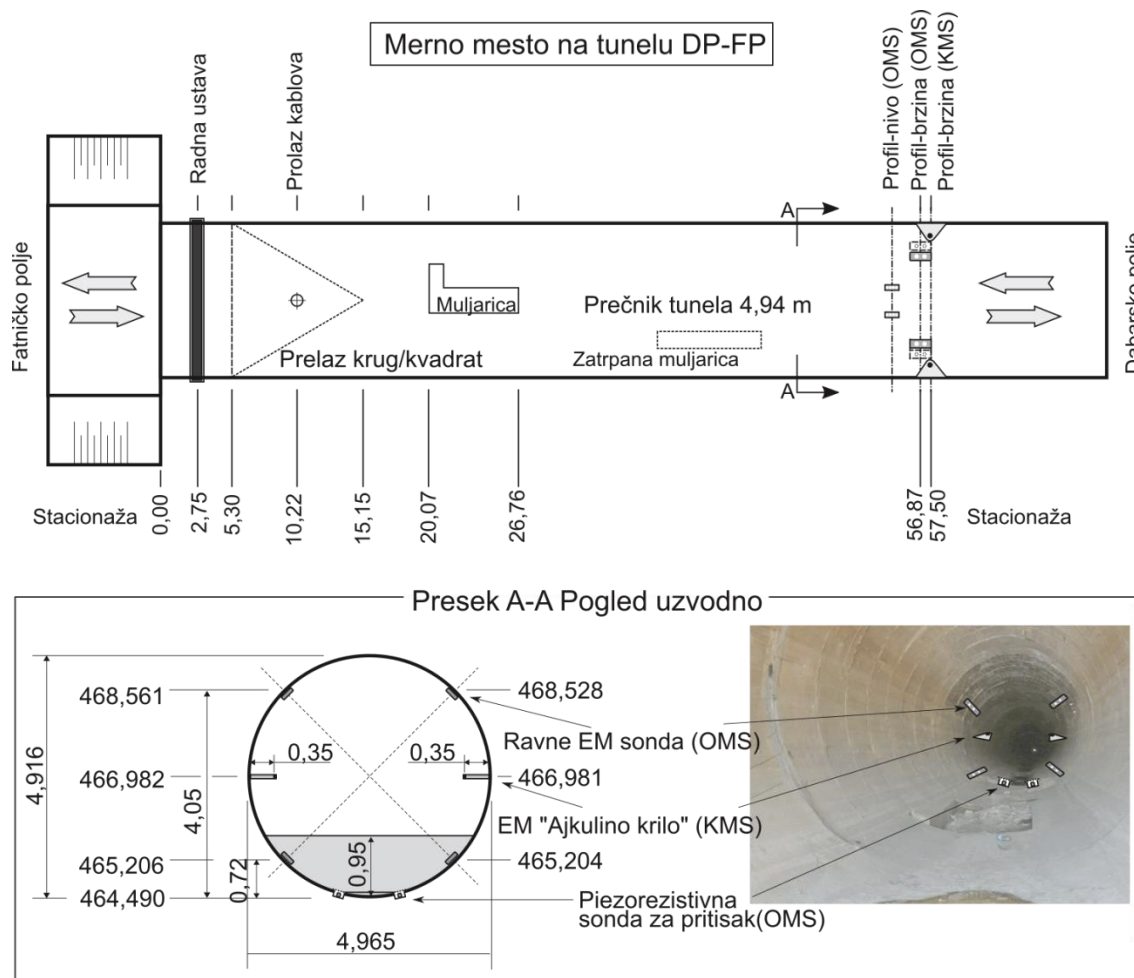
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Prečnik obloženih delova tunela iznosi 5.0 m, dok je prečnik neobloženih delova oko 5.6 m. Prosečan pad u tunelu iznosi oko 1 ‰. U periodu velikih voda, dolazi do akumulacije vode u Dabarskom i Fatničkom polju. U većini slučajeva potencijalna energija vode u Dabarskom polju je veća od u odnosu na Fatničko polje, pa voda teče u pravcu Fatničkog polja odakle se dalje evakuise ka Bilećkoj akumulaciji. Međutim u pojedinim situacijama, što će biti prikazano kasnije, situacija je obrnuta pa se javlja tečenje u suprotnom smeru, odnosno ka Dabarskom polju. Imajući u vidu visinsku razliku dva polja, tečenje sa slobodnom površinom odnosno kombinovani uslovi tečenja, se mogu javiti isključivo u slučaju tečenja ka Fatničkom polju dok se u obrnutom smeru javlja tečenje pod pritiskom.

U nastavku su ukratko opisani instalirani osnovni, odnosno permanentni, sistem kao i kontrolni sistem za merenje protoka koji je iskorišćen za lokalnu kalibraciju. Osnovni zadatak ovog rada je upravo analiza mogućnosti lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema, primenom postupka „Suve kalibracije“ i korišćenjem merenih rezultata za osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

### 2.3.1 Osnovni sistem za merenje protoka

Osnovni sistem za merenje protoka, zapravo predstavlja permanentni sistem koji će obavljati funkciju merenja protoka u derivacionom tunelu DP-FP tokom perioda eksploatacije. U okviru osnovnog sistema za merenje protoka instalirane su 4 velike ravne EM sonde i dve pijezezistivne sonde za pritisak, prema Slici 5 na udaljenosti od 57 m od izlazne građevine u Fatničkom polju, kao i propratne napojne i logerske jedinice.



Slika 5. Shematski prikaz osnovnog (OMS) i kontrolnog (KMS) sistema za merenje protoka u derivacionom tunelu DP-FP: pogled odozgo (Gore), presek i pogled uzvodno (Dole).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U okviru samog osnovnog sistema za merenje protoka, senzori su grupisani u odgovarajuće podsisteme (Slika 5.). Dva ravna senzora sa leve strane tunela čine podsistem za merenje brzine  $V_A$ , dok dva senzora sa desne strane tunela čine podsistem koji meri brzinu  $V_B$ . Same brzine  $V_A$  i  $V_B$ , se dobijaju osrednjavanjem pojedinačnih doprinosa odgovarajućih ravnih EM senzora:

$$V_A = \frac{V'_A + V''_A}{2}; V_B = \frac{V'_B + V''_B}{2} \quad (8)$$

gde su  $V'_A$  i  $V''_A$ ,  $V'_B$  i  $V''_B$  odgovarajuće izmerene brzine pomoću pojedinačnih ravnih EM senzora u okviru podsistema A i B respektivno. Senzori pritiska su takođe odvojeni, gde jedan senzor meri pritisak odnosno dubinu  $h_A$  dok se preko drugog dobija dubina  $h_B$ . Do izmerene brzine  $V_{mer}$ , koju je dalje potrebno korelisati sa srednjom profilskom brzinom, se dolazi dodatnim osrednjavanjem, brzina  $V_A$  i  $V_B$ . Slično se dolazi i do izmerene dubine  $h_{mer}$ , na osnovu osrednjavanja dubina  $h_A$  i  $h_B$ :

$$V_{mer} = \frac{V_A + V_B}{2}; h_{mer} = \frac{h_A + h_B}{2} \quad (9)$$

Treba imati u vidu da su za analizu izmerenih podataka na raspolaganju podaci sa odgovarajućih podsistema,  $V_A$  i  $V_B$ , odnosno  $h_A$  i  $h_B$  a ne i sa svakog pojedinog senzora. Konačno na osnovu izmerenih signala  $V_{mer}$  i  $h_{mer}$  se dolazi do protoka koristeći relaciju (1). Odgovarajuće korekzione funkcije za određivanje srednje profilske brzine pomoću ravnih EM senzora osnovnog mernog sistema, su  $K$  i  $K^S$  (za slučaj „Suve“ kalibracije).

## 2.3.2 Kontrolni sistem za merenje protoka

U početnom periodu eksploatacije instalirane merne opreme, merenja srednje profilske brzine  $V$ , odnosno protoka  $Q$ , su se obavljala pomoću dva sistema: osnovnog i kontrolnog. Dok je osnovni merni sistem permanentan, kontrolni sistem za merenje protoka je namenjen samo za privremenu upotrebu odnosno kalibraciju osnovnog sistema. Kontrolni sistem na derivacionom tunelu DP – FP su činile dve EM sonde „Ajkulino krilo“ instalirane na zidovima tunela, na polovini visine tunela.

Naime, pomoću kontrolnog sistema za merenje protoka dobijaju se dodatne informacije o rasporedu brzina na mernom mestu, budući da sama konstrukcija EM sonde „Ajkulino krilo“ omogućava merenje brzine na većoj udaljenosti od zidova tunela. Pored toga, treba imati u vidu da je kontrolna zapremina EM sonde „Ajkulino krilo“ dosta manja nego kod ravnih EM sondi. Budući da je u poređenju sa dimenzijama poprečnog preseka tunela, kontrolna zapremina zanemarljivo mala, može se smatrati da se ovim uređajima dobijaju približno tačkasta merenja brzine. Konkretno za slučaj derivacionog tunela, brzina dobijena pomoću EM sonde „Ajkulino krilo“ koja je postavljena na levi bok tunela je označena sa  $V_{kont,A}$ , dok je  $V_{kont,B}$  brzina izmerena sa sondom na suprotnoj strani tunela (Slika 4). Osrednjavanjem signala sa oba „Ajkulina krila“ dobija se:

$$V_{kont,mer} = \frac{V_{kont,A} + V_{kont,B}}{2} \quad (10)$$

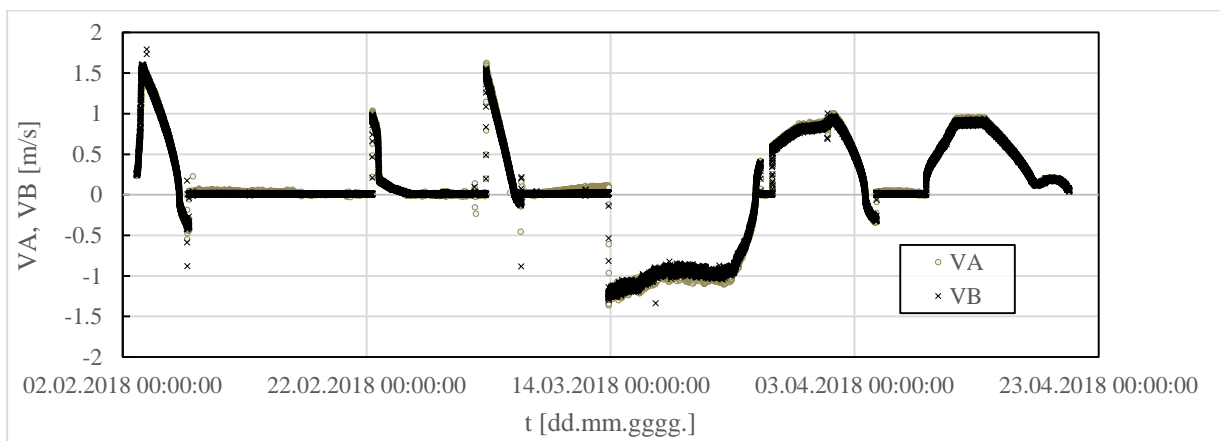
gde je  $V_{kont,mer}$  izmerena brzina pomoću kontrolnog sistema za merenje. Odgovarajuće korekzione funkcije za određivanje srednje profilske brzine pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“ kontrolnog mernog sistema, su  $K_{kont}$  i  $K_{kont}^S$  (za slučaj „Suve“ kalibracije). Treba napomenuti da usled konstrukcije „Ajkulino krila“ i mogućnosti merenja dublje u jezgru toka, očekivane su manje vrednosti i manje varijacije korekcionih funkcija u odnosu na ravne EM senzore.

### 3 Rezultati i diskusija

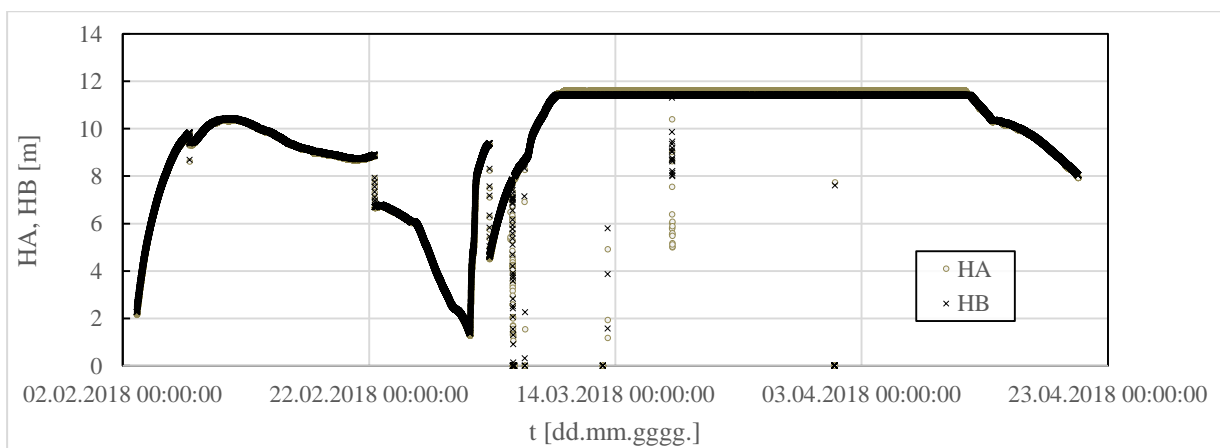
#### 3.1 Analiza izmerenih podataka

Analiza izmerenih podataka, predstavlja u ovom radu, obuhvata period od 3.2.2018 do 22.4.2018. Tipično u ovom periodu dolazi do akumulacije vode u Dabarskom i Fatničkom polju, usled otapanja snečnog pokrivača i pojave prolećnih kiša. Samim tim, usled razlike visinskih kota i nivoa u akumulacijama, dolazi do pojave protoka u derivacionim tunnelima u okviru sistema HET. Za ovaj rad je bidirekciono tečenje koje se javlja u tunelu DP-FP.

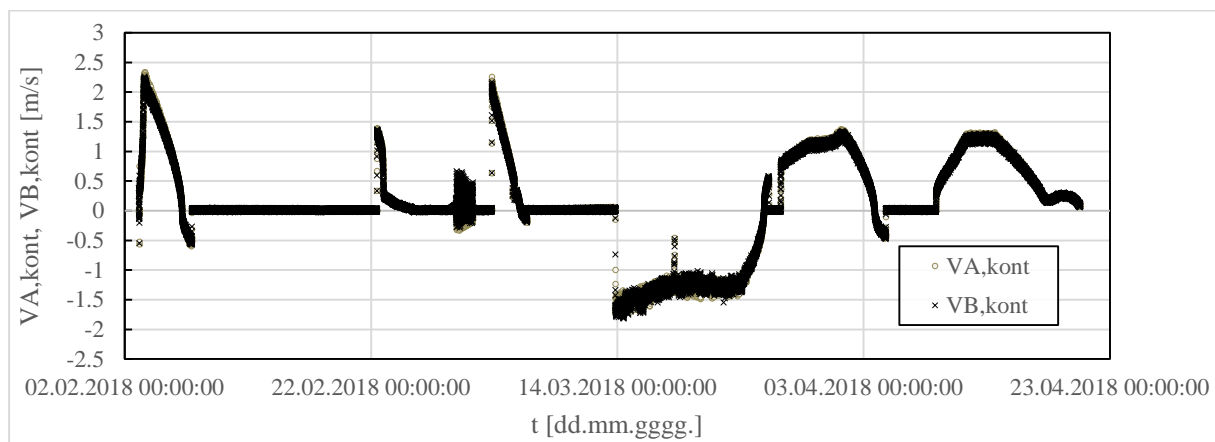
U periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018., osnovni i kontrolni merni sistem (poglavlja 2.3.1 i 2.3.2 respektivno) su kontinualno beležili podatke o brzinama ( $V_A$  i  $V_B$  - osnovni merni sistem,  $V_{kont,A}$  i  $V_{kont,B}$  - kontrolni merni sistem) i dubinama ( $h_A$  i  $h_B$  - osnovni merni sistem) sa vremenskim intervalom od  $\Delta t = 2$  min. Izmerene brzine  $V_A$  i  $V_B$ , kao i dubine  $h_A$  i  $h_B$  sa osnovnog mernog sistema, za razmatrani period su prikazane na Slici 6 i 7, respektivno. Treba napomenuti da je radni opseg pijerezistivnih senzora do približno 12 m vodenog stuba, što znači da su sve dubine, odnosno visine pritiska veće od 12 m zabeležene sa ovom vrednošću. Brzine izmerene pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,A}$  i  $V_{kont,B}$  su prikazane na Slici 8.



Slika 6. Brzine izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem velikih ravnih EM senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.



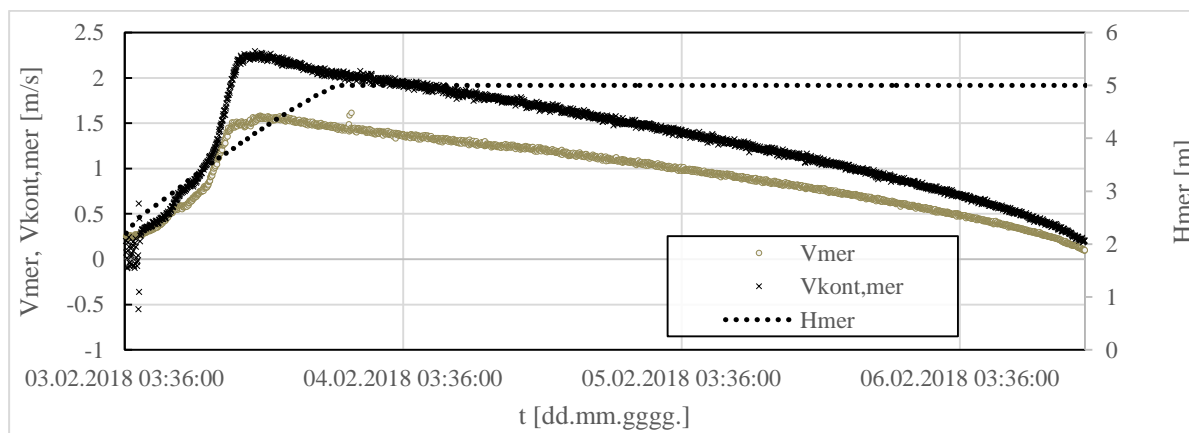
Slika 7. Dubine (visine pritiska) izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem pijerezistivnih senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.



Slika 8. Brzine izmerene u periodu od 3.2.2018 do 22.4.2018 korišćenjem EM senzora u okviru osnovnog mernog sistema na derivacionom tunelu DP-FP.

Na prikazanim dijagramima se može uočiti da je u razmatranom periodu zabeleženo pet događaja u kojima je tečenje bilo u smeru ka Fatničkom Polju i jedan u suprotnom smeru, ka Dabarskom polju. Imajući u vidu da se radi o velikoj količini podataka, radi preglednosti, izdvojena su tri karakteristična događaja koja će biti posebno analizirana za potrebe lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema:

- 1. Period 3.2.2018 – 6.2.2018 (Prvi događaj):** u ovom kratkom periodu, merni sistemi su zabeležili značajnu evakuaciju vode iz Dabarskog polja u Fatničko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je u njemu zabeležena maksimalna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je dostignuta u periodu od 10 h od početka tečenja, gde je nakon toga u prostalom vremenu polako opadala. Pored toga u ovom periodu je zabeležena pojava kombinovanih uslova tečenja. Na osnovu izmerenih podataka o brzini  $V_A$  i  $V_B$ , odnosno dubini  $h_A$  i  $h_B$  sračunata je izlazna brzina sa osnovnog mernog sistema  $V_{mer}$  odnosno dubina  $h_{mer}$  (j-na 9). Po sličnom postupku, koristeći  $V_{kont,A}$  i  $V_{kont,B}$ , sračunata je izlazna brzina sa kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}$  (j-na 10). Izlazni signali  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$  za prvi događaj su prikazani na Slici 9. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.

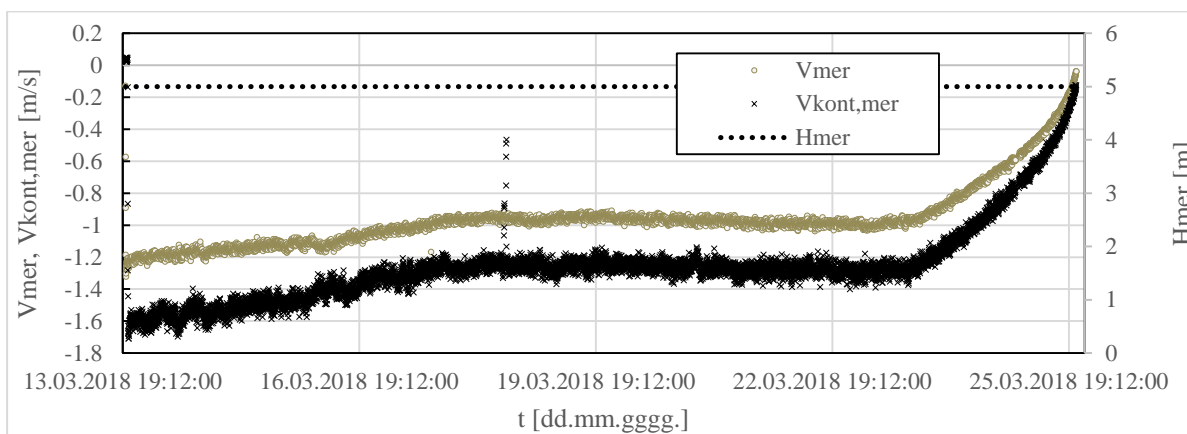


Slika 9. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

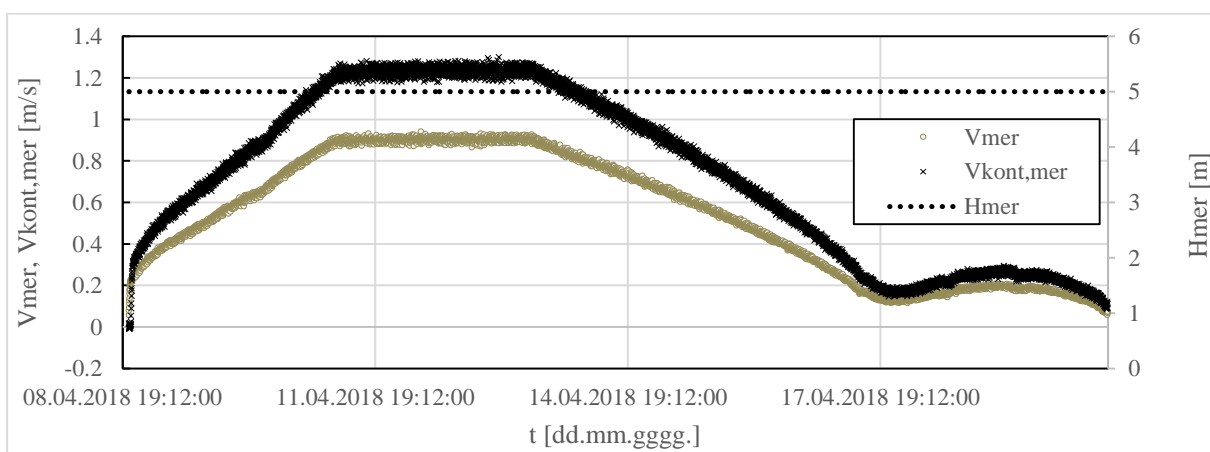
Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

2. **Period 13.3.2018 – 25.3.2018 (Drugi događaj):** u ovom periodu, merni sistemi su zabeležili značajnu evakuaciju vode iz Fatničkog polja u Dabarsko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je tokom njega najveća količina vode protekla u „kontra-smeru“. Takođe, zabeležena je maksimalna negativna brzina za razmatrani merni period. Maksimalna brzina je zabeležena na samom početku, gde je nakon toga u prostalom vremenu polako opadala. Slično kao i za prvi događaj sračunate su izlazne vrednosti  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , koje su prikazane na Slici 10. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.



Slika 10. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom drugog događaja u periodu od 8.4.2018 do 20.4.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

3. **Period 8.4.2018 – 20.4.2018 (Treći događaj):** u ovom periodu, merni sistemi su zabeležili evakuaciju vode iz Dabarskog polja u Fatničko polje. Ovaj događaj je karakterističan po tome što je najdužeg trajanja sa pozitivnim smerom tečenja. Generalno u ovom periodu, promene brzine su bile relativno blage. Slično kao i za prethodne događaje sračunate su izlazne vrednosti  $V_{mer}$ ,  $h_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , koje su prikazane na Slici 11. Radi preglednosti  $h_{mer}$  je ograničeno na 5 m što odgovara visini tunela.



Slika 11. Brzine  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , i dubina  $h_{mer}$  zabeleženi tokom prvog događaja u periodu od 3.2.2018 do 6.2.2018 korišćenjem osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

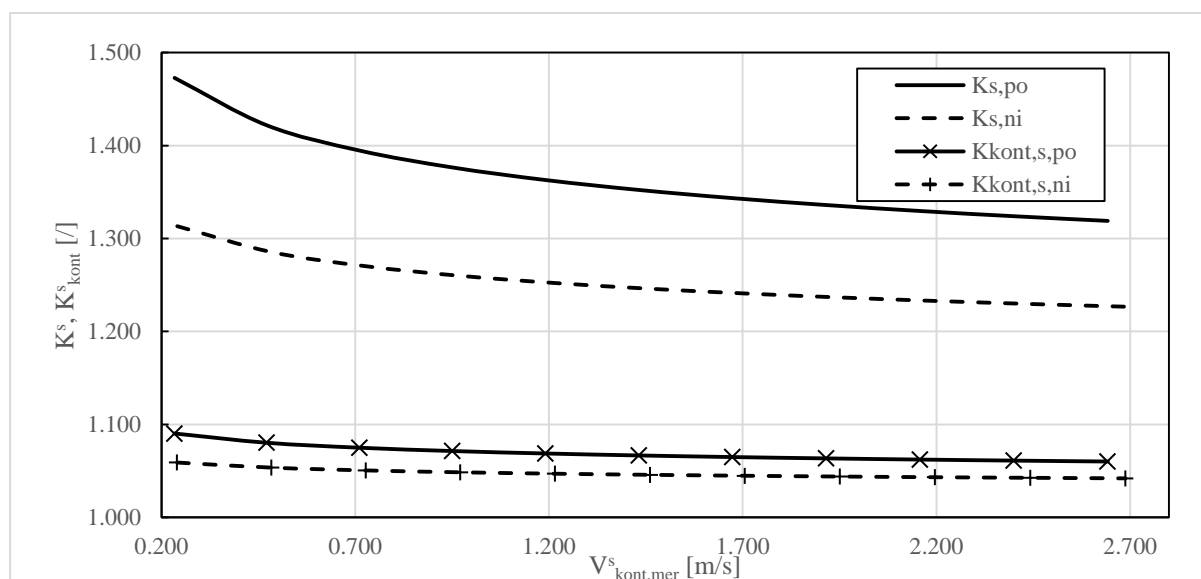
### 3.2 Lokalna kalibracija osnovnog sistema za merenje protoka

Analizirane su dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju velikih ravnih EM senzora: 1.) koristeći tzv. „Suvu“ kalibraciju i 2.) upotrebom kontrolnog mernog sistema. Dok se postupkom „Suve“ kalibracije omogućava definisanje korekcionih funkcija (neophodnih za procenu  $V$ ), kako za osnovni  $K^S$  tako i za kontrolni merni sistem  $K_{kont}^S$ , primenog drugog pristupa jedino je moguće odrediti odnos odgovarajućih korekcionih funkcija  $K/K_{kont}$ . Poređenje između dva analizirana pristupa je upravo izvršeno preko odnosa odgovarajućih korekcionih funkcija  $K^S/K_{kont}^S$  i  $K/K_{kont}$ .

#### 3.2.1 „Suva“ kalibracija

U okviru ovog kalibracionog postupka, neophodno je bilo proceniti raspored brzina na mernom mestu, primenom analitičkog Stepenog zakona (j-na 3) sa dva različita obrazca za vrednost samog stepena  $n$  (j-ne 4 i 5). Primenom j-ne (4), dobijaju se veće vrednosti eksponenta, u odnosu na j-nu (5), a samim tim i raspored brzina je ravnomerniji. Postupak „Suve“ kalibracije je sproveden za opseg protoka  $Q = 1 - 55$  m<sup>3</sup>/s. Međutim, dobijeni rezultati u vidu korekcionih funkcija su prikazani u zavisnosti od procenjene vrednosti izmerene brzine pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}^S$  (0.05 -2.69 m/s). Razlog leži u činjenici da u postupku kalibracije protok nije poznat (ili je poznat sa značajnom neodređenošću), zbog čega je za poređenje rezultata kalibracionih postupaka potrebno koristiti pouzdaniju referentnu veličinu. Imajući u vidu princip rada EM senzora „Ajkulino krilo“, malu kontrolnu zapreminu i poznatu težinsku funkciju, zaključeno je da se brzina izmerena pomoću (ili sračunata za) „Ajkulino krilo“ može uzeti kao referentna veličina za poređenje korekcionih funkcija.

Koristeći integrale proizvoda rasporeda brzina (j-ne 3, 4 i 5), kao i odgovarajuće težinskih funkcija velikog ravnog EM senzora i „Ajkulino krilo“ (j-na 2) sračunate se vrednosti korekcionih funkcija za opseg brzina od 0.05 do 2.69 m/s ( $Q = 1 - 55$  m<sup>3</sup>/s). Imajući u vidu da su korišćena dva obrazca za eksponent stepenog zakona, j-ne (4) i (5), za ravni EM senzor su dobijene dve korekzione funkcije  $K^{S,ni}$  i  $K^{S,po}$ , respektivno. Slično za EM senzor „Ajkulino krilo“ u postupku „Suve“ kalibracije su dobijene dve korekzione funkcije  $K_{kont}^{S,ni}$  i  $K_{kont}^{S,po}$ . Navedene korekzione funkcije su prikazane na Slici 12.



Slika 12. Vrednosti korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijene u postupku „Suve kalibracije“ sa analitičkim stepenim rasporedom brzina

Iz prikazanih rezultata, interesantno je apostrofirati nekoliko značajnih karakteristika. Prvo, uočava se da je gradijent korekcionih funkcija, u analiziranom opsegu brzina, u proseku pet puta veći za ravne EM senzora nego za „Ajkulina krila“. Razlog leži u činjenici da ravni EM senzori unutar kontrolne zapremine integrale polje brzine u zidnom regionu tečenja, gde se sa promenama Rejnoldsovog broja javljaju i najveće relativne promene u rasporedu brzina. Sa druge strane „Ajkulina krila“ mere brzinu na otprilike 0.35 m od čvrste konture, u značajno manjoj kontrolnoj zapremini, gde su relativne promene rasporeda brzine dosta manje.

Isti razlog se može pripisati i za pojavu značajne razlike u vrednostima korekcionih funkcija, sračunatih za oba tipa senzora. Svakako, EM senzor „Ajkulino krilo“ meri brzinu koja je približnija srednjoj profilskoj brzini, zbog čega je opravdana upotreba ovog uređaja za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora. Međutim ne treba zanemariti činjenicu, da je u okviru prikazanog postupka pokazano da vrednosti brzine izmerene pomoću ovog senzora, treba korigovati pomoću odgovarajuće korekcionne funkcije (za 5-8%), kako bi se dobila adekvatna procena srednje profilske brzine  $V$ .

Konačno, primećuje se značajno odstupanja između vrednosti korekcionih funkcija, dobijenih pomoću dva različita analitička obrazca za eksponent  $n$  u stepenom zakonu. Iako, unapred nije moguće poznavati koji analitički obrazac za raspored brzina adekvatniji za primenu u svakom pojedinom slučaju, korisno je ispitati više različitih kako bi se dobio pouzdaniji rezultat „Suve“ kalibracije.

### 3.2.2 Kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema

Za potrebe lokalne kalibracije osnovnog mernog sistema, korišćenjem kontrolnog mernog sistema, izdvojena su tri događaja (3.2.2018 – 6.2.2018 Prvi događaj; 13.3.2018 – 25.3.2018 Drugi događaj; 8.4.2018 – 20.4.2018 Treći događaj) iz analiziranog perioda rada sistema (3.2.2018 do 22.4.2018.) za merenje protoka na derivacionom tunelu DP-FP. Za svaki od izdvojenih događaja, prethodno su sračunati izlazni signali sa osnovnog ( $V_{mer}$  i  $h_{mer}$ ) i kontrolnog mernog sistema ( $V_{kont,mer}$ ).

Originalni podaci o izmerenim brzinama  $V_{mer}$  i  $V_{kont,mer}$ , zabeleženi sa vremenskim korakom od  $\Delta t = 2$  min, su osrednjeni na časovnom nivou ( $\Delta t_{sr} = 60$  min). Koristeći osrednjene izmerene podatke, i  $j$ -nu (7), sračunati su odnosi korekcionih funkcija za osnovni i kontrolni merni sistem,  $K/K_{kont}$ , za svaki od izdvojenih događaja. Dobijeni rezultati su prikazani na Slici 13, i praktično pokazuju sa kojom vrednošću bi trebalo pomnožiti izmerenu brzinu  $V_{mer}$  sa osnovnog mernog sistema, kako bi se dobila pouzdanija vrednost, izmerena pomoću kontrolnog mernog sistema  $V_{kont,mer}$ . Na istoj Slici 13, nanoseni su i rezultujućii odnosi korekcionih funkcija za osnovni i kontrolni merni sistem  $K^{s,ni}/K_{kont}^{s,ni}$  i  $K^{s,po}/K_{kont}^{s,po}$ , dobijeni preko postupka „Suve kalibracije“ korišćenjem dva različita obrazca sa analitički raspored brzina,  $j$ -ne (3 i 4) i  $j$ -ne (3 i 5) respektivno.

Vizualnim poređenjem rezultata, dobijenih pomoću dva potpuno nezavisna postupka kalibracije, može se doći do nekoliko interesantnih zaključaka. Prvo, ukoliko se posmatraju sami analizirani događaji, može se uočiti da vrednosti odnosa korekcionih funkcija najviše variraju za prvi događaj (Standardna devijacija  $\sigma_1 = 0.08$ ), dok su u slučaju drugog ( $\sigma_2 = 0.04$ ) a pogotovo trećeg ( $\sigma_3 = 0.02$ ) ove varijacije značajno manje. Razlog se može potražiti u činjenici da su gradijenti promene brzine najizraženiji bili upravo tokom prvog događaja. Pri naglim promenama brzine  $V$ , ili protoka  $Q$ , prvo se menjaju brzine u zidnom regionu toka a onda se polako profil brzina izravnava, odnosno menjaju se brzine i u jezgru. Zbog toga su ravni EM senzori, koji integrale brzine upravo u zidnom regionu, pokazivali čak 1.7 - 1.8 manju brzinu u periodima naglog opadanja protoka, dok u periodima naglog porasta protoka, ta vrednost bila manja, oko 1.1.

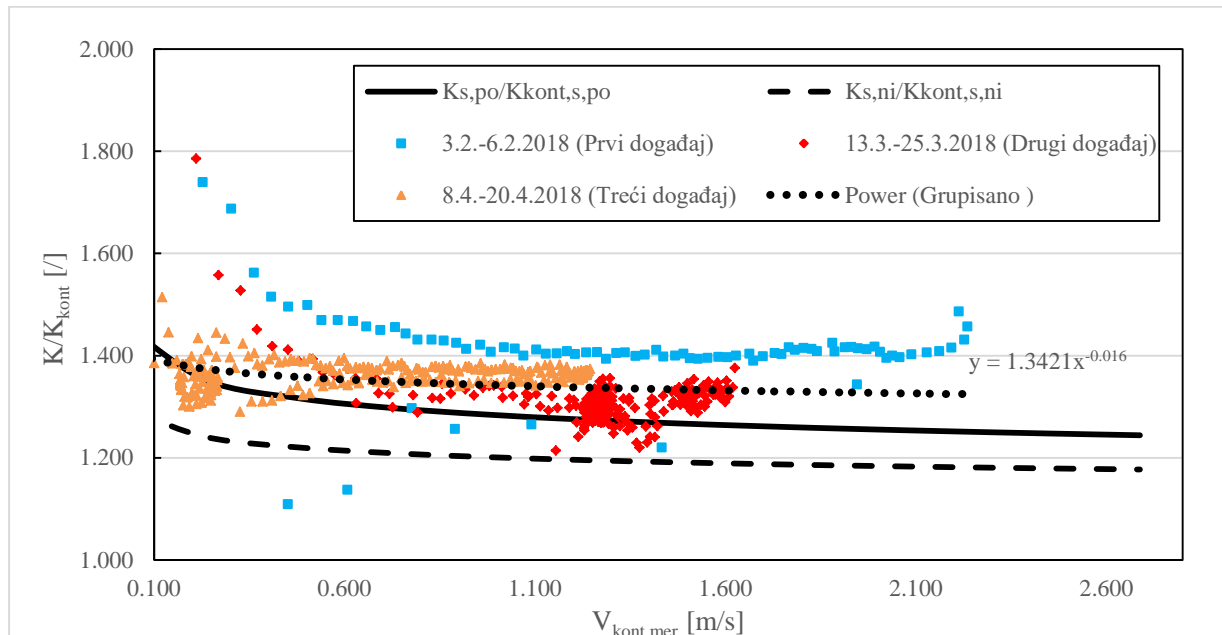
U periodima relativno blagih promena brzina (npr treći događaj), odnos korekcionih funkcija je relativno slabo varirao, između vrednosti 1.28 i 1.51, sa prosečnom vrednošću od 1.36. Za drugi događaj, vrednosti variraju između 1.21 i 1.78, sa prosečnom vrednošću od 1.31, dok za prvi događaj opseg vrednosti je 1.11 i 1.74, a prosečna 1.41. Treba napomenuti da se razlike u izračunatim prosečnim vrednostima, takođe mogu pripisati uočenim gradijentima brzine. Npr, za prvi događaj dobijena je najviša prosečna vrednost, budući da je većim delom trajanja, protok bio u opadanju sa



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

izraženim gradijentom. Prosečna vrednost nad agregiranim podacima iznosi oko 1.35. Primenom nelinearne regresije, agregirani izmereni rezultati su fitovani stepenom krivom, koja je takođe prikazana na Slici 13.



Slika 13. Vrednosti odnosa korekcionih funkcija za ravne EM senzore i EM senzore „Ajkulino krilo“ dobijenih poređenjem izmerenih podataka za tri izdvojena događaja i u postupku „Suve kalibracije“ sa analitičkim stepenim rasporedom brzina

Ukoliko se analiziraju samo rezultati „Suve“ kalibracije, može se uočiti da je trend dobijen primenom dva različita analitička obrazca dosta sličan. Pri minimalnoj brzini (min. Rejnoldsov broj), odnos korekcionih funkcija  $K^{s,ni}/K_{kont}^{s,ni}$  i  $K^{s,po}/K_{kont}^{s,po}$  je najveći i polako opada sa porastom brzina. Imajući u vidu da sa porastom brzina, raspored brzina postaje ravnomerniji – što znači da ravni EM senzori u zidnom regionu mere veću brzinu, ovaj rezultat je očekivan. Prosečna vrednost odnosa korekcionih funkcija za originalni Nikuradzeov obrazac iznosi 1.20 dok za drugi analitički obrazac ona iznosi 1.28.

U poređenju rezultata dva nezavisna postupka kalibracije, treba imati na umu da unutar „Suve“ kalibracije implicitno su pretpostavljeni ustaljeni uslovi tečenja, dok se kod kalibracije preko kontrolnog mernog sistema – uslovi bili neustaljeni. Međutim, opšti trendovi odnosa korekcionih funkcija, dobijenih preko jednog i drugog postupka su dosta slični. Poređenjem prosečnih vrednosti korekcionih funkcija, može se zaključiti da je bolje slaganje između izmerenih vrednosti i „Suve“ kalibracije dobijene primenom j-na (3 i 5). Nikuradzeov analitički obrazac j-na (4) opisuje profil brzina ravnomerniji rasporedom nego j-na (5), međutim najverovatnije usled neustaljenosti toka tokom rada mernog sistema takav profil brzina se nije formirao. Zbog toga se može usvojiti da je za slučaj velikih kružnih provodnika (kakav je i derivacioni tunel DP-FP), sa relativno velikim gradijentima promena brzine, za opisivanje rasporeda brzina analitičkim obrazcem primerenije koristiti j-nu (3 i 5).

## 4 Praktične implikacije dobijenih rezultata

Cilj ovog rada je ispitivanje dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora pri merenju srednje profilske brzine  $V$  (odnosno protoka  $Q$ ), u velikim provodnicima u kojima se javljaju

kombinovani uslovi tečenja. Lokalnom kalibracijom je potrebno minimizirati sistematske uticaje geometrijskih i hidrauličkih karakteristika na merenje srednje profilne brzine pomoću velikih ravnih EM senzora. Na osnovu prikazanih rezultata, izvedeno je nekoliko opštih zaključaka koji mogu imati praktični značaj u budućim merenjima.

- Ravni EM senzori i EM senzori „Ajkulino krilo“ su pokazali stabilan signal i nizak šum u merenju bidirekcionih brzine u kombinovanim uslovima tečenja.
- Ravni EM senzori su osetljivi na neustaljenost toka, zbog čega u periodima porasta protoka, mere veću brzinu, dok pri opadanju protoka, mere manju brzinu od one koja bi odgovarala slučaju ustaljenog tečenja.
- EM senzori „Ajkulino krilo“ su manje osetljivi na neustaljenost tečenja u odnosu na ravne EM senzore i generalno su tačniji u merenju srednje profilske brzine. Imajući navedeno u vidu, oni se mogu koristiti kao kontrolni merni sistem za korigovanje merenja pomoću ravnih EM senzora.
- Tačnost merenja  $V$  pomoću EM senzora „Ajkulino krilo“ je uslovljena dimenzijama samog provodnika, odnosno relativnim rastojanjem između kontrolne zapremine senzora i izovele koja opisuje lokaciju srednje profilske brzine u celokupnom rasporedu brzina.
- Ukoliko geometrijski i hidraulički uslovi dozvoljavaju, primenom postupka „Suve“ kalibracije moguće je definisati preliminarne vrednosti korekcionih funkcija za Ravne EM senzore. Treba imati u vidu da ovim postupkom nije moguće kvantifikovati uticaj neustaljenosti tečenja na pokazivanje ravnih EM senzora.
- Lokalnom kalibracijom pomoću kontrolnog mernog sistema, moguće je definisati odgovarajuću relaciju kojom se za lokalne geometrijski i hidraulički uslove, merenja  $V$  pomoću ravnih EM senzora mogu korigovati do nivoa tačnosti koji se dobija primenom EM senzora „Ajkulino krilo“.

Imajući u vidu da se postupkom „Suve“ kalibracije ne mogu obračunati efekti neustaljenosti na merenja brzine pomoću ravnih EM senzora, dok se sa druge strane primenom kontrolnog mernog sistema ne može odrediti direktno sama korekciona funkcija  $K$ , predlaže se primena kombinacije ova dva pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora u velikim provodnicima. Kombinovani pristup za lokalnu kalibraciju bi podrazumevao da se nakon prikupljanja dovoljnog broja merenih podataka pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema, i određivanja prethodno prikazanih veličina, vrednost srednje profilske brzine  $V$  definiše preko sledećeg obrazca:

$$V = \overbrace{K_{kont}^{s,po}}^{Suva kal.} \cdot \overbrace{K/K_{kont}}^{Kal. kont. merni sistem} \cdot V_{mer} \quad (6)$$

Konačna korekciona funkcija bi bila proizvod korekcione funkcije za „Ajkulino krilo“ dobijene pomoću „Suve kalibracije“ i odnosa korekcionih funkcija dobijenih na osnovu merenja pomoću osnovnog i kontrolnog mernog sistema.

## 5 Zaključci

Merenje protoka u velikim provodnicima u kojima se javljaju kombinovani uslovi tečenja, zahteva primenu pristupa Brzina – Proticajni Presek. Dominantan izvor neodređenosti u konačnoj proceni protoka, dobijene primenom pristupa B-PP, se nalazi u proceni srednje profilske brzine. U ovom radu je analiziran praktični primer merenja protoka u derivacionom tunelu sistema HET, koji spaja Dabarsko polje sa Fatničkim. Usled pojave bidirekcionog tečenja, uz kombinovane uslove tečenja, srednja profilska brzina je merena pomoću četiri velike ravne EM sonde, u okviru osnovnog mernog sistema, kao i dva EM senzora „Ajkulino krilo“, u okviru kontrolnog mernog sistema. Budući da je u prethodnim istraživanjima pokazano da je ravne EM senzore neophodno lokalno kalibrisati kako bi se minimizirao sistematski uticaj lokalnih geometrijskih i hidrauličkih uslova, na rezultate merenja brzine, u ovom radu su analizirane dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju: „Suva“ kalibracija i kalibracija pomoću kontrolnog mernog sistema.

U okviru postupka „Suve“ kalibracije izlazni signal senzora je modeliran korišćenjem odgovarajućih težinskih funkcija senzora, kao i analitičkih obrazaca za teorijski raspored brzina. Na osnovu odnosa modeliranog izlaznog signala i željene veličine (srednje profilske brzine  $V$ ), definišu se odgovarajuće korekzione funkcije, kojima se omogućava dobijanje pouzdanije procene srednje profilske brzine. Sa druge strane, primenom kontrolnog mernog sistema, na osnovu dovoljno dugačkog niza sniženih podataka, definišu se korekzione funkcije kojima se izlazni signal sa ravnih EM senzora može korigovati do nivoa tačnosti kontrolnog mernog sistema (EM senzora „Ajkulino krilo“).

Oba navedena postupka su primenjena na merni sistem na derivacionom tunelu DP-FP, gde je analiziran period rada sistema 3.2.2018 do 22.4.2018. Iz navedenog perioda su posebno razmatrana tri karakteristična događaja, na osnovu kojeg su upoređeni rezultati dva nezavisna pristupa za lokalnu kalibraciju ravnih EM senzora. Postupak „Suve“ kalibracije omogućava direktno određivanje traženih korekcionih funkcija, međutim podrazumeva ustaljene uslove tečenja. Vrednosti dobijene kalibracijom pomoću kontrolnog mernog sistema, pokazuju značajan uticaj neustaljenosti toka na vrednosti korekcionih funkcija. Uočeno je da u periodu porasta protoka, ravni EM senzori daju veće vrednosti brzine, u poređenju sa ustaljenim uslovima. Nasuprot tome, u periodu opadanja protoka, ravni EM senzori pokazuju manje vrednosti brzine nego u ustaljenim uslovima. Glavni razlog za ovakve rezultate leži u činjenici da se kontrolna zapremina ravnih EM senzora nalazi u zidnom regionu. U periodima blagih promena protoka, promena vrednosti odnosa korekcionih funkcija, za ravne EM senzore i „Ajkulina krila“, pokazuju sličan trend kao rezultati dobijeni „Suvom“ kalibracijom. Na osnovu dobijenih rezultata, zaključeno je da je optimalan pristup u lokalnoj kalibraciji ravnih EM senzora, kombinacija „Suve“ kalibracije i primene kontrolnog mernog sistema.

## Literatura

1. Al-Rabeth, R. H., Baker, R. C., 1986. On the ability to dry calibrate an electromagnetic flowmeter. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19(3): 203.
2. Bevir, M. K., O'Sullivan, V. T., Wyatt, D. G., 1981. Computation of electromagnetic flowmeter characteristics from magnetic field data. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 14(3), 373.
3. Bevir, M.K., 1970. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), pp.577-590.
4. Bonakdari, H. and Zinatizadeh, A.A., 2011. Influence of position and type of Doppler flow meters on flow-rate measurement in sewers using computational fluid dynamic. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(3), pp.225-234.
5. Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M. and Vanrolleghem, P.A., 2013. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. *Urban Water Journal*, 10(5), pp.300-311.
6. Cvitkovic, M., Prodanović, D., Vučurević, V. (2010). Elektromagnetne sonde za merenje protoka otpadnih voda – Primer Beogradske kanalizacije. Deseta međunarodna konferencija: Vodovodni i kanizacioni sistemi, Jahorina, Republika Srpska, BiH, strane: 231-239.
7. Gils, H., 1970. Discharge measurement in open water by means of magnetic induction. In *Symposium on hydrometry*, Koblenz.
8. Godley, A., 2002. Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 197-201.
9. Harremoës, P., Capodaglio, A.G., Hellström, B.G., Henze, M., Jensen, K.N., Lynggaard-Jensen, A., Otterpohl, R. and Søeberg, H., 1993. Wastewater treatment plants under transient loading-Performance, modelling and control. *Water Science and Technology*, 27(12), p.71.
10. Herschy, R.W., 1978. *Accuracy in Hydrometry*. Wiley, New York.
11. Ivetić, D., Prodanović, D. and Stojadinović, L., 2018. Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566(11), pp.455-469.
12. Ivetić, D., Prodanović, D., Stojadinović, L., Cvitkovic, M., 2017. Unapređenje metodologije merenja protoka pomoću ravnih elektromagnetnih senzora brzine. *Vodoprivreda*, 49(285-287), pp. 93-102.
13. Jaroslav Černi, Građevinski Fakultet, Svet instrumenata, 2017. Sistem za merenje protoka vode na tunelu DP-FP, Projekat Izvedenog Stanja. Investitor: Hidroelektrane na Trebišnjici.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

14. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
15. Kuromori, K., Gotoh, S. and Matunaga, Y., 1994. An electromagnetic flowmeter with dual frequency excitation. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 30(9), pp.1020-1026.
16. Luntta, E. and Halttunen, J., 1989. The effect of velocity profile on electromagnetic flow measurement. Sensors and Actuators, 16(4), pp.335-344.
17. Michalski, A., 2000. Dry calibration procedure of electromagnetic flowmeter for open channels. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 49(2), pp 434-438.
18. Michalski, A., Starzynski, J. and Wincenciak, S., 2001. Electromagnetic flowmeters for open channels: two-dimensional approach to design procedures. IEEE sensors journal, 1(1), pp.52-61.
19. Nikuradse, J. (1932). VDI Forschungsheft.
20. Pope S.B.: Turbulent Flows, Fifth printing, Cambridge University Press, 2008, United Kingdom, ISBN 978-0-521-59889-6
21. Prodanović, D., 2006. Merenje malih brzina u terenskim uslovima. Vodoprivreda, 38 (222-224), pp. 205-214.
22. Prodanović, D., Pavlović, D., Branislavljević, N., 2011. Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE 'Đerdap 2'. Vodoprivreda, 43(252-254), pp. 103-115.
23. Shercliff, J.A., 1962. The theory of electromagnetic flow-measurement. CUP Archive.
24. Steinbock, J., Weissenbrunner, A., Juling, M., Lederer, T. and Thamsen, P.U., 2016. Uncertainty evaluation for velocity–area methods. Flow Measurement and Instrumentation, 48, pp.51-56.

## **Koincidencija velikih voda na ušću reke Tise u Dunav primenom modela PROIL i KOPULA metode**

Aleksandra Ilić<sup>1</sup>, Stevan Prohaska<sup>2</sup>, Boris Pokorni<sup>3</sup>

APSTRAKT: Jedan od ključnih problema pri projektovanju sistema za zaštitu od poplava je kako odrediti merodavne velike vode na deonicama koje obuhvataju ušće dveju reka. U zonama ušća glavne reke i pritoke proces formiranja poplava može biti veoma složen, obzirom na međusobni uticaj uspora koji se pojavljuje kao posledica različitog vremena pojave maksimalnih protoka na oba vodotoka. U ovom radu se prikazuju rezultati primene različitih postupaka za proračun koincidencije velikih voda na primeru ušća Tise u Dunav. Korišćena su dva prilaza, proračun verovatnoće prevazilaženja u dvodimenzionalnom prostoru, koncipiran kao model PROIL i upotreba tri familije tzv. Arhimedovih kopula (COPULA): Gumbelova, Klejtonova i Frankova u kojima se određuju zajedničke raspodele verovatnoća različitih slučajno promenljivih. Navedene procedure su primenjene na sektoru ušća Tise u Dunav, od hidrološke stanice Senta na Tisi i od hidrološke stanice Bogojevo na Dunavu do hidrološke stanice Slankamen na Dunavu. Rezultati proračuna su prikazani numerički, preko marginalnih verovatnoća razmatranih kombinacija promenljivih za koje su definisane koincidencije i grafički preko linija prevazilaženja verovatnoća za sve razmatrane slučajeve po obe metode.

Ključne reči: koincidencija velikih voda, dvodimenzionalna sučajno promenljiva, model PROIL, Arhimedove kopule, vrh poplavnog talasa, verovatnoća prevazilaženja

## **Coincedence assessment of flood flows at the confluence of Tisza and Danube rivers by applying PROIL model and COPULA method**

ABSTRACT: One of the key problems in designing flood protection systems is to determine design floods on sections covering the confluence of two rivers. In areas of the mouth of the main river and tributaries flood formation process can be very complex, given the interaction between the backflow which occurs as a result of various appearance of maximum flows on both watercourses. This paper presents the results of application of various methods for the calculation of a coincidence in the case of flood flows at the confluence of Tisa and Danube Rivers. Two approaches were used, calculation of the exceedance probability in a two-dimensional space, designed as a model PROIL and the use of three so-called families of Archimedean copula: Gumbel, Clayton and Frank that determine the joint probability distribution of different random variables. These procedures are applied to the sector covering the confluence of rivers Tisa and Danube, from the profiles of hydrological stations Senta at the Tisa and hydrological station Bogojevo at the Danube to hydrological station Slankamen at the Danube. The calculation results are shown numerically, via marginal probability of the considered combination of variables that define coincidences and graphics through exceedance probabilities isolines for all cases considered by both methods.

Key words: coincidence of flood flows, bivariate random variable, PROIL model, Archimedean's copulas, flood wave pik, exceedance probability.

<sup>1</sup> M. Sc Aleksandra Ilić, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, [aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs](mailto:aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>2</sup> Prof. dr. Stevan Prohaska, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [stevan.prohaska@jcerni.rs](mailto:stevan.prohaska@jcerni.rs)

<sup>3</sup> dr Boris Pokorni, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [boris.pokorni@jcerni.rs](mailto:boris.pokorni@jcerni.rs)

## 1 Uvod

Projektovanje regulacionih radova na vodotocima u cilju fiksiranja korita i/ili zaštite od izlivanja u okolno područje iziskuje pažljiv izbor merodavnih velikih voda. U tu svrhu se ustalila procedura usvajanja najvećeg protoka reke određenog povratnog perioda (pik poplavnog talasa) procenjenog na osnovu istorijskih podataka o maksimalnim godišnjim protocima. Kako se hidrotehnički objekti definišu sa ciljem smanjenja rizika od ugrožavanja nizvodnog područja poplva, tako se izbor merodavnih velikih voda svodi na određivanje računске velike vode koje predstavljaju maksimalni protok i/ili neku drugu karakteristiku poplavnog talasa određene verovatnoće pojave.

Novi koncepti odbrane od poplava odbacuju stare ideje održivosti, umesto statičnog stanja usvaja se nestalnost, fleksibilnost i decentralizacija kao ključne osobine sistema koje treba razviti.

Sa gledišta geneze poplavnih talasa na rečnim deonicama koje obuhvataju ušće pritoke, definisanjem višedimenzionalne zavisnosti između parametara kojima se opisuje hidrogram velikih voda (u ovom slučaju maksimalni protok) određuje se realan prostor u kome se odabrani parametri različitih kombinacija verovatnoće pojava mogu naći. U (Bender et al, 2016) navodi se nekliko studija koje su se bavile problematikom raspodela verovatnoće u dvodimenzionalnom prostoru: Moris i Calise 1987, Raynal i Salas 1987, ali se tom popisu moraju svakako pridodati poglavlja u monografijama koja su se bavila ovom problematikom na sektorima reke Dunav sa značajnijim pritokama (Prohaska i sar., 1999. i Prohaska i Ilić, 2010.). Sve studije ističu da se verovatnoće prevazilaženja u dvodimenzionalnom prostoru dobijaju na osnovu unapred zadatih funkcija raspodela verovatnoće, što je uglavnom predstavljalo ograničenje u njenoj primeni.

Korišćenjem kopula funkcija, koje postaju sve popularnije napušta se konvencionalni pristup unapred zadate funkcije raspodele verovatnoće slučajne promenljive i omogućava njen izbor iz različitih grupa raspodela.

U ovom radu se prikazuje komparativna analiza korišćenja dvodimenzionalne distribucije i kopula za određivanje računskog protoka za dimenzionisanje sistema za odbranu od poplava u neposrednoj zoni uticaja recipijenta i pritoke.

## 2 Metode proračuna

Dosadašnja hidrološka praksa je podrazumevala je jednodimenzionalnu ocenu verovatnoće prevazilaženja pri određivanju računskih voda za dimenzionisanje sistema za zaštitu od poplava. Prvi put se pojam verovatnoće složenog višedimenzionalnog događaja, doduše samo na teorijskom nivou, uvodi u (Prohaska, Marjanović, Čabrić, 1978.). Raspodela verovatnoće složenog višedimenzionalnog događaja računa se na osnovu pojedinačnih (marginalnih) raspodela svake komponente slučajnog procesa, za koje se po pravilu pretpostavlja da su normalno ili log-normalno raspoređene. Mera odnosa slučajno promenljivih predstavljena je Pirsonovim koeficijentom korelacije koji se određuje se osnovu merenih, odnosno standardizovanih vrednosti.

Problem određivanja jednovremene pojave slučajno promenljivih rešava se grafičkim putem korišćenjem nomograma (Abramowitz i Stegun, 1972.). Tako sračunata verovatnoća predstavlja zapravo verovatnoću prevazilaženja događaja unapred usvojenih kombinacija slučajno promenljivih. Konačan ishod je mreža tačaka od kojih je svaka karakterisana verovatnoćom pojave definisane kombinacije i na osnovu kojih se sračunavaju linije istih verovatnoća. Ovakav pristup je nailazio na brojne poteškoće pri definisanju jedinstvenog zakona raspodele na osnovu marginalnih verovatnoća. Ceo concept definisanja funkcija prevazilaženja unapred usvojenih kombinacija slučajno promenljivih bazira se na grafo-analitičkoj proceduri čija je primena omogućena upotrebom modela PROIL.

Poteškoće i ograničenja koja su se pojavljivala primenom pomenute procedure počinju da se razrešavaju upotrebom kopula („copula”), pristupa u teoriji verovatnoće kojim se određuju zajedničke raspodele višedimenzionalnih slučajnih promenljivih.

## 2.1 Marginalne verovatnoće

Kako bi se odredila gustina raspodele,  $f(x, y)$ , prvi korak je određivanje marginalnih verovatnoća  $f(x, \bullet)$  i  $f(\bullet, y)$ . kao:

$$f(x, \bullet) = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} f(x, y) dy \quad (1)$$

$$f(\bullet, y) = \int_{x=-\infty}^{x=\infty} f(x, y) dx \quad (2)$$

Njihove kumulativne verovatnoće su onda:

$$F(x, \bullet) = \int_{t=-\infty}^{t=x} f(t, \bullet) dt \quad (3)$$

i

$$F(\bullet, y) = \int_{t=-\infty}^{t=y} f(\bullet, t) dt \quad (4)$$

Potrebno je izdvojiti više poznatih funkcija raspodele verovatnoće koje će biti testirane kao moguće marginalne verovatnoće.

U ustaljenoj proceduri pri određivanju verovatnoće prevazilaženja odabrane karakteristike poplavnog talasa u dvodimenzionalnom prostoru verovatnoća uslov je da se odabrane slučajne promenljive pokoravaju istom zakonu raspodele verovatnoća. U tu svrhu izabrane su Pirson III (P3), Log-Pirson III (LP3), Gumbelova (EV1) i Log-Normalna (LOGN) kao potencijalne marginalne distribucije. Parametri raspodele su ocenjivani klasičom metodom momenata. Ocena dobrote prilagođavanja izabranih teorijskih funkcija raspodele empirijskim podacima izvršena je pomoću  $\chi^2$ , Kolmogorov-Smirnov i  $\omega^2$  testova.

Prilikom konstruisanja kopula grupa mogućih marginalnih raspodela proširena je General Extreme Value (GEV) raspodelom gustine verovatnoće. Parametri raspodela su određivani na osnovu metode L-momenata. L-momenti su zasnovani na ideji klasičnih momenata ali se modifikacija ogleda u korišćenju težinskih funkcija u obliku verovatnoća (Hosking, 1990). Razlog njihovog korišćenja za određivanje parametara funkcije raspodele leži u tome što su manje osetljivi na ekstreme u uzorku i u slučaju malih uzoraka daju preciznije ocene parametara raspodele. Kvalitet prilagođavanja funkcije raspodele uzorku ocenjen je na osnovu Kolmogorov-Smirnov i Darling-Anderson testova kao i srednjeg kvadratnog odstupanja (Root Mean Square Error – RMSE).

## 2.2 Verovatnoća prevazilaženja u dvodimenzionalnom prostoru verovatnoća

Dvodimenzionalna normalna raspodela je raspodela sa gustinom verovatnoće koja se definiše na sledeći način (Prohaska, Marjanović, Čabrić, 1978):

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (5)$$

gde su:

$x$  i  $y$  – istovremene realizacije slučajnih promenljivih  $X$  i  $Y$ , respektivno;

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- $\mu_x$  i  $\mu_y$  – matematička očekivanja  $X$  i  $Y$ ;  
 $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  – standardne devijacije  $X$  i  $Y$ ;  
 $\rho$  – koeficijent korelacije  $X$  i  $Y$ .

Kumulativna raspodela verovatnoće,  $F(x, y)$  se definiše:

$$F(x, y) = P[X \leq x \cap Y \leq y] = \int_{t=-\infty}^{t=x} \int_{z=-\infty}^{z=y} f(t, z) dt dz \quad (6)$$

Sledeći korak je određivanje verovatnoće prevazilaženja  $\Phi(x, y)$  u dvodimenzionalnom prostoru verovatnoća (Prohaska, Marjanović, Čabrić, 1978):

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= \int_{t=x}^{t=+\infty} \int_{z=y}^{z=+\infty} f(t, z) dt dz = P[X > x \cap Y > y] = 1 - P[X < x \cup Y < y] = \\ &= 1 - F(x, \bullet) - F(\bullet, y) + F(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

Primena dvodimenzionalne raspodele verovatnoća pri statističkoj analizi različitih parametara hidrograma velikih voda zahteva uprošćenja da bi opisana procedura proračuna bila primenljiva.

Osnovno uprošćenje se odnosi na pretpostavku da se svaka od razmatranih karakteristika hidrograma pokorava Normalnom (Log-Normalnom) zakonu raspodele, što ne mora biti slučaj. Detaljnija teorijska osnova definisanja dvodimenzionalne funkcije raspodele sa primenom grafo-analitičke procedure (Abramowitz i Stegun, 1972.) u rešavanju može se naći u literaturi (Prohaska i sar., 1999.).

Čvrstina korelacione zavisnosti se određuje odnosom koeficijenta linearne korelacije  $R$  i standardne greške ocene koeficijenta korelacije  $\sigma_R$  (Yevjevich, 1972.):

$$|R| \geq 3\sigma_R \quad (8)$$

## 2.3 Kopule

Matematički model se bazira na višedimenzionalnim funkcijama raspodele verovatnoće, odnosno njihovim uslovnim verovatnoćama. Za relevantne slučajne promenljive, razmatraju se istovremene veličine hidrograma poplavnih talasa na glavnoj reci i pritoci.

Složenost fenomena nastajanja poplave i njegova ocena zahtevaju povezivanje marginalnih raspodela više varijabli sa ciljem definisanja jedinstvenog zakona raspodele koji poplavu opisuje.

Kopule su alat za određivanje zavisnosti nekoliko slučajno promenljivih. Termin copula potiče iz latinskog jezika (copulare) što znači povezati ili udružiti. Prvi ga uvodi Sklar 1959. godine, a glavna namena je opisivanje veza nekoliko slučajno promenljivih. (Schmith, 2006.)

Poboljšanja u primenjenoj matematici pokazuju da kopule mogu da predstavljaju koristan alat za proučavanje zavisno promenljivih.

Korišćenjem kopula napušta se konvencionalni pristup unapred zadate funkcije raspodele verovatnoće slučajne promenljive i omogućava njen izbor iz različitih grupa raspodela.

Ovakav pristup obuhvata modeliranje verovatnoće pojave u višedimenzionalnom prostoru modelirajući zavisnost pojedinačnih članova nezavisno od zakona raspodele verovatnoće kome se svaki pojedinačno pokorava čiji je krajnji cilj određivanje uslovnih raspodela verovatnoće i povratnog perioda poplave, kao složenog fenomena (Nelsen, 2006.).

Neka je  $(X_1, X_2, \dots, X_N) \in R^N$  slučajni vektor sa kumulativnom raspodelom:  
 $F(x_1, x_2, \dots, x_N) = P\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_N \leq x_N\}$  i marginalnim raspodelama:  
 $F_n(x_n) = P\{X_n \leq x_n\}, \quad 1 \leq n \leq N.$

Kopula  $C$  raspodele  $F$  je definisana na  $[0, 1]^N$  i  $F(x_1, x_2, \dots, x_N) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_N(x_N))$ .



Tabela 1. Tipovi “Arhimedovih kopula”

Table 1. Types of Archimedean copula

Copula	Parameter	$C(u,v,\theta)$
Gumbel	$\theta \geq 0$	$exp\left\{-\left[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta\right]^{\frac{1}{\theta}}\right\}$ (9)
Clayton	$\theta > 0$	$\left[\max\{u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0\}\right]^{\frac{1}{\theta}}$ (10)
Frank	$\theta \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$	$-\frac{1}{\theta} \log\left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)}\right]$ (11)

Egzistencija i jedinstvenost kopule  $C$  je obezbeđena pod određenim uslovima, a koji su zadovoljeni u slučajevima koji se ovde razmatraju. Postoji više načina konstrukcije, ali se najčešće koriste poznate familije kopula koje zavise od jednog parametra, a koji se određuje na osnovu uzorka.

Kao što je već istaknuto promenljive mogu da imaju različite marginalne raspodele, a kako je i kompletna struktura međusobne zavisnosti promenljivih sadržana u kopuli, samim tim je ona odvojena od tipa marginalne raspodele svake zavisno promenljive.

U ovom radu korišćene su tri familije kopula: Gumbelova, Klejtonova i Frankova koje pripadaju “Arhimedovim kopulama”. Sve kopule su jednoparametarske sa parametrom  $\theta$  (Tabela 1).

Procena parametra kopule vršena je putem poznatih aproksimacija koje vezuju parametar  $\theta$  sa Kendalovim koeficijentom korelacije  $\tau$ , koji je lako izračunati iz samog uzorka (Nelsen, 2006).

Ne bi li se odredila verovatnoća prevazilaženja dve jedinične uniformno raspoređene slučajno promenljive sa kopulom  $C(u,v,\theta)$  računa se kopula  $\bar{C}$ , tzv. kopula preživljavanja po relaciji:

$$\bar{C}(u,v) = C(1-u, 1-v) + u + v - 1 \text{ za } u, v \in [0,1]^2 \quad (12)$$

## 2.4 Ocena kvaliteta prilagođavanja kopula uzorku

Kvalitet prilagođavanja kopule uzorku u radu ocenjen je na osnovu statističkog testa (Reddy, Ganguli, 2012) koji su prvo predložili Genest, Remillard i Beaudoin 2009 godine.

Test se zasniva na parametarskoj Bootstrap metodi. Za svaku kopulu generiše se  $n$  slučajnih nezavisnih uzoraka i utvrđuje sintetički niz osmatranja koji se upoređuje sa sintetičkim serijama generisanih pomoću Monte Carlo simulacije na osnovu izmernih podataka. Test se zasniva na merenjima i ne zavisi od izabrane marginalne verovatnoće.

Veličina uzorka primenjena u radu je  $n=10000$ .

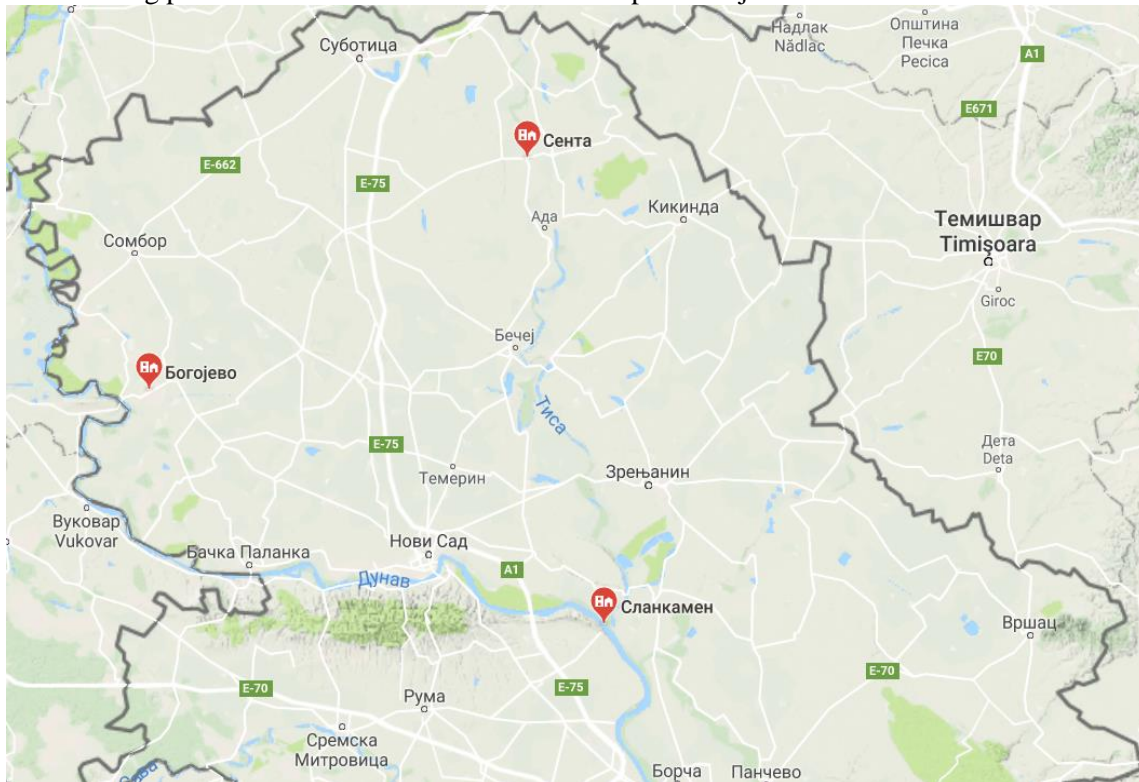
Za ocenu statističke značajnosti koristi se  $p$  vrednost koja se računa na osnovu Cramer-von Misesove statistike  $S_n$  (Reddy, Ganguli, 2012) i upoređuje se sa  $\alpha$  nivoom značajnosti.

Ako je  $p < \alpha$ , rezultat je statistički značajan, u suprotnom rezultat nije statistički značajan. Što je  $p$  vrednost veća, to testirana kopula bolje opisuje međusobnu zavisnost serija.

## 3 Ulazni podaci

Osnovni kriterijum pri izgradnji sistema za odbranu od poplava u zoni ušća reke Tise u reku Dunav je ekonomski optimalno dimenzionisanje svih objekata za zaštitu od poplava (Prohaska i

Petković, 1989). Sektor reke Dunav, od ulaznih hidroloških stanica Bogojevo na reci Dunav i Senta na Tisi do izlaznog profila – h.s. Slankamen na reci Dunav prikazan je na slici 1.



Slika 1. Sektor reke Dunav od h. s. Bogojevo do h. s. Slankamen

Figure 1. Danube River reach from h. s. Bogojevo to h. s. Slankamen

Osnovu za dimenzionisanje sistema za zaštitu od poplava predstavljaju teorijske vrednosti protoka različitih povratnih perioda na razmatranim profilima, dobijene primenom klasične procedure za slučaj statistički značajne koincidencije, na osnovu nizova maksimalnih godišnjih protoka period 1931-2014. godina.

### 3.1 Definisane promenljivih

Merodavni (projektovani) nivoi u široj zoni ušća dobijaju putem hidrauličkog proračuna linija nivoa na osnovu usvojenih graničnih uslova i usvojenih merodavnih protoka.

Za definisanje merodavnih nivoa neophodno je raspolagati sledećim podacima:

- serijama maksimalnih godišnjih protoka na ulaznim profilima (h.s. Bogojevo i h.s. Senta) i izlaznom profilu (h.s. Slankamen), i
- rezultatima proračuna koincidencije velikih voda.

Analiza koincidencije velikih voda recipijenta i pritoke bazira se na razmatranju kombinacija promenljivih prikazanih u tabeli 2 (Prohaska i sar., 1999.).

Kao rezultat proračuna koincidencije dobija se linija istih verovatnoća navedenih kombinacija odabranog parametra poplavnog talasa (diferencijalni zakon raspodele), kao i linije koje definišu verovatnoću prevazilaženja istih kombinacija promenljivih.

Ukoliko se primenjuje metoda kopula za određivanje “najverovatnijeg događaja” za dimenzionisanje sistema za zaštitu od poplava, postupak se svodi na identifikaciju tačke sa izolinijske prevazilaženja određene verovatnoće pojave sa koordinatama (Bender i sar., 2016.):

$$(u^*, v^*) = \underset{C_{UV}(u,v)=t}{\operatorname{argmax}} f_{X,Y}(F_X^{-1}(u), F_Y^{-1}(v)) \quad (13)$$

Tabela 2. Kombinacije promenljivih u slučaju njihove istovremene pojave

Table 2. Combination of simultaneous variables

Deonica		Kombinacija promenljivih	Oznaka
Profil 1	Profil 2		
Recipijent ispred ušća pritoke	Recipijent posle ušća pritoke	max-max	QINmax - QOUTmax
		max-sim	QINmax - QOUTodg1
		sim-max	QINodg1 - QOUTmax
Recipijent ispred ušća pritoke	Pritoka	max-max	QINmax - QTRmax
		max-sim	QINmax - QTRodg1
		sim-max	QINodg2 - QTRmax
Pritoka	Recipijent posle ušća pritoke	max-max	QTRmax - QOUTmax
		max-sim	QTRodg2 - QOUTmax
		sim-max	QTRmax - QOUTodg2

## 4 Rezultati

### 4.1 Marginalne verovatnoće

Primenom klasične procedure, a ne vodeći računa o koincidenciji velikih voda, hidrotehnički objekti namenjeni zaštiti od poplava bi se dimenzionisali na snovu teorijskih vrednosti protoka različitih verovatnoća pojave. Teorijske vrednosti protoka za navedene hidrološke stanice na razmatranom sektoru Dunava i Tise prikazane su u tabeli 3 za obe primenjivane metode ocene parametara raspodele navedene u poglavlju 2.1.

### 4.2 Dvodimenzionalna raspodela verovatnoća

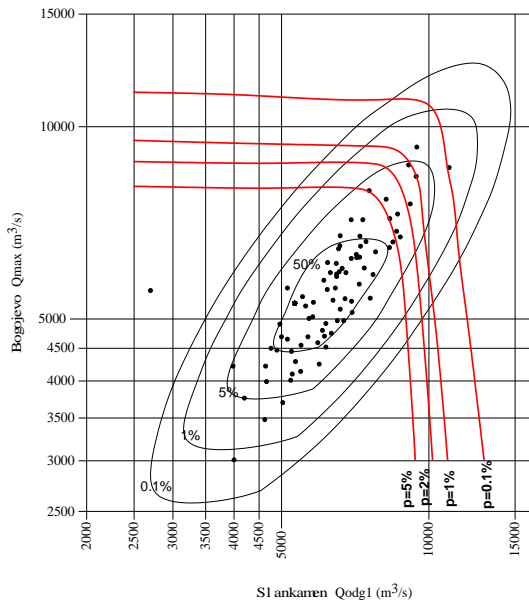
Rezultati proračuna dvodimenzionalne raspodele verovatnoća velikih voda i kopula reka Dunava i Tise po metodama opisanim u poglavlju 2 prikazani su grafički na slikama 2–13. Na graficima su prikazane linije verovatnoća prevazilaženja (funkcija raspodele) po dvodimenzionalnom zakonu i kopulama kao i empirijske tačke.

Tabela 3 Teorijske vrednosti maksimalnih godišnjih protoka reka Dunava i Tise za različite verovatnoće pojave –  $Q_{max,p}$  (m<sup>3</sup>/s)

Table 3. Theoretical values of maximum annual flows of Danube and Tisza of different probabilities of occurrence –  $Q_{max,p}$  (m<sup>3</sup>/s)

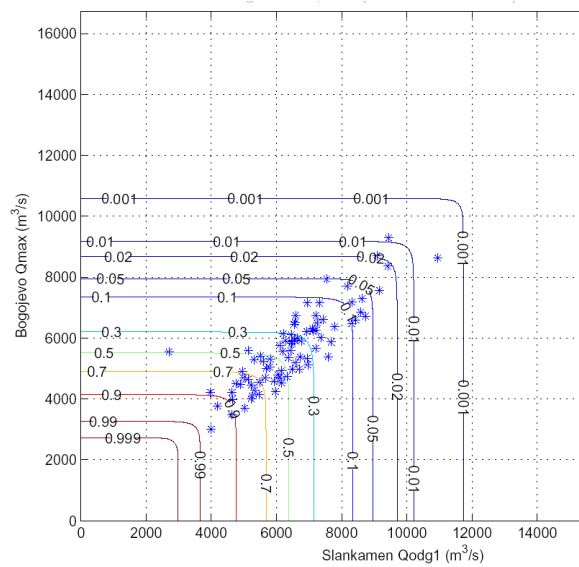
p(%)	reka Dunav				reka Tisa	
	h.s Bogojevo $Q_{max,p}$ (m <sup>3</sup> /s)		h.s. Slankamen $Q_{max,p}$ (m <sup>3</sup> /s)		h.s. Senta $Q_{max,p}$ (m <sup>3</sup> /s)	
	MOM (LP3)	LMOM (GEV)	MOM (LP3)	LMOM (GEV)	MOM (LP3)	LMOM (GEV)
0.1	10799	16400	12940	17145	4611	6317
1	9172	11693	10869	12834	3847	4623
2	8650	10479	10236	11683	3598	4156
5	7918	8991	9374	10247	3248	3563

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



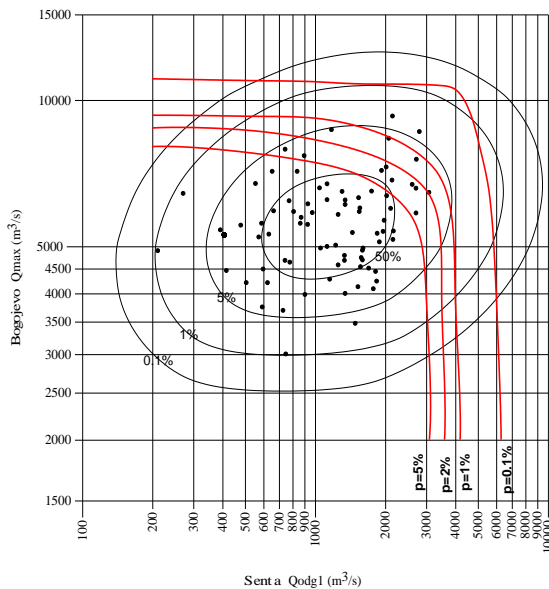
Slika 2. Koincidencija maksimalnih godišnjih protoka reke Dunav kod h.s. Bogojevo i h.s. Slankamen

Figure 2. Coincidence of maximum annual flows of the Danube at Bogojevo and Slankamen



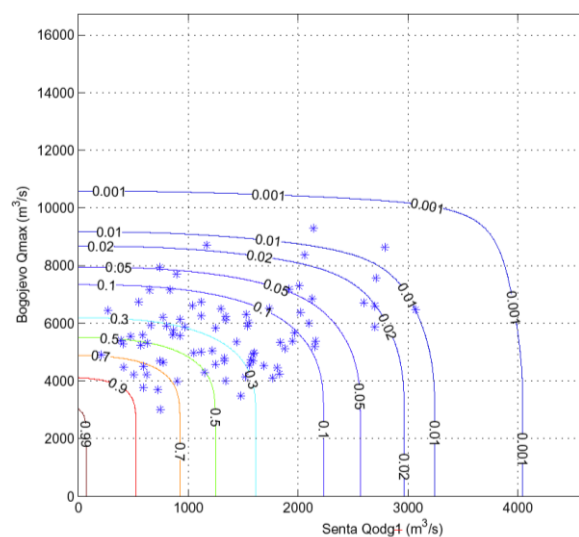
Slika 3. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Bogojevo i odgovarajućih h.s. Slankamen na Dunavu po Gumbelovoj kopuli

Figure 3. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Danube at Bogojevo and corresponding flows at Slankamen according to Gumbel copula



Slika 4. Koincidencija maksimalnih godišnjih protoka reke Dunav kod h.s. Bogojevo i odgovarajućih protoka Tise kod h.s. Senta

Figure 4. Coincidence of maximum annual flows of the Danube at Bogojevo and corresponding flows of the Tisa at Senta

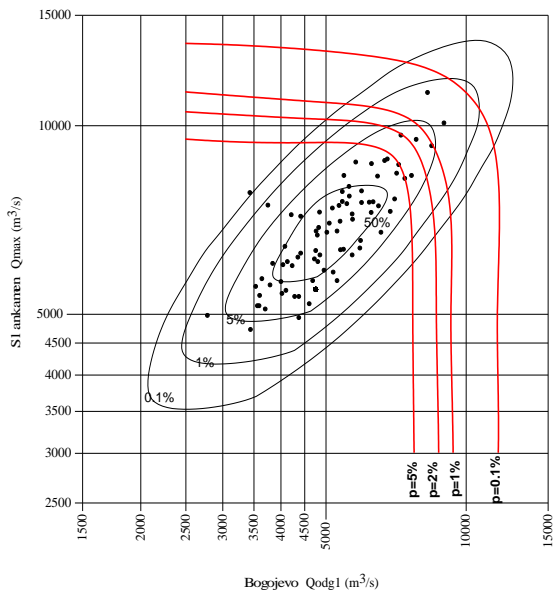


Slika 5. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Bogojevo na Dunavu i odgovarajućih h.s. Senta na Tisi po Gumbelovoj kopuli

Figure 5. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Danube at Bogojevo and corresponding flows of the Tisa at Senta according to Gumbel copula

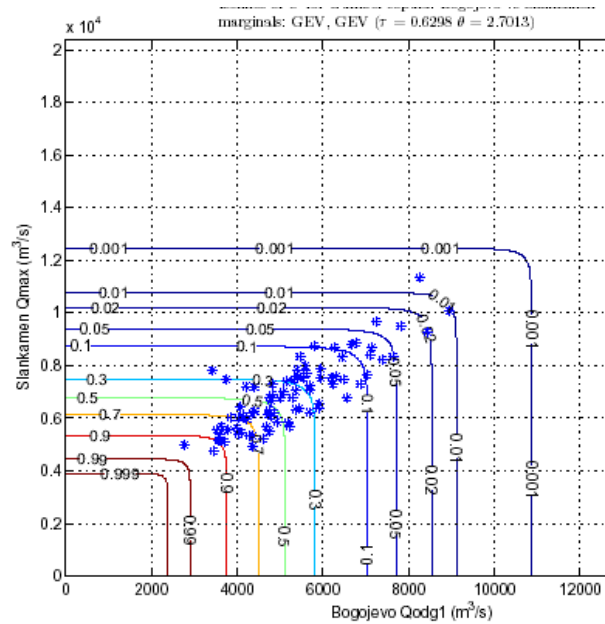
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



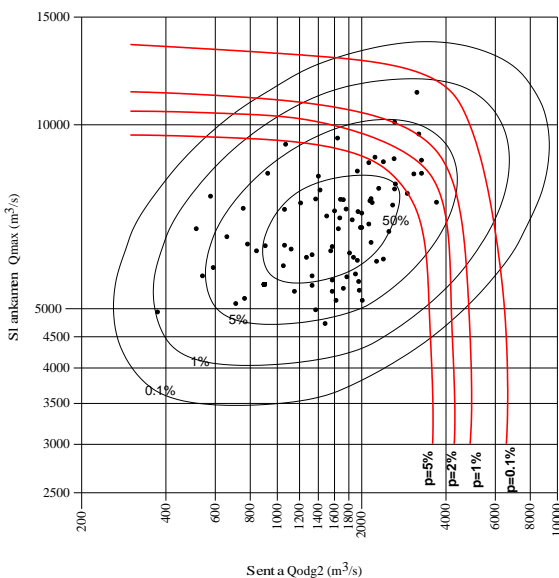
Slika 6. Koincidenција maksimalnih godišnjih protoka reke Dunav kod h.s. Slankamen i odgovarajućih protoka kod h.s. Bogojevo

Figure 6. Coincidence of maximum annual flows of the Danube at Slankamen and corresponding flows at Bogojevo



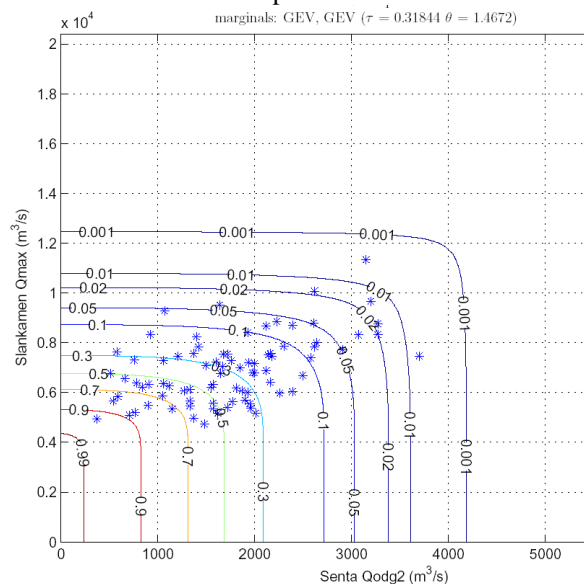
Slika 7. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Slankamen i odgovarajućih h.s. Bogojevo na Dunavu po Gumbelovoj kopuli

Figure 7. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Danube at Slankamen and corresponding flows at Bogojevo according to Gumbel copula



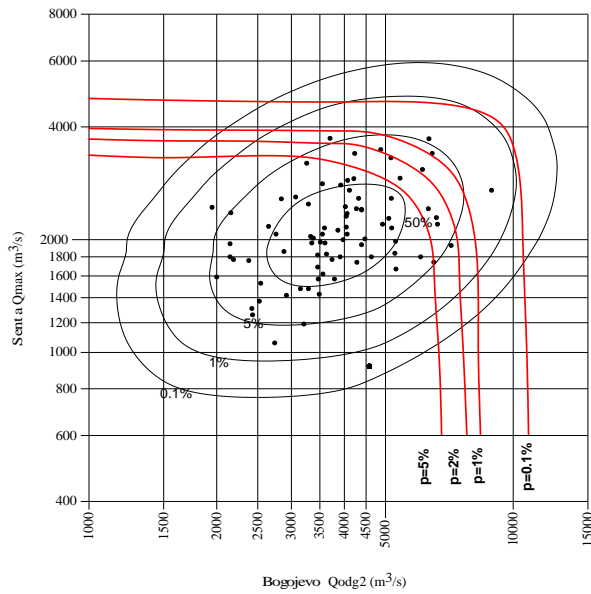
Slika 8. Koincidenција maksimalnih godišnjih protoka reke Dunav kod h.s. Slankamen i odgovarajućih protoka reke Tise kod h.s. Senta

Figure 8. Coincidence of maximum annual flows of the Danube at Slankamen and corresponding flows of the Tisa at Senta



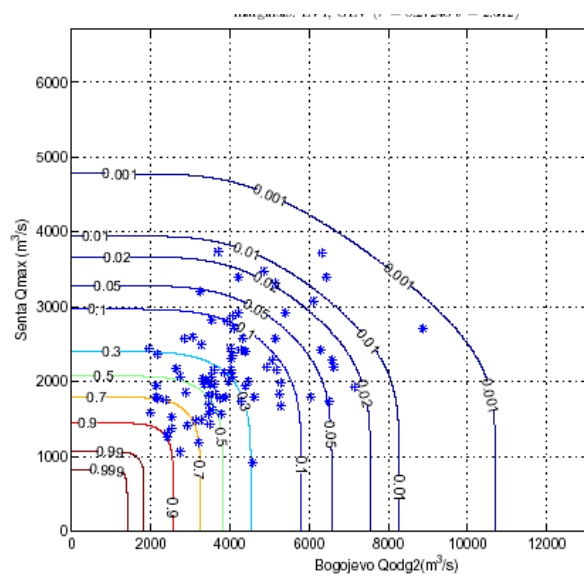
Slika 9. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Slankamen na Dunavu i odgovarajućih h.s. Senta na Tisi po Gumbelovoj kopuli

Figure 9. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Danube at Slankamen and corresponding flows of the Tisa at Senta according to Gumbel copula



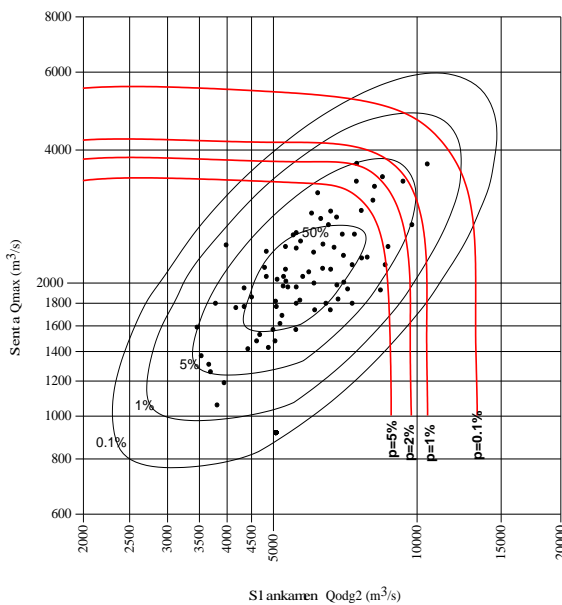
Slika 10. Koincidencija maksimalnih godišnjih protoka reke Tise kod h.s. Senta i odgovarajućih protoka reke Dunav kod h.s. Bogojevo

Figure 10. Coincidence of maximum annual flows of the Tisa at Senta and corresponding flows of the Danube at Bogojevo



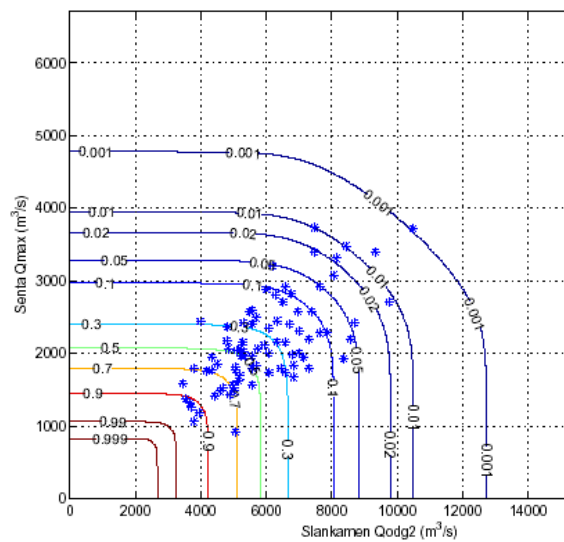
Slika 11. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Senta na Tisi i odgovarajućih h.s. Bogojevo na Dunavu po Frankovoj kopuli

Figure 11. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Tisa at Senta and corresponding flows of the Danube at Bogojevo according to Frank copula



Slika 12. Koincidencija maksimalnih godišnjih protoka reke Tise kod h.s. Senta i odgovarajućih protoka reke Dunav kod h.s. Slankamen

Figure 12. Coincidence of maximum annual flows of the Tisa at Senta and corresponding flows of the Danube at Slankamen



Slika 13. Verovatnoće prevazilaženja maksimalnih godišnjih protoka na h.s. Senta na Tisi i odgovarajućih h.s. Slankamen na Dunavu po Frankovoj kopuli

Figure 13. Exceedance probabilities of maximum annual flows of the Tisa at Senta and corresponding flows of the Danube at Slankamen according to Frank copula

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Za ocenu statističke značajnosti sračunatih promenljivih koincidencija protoka velikih voda reke Dunav i Tise u tabeli 4 su prikazani osnovni pokazatelji čvrstine uspostavljenih koincidencionih veza i to: koeficijent linearne korelacije i standardna greška ocene koeficijenta korelacije po jednačini (8).

Primenom procedure opisane u poglavlju 2.4, u tabeli 5 prikazan je izbor kopule koja je primenjena za identifikaciju "najverovatnijeg događaja.

Tabela 4. Prikaz rezultata ocene statističke značajnosti razmatranih konstelacija promenljivih

Table 4. The results of statistical significance assessment of considered constellation of variables

h.s.	konstelacije promenljivih	$R$	$N$	$\sigma$	$3\sigma$	statistička značajnost
Bogojevo – Slankamen	max – max	0.86771	82	0.02729	0.08186	DA
	max – cor	0.79096	82	0.04134	0.12403	DA
	cor – max	0.80042	82	0.03968	0.11904	DA
Bogojevo – Senta	max – max	0.59386	82	0.07149	0.21446	DA
	max – cor	0.43787	82	0.08926	0.26778	DA
	cor – max	0.68209	82	0.05905	0.17716	DA
Senta – Slankamen	max – max	0.33375	82	0.09813	0.29439	DA
	cor – max	0.23267	82	0.10445	0.31336	NE
	max – cor	0.37304	82	0.09506	0.28519	DA

Tabela 5. Rezultati ocene kvaliteta prilagođavanja kopula

Table 5. The results of copula goodness-of-fit testing

Profili	kombinacije promenljivih	Clayton	Frank	Gumbel	$\alpha$	Copula- izbor
		p				
Bogojevo – Senta	max – sim	0.012588	0.0439	0.19801	0.05	Gumbel
	sim – max	0.24170	0.47977	0.18247		Frank
	max – max	0.025751	0.26711	0.70071		Gumbel
Senta – Slankamen	max – sim	0.07529	0.23609	0.23551		Frank
	sim – max	0.00015	0.02324	0.36973		Gumbel
	max – max	0.00163	0.11394	0.90485		Gumbel
Bogojevo – Slankamen	max – sim	0.00044	0.31876	0.86928		Gumbel
	sim – max	0.00035	0.36073	0.90586		Gumbel
	max – max	0.00249	0.35352	0.83346		Gumbel

Na osnovu grafika prikazanim na slikama 2-13 računski protoci u zoni ušća Dunava i Tise prikazani su u tabelama 6 i 7. Na slikama 14 i 15 su šematski prikazane uporedne vrednosti merodavnih linija nivoa vode koja bi se usvojile u slučaju primene proračuna u dvodimenzionalnom prostoru (vrednosti plavom bojom ispisane) i kopula metode (vrednosti ispisane crvenom bojom).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 6. Prikaz merodavnih protoka za različite verovatnoće koincidencije velikih voda Dunava i reke Tise

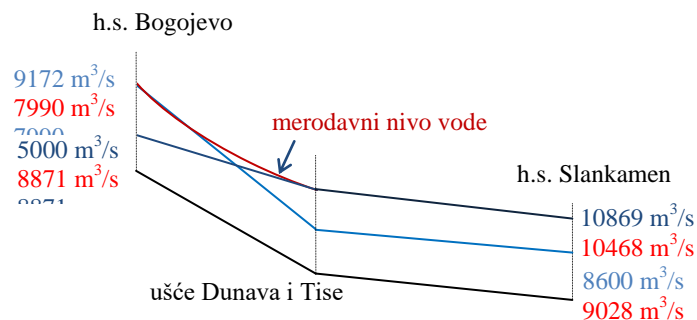
Table 6. Design flood flows for different probabilities of coincidence of the Danube and the Tisa

p%	h.s. Bogojevo			h.s. Slankamen			h.s. Senta		
	$Q_{max,p}^{Bog}$	$Q_{odg1,p}^{Sla}$	$Q_{cor1,p}^{St}$	$Q_{max,p}^{Sla}$	$Q_{cor1,p}^{Bog}$	$Q_{cor2,p}^{St}$	$Q_{max,p}^{St}$	$Q_{cor2,p}^{Bog}$	$Q_{cor2,p}^{Sla}$
0.1	10799	10000	1450	12940	6000	1340	4611	6600	10200
1.0	9172	8600	1000	10869	5000	1200	3847	4650	8500
2.0	8650	8100	910	10236	4650	1160	3598	4000	7900
5.0	7918	7500	900	9374	4500	1110	3248	3630	7100

Tabela 7. Prikaz merodavnih protoka za različite verovatnoće koincidencije velikih voda Dunava i reke Tise kopula metodom

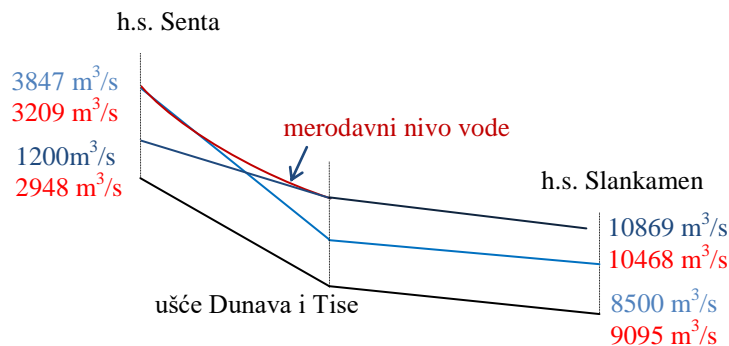
Table 7. Design flood flows for different probabilities of coincidence of the Danube and the Tisa according to copulas

p%	h.s. Bogojevo			h.s. Slankamen			h.s. Senta		
	$Q_{max,p}^{Bog}$	$Q_{odg1,p}^{Sla}$	$Q_{cor1,p}^{St}$	$Q_{max,p}^{Sla}$	$Q_{cor1,p}^{Bog}$	$Q_{cor2,p}^{St}$	$Q_{max,p}^{St}$	$Q_{cor2,p}^{Bog}$	$Q_{cor2,p}^{Sla}$
0.1	8828	10078	3794	11893	10784	3955	3880	7057	9977
1.0	7990	9028	2735	10468	8871	2948	3209	6202	9095
2.0	7804	8543	2269	9916	8244	2615	2947	5998	8839
5.0	7261	8106	1792	9288	7011	1695	2842	5068	7885



Slika 14. Prikaz merodavnih maksimalnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog ogledala duž reke Dunav na razmatranom sektoru

Figure 14. Design maximum flows with 100 yr. return period at considered Danube River reach



Slika 15. Prikaz merodavnih maksimalnih protoka za proračun stogodišnjeg nivoa vodnog ogledala na širem sektoru ušća Tise u Dunav

Figure 15. Design maximum flows with 100 yr. return period in the extended area of the confluence of the Danube and the Tisa



## 5 Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da postoji statistički značajna koincidencija između razmatranih kombinacija maksimalnih protoka Dunava na h.s. Bogojevo i maksimalnih i odgovarajućih protoka reke Tise na h. s. Senta. Isti zaključak se može izvesti i za slučaj razmatranih kombinacija protoka reke Dunav na h.s. Slankamen i reke Tise na h. s. Senta (Tabela 4). Izuzetak predstavlja kombinacija maksimalnog godišnjeg protoka na h.s. Slankamen i odgovarajućeg protoka na h.s. Senta.

Ocenjuje se da se posmatranim uzorcima najbolje prilagođava Gumbelova kopula osim u slučaju kombinacija sa maksimalnim godišnjim protocima na h.s. Senta na Tisi i odgovarajućih protoka na Dunavu na oba hidrološka profila. U tom slučaju se uzorku najbolje prilagođava Frankova kopula.

Analizom rezultata računskih protoka prikazanim u tabelama 6 i 7 može se konstatovati da drastične razlike u kombinacijama vrednosti promenljivih postoje kada su odgovarajući protoci u pitanju, a najviše kada su odgovarajući protoci na pritoci u pitanju pri maksimalnim vodama uzvodno i nizvodno od ušća.

Merodavni računski protoci za dimenzionisanje sistema za zaštitu od poplava uzvodno od ušća reke Tise u reku Dunav bili bi identični onima koji su dobijeni na konvencionalan način. Značajne izmene u graničnim uslovima i merodavnim protocima se konstatuju na deonici koja obuhvata ušće i deonici pritoke uzvodno od ušća u recipijent (Slike 14 i 15).

Definisane zavisnosti predstavljene u poglavlju 4 pokazuju da je neminovnost napustiti konvencionalni pristup određivanja merodavnih velikih voda za dimenzionisanje sistema za zaštitu od poplava, na sektoru reka sa pritokama, na osnovu jednodimenzionalnih verovatnoća pojave maksimalnih godišnjih protoka na hidrološkim stanicama. Analizom je pokazano da su vrednosti dobijene posmatrajući poplavu u zoni ušća reke i njene pritoke niže, što je naznaka da ovaj još uve "teorijski pristup" može naći svoje mesto u projektovanju ekonomičnijih objekata čime bi se ostavilo dovoljno prostora za neinvesticione mere zaštite od poplava kojima se sve više pridaje značaj. Nezaobilazno je posmatranje poplave kao složenog fenomena uz analizu ostalih karakteristika poplavnih talasa (npr. zapreminu), njihovih odnosa u višedimenzionalnom prostoru.

## Zahvalnica

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2016. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

## Literatura

1. Abramowitz M., Stegun A. I. (1972) *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, Dover Publications, INC., New York
2. Bender J., Wahl T., Muller A., Jensen J. (2016) A multivariate design framework for river confluences, *Hydrological Sciences Journal*, 61:3, 471-482
3. Hosking J. R. M. (1990) L-moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics, *Journal of Royal Statistical Society*, Vol. 52, No. 1, pp. 105-124
4. Nelsen R. B. (2006) *An introduction to copulas. Lecture notes in statistics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Springer
5. Prohaska S., Marjanović N., Čabrić M. (1978) *Dvoparametarsko definisanje velikih voda*, Vode Vojvodine, Novi Sad
6. Prohaska S., Petković T. (1989) Metode za proračun velikih voda, Deo I, Proračun velikih voda na hidrološki izučanim profilima, *Građevinski calendar 89*, Beograd.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

7. Prohaska S et al. (1999) Concidence of Flood Flow of the Danube River and its Tributary, *The Danube and its Basin – A Hydrological Monograph*, Follow-up volume IV, Regional Cooperation of the Danube Countries in the Frame of the International Hydrological Programme of UNESCO, Bratislava.
8. Prohaska S., Ilic A. (2010) *Coincidence of Flood Flow of the Danube River and Its Tributaries*, (In: Mitja Brilly (Ed.): *Hydrological Processes of the Danube River Basin - Perspectives from the Danubian Countries*), Publisher: Springer, ISBN 978-90-481-3422-9, Book Chapter 6, p. 175-226. DOI: 10.1007/978-90-481-3423-6\_6
9. Schmidt T. (2006) Coping with Copulas, *Forthcoming in Risk Books “Copulas- From Theory to Applications in Finance”*, Department of mathematics, university of Leipzig
10. Yevjevich V. ( 1972) *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, Colo. U.S.A

## Uticaj dužine osmotrenih nizova na stohastičko generisanje vremenskih serija na više hidroloških stanica

Đurica Marković<sup>1</sup>, Jasna Plavšić<sup>2</sup>

APSTRAKT: U radu je prikazana komparativna analiza vremenskih serija generisanih na osnovu različitih dužina ulaznih nizova osmotrenih podataka. Generisanje vremenskih serija je izvršeno modelom za generisanje stacionarnih hidroloških vremenskih serija na više mernih stanica korišćenjem logaritamski transformisanih podataka, koji je razvijen na osnovu metodologiji Ilich-a (2009). Korišćeni su podaci o nedeljnim protocima sa hidroloških stanica na slivu reke Oldman u Kanadi, dužine 90 godina. Kao ulazni podaci za generisanje formirani su nizovi podataka osmatranja dužina 90, 45 i 30 godina. Poređenje tako dobijenih generisanih serija je izvršeno prema sledećim parametrima: 1) srednja vrednost, standardna devijacija, koeficijent asimetrije i nedeljne raspodele; 2) srednji godišnji protoci, i godišnje raspodele; 3) koeficijenti autokorelacije, kroskorelacije, korelacija na krajevima i počecima godina, sve na nivou nedeljnih podataka, i 4) autokorelacija godišnjih nizova. Rezultati su pokazali da dužina ulaznog niza ne utiče na kvalitet reprodukcije karakteristika osmotrenih nizova pri generisanju, kao i da kratki segmenti generisanog niza od 1000 godina dobro reprodukuju osnovne statistike i korelacionu strukturu osmotrenih podataka.

Ključne reči: generisanje vremenskih serija, korelacija, statistike nizova, dužina niza

## Effect of the observed record lengths on multi-site stochastic generation of hydrologic time series

ABSTRACT: The paper presents comparative analysis of simulated hydrologic time series obtained from the observed data sets of different lengths. Generation of time series is performed by using the stochastic generation model for simulating stationary hydrologic time series at multiple sites with logarithmically transformed data, developed upon the methodology of Ilich (2009). The 90-year record of weekly streamflows at seven hydrologic stations in the Oldman River basin in Canada is used in the study. The observed subsets of 30, 45, and 90 years are used as the input data for the stochastic generation. The data simulated from these subsets are compared by comparing the following parameters: 1) means, standard deviations, skews and empirical distributions of the streamflows for each week, 2) mean annual flows and annual flow distributions, 3) autocorrelation and cross-correlation coefficients between the weeks within year and for the year-to-year transition, 4) autocorrelation of annual flows. The results show that the observed input subset size does not affect the quality of reproducing the characteristics of the observed data in the generation process, and that the short subsets of the simulated 1000-year data set can also reproduce well the main statistics and correlation structure of the observed data.

Keywords: time series generation, correlation, series statistics, record length

<sup>1</sup> Doc. dr Đurica Marković, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini sa sedištem u Kosovskoj Mitrovici, [djuricam@gmail.com](mailto:djuricam@gmail.com)

<sup>2</sup> Dr Jasna Plavšić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, [jplavsic@grf.bg.ac.rs](mailto:jplavsic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvodna razmatranja

Poznata je činjenica da je trend smanjenja vode kao resursa posledica neprestanog i uvećanog zagađenja. Pored toga, uticaj klimatskih promena koje utiču na uvećanu prostornu i vremensku neravnomernost pojave vode kao resursa. Spomenuti uticaji dovode do većeg pridavanja važnosti maksimalnom iskorišćenju vodnih resursa, što znači da korisnici kao što su vodosnabdevanje, poljoprivreda, energetika ili turizam uz optimalno upravljanje akumulacijama mogu da dobiju maksimalnu obezbeđenost u odnosu na unapred određene parametre.

Raspoloživi nizovi osmatranja protoka su najčešće nedovoljni za pouzdano planiranje i upravljanje akumulacijama. Zato se kao osnova za određivanje optimalne zapremine akumulacije, određivanje optimalnih pravila upravljanja raspodelom vode i sl., koriste generisane hidrološke serije. Od sintetičkih serija se zahteva da imaju statističke osobine koje se ne razlikuju od osmotrenih, kao što su srednja vrednost, standardna devijacija, korelacije i sl. Osnovna ideja generisanja sintetičkih nizova je da se vodoprivredni sistem testira pod različitim uslovima, sa mnogo dužim nizovima protoka nego što su osmotreni. Pri tome se pretpostavlja da će duži nizovi protoka sadržati ekstremnije protoke od osmotrenih i na taj način će se testirati sistem pod strožim uslovima (Lawrance & Kottegoda, 1977). Pored izraženijih ekstremnih pojava, u dovoljno dugim generisanim serijama mogu da se očekuju i uzastopni nizovi sušnih i vodnih godina, što bi dalo mogućnost u planiranju da se na takve događaje odgovori optimalnim upravljanjem koje će zadovoljiti potrebe svih korisnika sa određenom obezbeđenošću.

Rezultat generisanja hidroloških vremenskih serija treba da budu serije podataka koje zadržavaju statističke karakteristike i korelacionu strukturu osmotrenih vremenskih serija. Klasičan pristup za ovo generisanje je primena modela vremenskih serija zasnovanih na Boks-Dženkins pristupu (Box and Jenkins 1976), kao što su autoregresivni procesi i procesi pokretnih sredina (tzv. ARMA modeli).

U novije vreme, za generisanje hidroloških vremenskih serija koriste se i neparametarski modeli koji se temelje na osmotrenim podacima bez formiranja analitičkog modela. Među neparametarskim pristupima za generisanje hidroloških vremenskih serija, nedavno se pojavila metodologija koju je predložio Ilić (Ilich & Despotovic, 2008; Ilich, 2009, 2014), a zasniva se na postizanju željene korelacione strukture nizova preslaganjem matrica generisanih slučajnih podataka. Ova metodologija pruža velike mogućnosti za dalji razvoj u ovoj oblasti.

Na osnovu spomenute metodologije Ilića, autori su razvili model za generisanje vremenskih serija na više stanica koji je sposoban da generiše više promenljivih istovremeno (npr. protoci, padavine, temperatura, i sl.) i da pritom zadrži sve statistike osmotrenih serija i njihovu korelacionu strukturu. Metodologija je razvijena u okviru doktorske disertacije Markovića (2016), i publikovana u međunarodnom časopisu (Marković et al, 2015).

Jedna od karakteristika postojećih pristupa za generisanje vremenskih serija jeste da se najčešće generiše veliki broj nizova jednake dužine kao osmotrena serija, podešavanjem statistika i korelacione strukture serija, a zatim se vrši poređenje statistika svih dobijenih serija sa osmotrenom. Za razliku od spomenutog pristupa, razvijeni model generiše nizove unapred definisane dužine (npr. 1000 godina) sa odgovarajućim statistikama, a zatim se dobijenim nizovima podešava korelaciona struktura. Na kraju, vrši se podešavanje korelacije podataka na prelazu iz godine u godinu, kao i autokorelacija godišnjih vrednosti. Cilj ovog rada je da utvrdi uticaj dužine osmotrenih nizova na sposobnost modela da u generisanim nizovima reprodukuje karakteristike osmotrene serije.

## 2 Prikaz modela i metodologije

Uspešan model za generisanje hidroloških veličina treba da zadovolji sledeće karakteristike (Ilich & Despotovic, 2008):

- Serije podataka o protocima moraju predstavljati prirodne protoke.
- Osmotrene serije podataka predstavljaju stacionarne vremenske serije.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Delovi osmotrene serije koju čine podaci za izabrani vremenski korak modela (mesec, nedelja ili dan) imaju jedinstvenu raspodelu verovatnoće prema kojoj treba uskladiti generisanu seriju. Ova funkcija raspodele može biti predstavljena nekom od poznatih teorijskih funkcija raspodele koja se dobro prilagođava podacima, ili korišćenjem neparametarskih raspodela.
- Generisana serija treba da zadrži osnovne statističke karakteristike osmotrene serije, kao što su srednja vrednost, standardna devijacija i koeficijent asimetrije za svaku promenljivu na nivou izabranog vremenskog koraka (mesec, nedelja ili dan);
- Generisane serije treba da imaju korelacionu strukturu koja odgovara osmotrenoj autokorelaciji i kroskorelaciji;
- Godišnje statistike osmotrene serije, tj. srednja vrednost, standardna devijacija, koeficijent varijacije, koeficijent asimetrije, autokorelacija i kroskorelacija godišnjih vrednosti, treba da budu reprodukovane u generisanim serijama.

Pored spomenutih zahteva, trebalo bi dodati i da se teži ka automatizaciji proračuna karakteristika modela za generisanje. Primena neparametarskih metoda u modelu omogućava potpunu automatizaciju i donosi još poboljšanja u odnosu na parametarske metode, koje se uobičajeno koriste u hidrologiji.

Model za neparametarsko generisanje hidrometeoroloških nizova koji su razvili Marković i ostali (Marković et al. 2015) zasnovan je na modelu Ilića (Ilich & Despotovic, 2008; Ilich, 2009; 2014). Ovim modelom se reprodukuju osnovne statistike osmotrenih veličina, njihova prostorna i vremenska zavisnost obezbeđujući iste rezultate na različitim vremenskim koracima istovremeno. Ovom metodologijom je moguće dobiti podjednako dobre rezultate nezavisno od vremenskog koraka (dnevni, nedeljni, mesečni ili sezonski), zadržavajući sve parametre osmotrenih podataka. Pored toga, predložena metodologija se može smatrati opštom jer ne zavisi od tipa podataka. Metoda je neparametarska jer se ne moraju ocenjivati parametri za svaku razmatranu veličinu, kao kod modela vremenskih serija u Boks-Dženkins pristupu. Takođe, metoda veoma dobro reprodukuje autokorelacionu strukturu osmotrenih veličina, u opštem slučaju do bilo kog reda, a praktično do reda koji ima smisla (do preporučenih  $n/4$ ) (Box and Jenkins 1976). Uz autokorelacionu strukturu, generisani nizovi zadržavaju i kros-korelaciju između stanica i različitih veličina sadržanu u osmotrenim podacima. Sve statistike i zavisnosti među podacima osmotrenih serija zadržavaju se u generisanim serijama vremenskim korakom za koji je vršeno generisanje (npr. mesečni podaci), ali i na godišnjem nivou, uz zadržanu autokorelaciju između početaka godine sa krajevima prethodne godine. Na ovaj način generisani nizovi mogu dobro poslužiti u razmatranjima planiranja i upravljanja akumulacijama sa višegodišnjim izravnanjem.

Prema tome, model može da generiše podatke na više mernih mesta, sa više promenljivih hidroloških veličina, i za više vremenskih koraka (*multi-site, multi-variate, multi-temporal methodology*).

Metod generisanja hidroloških serija se sastoji iz tri osnovna koraka:

**Korak 1:** generisanje nezavisnih nizova (nizova slučajnih brojeva) uz reprodukciju raspodela osmotrenih veličina za usvojenu vremensku diskretizaciju (dnevni, nedeljni, mesečni podaci). Za ovaj korak koristi se Monte Karlo pristup za dobijanje slučajnih brojeva, koji se onda usvojenom inverznom raspodelom „prevode“ u odgovarajuću vrednost date veličine. Nizovi dobijeni na ovaj način su slučajni i ne sadrže nikakvu autokorelaciju, niti kros-korelaciju između nizova.

**Korak 2:** postizanje željene korelacione strukture u generisanim nezavisnim nizovima, uključujući i autokorelaciju i kros-korelaciju između nizova sa izabranom vremenskom diskretizacijom. U ovom koraku se koriste permutacije elemenata u parcijalnim nizovima, koja se izvode prema algoritmu Imana i Konovera (Iman & Conover, 1982). Pored toga, model obezbeđuje da srednji godišnji protoci generisanih nizova imaju ekstremnije vrednosti srednjih godišnjih protoka od osmotrenih nizova. Na kraju ovog koraka, generisani nizovi imaju potpunu korelacionu strukturu sadržanu u osmotrenim nizovima i statistike osmotrenih nizova na godišnjem nivou.

**Korak 3:** postizanje korelacione strukture za agregirane nizove na godišnjem nivou i povezivanje elemenata na kraju prethodne godine sa početkom tekuće godine. U ovom koraku koriste se permutacije već složenih godina tako da se minimizuju razlike kvadrata koeficijenata autokorelacije osmotrenih i generisanih godišnjih vrednosti, i koeficijenata autokorelacije osmotrenih i generisanih vrednosti sa kraja tekuće i početka sledeće godine. U okviru ovog koraka podešava se i višegodišnje ponašanje osmotrenih serija u pogledu cikličnog smenjivanja sušnih i vodnih perioda, dovodeći raspored godišnjih vrednosti u redosled koji ne remeti postignutu korelacionu strukturu a postiže dugogodišnje usklađivanje generisanih i osmotrenih serija.

Navedene karakteristike modela, zatim činjenica da su raspoloživi nizovi najčešće nedovoljni za pouzdano planiranje i upravljanje akumulacijama, i na kraju i rezultati koji su dobijeni modelom na osnovu osmotrenih podataka dužine 50 i 90 godina, navelo je autore da sprovedu istraživanje o kvalitetu generisanih hidroloških vremenskih serija iz osmotrenih serija manjih dužina, u odnosu na serije dobijene iz osmotrene serije dužine 90 godina.

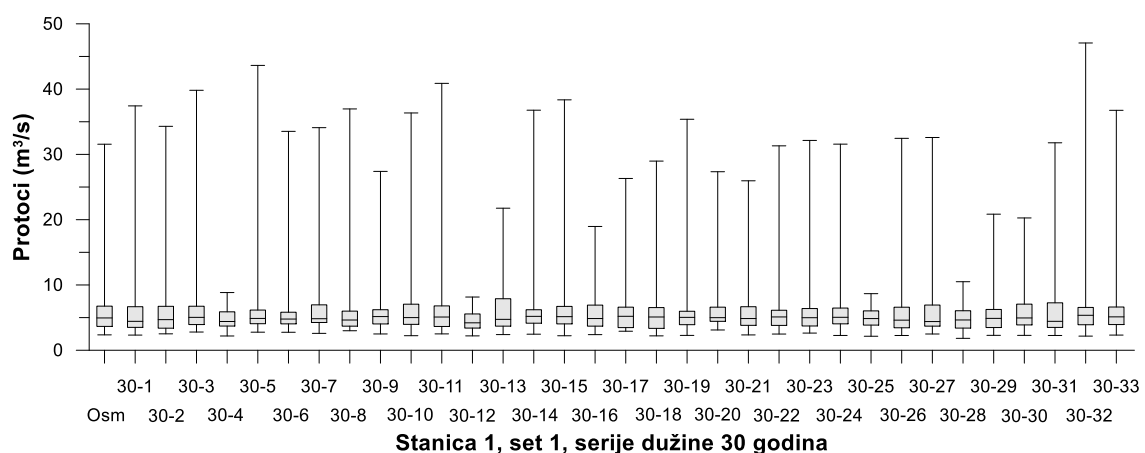
Osnovna hipoteza ovog istraživanja je da se pokaže da li je moguće generisanje hidroloških vremenskih serija iz kratkih nizova korišćenjem opisanog modela, tako da generisane vremenske serije na osnovu kraćih nizova budu jednakog kvaliteta kao i serije dobijene na osnovu niza dužine 90 godina. Za te potrebe, formirano je tri grupe ulaznih podataka: 1) osmotreni niz dužine 90 godina, 2) dva osmotrena niza dužine 45 godina i 3) tri osmotrena niza dužine 30 godina. Za svaki od ovih 6 ulaznih nizova je izvršeno generisanje 1000-godišnjih vremenskih serija hidroloških podataka. Zatim su generisane serije izdvojene na dužine ulaznih serija (90, 45 i 30), a onda su za svaku od tih serija kontrolisane statistike, korelaciona struktura i dugoročne karakteristike.

### 3 Prikaz rezultata na odabranom primeru

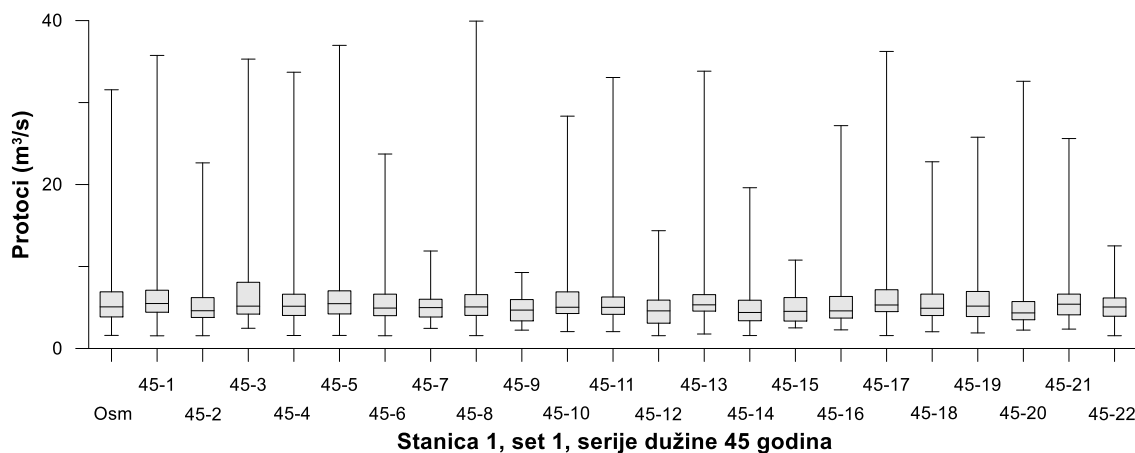
Za potrebe ovog istraživanja korišćeni su podaci o protocima sa sedam hidroloških stanica u slivu reke St. Marry, Kanada. Dužina osmotrenih nizova je 90 godina, a razmatrani vremenski korak je nedeljni.

Zbog velikog broja rezultata, prikaz u radu je ograničen na jednu hidrološku stanicu i priloženi su samo odabrani rezultati kojima se dokazuju polazne hipoteze.

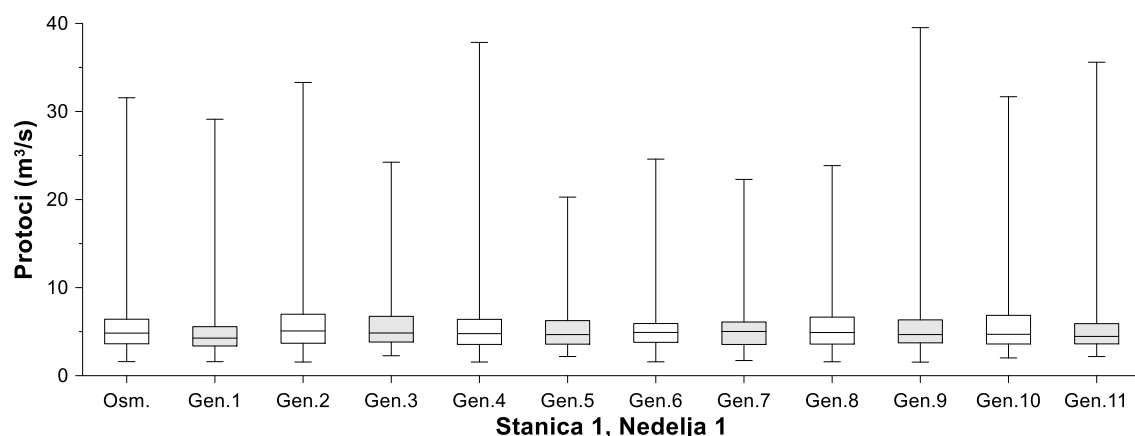
Na slici 1 je dat box-plot prikaz raspodela nedeljnih protoka osmotrene i 33 generisane serije dužine 30 godina, za 1. nedelju na stanici 1 i 1. set podataka od 30 godina. Na dijagramu se može videti raznolikost maksimalnih vrednosti protoka, ujednačenost vrednosti medijane i manjih odstupanja gornjih kvartila, što uz ujednačenu srednju vrednost serija ukazuje na dobru reprodukciju osmotrene serije.



Slika 1 – Box-plots dijagram nedeljnih raspodela protoka osmotrene i generisanih serija dužine 30 godina za stanicu 1 i nedelju 1



Slika 2 – Box-plots dijagram nedeljnih raspodela protoka osmotrene i generisanih serija dužine 45 godina za stanicu 1 i nedelju 1



Slika 3 – Box-plots dijagram nedeljnih raspodela protoka osmotrene i generisanih serija dužine 90 godina za stanicu 1 i nedelju 1

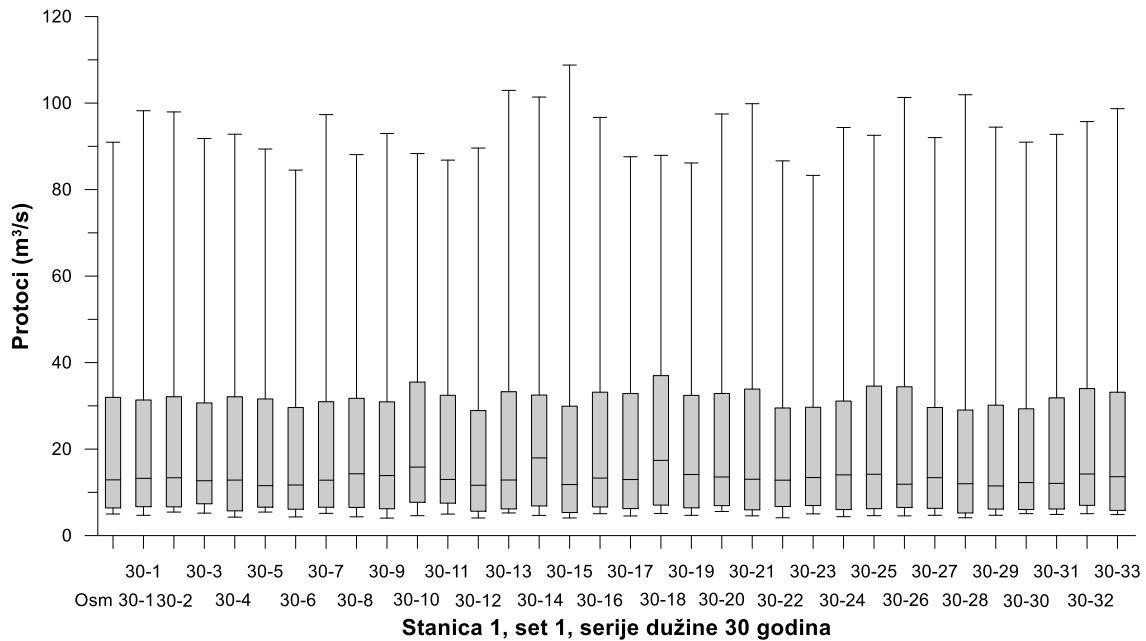
Slika 2 i 3 su box-plot prikazi raspodela nedeljnih protoka osmotrene i generisanih serija dužine 45 i 90 godina, za 1. nedelju na stanici 1, čime se pokazuje da nezavisno od dužine osmotrenih nizova, generisane serije odgovarajuće dužine pokazuju dobru reprodukciju. Pri tome generisane serije imaju i vodnije i malovodnije segmente, koji su bitni za razmatranja pouzdanog planiranja i upravljanja akumulacijama.

Slični rezultati se dobijaju i za druge nedelje u godini. Na slikama 4,5 i 6 a) su dati box-plot prikazi srednjih vrednosti nedeljnih protoka u osmotrenim i odgovarajućim generisanim serijama (dužine 30, 45 i 90 godina), za stanicu 1. Kako jedan box-plot prikazuje srednje vrednosti za sve nedelje, može se videti da su dijagrami poprilično ujednačeni za sve generisane serije podataka, što svakako ukazuje na dobru reprodukciju osmotrenih serija. Slično se može reći i za slaganje standardnih devijacija. Na slici 6 b) je dat box-plot prikaz standardnih devijacija nedeljnih protoka u svakoj generisanoj seriji dužine 90 godina, gde se vidi da vrednosti standardnih devijacija generisanih serija ne odstupaju od vrednosti osmotrene serije.

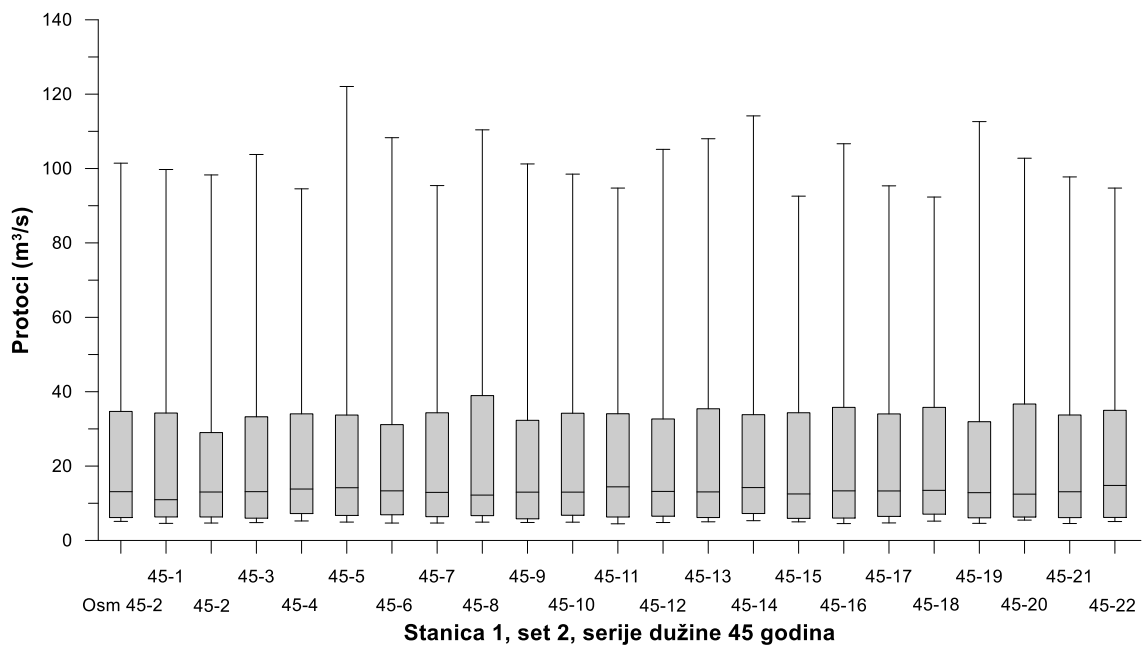
U ovom delu treba spomenuti da je vreme potrebno da se dobiju generisane serije veće kada su serije ulaznih podataka kraće, što je posledica težeg postizanja uslova reprodukcije srednje vrednosti i asimetrije u nizovima u slučaju pojave izuzetaka, što je kod dužih nizova ujednačenije, pa model brže generiše zahtevane serije.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

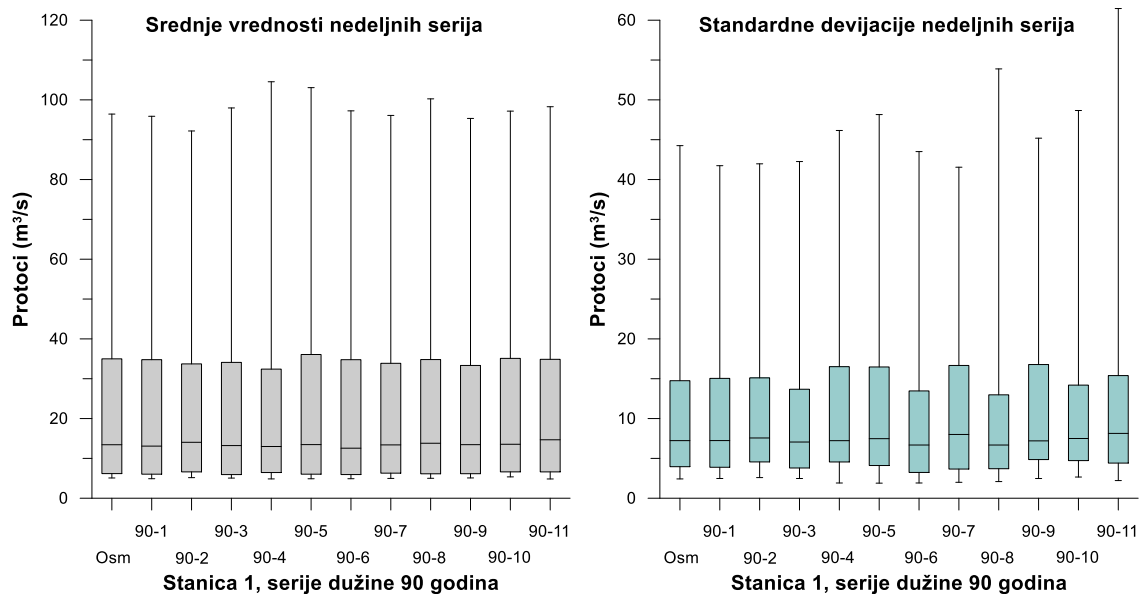


Slika 4 – Box-plots dijagram raspodela protoka nedeljnih srednjih vrednosti osmotrene i generisanih serija dužine 30 godina, set 1, za stanicu 1

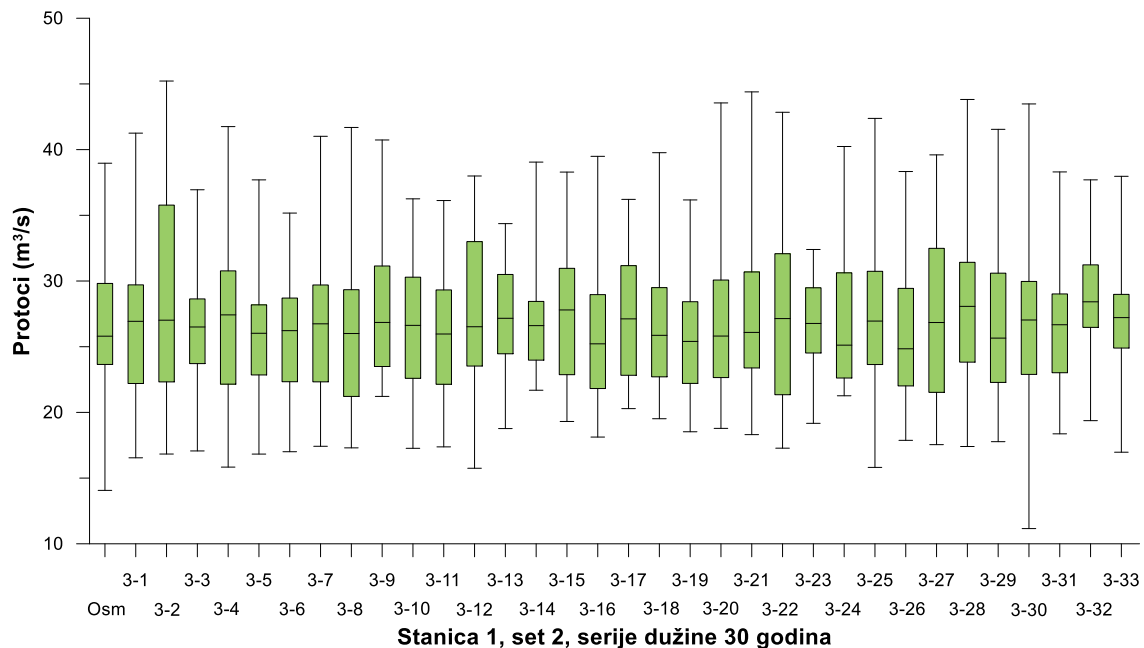


Slika 5 – Box-plots dijagram raspodela protoka nedeljnih srednjih vrednosti osmotrene i generisanih serija dužine 45 godina, set 2, za stanicu 1





Slika 6 – Box-plots dijagram raspodela protoka a) nedeljnih srednjih vrednosti i b) standardnih devijacija za osmotrenu i generisane serije dužine 90 godina

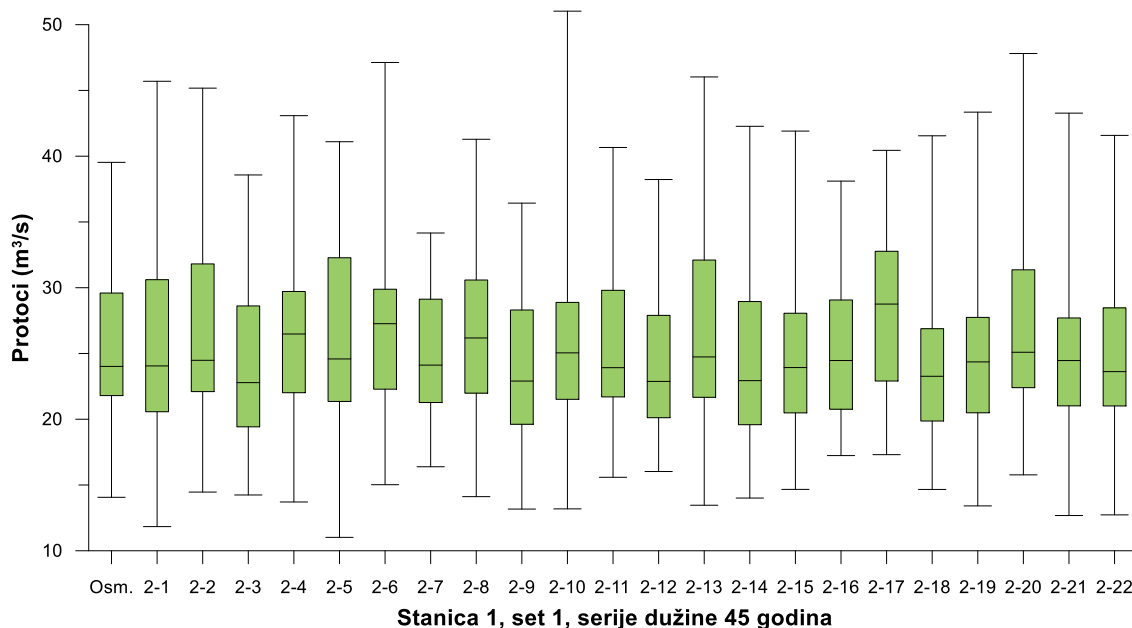


Slika 7 – Box-plots dijagram raspodela protoka srednjih godišnjih vrednosti osmotrene i generisanih serija dužine 30 godina, set 2, za stanicu 1

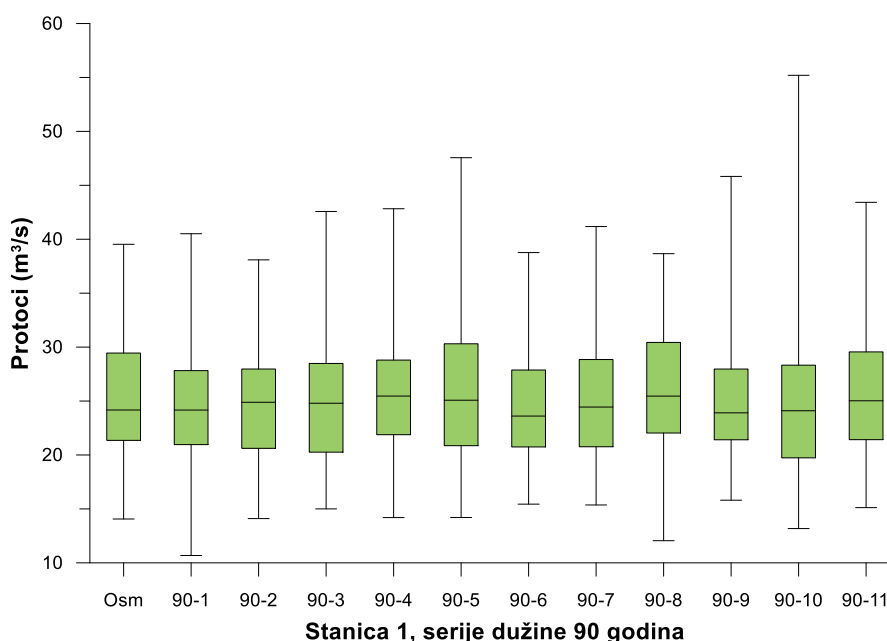
Pored statistika na nedeljnom nivou, kao rezultati modela se sagledavaju i upoređuju statistike srednjih godišnjih vrednosti, kao i njihove raspodele. Na slikama 7-9 su dati box-plot dijagrami raspodela srednjih godišnjih protoka osmotrene i generisanih serija (dužina 30, 45 i 90 godina), za stanicu 1. Analizirajući prikazane dijagrame može se zaključiti da su i godišnji podaci podjednako dobro reprodukovani, obuhvatajući i ekstremnije vrednosti od onih koje su osmotrene, što je i jedna od pretpostavki za primenu modela. Nezavisno od dužine osmotrenih nizova, rezultati godišnjih srednjih vrednosti su ujednačeni i dobro reprodukovani.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 8 – Box-plots dijagram raspodela protoka srednjih godišnjih vrednosti osmotrene i generisanih serija dužine 45 godina, set 1, za stanicu 1



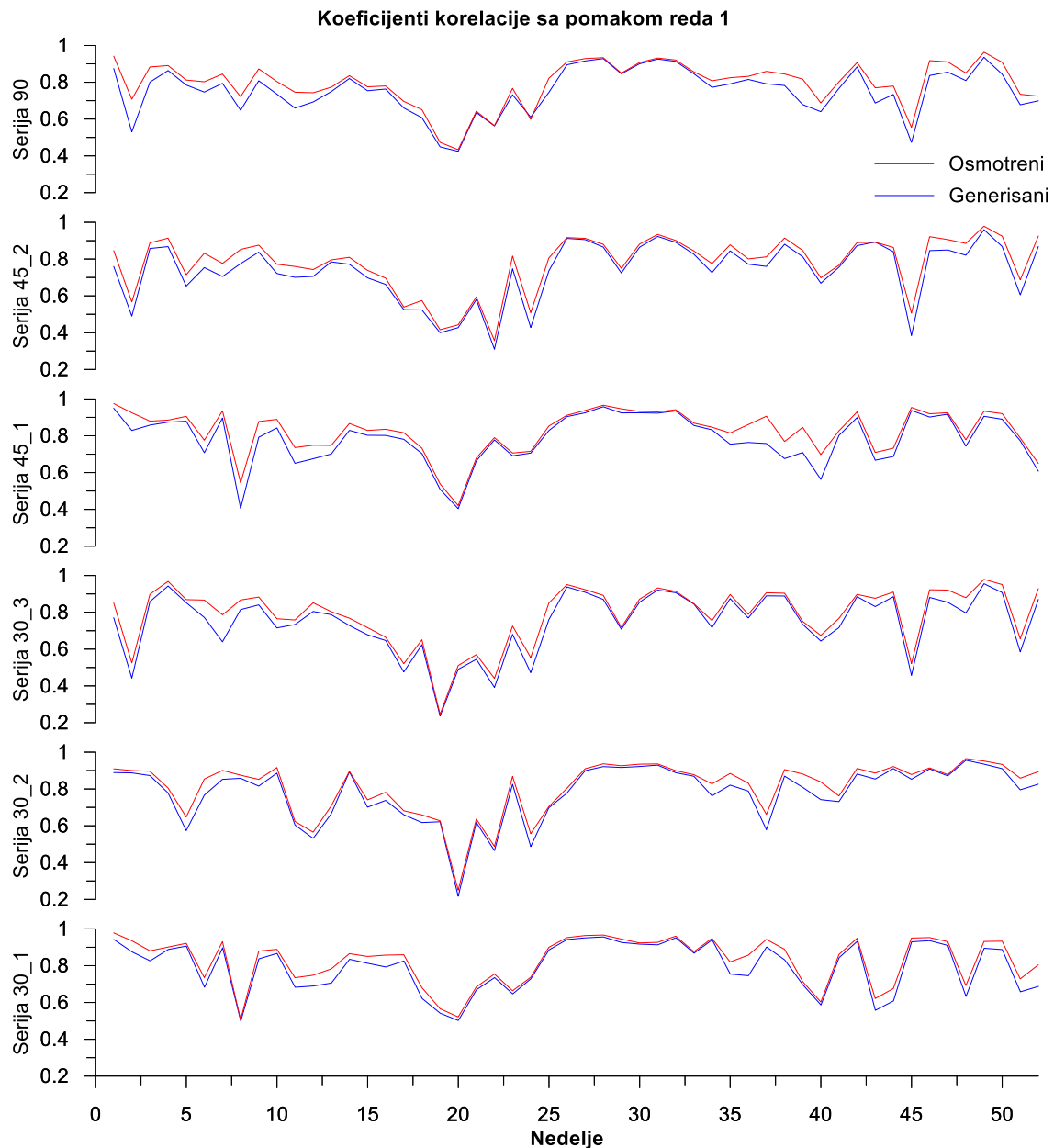
Slika 9 – Box-plots dijagram raspodela protoka srednjih godišnjih vrednosti osmotrene i generisanih serija dužine 90 godina

Pored statistika, na nedeljnom i godišnjem nivou, model treba da obezbedi dobru reprodukciju korelacije podataka na nedeljnom nivou, njihovu kros-korelaciju kao i autokorelaciju srednjih godišnjih vrednosti protoka, čime bi bila potpuno preslikana i korelaciona struktura osmotrenih podataka.

Na slici 10 su dati dijagrami korelacija nedeljnih serija sa pomakom 1, za stanicu 1 za svih 6 setova ulaznih podataka. Kako se sa dijagrama može videti, korelacije osmotrenih podataka su potpuno reprodukovane u generisanim serijama bez uticaja dužine ulaznih nizova na kvalitet rezultujućih korelacionih karakteristika.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

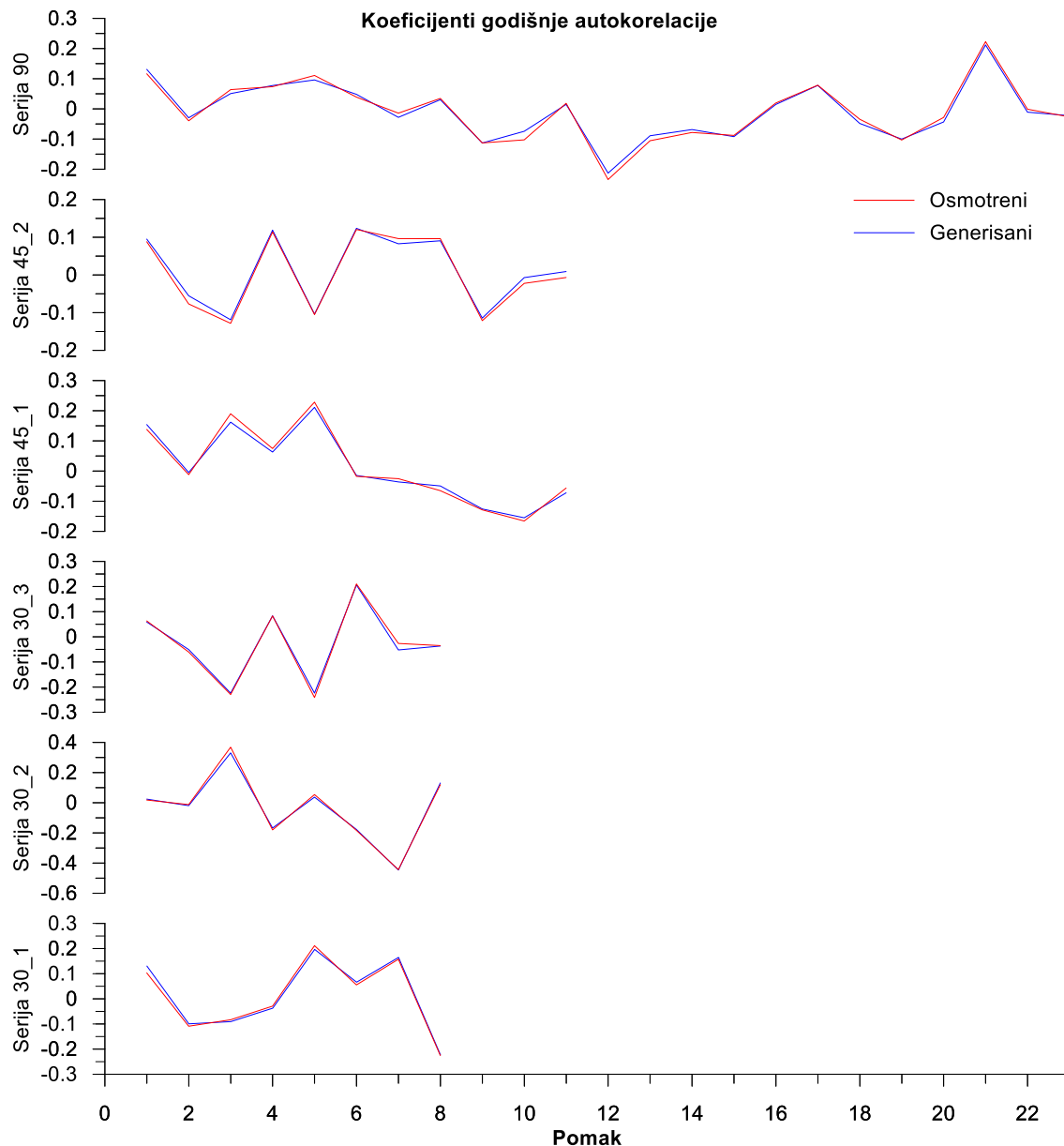


Slika 10 – Dijagrami koeficijenata korelacije nedeljnih serija sa pomakom reda 1 za osmotrene i generisane serije za svih 6 setova podataka, za stanicu 1

Dijagrami na slici 11 predstavljaju autokorelaciju godišnjih protoka, za stanicu 1 za svih 6 setova ulaznih podataka. Dijagrami za različite dužina nizova imaju prikaz autokorelacije do reda koji ima smisla (do preporučenih  $n/4$ ) (Box and Jenkins 1976). Autokorelacije godišnjih protoka generisanih serija potpuno oslikavaju autokorelacije osmotrenih serija bez uticaja dužine ulaznih nizova na kvalitet rezultata.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

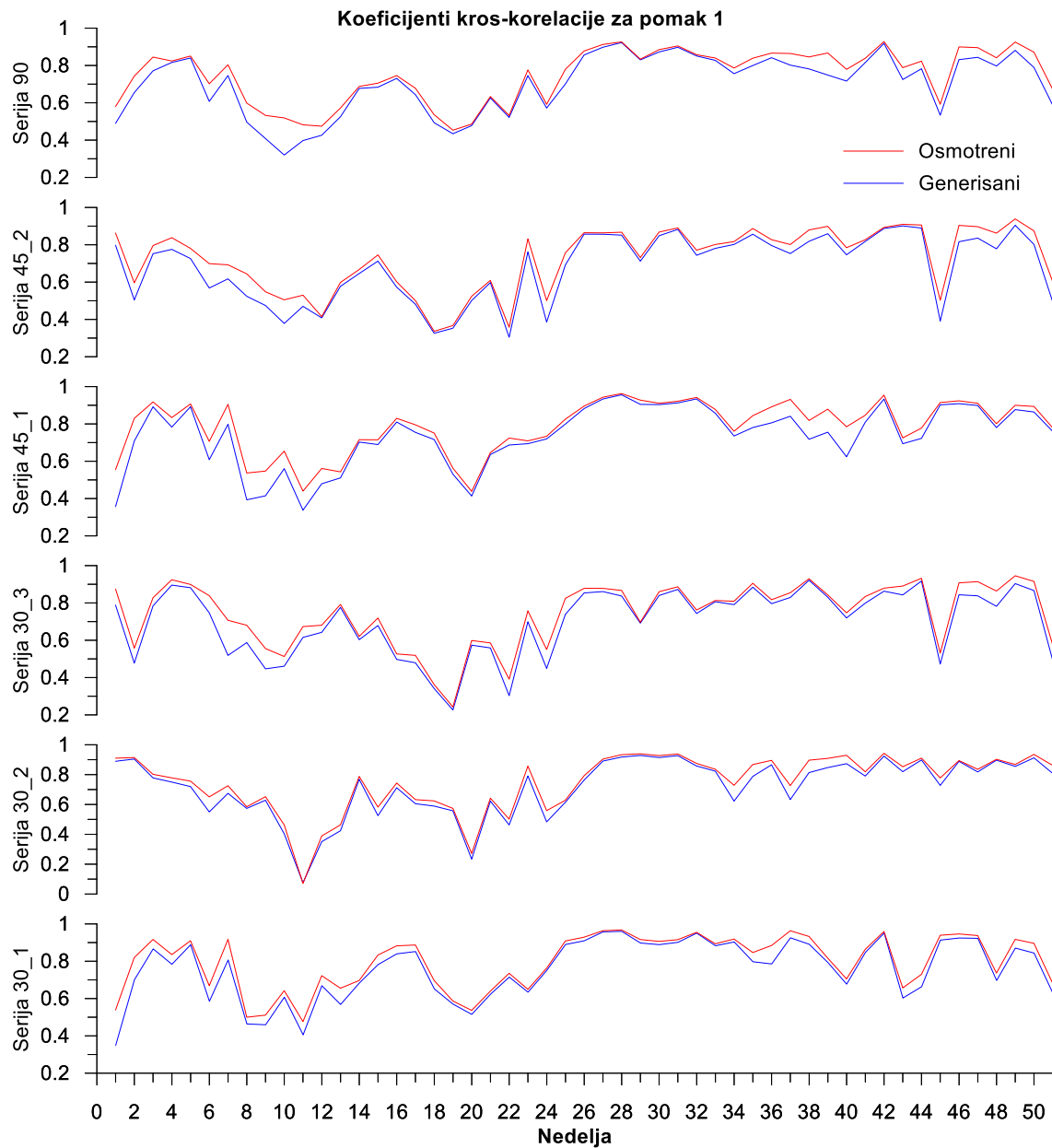


Slika 11 – Dijagrami koeficijenata godišnje autokorelacije osmotrene i generisane serije za svih 6 setova podataka, za stanicu 1

Kao treća karakteristika korelacione strukture je kros-korelacija, koja je prikazana na dijagramima na slici 12 za svih 6 setova podataka. Dijagrami predstavljaju kros-korelaciju 1. nedelje na 1. stanici sa 1. nedeljom na 2. stanici, sa pomakom 1. kao i u prethodna dva slučaja i ovom kros-korelacijom je reprodukovana kompletna korelaciona struktura osmotrenih serija.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 12 – Dijagrami koeficijenta kros-korelacije nedeljnih serija sa stanice 1 i 2 za osmotrene i generisane serije za svih 6 setova podataka

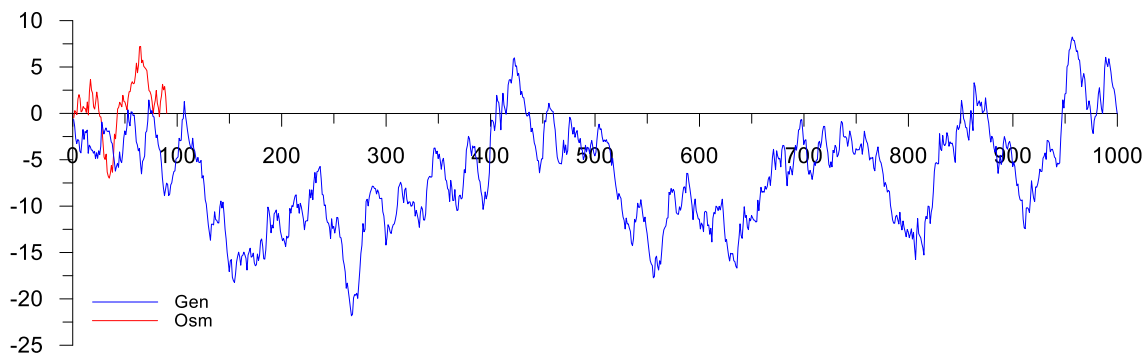
Na kraju su kontrolisane i dugoročne karakteristike serija, gde su prvo formirane modulne krive za svaku seriju podataka (osmotrene i generisane), prema sledećem obrascu:

$$S_i = S_{i-1} + \frac{x_i - x_{sr}}{\sigma}$$

Na slici 13. su prikazane modulna kriva osmotrene serije dužine 90 godina i modulna kriva odgovarajuće generisane 1000-godišnje serije. Jasno je da se njihove karakteristike ne mogu porediti jer i sami ne znamo kako se vremenske serije ponašaju u tako dugačkom periodu, ali svakako možemo da zaključimo da dugoročne karakteristike u serijama od 1000 godina nisu realne, jer se npr. javljaju sušniji periodi od 200 i više godina u kontinuitetu. Zbog toga su dalje poredene osmotrene serije sa segmentima generisanih serija, što je prikazano na slikama 14-16.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

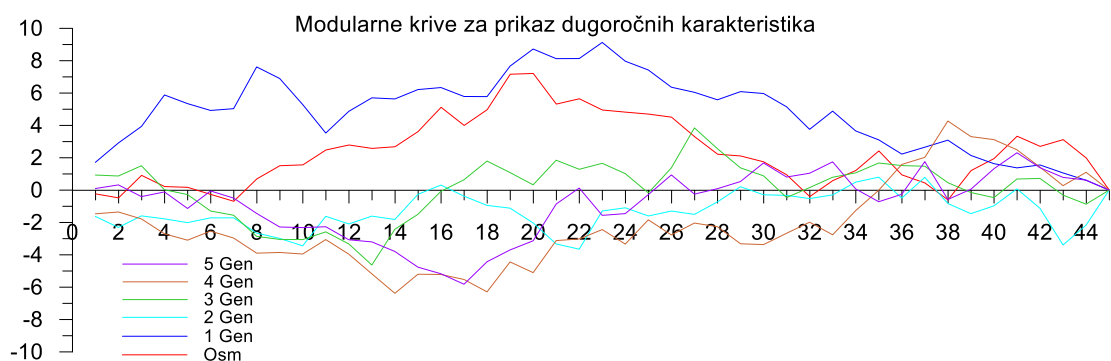
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 13 – Dijagram dugoročnih karakteristika preko modularne krive za osmotreni niz dužine 90 godina i generisani niz dužine 1000 godina, za stanicu 1



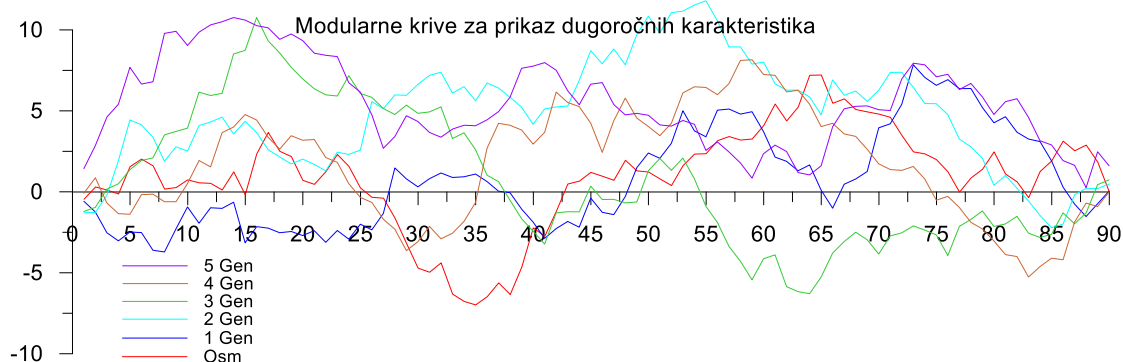
Slika 14 – Dijagram dugoročnih karakteristika preko modularne krive za osmotreni i prvih 5 generisanih nizova dužine 30 godina, set 1, stanica 1



Slika 15 – Dijagram dugoročnih karakteristika preko modularne krive za osmotreni i prvih 5 generisanih nizova dužine 45 godina, set 2, stanica 1

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 16 – Dijagram dugoročnih karakteristika preko modularne krive za osmotreni i prvih 5 generisanih nizova dužine 90 godina, stanica 1

Na slici 14 je dat prikaz dugoročnih karakteristika za osmotreni i prvih 5 generisanih nizova dužine 30 godina, set 1, stanica 1. Prikazano je samo 5 generisanih nizova iz razloga preglednosti. Sa slike se može uočiti da, za razliku od modulne krive 1000-godišnje generisane serije, modulne krive generisanih serija iste dužine kao i osmotreni niz imaju slične vrednosti maksimuma, minimuma, sličan broj prelaza iz vodnog u sušni period i obratno, kao i trajanje vodnih odnosno sušnih perioda. Na osnovu ovih karakteristika se može zaključiti da su i dugoročne karakteristike osmotrenih serija reprodukovane u sintetičkim vremenskim serijama.

Slični rezultati su dobijeni i za nizove dužina 45 i 90 godina, koji su prikazani na slikama 15 i 16, respektivno. Ovime su potvrđene polazne hipoteze da se model za neparametarsko generisanje stohastičkih vremenskih serija može koristiti za generisanje i u slučaju manjih dužina osmotrenih podataka, ali ipak uzimajući rezultate sa određenom rezervom, imajući u vidu i promenljivost samih osmotrenih nizova tokom vremena.

## 4 Zaključak

Važnost sintetičkih hidroloških serija u hidrotehnici je značajna. Takođe, činjenica je da raspoloživi nizovi najčešće nisu dovoljni za pouzdano planiranje i upravljanje akumulacijama. Zbog toga bi bilo značajno raspolagati nekim modelom koji je sposoban da izvrši generisanje dugačkih hidroloških vremenskih serija na osnovu osmotrenih nizova kratkog trajanja. Model za neparametarsko generisanje stohastičkih vremenskih serija (Marković et al, 2015; Marković, 2016) je korišćen za utvrđivanje mogućnosti da bude korišćen u slučajevima neophodnosti dobijanja dugih sintetičkih serija iz kratkih nizova. U tu svrhu, postavljene su sledeće hipoteze:

1. Moguće je generisanje iz osmotrenih kratkih nizova;
2. Generisanih 1000 godina se može podeliti na kraće segmente jednake dužini osmotrenog niza a da se pri tome ne gubi ništa od osnovnih karakteristika generisanih nizova;
3. Kako su dugoročne karakteristike iz osmotrenih serija neuporedive sa dugoročnim karakteristikama 1000-godišnjih nizova, podelom nizova u segmente dužina jednakih osmotrenim nizovima, dugoročne karakteristike su reprodukovane.

Korišćeni su podaci o protocima sa 7 hidroloških stanica na reci St.Marry u Kanadi, dužine 90 godina. Formirano je 6 setova osmotrenih podataka: 3 seta osmotrenih podataka dužine 30 godina, 2 seta dužine 45 godina i jedan set dužine 90 godina, a zatim je izvršeno generisanje nizova dužine 1000 godina. Nakon toga su generisani nizovi podeljeni u nizove jednake osmotrenim.

Na osnovu priloženih rezultata može se zaključiti da se modelom za neparametarsko generisanje stohastičkih vremenskih serija mogu uspešno generisati serije iz kratkih nizova, čije karakteristike ne

odstupaju od onih koje su dobijene generisanjem na osnovu dužih osmotrenih nizova, čime su potvrđene prve dve hipoteze.

Računsko vreme potrebno za generisanje serija je veće za kraće serije ulaznih podataka zbog težeg ispunjavanja kriterijuma za slaganje karakteristika osmotrenih i generisanih serija kada se u nizovima pojave izuzetno male ili velike vrednosti. Kod dužih nizova vrednosti su ujednačenije, tj. manje je neuobičajenih vrednosti, pa model brže ispunjava postavljene kriterijume.

Dugoročne karakteristike generisanih nizova, posle podele u segmente, posmatrane kroz modulne krive, odgovaraju dugoročnim karakteristikama osmotrenih nizova u pogledu pojave maksimalnih vrednosti i broja presecanja nulte linije. Međutim, prikazom 1.000-godišnje serije, nezavisno od seta podataka iz kojih je generisana, uviđa se da dolazi do pojava i više od 200-godišnjih sušnih perioda, što su nerealne vrednosti, koje se ne uočavaju na osmotrenim nizovima dužine 90 godina. Ovi rezultati su uočeni tokom izrade disertacije (Marković, 2016), gde je predložen model za preslaganje segmenata godišnjih podataka, čime bi se podesile dugoročne karakteristike vremenskih serija, kao što su dužine trajanja vodnih i malovodnih perioda, njihovi maksimumi i minimumi, broj presecanja nulte linije. U ovom delu treba vršiti dalja istraživanja, kako bi se unapredio model za podešavanje dugoročnih karakteristika generisanih serija.

## Literatura

1. Box, G. & Jenkins, G., 1976. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Oakland, California: Holden-Day, Inc.
2. 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), pp. 265-279.
3. Ilich, N., 2009. A matching algorithm for generation of statistically dependent random variables with arbitrary marginals. *European Journal of Operational Research*, Volume 192, pp. 468-478.
4. Ilich, N., 2014. An Effective Three-Step Algorithm for Multi-Site Generation of Stochastic Weekly Hydrologic Time Series. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), pp. 85-98.
5. Iman, R. & Conover, W., 1982. A Distribution-free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 11(3), pp. 311-334.
6. Lawrence, A. & Kottegoda, N., 1977. Stochastic Modelling of Riverflow Time Series. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A: Statistics in Society*, 140(1), pp. 1-47.
7. Marković, Đ. (2016) *Neparametarsko generisanje stohastičkih vremenskih serija*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
8. 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. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1090-z>



## Modeliranje vremenskih serija godišnjih i mesečnih protoka na reci Savi kod Sremske Mitrovice

Ranka Erić<sup>1</sup>, Jasna Plavšić<sup>2</sup>, Vesna Đukić<sup>3</sup>

APSTRAKT: Analiza vremenskih serija iz prošlosti veoma je značajna pri procenama budućih hidroloških događaja, kao i pri planiranju i izgradnji vodoprivrednih i hidroenergetskih postrojenja. U okviru ovog rada izvršena je analiza serija prosečnih godišnjih i mesečnih protoka na reci Savi kod Sremske Mitrovice u periodu 1926-2015 godine i formirana su dva modela. Prvi model opisuje promene prosečnih godišnjih protoka, dok drugi model opisuje promene prosečnih mesečnih protoka. U zavisnosti od karaktera serije modeli sadrže periodičnu komponentu, stohastičku i slučajnu komponentu, dok je za obe serije trend statistički beznačajan. Komponenta trenda je ispitana na osnovu pretpostavke da je reč o linearnom trendu, periodična komponenta je formirana analizom u frekventnom domenu pomoću Furijeovih redova, a stohastička komponenta modelirana je ARMA modelom. Nakon svakog koraka u modeliranju analizirane su autokorelaciona funkcija i parcijalna autokorelaciona funkcija i određen je procenat ukupne varijanse koju svaka od komponenti objašnjava. Prema tome, godišnja serija skoro odgovara belom šumu, a pri tome prati normalnu raspodelu. Sa druge strane, varijansa mesečne serije je preko periodične i slučajne komponente objašnjena oko 57%, a ostatak predstavlja slučajni niz koji se ovim modelom ne može objasniti i koji ne prati normalnu raspodelu.

Ključne reči: vremenske serije, proticaj, trend, periodična komponenta, stohastička komponenta

## Modelling the time series of the annual and monthly flows on the Sava River near Sremska Mitrovica

ABSTRACT: The analysis of time series from the past is of primary importance in the estimations of future hydrological events, and then in the planning and construction of water management and hydropower plants. In this paper, the series of annual and monthly flows on the Sava River near Sremska Mitrovica was analyzed in the period of 1926-2015 and two models have been created. The first model describes changes in average annual flows, while the second model describes changes in average monthly flows. Depending on the character of the series, the models contain a periodic component, stochastic and random component, while for both series the trend is statistically insignificant. The trend component was tested on the assumption that it was a linear trend, a periodic component was formed by frequency domain analysis using Fourier series, and the stochastic component was modeled with the ARMA model. Therefore, the annual series almost corresponds to the white noise, and at the same time monitors the normal distribution. On the other hand, the variation of the monthly series is explained by a periodic and random component about 57%, and the rest is a random series that cannot be explained by this model and which does not follow the normal distribution.

Keywords: time series, flow, trend, periodic component, stochastic component

<sup>1</sup> Mast. inž. građ. Ranka Erić, asistent, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, ranka.eric@sfb.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Dr Jasna Plavšić, vanredni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, jplavsic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dr Vesna Đukić, vanredni profesor, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, vesna.djukic@sfb.bg.ac.rs

## 1 Uvod

Vremenske serije predstavljaju slučajni proces sa diskretnim vremenom, odnosno niz slučajnih veličina. U primenama, vremenska serija je svaki niz podataka sa prirodnim redosledom koji se mora poštovati (Mališić i Jevremović, 1991). Njihova analiza je postala jedna od glavnih alatki u hidrologiji (Salas, 1993). Osnovni cilj analize vremenskih serija jeste da se formira matematički model koji bi opisivao način kako se događaji dešavaju u vremenu. Postoje brojni stohastički modeli vremenskih serija zajedno sa metodama ocene parametara i procedure testiranja modela.

Analizom serije oticaja definiše se varijabilnost njegove pojave, a zatim se na osnovu toga predviđaju budući vlažni i sušni periodi (Pekarova i Pekar, 2005). Još šezdesetih godina prošlog veka postojala su istraživanja prirode i cikličnih promena u hidrološkim podacima. Williams (1961) je pokušao da uspostavi korelaciju između sunčeve aktivnosti i hidroloških podataka. Najčešće su se istraživanja odnosila na padavine, temperature i oticaj. Vremenom su nizovi hidroloških i meteoroloških podataka postali sve duži i dostupniji sa različitih strana sveta, a to omogućava detaljnije i uspešnije analize. Na primer, Probst i Tardy (1987) su analizirali srednje godišnje protoke u rekama širom sveta i pokazali da su promene protoka reka u Severnoj Americi i Evropi suprotnog karaktera, dok su u rekama Južne Amerike i Afrike prisutne sinhorne promene protoka.

Razvoj stohastičkih modela devedestih godina prošlog veka je omogućio brz napredak u dugoročnom modeliranju vremenskih serija. Ovaj napredak je omogućen usled razvoja nekoliko stohastičkih modela hidroloških vremenskih serija koristeći slučajnu metodu uzorkovanja, klasičnu analizu vremenskih serija, spektralnu analizu ili metodu Boks-Dženkins (Box-Jenkins) (Pekarova i Pekar, 2005). Neke od njih su korišćene i u ovom radu.

U okviru ovog rada formirani su modeli vremenskih serija godišnjih i mesečnih protoka na Savi kod Sremske Mitrovice na osnovu raspoloživih podataka 1926-2015 godine. Model godišnje serije sadrži stohastičku i slučajnu komponentu, dok model mesečne serije protoka obuhvata periodičnu komponentu, stohastičku i slučajnu komponentu. Trend je za obe serije statistički beznačajan. Komponenta trenda je određena na osnovu pretpostavke da je reč o linearnom trendu, a dodatnom analizom je pokazano da trend nije statistički značajan. Periodična komponenta je formirana analizom u frekventnom domenu pomoću Furijeovih redova, a stohastička komponenta modelirana je ARMA modelom. Nakon svakog koraka u modeliranju analizirane su autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija i određen je procenat ukupne varijanse koju svaka od komponenti objašnjava. Zbog različitog karaktera godišnjih i mesečnih serija posebno su modelirana.

## 2 Metodologija

### 2.1 Osnovni pojmovi i karakteristike vremenskih serija

Hidrološke vremenske serije uglavnom su rezultat rada nekog sistema, bio on prirodni ili veštački. One predstavljaju skup osmatranja tokom vremena koji može da se predstavi kao realizacija slučajnih promenljivih koje čine jedan slučajni proces (Stojković, 2015). Osnovna podela vremenskih serija je na determinističke i slučajne. Većina hidroloških serija su kombinovane, sadrže i jednu i drugu komponentu. U determinističke komponente spadaju trend, skokovita promena, sezonska i ciklična komponenta. U nekim vremenskim serijama koje su dovoljno duge zapaža se postojanje jedne sistematske komponente, kojom se izražava dugoročna tendencija razvoja. Ta komponenta je trend, koji može biti rastući ili opadajući u zavisnosti od karakteristika vremenske serije. Sezonska komponenta je rezultat dejstava faktora koji se javljaju periodično, po sezonama jedne godine. Cikličnu komponentu ima vremenski niz koji prikazuje pojavu koja se ponavlja na približno jednak način u intervalima vremena dužim od godinu dana. Slučajna komponenta se dobija kada se iz serije odstrane sve determinističke komponente i može se shvatiti kao niz slučajnih veličina sa nultom srednjom vrednošću i istom raspodelom. Ako je to niz nezavisnih slučajnih veličina, radi se o potpuno

slučajnoj komponenti. Ako se radi o nizu u kome postoji zavisnost između slučajnih veličina u pojedinim vremenskim presecima, onda govorimo o autokorelaciji.

Dakle, ako je parametarski skup (vreme)  $T$  i  $X(t)$ ,  $t \in T$  vremenska serija, tada je

$$X(t) = f(t) + s(t) + c(t) + e(t), t \in T \quad (1)$$

gde je:  $f(t)$  – trend,  $s(t)$  – perodična ili sezonska komponenta,  $c(t)$  – ciklična komponenta,  $e(t)$  – slučajna komponenta (Mališić i Jevremović, 1991). Neka od determinističkih komponenti može i da odsustvuje (Mališić i Jevremović, 1991). Uobičajen pristup analizi hidroloških serija jeste da svaka od ovih komponenti zasebno modelira.

## 2.2 Testiranje značajnosti koeficijenata autokorelacije

Osnovni zadatak analize vremenskih serija je otkrivanje međusobnih zavisnosti uzastopnih članova serije. U ovom radu su ove zavisnosti praćene u vremenskom domenu preko korelograma ili autokorelacione funkcije (AKF). Autokorelaciona funkcija opisuje vezu između dve slučajne veličine jednog slučajnog procesa  $X_t$  u različitim vremenskim trenucima. Kod stacionarnih slučajnih procesa AKF je funkcija samo vremenskog intervala između dve posmatrane slučajne veličine. Kako su vremenske serije procesi u diskretnom vremenu, tada se njihova AKF može označiti sa  $\rho_k$  gde je  $k$  broj vremenskih koraka za koji se traži autokorelacija.

Ukoliko su vrednosti koeficijenata autokorelacije u AKF dovoljno male tako da se ne razlikuju značajno od nule u statističkom smislu, tada možemo da tvrdimo da među uzastopnim članovima niza nema zavisnosti, što znači da je serija slučajnog karaktera. Bartletov test (*Bartlett*) je korišćen kao test značajnosti koeficijenta autokorelacije. Za testiranje značajnosti koeficijenta parcijalne autokorelacije važi izraz koji je dao Quenouille:

$$SE[\hat{\Phi}_{kk}] \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Ako se vrednost  $r_k$  nalazi u granicama od  $\pm 2SE[r_k]$ , usvaja se hipoteza  $H_0$  da je  $\rho_k$  jednako nula na pragu poverenja značajnosti  $\alpha$ . U suprotnom se odbacuje hipoteza  $H_0$  i usvaja alternativna hipoteza  $H_1$  da postoji značajna autokorelisanost na vremenskom pomaku  $k$ . Prethodni izraz (2) se koristi kako bi se odredili intervali poverenja parcijalne autokorelacione funkcije (Stojković, 2015):

$$\phi_{kk} \in \left[ -z_{1-\alpha} \frac{1}{\sqrt{N}}; +z_{1-\alpha} \frac{1}{\sqrt{N}} \right] \quad (3)$$

Ukoliko se vrednost parcijalne autokorelacione funkcije  $\phi_{kk}$  na vremenskom pomaku  $\tau$  nalazi unutar intervala poverenja tada se usvaja hipoteza  $H_0$  da vrednost funkcije  $\phi_{kk}$  na datom pomaku nije značajna na pragu poverenja  $\alpha$ . U suprotnom se odbacuje hipoteza  $H_0$  i usvaja alternativna hipoteza  $H_1$  da postoji značajna parcijalna autokorelisanost na vremenskom pomaku  $\tau$ .

## 2.3 Analiza komponenti vremenskih serija

Za otkrivanje trenda se koristi regresiona analiza kojom se određuje jednačina trenda iz podataka serije (metodom najmanjih kvadrata). Zatim se iz serije otklanja komponenta trenda, oduzimanjem od originalne serije:

$$x_i' = x_i - x_{Ti} \quad (4)$$

gde je  $x_{Ti}$  funkcija trenda. Na primer, linearni trend se izražava kao

$$x_{Ti} = a \cdot i + b \quad (5)$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

gde su  $a$  i  $b$  regresioni koeficijenti. Ocena statističke značajnosti identifikovanog linearnog trenda izvršena je pomoću parametarskog testa koji su predložili Kendall i Stuart (1966) (Stojković, 2015). Ukoliko trend nije značajan iz originalne serije se otklanja srednja vrednost serije  $x'_i = x_i - \bar{x}_i$ .

Da bi se otkrila periodičnost, koristi se periodogram ili diskretni (linijski) spektar koji se definiše kao:

$$I(f_k) = \frac{n}{2} c_k^2 \quad (6)$$

gde je:  $f_k = k/n$  frekvencija  $k$ -tog harmonika,  $c_k$  amplituda  $k$ -tog harmonika i  $n$  je broj podataka u seriji. Amplituda  $k$ -tog harmonika  $c_k$  se dobija transformacijom serije u Furijeov niz  $m$ -tog reda, gde je  $m = n/2$ , kada je  $n$  parno, a  $m = (n-1)/2$  kada je  $n$  neparno. Iz toga sledi:

$$x_{Fi} = \bar{x}' + \sum_{k=1}^m (a_k \cos(2\pi \cdot f_k \cdot i) + b_k \sin(2\pi \cdot f_k \cdot i)) \quad (7)$$

gde su  $a_k$  i  $b_k$  Furijeovi koeficijenti koji se izračunavaju prema:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x'_i \cos(2\pi f_k i) \quad (8)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x'_i \sin(2\pi f_k i) \quad (9)$$

Oznake  $x'$  odnose se na seriju dobijenu uklanjanjem trenda iz originalne serije.

U ovom radu se periodičnost ispituje korišćenjem normalizovanog kumulativnog periodograma (NKP). NKP se dobija sukcesivnim dodavanjem ordinata periodograma  $I(f_j)$ , a zatim se podeli sa ukupnom varijansom serije  $\sigma_x^2$  (u ovom slučaju serije koja je dobijena nakon otklanjanja srednje vrednosti originalne serije):

$$NKP_i = \frac{\sum_{j=1}^i I(f_j)}{n\sigma_x^2} \quad (10)$$

Normalizovani kumulativni periodogram za slučajni proces je prava linija koja spaja tačke (0,0) i (0.5,1) na NKP grafiku (Plavšić i ostali, 2016). Ukoliko vremenska serija sadrži značajnu periodičnost, odstupanje od prave linije biće veliko zbog velikih amplituda na visokim frekvencijama. Intervali poverenja formiraju se oko granične teorijske linije korišćenjem Kolmogorov-Smirnov statistike. U zavisnosti od izabranog praga značajnosti  $\alpha$  (ovom prilikom se koristi prag značajnosti  $\alpha = 0.05$ ), intervali poverenja formiraju se na rastojanju od  $\pm K_\alpha / \sqrt{N'}$  od teorijske prave linije, pri čemu je  $N' = N/2$  za parne vrednosti dužine serije  $N$ , dok je za neparne  $N' = (N-1)/2$  (Stojković, 2015).

U ovom radu za prag značajnosti  $\alpha = 0.05$  vrednost koeficijenta iznosi  $K_\alpha = 1.36$ . Kada se utvrdi koji su harmonici značajni, otklanjaju se iz serije. Ukoliko je harmonik sa frekvencijom  $f_k$  značajan, jednačina tog harmonika je:

$$x_{Pi}^{(k)} = a_k \cos(2\pi f_k i) + b_k \sin(2\pi f_k i) \quad (11)$$

i on se uklanja iz serije:

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$x_i'' = x_i' - x_{pi}^{(k)} \quad (12)$$

Procedura se dalje ponavlja sa inspekcijom periodograma serije  $x_i''$  i testiranjem njegove maksimalne ordinate. Kada se iz serije uklone svi značajni harmonici (a prethodno je uklonjen trend ili srednja vrednost), tada u seriji ostaje samo slučajna komponenta (Plavšić, 1993).

Kada se iz originalne serije uklone komponente trenda i periodičnosti, u njoj ostaje samo slučajna komponenta  $x_i''$ , koju ćemo, radi jednostavnosti nadalje obeležavati sa  $z_i$ . Ukoliko je korelogram serije takav da se svi  $r_k$  nalaze unutar granica  $2SE[r_k]$ , tada je  $z_i = a_i$ , gde je  $a_i$  beli šum sa raspedelom  $\mathcal{N}(0, \sigma_a^2)$ . Ukoliko neki od  $r_k$  izlazi iz granica  $2SE[r_k]$ , tada između članova serije postoji neka zavisnost koju treba otkriti. U traženju te zavisnosti polazi se od najjednostavnijih, i to linearnih modela. Najjednostavniji primer je autoregresivni proces prvog reda AR(1). Drugi tip jednostavnog modela je model pokretnih sredina prvog reda MA(1). Kombinacija ova dva modela daje tzv. ARMA(1,1) model. U opštem slučaju ova tri modela imaju sledeći oblik:

$$\text{AR}(p): z_i = \phi_1 z_{i-1} + \dots + \phi_p z_{i-p} + a_i \quad (13)$$

$$\text{MA}(q): z_i = \theta_1 a_{i-1} + \dots + \theta_q a_{i-q} + a_i \quad (14)$$

$$\text{ARMA}(p,q): z_i = \phi_1 z_{i-1} + \dots + \phi_p z_{i-p} + a_i + \theta_1 a_{i-1} + \dots + \theta_q a_{i-q} \quad (15)$$

gde su  $p$  i  $q$  redovi AR i MA modela. U zavisnosti od osobina AKF i PAKF serije, vrši se identifikacija modela. Nakon identifikacije modela, dolazi faza određivanja koeficijenata modela, a na kraju faza verifikacije. Verifikacija modela se sprovodi pomoću analize ocenjene greške modela  $\hat{\varepsilon}_i$ . Najbitnija osobina greške modela je da ne sadrži skrivenu periodičnost i da nije autokorelisana, tj. da su članovi serije  $\varepsilon_i$  međusobno nezavisni događaji. Jedan od načina ispitivanja tih osobina greške modela vrši se pomoću Boks-Ljung (Box-Ljung) test statistike. Korišćenjem Boks-Ljung test statistike se obuhvata autokorelacija do zadanog  $m$ -tog pomaka. Test statistika je sledeća (Stojković, 2015):

$$Q_{BL} = N(N+2) \sum_{\tau=1}^m \frac{\hat{\rho}_{\varepsilon}(\tau)}{N-\tau}, \quad (16)$$

gde je  $\hat{\rho}_{\varepsilon}$  ocenjena autokorelaciona funkcija greške modeliranja na pomaku  $\tau$  ( $\tau = 1, 2, \dots, m$ ).

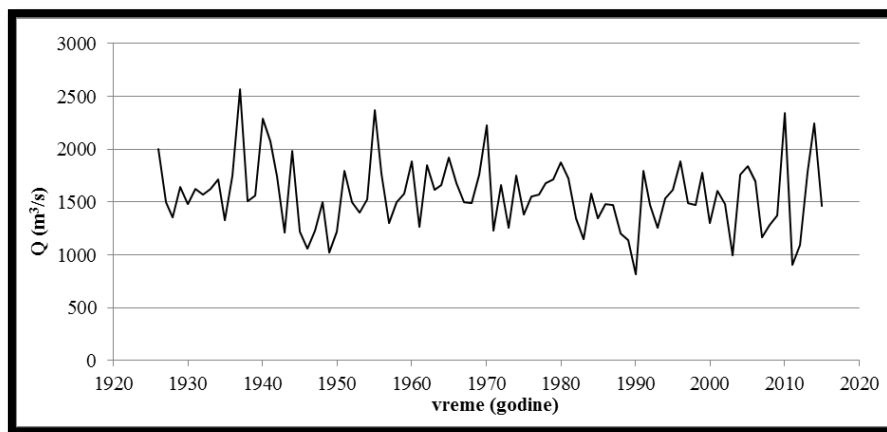
Ukoliko se pokaže da je  $Q_{BL} < \chi_{1-\alpha}^2$  usvaja se hipoteza  $H_0$  da je vremenska serija slučajna, u suprotnom odbacuje se hipoteza  $H_0$  i usvaja se alternativna hipoteza  $H_1$  da serija nije slučajna. Kada se utvrdi da greška odgovarajućeg modela predstavlja slučajnu seriju na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$  ispituje se da li je ona saglasna normalnoj raspodeli. U tu svrhu koristi se PPCC (*Probability Plot Correlation Coefficient*). PPCC test predstavlja statistički test kojim se ispituje da li vremenska serija pripada normalnoj ili nekoj drugoj raspodeli. Ovaj test koristi koeficijent korelacije  $r$  između vremenske serije  $Q_i$  i korespondentnih kvantila razmatrane raspodele  $M_i$ . Podrazumeva se da ukoliko koeficijent korelacije  $r$  ima vrednosti bliske 1 tada vremenska serija  $Q_i$  pripada razmatranoj raspodeli. Koeficijent korelacije  $r$  između vremenske serije  $Q_i$  i korespondentnih kvantila  $M_i$  definiše se na sledeći način (Filiben, 1975):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}}, \quad (17)$$

gde su  $\bar{Q}$  i  $\bar{M}$  srednje vrednosti vremenske serije  $Q_i$  i kvantila  $M_i$ , a  $N$  predstavlja dužinu vremenske serije. Kvantili  $M_i$  predstavljaju inverznu funkciju  $\Phi^{-1}$  razmatrane kumulativne raspodele za kompromisnu verovatnoću  $m_i$ . U ovom testu za kompromisnu verovatnoću  $m_i$  se koriste različite formule u zavisnosti od razmatrane raspodele. U radu su razmatrane normalna (Filliben, 1975) i Gumbelova raspodela (Vogel, 1986). Ukoliko je  $r > r_\alpha(N)$  usvaja se nulta hipoteza  $H_0$  da vremenska serija grešaka ima normalnu raspodelu. U suprotnom se odbacuje hipoteza  $H_0$  i usvaja alternativna hipoteza  $H_1$  da vremenska serija grešaka nema normalnu raspodelu. Kritične vrednosti  $r_\alpha(N)$  definišu se na osnovu praga značajnosti  $\alpha$  i dužine vremenske serije  $N$ .

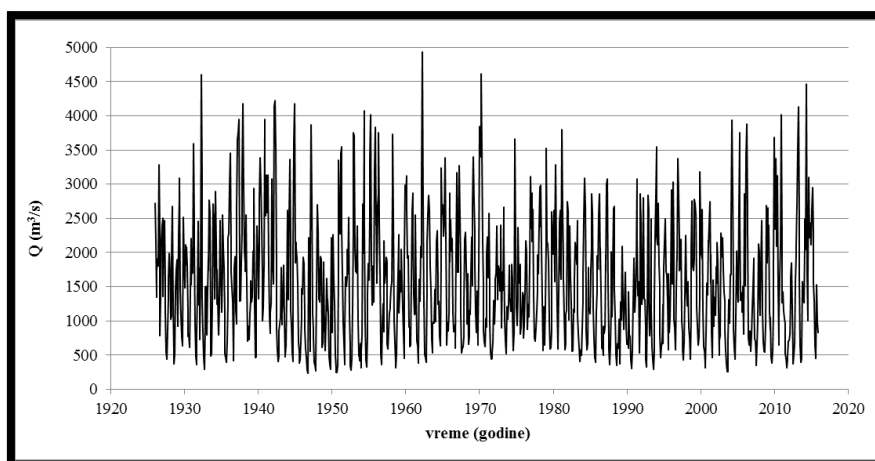
### 3 Ulazni podaci

U ovom radu su analizirane serije godišnjih i mesečnih proticaja na reci Savi kod Sremske Mitrovice u periodu od 1926-2015 godine. Na slikama 1 i 2 su grafički prikazi razmatranih serija. Dužina godišnje serije iznosi  $n = 90$ , a mesečne seije  $n = 1080$



Slika 1. Grafički prikaz originalne godišnje serije

Figure 1. Graphic presentation of the original annual series



Slika 2. Grafički prikaz originalne mesečne serije

Figure 2. Graphic presentation of the original monthly series

### 4 Rezultati i diskusija

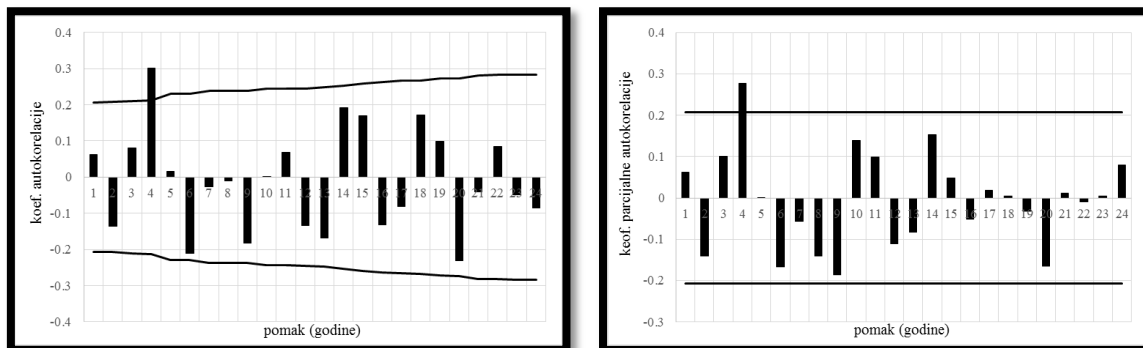
#### 4.1 Analiza godišnje serije

U tabeli 1 dat je pregled osnovnih karakteristika godišnje serije. Na slici 3 su prikazane autokorelaciona (AKF) i parcijalna autokorelaciona funkcija (PAKF) originalne serije godišnjih protoka na reci Savi.

Tabela 1. Pregled statistika originalne godišnje serije

Table 1. Summary statistics of the original annual series

Dužina serije	90
Srednja vrednost	1565.04
Medijana	1542.50
Mod	1627.00
Varijansa	108584.56
Standardna devijacija	329.52
Minimum	813
Maksimum	2567
Koeficijent asimetrije	0.50
Koeficijent zakrivljenosti	0.69
Koeficijent varijacije (%)	21.06



Slika 3. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija originalne godišnje serije

Figure 3. Autocorrelation and partial autocorrelation function of the original annual series

U radu je testiran linearni tip trenda. Tabela 2. prikazuje rezultate ispitivanja linearnog trenda originalne serije, kao i rezultate testiranja značajnosti trenda.

Tabela 2. Ispitivanje trenda kod godišnje serije

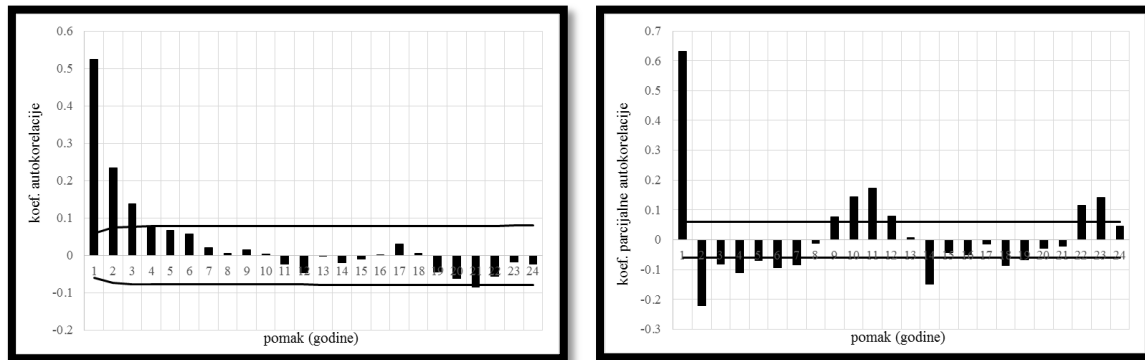
Table 2. Trend testing for the annual series

Jednačina trenda	Kendall u Stuart mecm	$R^2$ (%)	p vrednost
1647.77-1.818i	2.59	2.08	0.175

Prema podacima iz gore prikazane tabele ocenjena vrednost koeficijenta  $a$  manja je od vrednosti test statistike, što ukazuje da linearni trend nije značajan. Takođe, to pokazuju i druge dve vrednosti iz

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

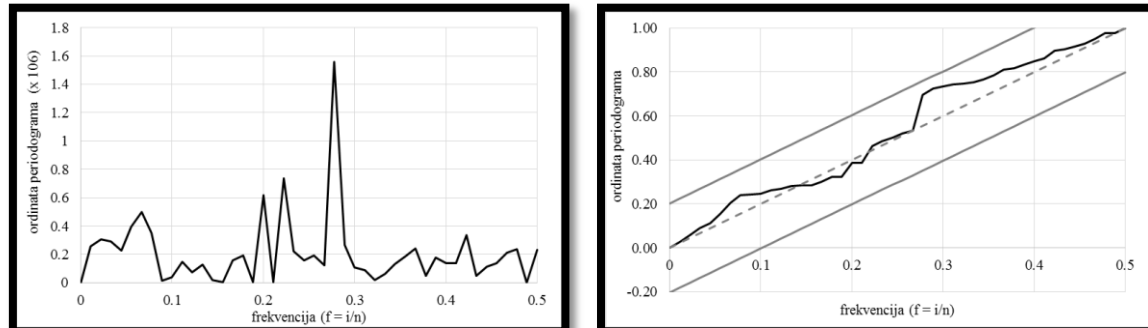
tabele 2.  $R^2$  ukazuje na to da model linearnog trenda objašnjava samo 2.08 % varijabilnosti originalne serije godišnjih proticaja, a pošto je  $p$  vrednost veća od 0.05 smatra se da ne postoji statistički značajna veza između godišnjih proticaja i rednog broja podatka u nizu. Prema tome, iz originalne serije uklonjena je srednja vrednost originalne serije  $x'_i = x_i - \bar{x}_i$ . Na slici 4 su prikazane AKF i PAKF serije  $x'_i$ .



Slika 4. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija nakon uklanjanja srednje vrednosti

Figure 4. Autocorrelation and partial autocorrelation function after removing the mean value

Nakon izdvajanja srednje vrednosti, analizirana je periodičnost serije godišnjih proticaja na reci Savi. Periodogram i NKP su prikazani na slici 5.



Slika 5. Periodogram i normalizovani kumulativni periodogram nakon uklanjanja srednje vrednosti

Figure 5. Periodogram and normalized cumulative periodogram after removing the mean value

Na slici 5 (levo) postoji nekoliko ordinata koje se izdvajaju od ostalih, ali to ne mora da znači da su i značajne. NKP (slika 5, desno) ukazuje na to da ne postoje značajne frekvencije, tj. da ne postoji odstupanje od Kolmogorov-Smirnov teorijskih linija za interval poverenja 95%. Ovo upućuje da se usvaja hipoteza  $H_0$  i da je vremenska serija godišnjih proticaja na reci Savi bez značajnih korelacija i periodičnosti. U skladu sa tim ovakva serija predstavlja slučajnu seriju i ne sadrži periodičnu komponentu.

Slučajna komponenta se modelira korišćenjem reziduala  $x'$  nakon uklanjanja srednje vrednosti (usled nepostojanja značajnog trenda) i periodičnosti. Vrednosti AKF i PAKF ne ukazuju na neki određeni model, pa je zbog toga ispitano nekoliko modela. Rezultati su prikazani u tabeli 3.

Test statistika  $Q_{BL}$  za sve ispitane modele je manja od kritične, osim kod modela AR(1) i ARMA(1,1), što ukazuje na to da greška modeliranja predstavlja slučajnu seriju. Međutim, kod modela AR(2) i ARMA(2,1) koeficijent korelacije  $r_4$  je ostao značajan, a kod modela ARMA(3,1) koeficijent PACF-e na pomaku  $\tau = 4$  je i dalje značajan. ARMA(4,2) i ARMA(4,4) su modeli kojim se



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

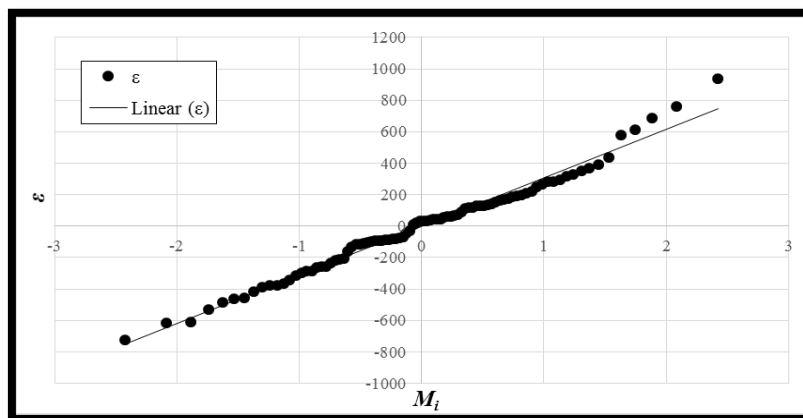
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

ova značajnost može otkloniti. Iako prema podacima u tabeli 3 model ARMA(4,4) ima veći procenat objašnjene varijanse, zbog jednostavnosti modela usvaja se ARMA(4,2). Prema tome utvrđeno je da greška ARMA modela predstavlja slučajnu seriju na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$ . Na osnovu PPCC testa, određen je koeficijent korelacije  $r = 0.991$ . U poređenju sa njegovom kritičnom vrednošću  $r_\alpha(90) = 0.985$ ,  $r > r_\alpha(90)$  serija  $a_i$  prati normalnu raspodelu na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$ , a rezultati su i grafički prikazani (slika 6).

Tabela 3. Modeliranje slučajne komponente godišnje serije

Table 3. Modeling the random component of the annual series

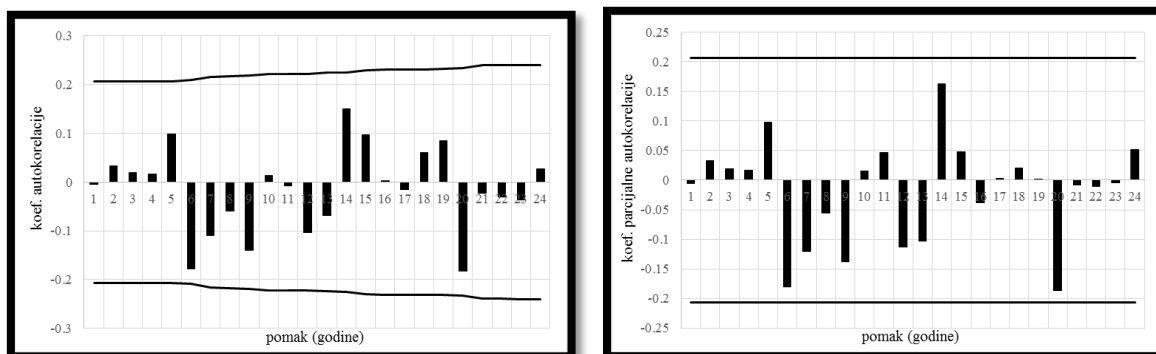
Model	Ocena koef.	SE ocene koef.	$\sigma_a^2$	$R^2$ (%)	$Q_{BL}$	$\chi_\alpha^2$
AR (1)	$\phi_1 = 0.062$ , constant = 0.15	0.11	108158	0.39	48.39	35.20
AR (2)	$\phi_1 = 0.072$ , $\phi_2 = -0.147$ , constant = -0.85	0.105 0.108	105804.4	2.56	33.00	33.90
ARMA(1,1)	$\phi_1 = 0.002$ , $\theta_1 = -0.077$ , constant = 0.322	1.37 1.37	107990.7	0.55	47.78	33.90
ARMA(2,1)	$\phi_1 = 0.018$ , $\phi_2 = -0.151$ , $\theta_1 = -0.065$ , constant = -1.163	0.72 0.12 0.73	105635.1	2.72	31.98	32.7
ARMA(3,1)	$\phi_1 = 0.49$ , $\phi_2 = -0.20$ , $\phi_3 = 0.24$ , $\theta_1 = 0.40$ , constant = 0.58	0.41 0.13 0.11 0.42	101905.9	6.15	25.29	31.4
ARMA(4,2)	$\phi_1 = 0.11$ , $\phi_2 = -0.35$ , $\phi_3 = 0.11$ , $\phi_4 = 0.30$ , $\theta_1 = 0.06$ , $\theta_2 = -0.25$ , constant = 1.76	0.31 0.31 0.13 0.14 0.32 0.31	93213.46	14.16	18.69	28.9
ARMA(4,4)	$\phi_1 = 0.49$ , $\phi_2 = -1.06$ , $\phi_3 = 0.55$ , $\phi_4 = 0.40$ , $\theta_1 = 0.46$ , $\theta_2 = -1.04$ , $\theta_3 = 0.46$ , $\theta_4 = -0.71$ , constant = -2.06	0.23 0.21 0.21 0.23 0.20 0.17 0.15 0.15	82132.43	24.36	7.55	26.3



Slika 6. Testiranje normalnosti serije  $a_i$  korišćenjem PPCC testa

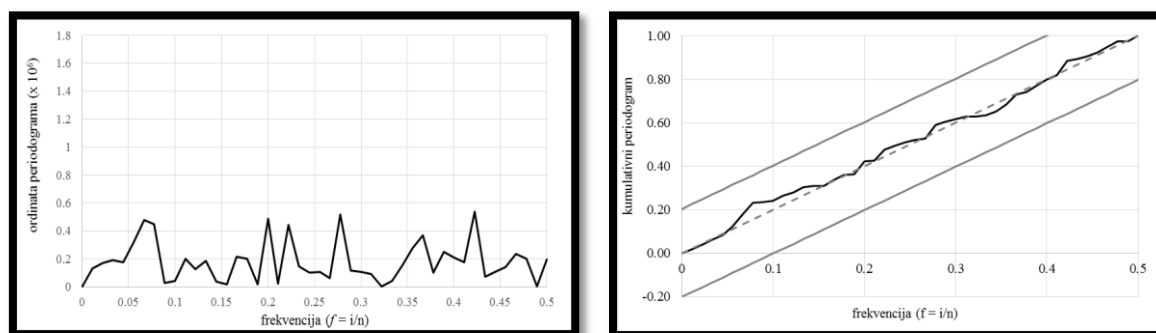
Figure 6. Testing the normality of the series  $a_i$  using the PPCC test

Na narednim graficima vidi se da su za AKF i PAKF koeficijenti korelacije beznačajni, pa se može reći da članovi serije  $a_i$  ne poseduju određenu autokorelisanost. Takođe, primećeno je na osnovu periodograma i NKP (slika 8) da  $a_i$  ne sadrži zaostalu periodičnost jer ne postoji odstupanje od Kolmogorov-Smirnov teorijskih linija za interval poverenja 95%. Krajnji rezultat je da greška ARMA modela predstavlja slučajnu seriju na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$  koja je saglasna normalnoj raspodeli.



Slika 7. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija serije  $a_i$

Figure 7. Autocorrelation and partial autocorrelation function of the series  $a_i$



Slika 8. Periodogram i normalizovani kumulativni periodogram serije  $a_i$

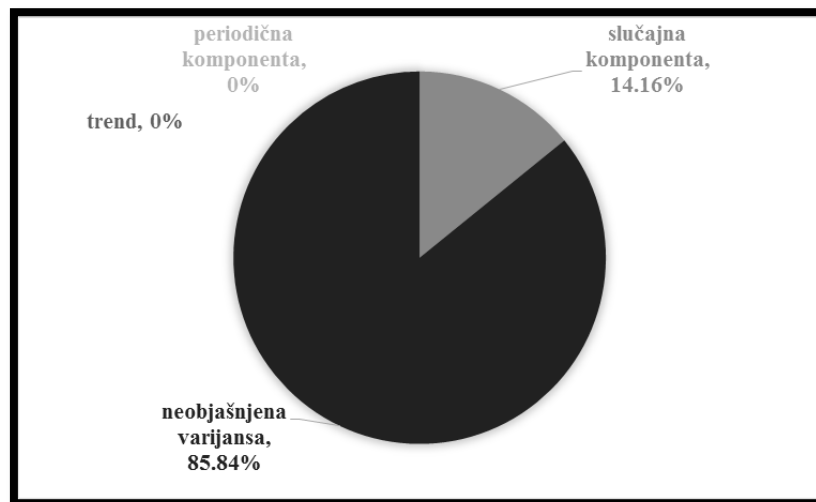
Figure 8. Periodogram and normalized cumulative periodogram of the series  $a_i$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na osnovu rezultata iz prethodnih tačaka, jednačina kompozitnog modela razmatrane serije godišnjih proticaja na reci Savi izgleda ovako:

$$x_i = 1565.04 + 0.11x_{i-1} - 0.35x_{i-2} + 0.11x_{i-3} + 0.3x_{i-4} + a_i + 0.06a_{i-1} - 0.25a_{i-1},$$
$$a_i : N(-1.05; 932.13.46) \quad (18)$$

Model sadrži srednju vrednost osmotrenih podataka i slučajnu komponentu, bez trenda i periodične komponente. Na slici 9 prikazan je procenat objašnjene varijanse kod godišnje serije.



Slika 9. Procenat objašnjene varijanse kod godišnje serije

Slika 9. The percentage of the explained variance in the annual series

## 4.2 Analiza mesečne serije

U tabeli 4 dat je pregled osnovnih karakteristika mesečne serije, a na slici je 10 je prikazana AKF i PAKF originalne mesečne serije.

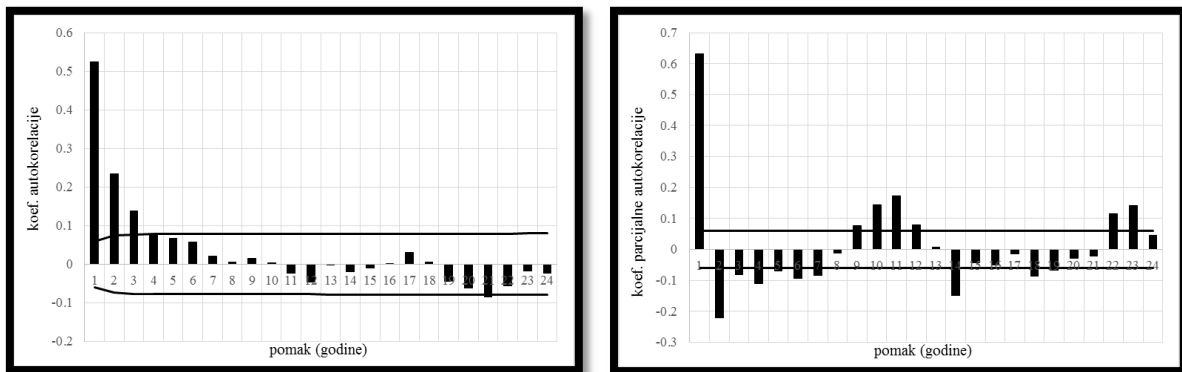
Tabela 4. Pregled statistika originalne mesečne serije

Table 4. Summary statistics of the original monthly series

Dužina serije	1080
Srednja vrednost	1567.29
Medijana	1420.50
Mod	2119
Varijansa	784589.88
Standardna devijacija	885.77
Minimum	236
Maksimum	4933
Koeficijent asimetrije	0.75
Koeficijent zakrivljenosti	0.19
Koeficijent varijacije (%)	56.52

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 10. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija originalne mesečne serije

Figure 10. Autocorrelation and partial autocorrelation function of the original monthly series

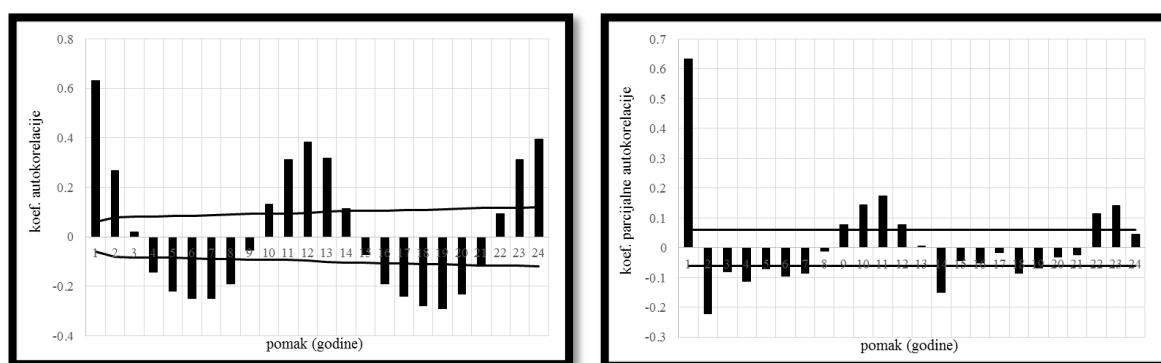
Kao i za godišnju, tako je i za mesečnu seriju testiran samo linearni tip trenda. Tabela 5 prikazuje rezultate ispitivanja linearnog trenda originalne serije, kao i rezultate testiranja značajnosti trenda.

Tabela 5. Ispitivanje trenda kod godišnje serije

Table 5. Trend testing for the annual series

<i>Jednačina trenda</i>	<i>Kendall i Stuart test</i>	$R^2$ (%)	<i>p vrednost</i>
1653.7-0.16i	0.17	0.32	0.064

Prema prikazanim podacima (tabela 5) linearni trend nije značajan. Vrednost koeficijenta  $a$  ( $|a| = 0.16$ ) manja je od vrednosti test statistike, a  $R^2$  ukazuje na to da model linearnog trenda objašnjava samo 0.32 % varijabilnosti originalne serije godišnjih proticaja. Pošto je  $p$  vrednost veća od 0.05 smatra se da ne postoji statistički značajna veza između srednjih mesečnih proticaja i rednog broja podatka u seriji na nivou pouzdanosti od 95.0 %. Prema tome, iz originalne serije uklonjena je srednja vrednost originalne serije, kao što je bilo i u slučaju godišnje serije. Nakon uklanjanja srednje vrednosti ponovo su izračunate vrednosti koeficijenata AKF-e i PAKF-e (slika 11).



Slika 11. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija nakon uklanjanja srednje vrednosti

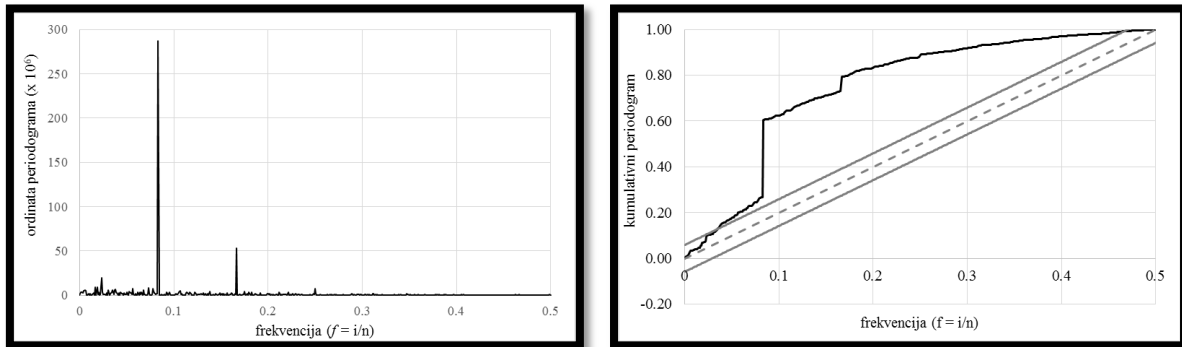
Figure 11. Autocorrelation and partial autocorrelation function after removing the mean value

Sam izgled autokorelacione funkcije (slika 11) ukazuje na to da postoji određena periodičnost u seriji. Periodogram i NKP su prikazani na slici 12. Vidi se da postoji nekoliko ordinata koje se izdvajaju od ostalih i smatraju se značajne, a posebno jedna koja i odgovara osnovnoj frekvenciji 1/12. Zatim, sledeće ordinate koje se izdvajaju su za frekvencije 1/6 i 25/1080. Frekvencija 25/1080

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

odgovara frekvenciji oko 1/43, a to je više od godinu dana, unutar čega se gleda sezonski ciklus. NKP takođe ukazuje na to da postoje značajne frekvencije, tj. očigledno je odstupanje od Kolmogorov-Smirnov teorijskih linija za interval poverenja 95 %. Ovo upućuje da se odbacuje hipoteza  $H_0$  i da vremenska serija mesečnih proticaja sadrži određenu korelaciju i periodičnost. U tabeli 6 su dati rezultati ispitivanja periodičnosti mesečne serije.

Nakon uklanjanja periodične komponente određene su AKF i PAKF (slika 13), kao i periodogram i NKP (slika 14). Uklanjanjem periodične komponente većina koeficijenata autokorelacije su postali beznačajni, osim na nekoliko početnih pomaka.



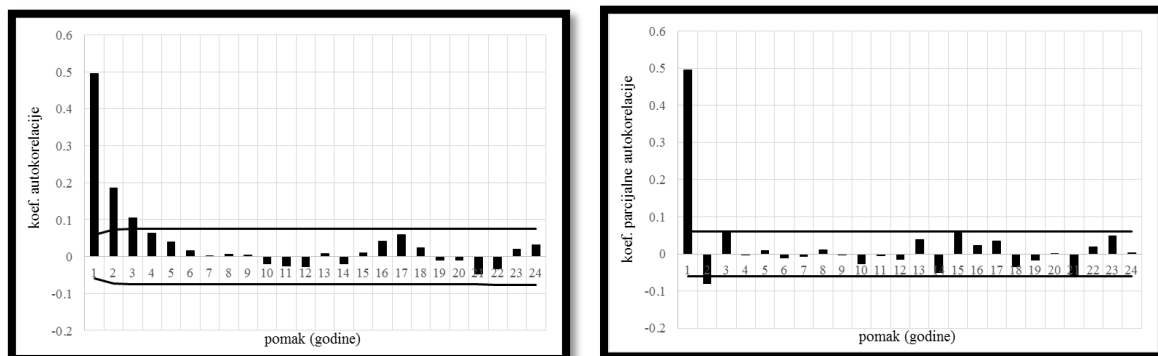
Slika 12. Periodogram i normalizovani kumulativni periodogram nakon uklanjanja srednje vrednosti

Figure 12. Periodogram and normalized cumulative periodogram after removing the mean value

Tabela 6. Ispitivanje periodičnosti kod mesečne serije

Table 6. Periodicity testing for monthly series

Harmonik $k$	Ordinata periodograma $I_k$	Frekvencija $f_k$	Furijeovi koeficijenti		$R^2$ (%)	Ukupna određena varijansa
			$a_k$	$b_k$		
1	286 705 000.00	1/12	137.22	715.62	33.84	42.45 %
2	53 557 300.00	1/6	121.02	-290.77	6.32	
3	19 369 100.00	25/1080	9.00	189.19	2.29	



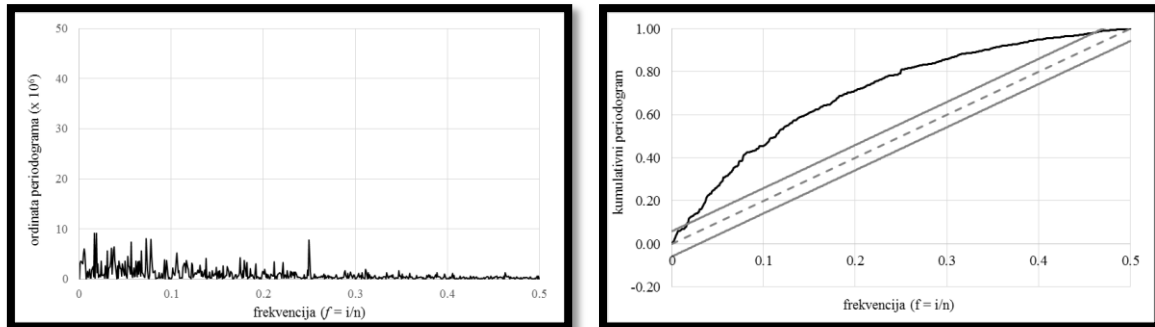
Slika 13. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija nakon uklanjanja periodične komponente

Figure 13. Autocorrelation and partial autocorrelation function after removing the periodic component

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Periodogram (slika 14, levo) ukazuje da više ne postoje ordinate koje se značajno izdvajaju od ostalih, da bi se njihovim uklanjanjem značajno smanjila varijansa reziduala  $x_i''$ . Međutim, NKP (slika 14, desno) je van granica intervala poverenja od 95 %, pa u skladu sa tim reziduali  $x_i''$  poseduju određenu korelisanost koja se određuje odgovarajućim ARMA modelom.



Slika 14. Periodogram i normalizovani kumulativni periodogram nakon uklanjanja periodične komponente

Figure 14. Periodogram and normalized cumulative periodogram after removing the periodic component

Slučajna komponenta mesečne serije se modelira korišćenjem reziduala  $x_i''$  nakon uklanjanja srednje vrednosti i periodične komponente. Identifikacija modela sprovodi se analizom vrednosti AKF i PAKF posmatrane serije  $x_i''$ . U skladu sa tim, razmatrani su autoregresioni modeli AR( $p$ ) i ARMA( $p, q$ ) modeli, pri čemu je operator pokretnih sredina  $q$  nižeg reda. U tabeli 7 su prikazani rezultati estimacije i verifikacije modela. Test statistika  $Q_{BL}$  za sve modele je manja od kritične, pa greška modeliranja predstavlja slučajnu seriju. Međutim, kod modela AR(1) koeficijent korelacije  $r_2$  je ostao i dalje značajan, pa se usvaja model kojim se ova značajnost može otkloniti. Bilo koji od ostalih ispitivanih modela se može usvojiti, ali se zbog jednostavnosti modela usvaja AR(2). Ovim je pokazano da u konkretnom slučaju složeniji modeli ne daju rezultate veće tačnosti.

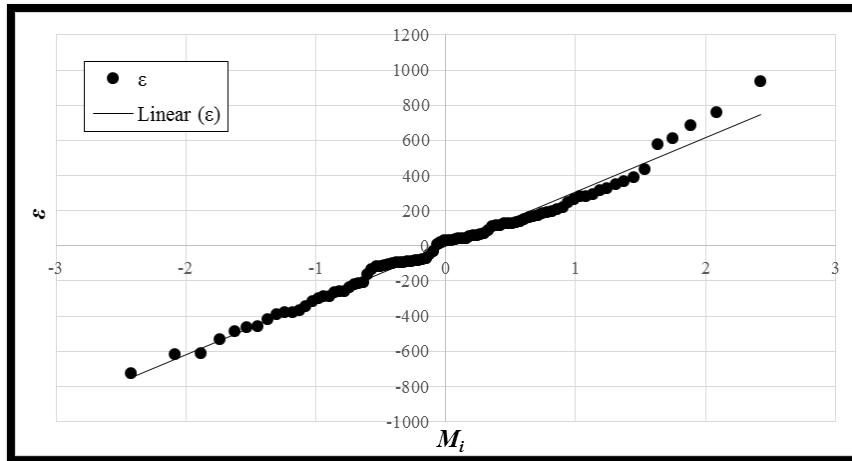
Tabela 7. Modeliranje slučajne komponente mesečne serije

Table 7. Modeling the random component of the monthly series

Model	Ocena koef.	SE ocene koef.	$\sigma_a^2$	$R^2$ (%)	$Q_{BL}$	$\chi_a^2$
AR (1)	$\phi_1 = 0.497,$ constant = -0.099	0.026	340200.20	56.64	28.64	35.20
AR (2)	$\phi_1 = 0.536,$ $\phi_2 = -0.080,$ constant = -0.026	0.03 0.03	337993.01	56.92	22.10	33.90
AR(3)	$\phi_1 = 0.539,$ $\phi_2 = -0.110,$ $\phi_3 = 0.061,$ constant = -0.071	0.030 0.034 0.030	336871.93	57.06	18.84	32.70
ARMA(1,1)	$\phi_1 = 0.330,$ $\theta_1 = -0.217,$ constant = -0.092	0.058 0.059	337496.05	56.98	20.72	33.90
ARMA(2,1)	$\phi_1 = 0.211,$ $\phi_2 = 0.074,$ $\theta_1 = -0.336,$ constant = -0.066	0.244 0.131 0.240	337148.41	57.03	19.79	32.70

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

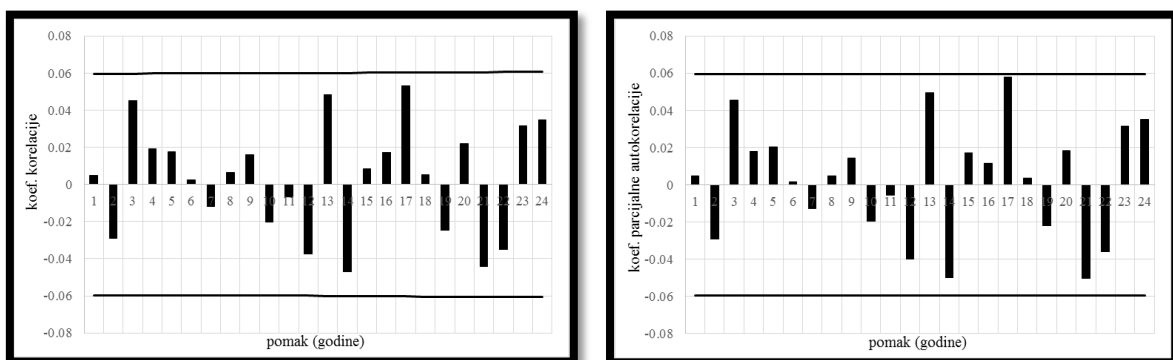
Utvrđeno je da greška AR modela predstavlja slučajnu seriju na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$ . Pomoću PPCC testa određen je koeficijent korelacije  $r = 0.98$ . U poređenju sa njegovom kritičnom vrednošću  $r_\alpha(1080) = 0.999$  (Vogel, 1986),  $r < r_\alpha(1080)$ , može se reći da serija  $a_i$  ne prati normalnu raspodelu na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$ . Dodatnom analizom utvrđeno je da serija  $a_i$  prati Gumbelovu raspodelu. Koeficijent korelacije iznosi  $r = 0.997$  i kao takav je veći od kritične vrednosti za Gumbelovu raspodelu  $r_\alpha(1080) = 0.996$  (Vogel, 1986). To se potvrđuje i grafikom (slika 15).



Slika 15. PPCC test za Gumbelovu raspodelu

Figure 15. PPCC test for Gumbel's distribution

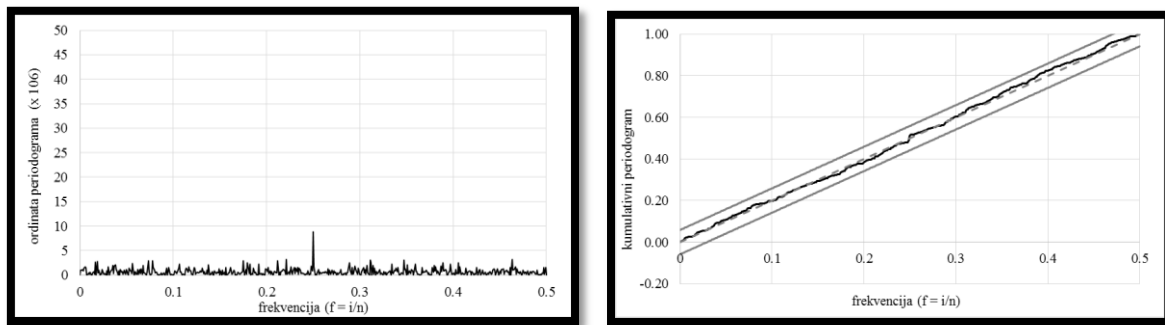
Na osnovu AKF i PAKF serije (slika 16), iz koje je eliminisana srednja vrednost, periodična i stohastička komponenta, može se primetiti da su svi koeficijenti korelacije unutar dozvoljenih granica. To znači da su članovi serije međusobno nezavisni. Slika 17 pokazuje da reziduali prate pravu liniju na periodogramu, pa se može reći da reziduali predstavljaju beli šum.



Slika 16. Autokorelaciona i parcijalna autokorelaciona funkcija serije  $a_i$

Figure 16. Autocorrelation and partial autocorrelation function of the series  $a_i$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

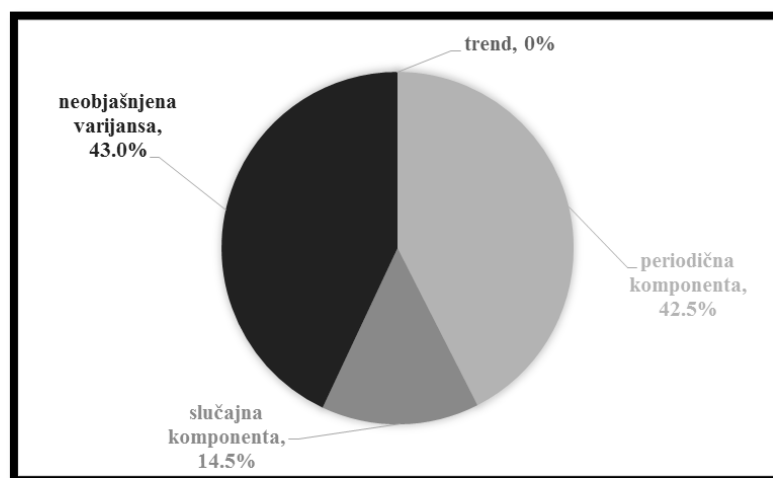


Slika 17. Periodogram i normalizovani kumulativni periodogram serije  $a_i$

Na osnovu rezultata iz prethodnih tačaka, jednačina kompozitnog modela razmatrane serije mesečnih proticaja na reci Savi izgleda ovako:

$$\begin{aligned} x_i = & 1567.29 + 137.22 \cos(0.524i) + 715.62 \sin(0.524i) + 121.02 \cos(1.047i) - \\ & 290.77 \sin(1.047i) + 9 \cos(0.145i) + 189.19 \sin(0.145i) + 0.536x_{i-1} - 0.08x_{i-2} + a_i, \\ a_i : & N(-0.52; 338306.3) \end{aligned} \quad (19)$$

Model mesečnih proticaja sadrži srednju vrednost osmotrenih podataka, periodičnu komponentu, stohastičku i slučajnu komponentu. Na slici 18 prikazan je procenat objašnjene varijanse kod mesečne serije.



Slika 18. Procenat objašnjene varijanse kod mesečne serije

Slika 18. The percentage of the explained variance in the monthly series

## 5 Zaključak

Prema rezultatima analize dve serije, godišnjih i mesečnih proticaja na reci Savi, nijedna od serija nema značajan trend na pragu značajnosti  $\alpha = 0.05$ , što govori o stacionarnosti serija. Godišnja serija ne sadrži ni periodičnu komponentu. Ovaj zaključak je logičan s obzirom da godišnji nizovi nemaju tačno određenu osnovnu frekvenciju, kao što to na primer imaju mesečne serije. Periodična komponenta mesečne serije objašnjava čak 42.45% od ukupne varijanse i to predstavlja najveće pojedinačno učešće u varijansi serije. Slučajna komponenta godišnje serije objašnjava nešto manje od



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

15% ukupne varijanse, a preostalih 85% ostaje neobjašnjeno. Prema tome, godišnja serija skoro odgovara belom šumui pri tome prati normalnu raspodelu. Sa druge strane, varijansa mesečne serije je preko periodične i slučajne komponente objašnjena oko 57%. Ostatak predstavlja sasvim slučajni niz koji se ovim modelom ne može objasniti i koji ne prati normalnu raspodelu, već je finijom analizom dokazano da prati Gumbelovu raspodelu.

Analiza dugačkih serija iz prošlosti, kao što je prikazana analiza, prvenstveno je značajna pri procenama budućih hidroloških događaja, pri čemu se karakteristike prošlog vremena prenose u budućnost. Na osnovu toga je mnogo lakše planirati i projektovati vodoprivredna i hidroenergetska postrojenja.

## Literatura

1. Filliben J.J. (1975) The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality. *Technometrics*, 17(1): 111-117
2. Jevđević V. (1972) *Stochastic processes in hydrology*, Colorado, USA.
3. Mališić J., Jevremović V. (1991) *Statistička analiza i slučajni procesi*, Beograd.
4. Pekarova P., Pekar J. (2005), Long-term discharge prediction for the Turnu Severin station (the Danube) using a linear autoregressive model, *Hydrological processes*, 1217-1228
5. Petrović J. (1993) *Analiza stohastičkih karakteristika vremenskih serija meteoroloških veličina – seminarski rad na poslediplomskim studijama iz predmeta Stohastička hidrologija*, Beograd.
6. Plavšić J., Blagojević B., Todorović A., Despotović J. (2016) Long-term behavior of precipitation at three stations in Serbia, *Acta hydrotechnica*, Ljubljana.
7. Probst J., Tardy Y. (1987) Long range streamflow and world continental runoff fluctuation since the beginning of this century, *Journal of Hydrology*, 289-311.
8. Salas, J.D. (1993) Analysis and modeling of hydrologic time series. U: *Handbook of Hydrology*, D. R. Maidment (ed), McGraw-Hill, Chapter 19.
9. Stojković M. (2015) *Dugoročne promene u stohastičkoj strukturi hidroloških vremenskih serija – doktorska disertacija*, Beograd.
10. Vogel M. R. (1986) The Probability Plot Correlation Coefficient Test for the Normal, Lognormal, and Gumbel Distributional Hypotheses, *WATER RESOURCES RESEARCH*, 587-590.
11. Williams GR. (1961) Cyclical variations in the world-wide hydrological data, *Journal of the Hydraulics Division*, 71–88.

## **Statistička analiza trajanja leda na Dunavu kod hidrološke stanice Bezdan**

Ognjen Gabrić<sup>1</sup>, Jasna Plavšić<sup>2</sup>

APSTRAKT: Mnoge reke severnog hladnog i severnog umerenog pojasa su tokom određenog dela godine pokrivene ledom. Iako led ima značajan uticaj na pojavu visokih i niskih vodostaja, rečni saobraćaj i proizvodnju energije, statistička analiza pojave leda se u hidrološkoj literaturi retko obrađuje. U radu su prikazani rezultati stohastičke analize pojave leda na reci Dunav metodom prekoračenja iznad praga a na osnovu podataka sa hidrološke stanice Bezdan. Obradeni su podaci za period od 1900. do 1982. godine. Analizom su obuhvaćeni podaci o broju javljanja događaja sa ledom i trajanja leda.

Keywords: pojava leda, Dunav, Bezdan, metoda prekoračenja

## **Statistical analysis of the Danube ice duration at the hydrological station of Bezdan**

ABSTRACT: Many rivers of the northern frigid and the northern temperate zones are covered with ice during certain periods in a year. Although ice has significant role on occurrence of the high or low water levels, river traffic and energy production, statistical analysis of the ice occurrence is not so common in hydrological literature. In this paper, results of the stochastic analysis of the ice occurrence on the Danube River at the Bezdan hydrologic station are shown, using the peaks over threshold method and based on the data form 1900 to 1982.

Keywords: ice occurrence, Danube, Bezdan, peaks over threshold method

---

<sup>1</sup> Dr Ognjen Gabrić, docent, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, ogabric@gf.uns.ac.rs

<sup>2</sup> Dr Jasna Plavšić, docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet Beograd, jplavsic@grf.bg.ac.rs

## 1 Uvod

Rečni led predstavlja jednu od nekoliko komponenata kriosfere čija se globalna količina još uvek nije u potpunosti kvantifikovala (Beltaos i Prowse, 2009). Poznato je da su velike svetske reke, naročito one u severnom pojasu, pogođene pojavom površinskog leda. Po nekim procenama, 60% ovih reka je pogođeno uticajem leda na njihov režim. Kritična mesta za pojavu ledenih barijera su delovi vodotoka gde je usled hidrološko-morfoloških uslova formiranje leda predodređeno (Zelenhasić i Ruski, 1991). To su delovi toka čiji nizvodni delovi imaju smanjenu propusnu moć ledohoda.

Pojava i stanje kretanja leda na rekama predstavlja bitan činilac za izučavanje zimskog režima reka sa aspekta zaštite od poplava, plovidbe i energetike. Među prirodnim činiocima koji utiču na pojavu leda najpresudnija je temperatura vazduha, naročito trajanje negativnih temperatura i njihova suma (Zelenhasić i Ruski, 1991). Zaleđivanje kopnenih voda počinje posle više dana sa temperaturom vazduha ispod 0°C (Ćirković, 1975). Sem niskih temperatura vazduha razvoju leda pogoduju i mali nagibi korita, male brzine vode i smanjeni proticaji u ovom delu godine. Antropološki faktori kao što su regulacije rečnih korita i korišćenje hidroelektrana menjaju morfologiju korita a samim tim utiču i na režim leda na rekama (Takacs i sar, 2013).

Na vojvođanskim rekama se led javlja u decembru, januaru, februaru i martu. Sava ledi posle 21 dana, Dunav posle 15-18 dana, Tisa posle 7-12 dana, Begej i kanali hidrosistema DTD posle 7 dana sa temperaturom manjom od 0°C. Na reci Dunav, na osnovu podataka za period od 1947. do 1970. godine, na najuzvodnijim deonicama se led zadržava do 2,5 meseca dok se na najnižvodnijim zadržava 1,5 meseci (Ćirković, 1975).

U ovom radu je analizirano trajanje dana sa ledom na reci Dunav na osnovu podataka sa hidrološke stanice Beždan za period od zimske sezone 1900/01 do 1981/82 (Zelenhasić i Ruski, 1991). Analiza obuhvata period od 1.12. do 31.3. i ne razdvaja ledohod od ledostaja. Metodom prekoračenja analizirana je raspodela verovatnoće trajanja dana sa ledom.

## 2 Metodologija

Prilikom analize ekstremnih vrednosti trajanja dana sa ledom metodom prekoračenja, u razmatranje se uzimaju sve vrednosti trajanja leda koje su veće od izabrane bazne vrednosti. Generalno, to je i prednost ove metode u odnosu na metodu godišnjih maksimuma gde u analizu ulaze samo godišnje vrednosti ne uzimajući u obzir činjenicu da u nekoj godini može biti više vrednosti koje su veće od ekstremne vrednosti u nekoj drugoj godini. Statistička analiza metodom prekoračenja se sastoji od tri koraka:

1. određivanje raspodele broja prekoračenja u sezoni,
2. određivanje raspodele samih prekoračenja, i
3. kombinacije prethodne dve raspodele u raspodelu sezonskih ekstrema.

### 2.1 Raspodela broja prekoračenja

Broj ledenih događaja sa trajanjem dužim od izabranog praga koji će se javiti tokom zimske sezone je diskretna slučajna promenljiva koja u mnogome zavisi od veličine postavljenog praga. Pod ledenim događajem se podrazumeva vremenski period od pojave do nestanka leda na površini reke. Moguća je pojava više ovakvih događaja u toku jedne godine. Generalno, što je visina praga veća, to je i broj događaja manji, kao i broj godina bez leda. Uzorak predstavlja hronološki niz broja događaja  $n$  sa ledom u jednoj godini (u ovom slučaju, jedna godina je jedna zimska sezona) čije je trajanje duže od izabranog praga, odnosno niz prekoračenja trajanja leda preko praga. Na osnovu uzorka, računa se srednja vrednost prekoračenja,  $\bar{n}$ , i disperzija broja prekoračenja,  $S_n^2$ , kao:

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i, \quad S_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2 \quad (1)$$

gde je  $N$  broj posmatranih godina i  $n_i$  broj prekoračenja u sezoni.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Glavni kriterijum prilikom prilagođavanja broja javljanja prekoračenja je vrednost indeksa disperzije,  $I$ , koji predstavlja statistiku koju računamo kao:

$$I = \frac{s_n^2}{n} \quad (2)$$

Prilikom izbora teorijske raspodele, vodimo se sledećim kriterijumima:

- $I < 1$ : binomu raspodelu biramo za teorijsku
- $I = 1$  (praktično  $0,8 < I < 1,2$ ): Poasonova raspodela
- $I > 1$ : negativna binomna raspodela

## 2.2 Raspodela prekoračenja

Visina prekoračenja predstavlja kontinualnu slučajnu promenjivu definisanu kao:  $U = T - T_b$ , gde je  $T$  trajanje leda, a  $T_b$  izabrani prag za trajanje. Funkcija raspodele visine prekoračenja,  $H(u)$ , definisana je kao:

$$H(u) = H(T - T_b) = P\{U \leq u\} \quad (3)$$

Prilikom razmatranja  $f$ -je visine prekoračenja najčešće se upotrebljavaju eksponencijalna i Vejbulova raspodela.

Empirijska raspodela visine prekoračenja je formirana dodeljivanjem kompromisnih verovatnoća po Vejbulovoj formuli. Za ispitivanje saglasnosti empirijske raspodele sa teorijskim raspodelama visine prekoračenja upotrebljeni su Kramer-Mizesov test i test Kolmogorov-Smirnova. U testu je pretpostavljena saglasnost raspodela a izabrana vrednost praga značajnosti je  $\alpha=5\%$ .

## 2.3 Raspodela trajanja dana sa ledom

Godišnji maksimumi predstavljaju slučajnu promenjivu  $T$ , koja se definiše kao najveća vrednost od slučajnog broja  $n$  prekoračenja  $U$  tokom zimske sezone:

$$T = T_b + \max\{U_j; j = 1, 2 \dots n\} \quad (4)$$

Raspodela godišnjih maksimuma,  $F(z)$ , je verovatnoća:

$$F(z) = P\{T \leq t\} \quad (5)$$

koja je definisana samo za vrednosti  $t > T_b$ . Kombinovanjem raspodela broja i visine prekoračenja, uzimajući u obzir sve moguće kombinacije broja prekoračenja u vegetacionoj sezoni, dobija se opšti izraz za raspodelu  $F(z)$  godišnjih maksimuma trajanja leda:

$$F(z) = p_0 + \sum_{j=1}^{\infty} p_j [H(t - T_b)]^j \quad (6)$$

koji se, u zavisnosti od tipa raspodele broja prekoračenja i tipa raspodele visine prekoračenja, svodi na:

- Poasonova raspodela:  $F(t) = \exp\{-\lambda(1 - H)\}$  (7)

- Binomna raspodela :  $F(t) = [1 - p(1 - H)]^a$  (8)

- Negativna binomna raspodela :  $F(t) = \left[1 + \left(\frac{1}{p} - 1\right)(1 - H)\right]^{-b}$  (9)

gde su  $\lambda$ ,  $p$  i  $a$  parametri odgovarajućih diskretnih raspodela. U zavisnosti od raspodele visine prekoračenja, verovatnoća  $(1-H)$  je:

- Eksponencijalna raspodela:  $1 - H = \exp\{-(t - t_b)/\alpha\}$  (10)

- Vejbulova raspodela: :  $1 - H = \exp\{-(t - t_b)/\alpha\}^\beta$  (11)

Inverzni izrazi, odnosno izrazi za kvantile zadate vrednosti funkcije raspodele  $F$  glase:

- Eksponencijalna raspodela:  $t(F) = t_b + \alpha[-\ln(1 - H)]$  (12)

- Vejbulova raspodela:  $t(F) = t_b + \alpha[-\ln(1 - H)]^{1/\beta}$  (13)

gde  $1-H$  zavisi od raspodele broja prekoračenja:

- Poasonova raspodela:  $1 - H = -\frac{\ln F}{\lambda}$  (14)

- Binomna raspodela:  $1 - H = \frac{1-F^{1/a}}{p}$  (15)

- Negativna binomna raspodela:  $1 - H = \frac{F^{-1/b}-1}{\frac{1}{p}-1}$  (16)

Funkcija raspodele godišnjih maksimuma  $F(t)$  definisana je samo za vrednosti  $T > T_b$ , odnosno  $u > 0$ . Može se pokazati iz prethodnih izraza da se kvantili mogu sračunati samo za vrednost funkcije raspodele:

- Poasonova raspodela broja prekoračenja:  $F > e^{-\lambda}$  (17)

- Binomna raspodela broja prekoračenja:  $F > (1 - p)^a$  (18)

- Negativna binomna raspodela broja prekoračenja:  $F > p^b$  (19)

## 2.4 Empirijska raspodela trajanja

Svaka sezona u kojoj se nije javio led na reci predstavlja jedan podatak iz zasečenog skupa podataka. Ukupan broj sezona bez leda, odnosno broj podataka u zasečenom skupu, isključivo zavisi od usvojene minimalne dužine trajanja dana sa ledom. Prilikom određivanja empirijske raspodele godišnjih maksimuma potrebno je podacima iz zasečenog skupa dodeliti verovatnoću. U tu svrhu korišćen je model uslovne verovatnoće [5] koji uvodi verovatnoću  $p_0$  da će neka izmerena vrednost biti ispod praga. Ako je  $r$  od ukupno  $n$  podataka prešlo prag detekcije, tada je:

$$p_0 = \frac{n-r}{n} \quad (20)$$

Bezuslovna raspodela za bilo koju vrednost  $x$  veću od praga je:

$$F(x) = p_0 + (1 - p_0)G(x) \quad (21)$$

gde  $G(x)$  predstavlja raspodelu vrednosti koje su prešle prag, a parametri ove raspodele se određuju uobičajenim postupkom za kompletne podatke iz nezasečenog skupa.

U prvom koraku se uzorak, koji čine godišnji maksimumi trajanja leda, uređuje u rastući niz, pri čemu uočavamo da postoji  $n_0$  podataka tj. godina u kojima nema pojave leda sa trajanjem dužim od praga. Podacima iz zasečenog skupa dodeljujemo verovatnoću  $p_0$ :

$$p_0 = P\{Z_{max} = 0\} = \frac{n_0}{N} \quad (22)$$

gde je  $N$  ukupan broj zimskih sezona, odnosno godina.

Maksimalnim trajanjima  $T_{max} > 0$  u ostalim sezonama/godinama dodeljujemo verovatnoću:

$$F_{emp} = p_0 + (1 - p_0) \cdot F'_{emp} \quad (23)$$

gde je  $F'_{emp}$  empirijska raspodela trajanja leda iznad praga, definisana preko Vejbulove formule, koja glasi:

$$F'_{emp} = \frac{i-n_0}{N'+1} \quad (24)$$

gde je  $N'=N-n_0$  ukupan broj podataka iz nezasečenog skupa.

Nakon formiranja empirijske i teorijskih raspodela godišnjih maksimuma pristupa se ispitivanju njihove saglasnosti, istim testovima kao i kod određivanja raspodele visine prekoračenja.

## 3 Rezultati

Za period od 1900/01. do 1981/82. analizirane su dužine trajanja dana sa ledom na reci Dunav a na osnovu podataka sa hidrološke stanice Bezdan (Slika 2). Od analizirane 82 godine, led se na Dunavu javio tokom 62 godine, a ukupno je zabeleženo 115 ledenih događaja. Led se prosečno pojavljuje 1,4 puta godišnje. Maksimalno trajanje leda započeto je 19.12.1946. i trajalo je do 19.3.1947. godine, ukupno 91 dan. Osnovne statistike analiziranog niza date su u tabeli 1.

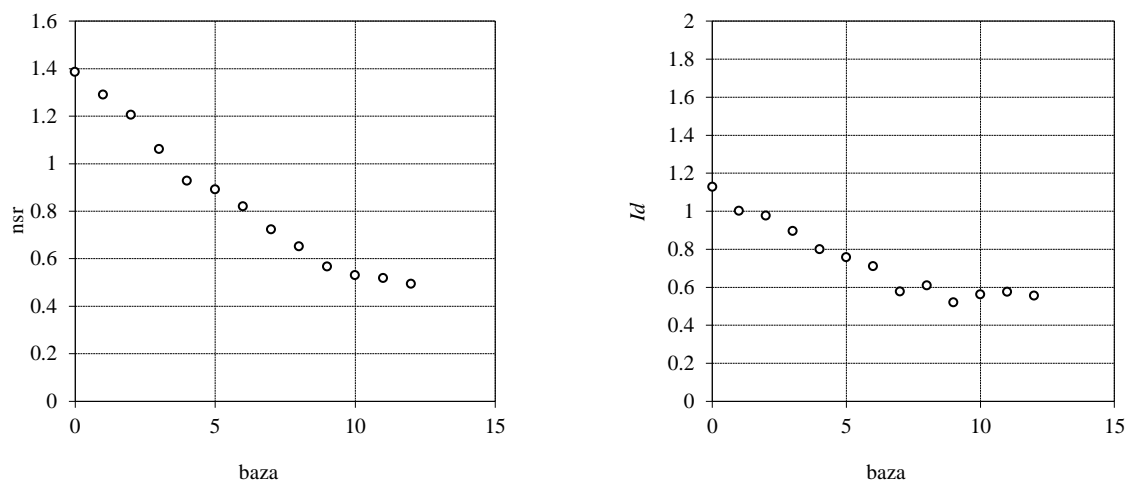
Tabela 1. Osnovne statistike niza trajanja leda.

Table 1. Basic statistics of analysed series.

Analizirani period	Broj javljanja	Prosečno javljanja godišnje	Najduže trajanje (dana)	Najkraće trajanje (dana)	Prosečno trajanje (dana)	Najranije/najkasnije javljanje	Broj javljanja po mesecima			
							XII	I	II	III
1900-1982	115	1,40	91	1	18,6	1.12/23.2	38	58	19	0

Na osnovu raspoloživih podataka, sračunate su teorijske raspodele trajanja ledenih događaja za baze od 0 do 12 dana. Raspodele trajanja za pragove duže od 12 dana nisu računane jer ukupan broj događaja pada ispod 41 a prosečno javljanje na 0,5 što je daleko od poželjnih vrednosti (Slika 1).

Za broj javljanja ledenih događaja proračunate su statistike za određivanje Poasonove, binomne i negativne binomne raspodele. Indeks disperzije se stabilizuje od baze 7 a time i parametri binomne raspodele. Za sve baze, karakteristike niza pikova ( $C_v$ ,  $C_s$  i  $C_s/C_v$ ) su daleko od teorijskih vrednosti za Vejbulovu (W) i opštu Pareto (GP) raspodelu (Slika 3). Razlog za ovo je činjenica da je raspodela trajanja mešovita. Naime, teorijska raspodela menja nagib kod trajanja od 70 dana ali postavljanje tako visoke baze ne bi imalo smisla s obzirom da je prosečno trajanje ledenih događaja oko 18 dana.



Slika 1. Zavisnost prosečnog broja javljanja i indeksa disperzije od baze.

Figure 1. Dependences of mean number of occurrences, dispersion index and adopted threshold

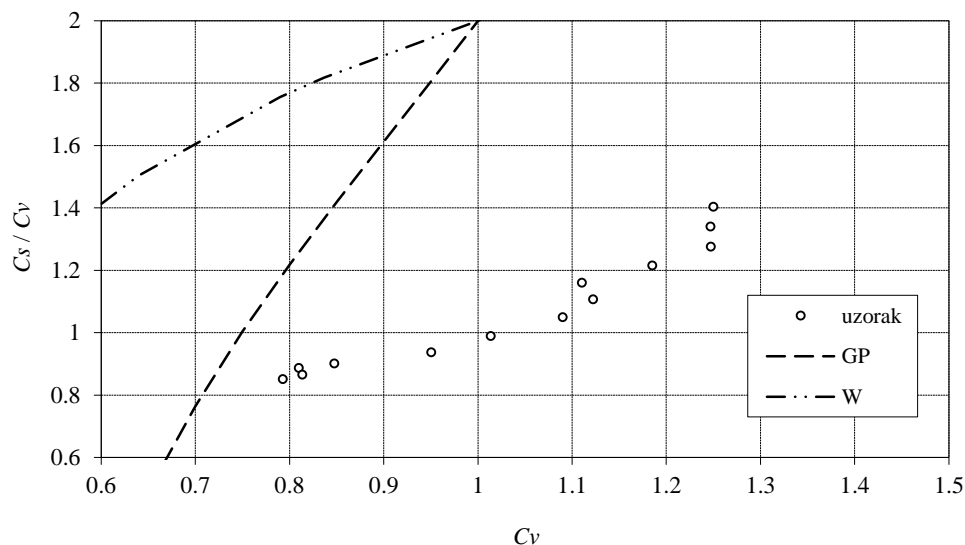
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2. Broj javljanja i maksimalna godišnja trajanja leda za analizirani period.

Figure 2. Number of occurrences and maximal annual duration for analysed period.

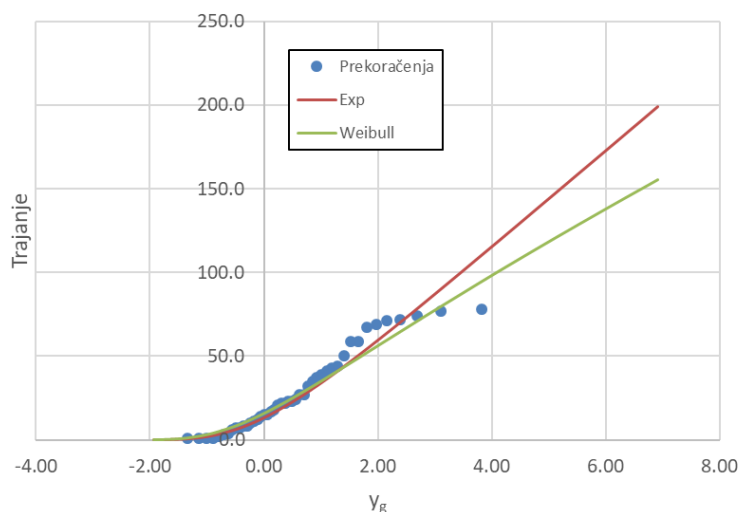


Slika 3. Dijagram odnosa  $C_s/C_v$  i  $C_v$  za razmatrani niz trajanja leda za različite pragove (baze).

Figure 3. Moment ratio diagram for ice duration above various thresholds.

Za raspodelu prekoračenja (pikova) godišnjih trajanja ledenih događaja izračunate su teorijske raspodele i to eksponencijalna i Vejbulova. Kao što je ranije navedeno, analizirane su teorijske verovatnoće za pragove od 0 do 12 dana. Rezultati ukazuju da je najbolje slaganje teorijskih i osmotrenih vrednosti za usvojeni prag od 11 dana. Za ovako postavljenu granicu Kramer-Mizesov i Kolmogorov-Smirnov test pokazuje da analizirani niz prati Vejbulovu raspodelu. Rezultati su prikazani na slici 4.

Za raspodelu maksimalnih godišnjih trajanja ledenih događaja usvojen je model koji kombinuje binomnu i Vejbulovu raspodelu. Rezultati su prikazani na slici 5.

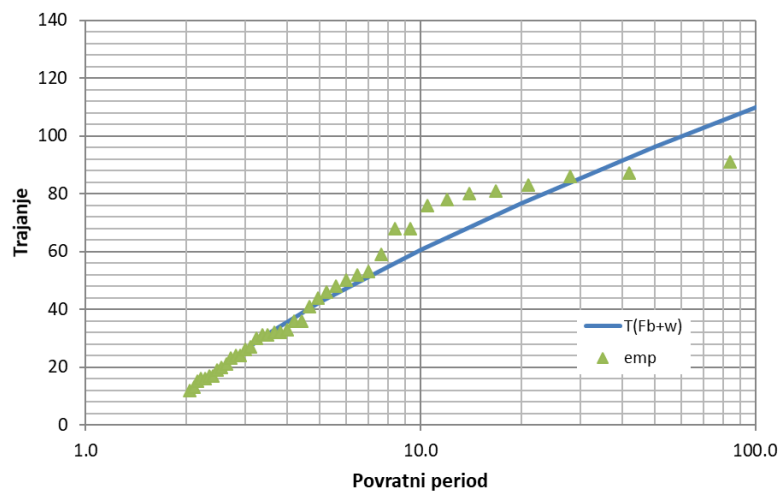


Slika 4. Teorijske raspodele prekoračenja trajanja ledenih događaja.

Figure 4. Theoretical distributions of peaks over threshold of ice duration.

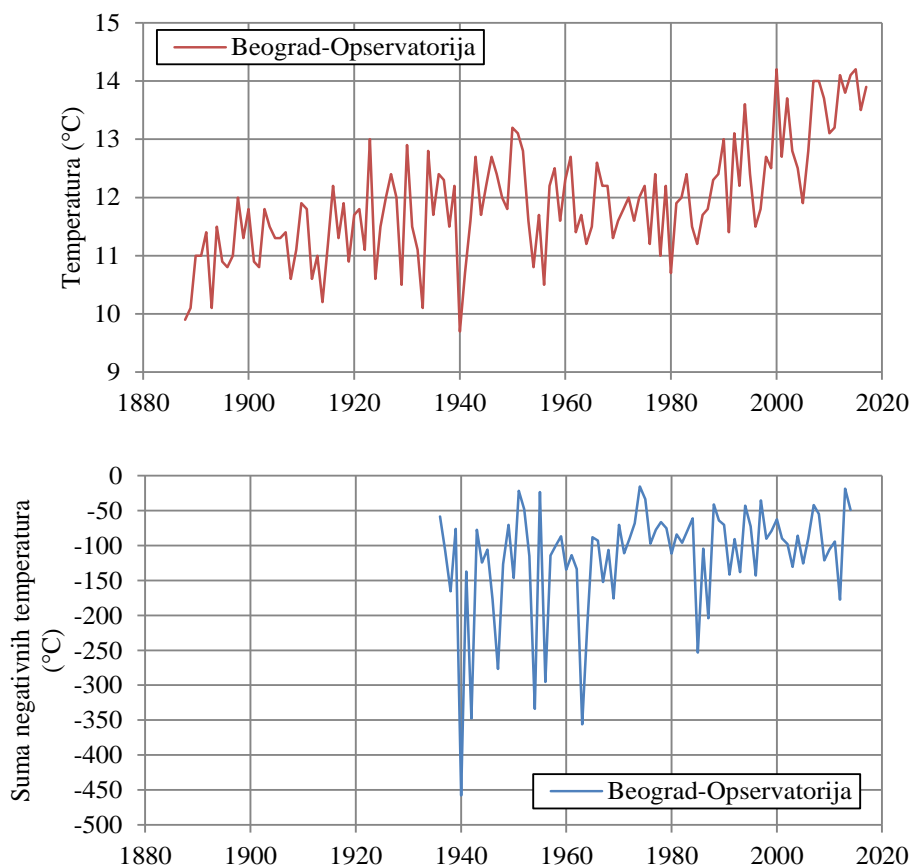


# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 5. Teorijska raspodela maksimalnog godišnjeg trajanja ledenih događaja

Figure 5. Distribution of the annual maximum ice duration.



Slika 6. Srednje godišnje temperature 1888-2017 (gore) i godišnje sume negativnih temperatura 1936-2014 (dole) u Beogradu.

Figure 6. Mean annual temperatures for 1888-2017 (top) and annual sums of negative temperatures 1936-2014 (bottom) in Belgrade.

## 4 Diskusija i zaključak

U radu su analizirana trajanja ledenih događaja na vodomernoj stanici Bezdan, na reci Dunav, u periodu od 1900. do 1982. godine. Za proračun teorijskih verovatnoća prevazilaženja korišćena je metoda prekoračenja. Prilikom proračuna nije posebno odvajan ledohod od ledostaja.

Rezultati ukazuju da kombinacija binomne i Vejbulove raspodele, uz postavljeni prag od 11 dana, najbolje opisuje trajanje ledenih događaja. Ipak, za sve razmatrane pragove, pokazalo se da je raspodela maksimalnog godišnjeg trajanja leda složenog oblika, jer se nagib raspodele (u smislu porasta trajanja sa porastom povratnog perioda) menja za povratne periode veće od 10 godina. Na osnovu usvojene metodologije, maksimalno godišnje trajanje leda 10-godišnjeg povratnog perioda iznosi oko 60 dana, dok maksimalno godišnje trajanje leda povratnog perioda 100 godina iznosi oko 110 dana. Pouzdanost ocene trajanja leda većih povratnih perioda je manja, jer se u ovom delu raspodele empirijska i teorijska raspodela manje slažu.

Treba naglasiti da je analiza trajanja leda u ovom radu sprovedena za prvih 80 godina 20. veka u kojima se još uvek nije manifestovao uticaj globalnog zagrevanja usled emisije gasova staklene bašte i kada su negativne temperature bile znatno zastupljenije. Na slici 6 prikazan je hronološki niz srednjih godišnjih temperatura u Beogradu, kao najduži raspoloživ niz, na kojoj se može videti rastući trend temperatura u periodu posle 1982. godine. Na istoj slici su prikazane godišnje sume negativnih temperatura u Beogradu, koje ukazuju na postojanje uslova za formiranje leda. Ove sume negativnih temperatura pokazuju značajan opadajući trend, što, zajedno sa rastućim trendom srednjih temperatura, vodi ka zaključku da su uslovi za formiranje leda promenjeni u periodu posle 1982. godine. Ipak, pojava leda u 2017. godini na Dunavu u Srbiji imala je značajno trajanje (skoro 30 dana, mada sa prekidima uz rad ledolomaca).

Na osnovu svega iznetog može se zaključiti da, uprkos promeni klimatskih uslova, trajanje leda na Dunavu može da bude značajno, kao i da ima značajne posledice pre svega na plovidbu i rizik od ledenih poplava. Iz tog razloga bi analizu trajanja pojave leda na rekama, a naročito na plovnim rekama, trebalo analizirati detaljnije uz primenu složenijeg statističkog aparata koji bi omogućio da se uzmu u obzir nestacionarnosti u klimatskim uslovima, kao i uz potencijalno razmatranje složenih (dvokomponentnih) raspodela koje bi bolje opisale raspodelu trajanja leda u različitim domenima verovatnoće pojave.

## Zahvalnica

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. Beltaos, S., Prowse, T. (2009) River-ice hydrology in a shrinking cryosphere. *Hydrological Processes*, 23(1), pp. 122–144. DOI:10.1002/hyp.7165
2. Ćirković, Lj. (1975): Pojava i režim leda površinskih voda SAP Vojvodine. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, 55 (1), 3-28.
3. Takács, K., Kern, Z., Nagy, B. (2013) Impacts of anthropogenic effects on river ice regime: Examples from Eastern Central Europe. *Quaternary International*, 293, pp. 275–282. DOI:[10.1016/j.quaint.2012.12.010](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.12.010)
4. Zelenhasić, E., Ruski, M. (1991) *Inženjerska hidrologija*. Naučna knjiga. 1991.

## Laboratorijsko ispitivanje magnetnog polja ravnih elektromagnetnih senzora

Luka Stojadinović<sup>1</sup>, Damjan Ivetić<sup>2</sup>, Dušan Prodanović<sup>3</sup>

APSTRAKT: Princip rada elektromagnetnih (EM) senzora brzine ili protoka se zasniva na Faradejevom zakonu indukcije. Kretanje provodne tečnosti kroz magnetno polje senzora indukuje na krajevima elektroda koje su u kontaktu sa tečnošću napon proporcionalan brzini kretanja tečnosti. U opštem slučaju, veličina napona je rezultat integracije vektorskog proizvoda nelinearnog polja brzina i nelinearnog magnetnog polja. Za potrebe ispitivanja osetljivosti EM senzora, od interesa je poznavati raspored magnetnog polja koje generiše uređaj. Takođe, potrebno je definisati koji uslovi, koji se mogu javiti u eksploataciji, utiču na oblik indukovano magnetnog polja a samim tim i na pokazivanje samog uređaja. U ovom radu predstavljeni su rezultati ispitivanja magnetnog polja ravnog EM senzora brzine, sprovedenih u laboratoriji Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Ključne reči: merenje protoka, merenje brzine, merenje magnetnog polja, elektromagnetni senzori, neuralne mreže

## Laboratory assessment of the flat electromagnetic meter's magnetic field

ABSTRACT: The operating principle of the Electro Magnetic (EM) velocity, or flow meters is based on the Faraday's law of the induction. The motion of the conductive fluid through the magnetic field of the sensor generates, on the electrodes, the voltage proportional to the flow velocity. In general, the output voltage value is a result of the integration of the non-linear flow field and non-linear magnetic field. In order to assess the sensitivity of the EM probes, the magnetic field distribution is needed. Also, it is required to determine which operational conditions can affect the distribution of the induced magnetic field, and thus the sensor's output voltage. In this paper, results of the laboratory analysis of the magnetic field of the flat EM velocity meter are presented. Laboratory tests were performed at the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade.

Keywords: flow measurements, velocity measurements, magnetic field measurements, electromagnetic meters, neural networks

---

<sup>1</sup> Luka Stojadinović, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Pinosava-Beograd, [st\\_luka@hotmail.com](mailto:st_luka@hotmail.com)

<sup>2</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Procena količine zagađujućih materija u kanalizacionim sistemima i njihov uticaj na životnu okolinu je tema koja u vremenu značajne urbanizacije gradskih centara sve više u centru pažnje. Preduslov za navedene pouzdane procene je poznavanje protoka u kanalizacionim sistema u realnom vremenu. Međutim, merenje protoka kanalizacionih sistema je zahtevan zadatak, jer u se u njima nailazi na niz problema koji ometaju pravilan rad uređaja. Neki od tih problema su veliki odnosi minimalnog i maksimalnog protoka koje je potrebno meriti (i do 1:1000), kombinovani uslovi tečenja (prelazak iz tečenja sa slobodnom površinom u tečenje pod pritiskom), „prljava“ voda koja sa sobom nosi nanos i mnogi drugi.

Jedna od popularnijih metoda za merenje protoka u kanalizaciji je metoda „brzina – proticajni presek“. Suština ove metode svodi se na odvojeno merenje dubine, iz koje je relativno lako proračunati poprečni presek, i merenje srednje profilske brzine. Množenjem poprečnog preseka sa srednjom brzinom dobija se protok. Međutim, merenje srednje brzine nije jednostavan zadatak [1].

Metode za merenje brzine u otvorenim tokovima koje su među najzastupljenijim su ultrazvučne (UZV) metode [2]. Zahvaljujući velikom napretku tehnologije poslednjih godina, a posebno dostignućima u obradi signala, UZV metode su postala pouzdane i ekonomski pristupačne. Mane ovih metoda su to što su osetljive na rad u uslovima velikog opterećenja toka nanosom usled prljanja UZV senzora prilikom sedimentacije nanosa (što je često slučaj u merenjima u kanalizaciji) kao i nepouzdana rezultati merenja pri malim brzinama i/ili malim dubinama vode (opet, čest slučaj pri usporima u kanalizaciji).

Kao alternativa UZV merenju brzine u otvorenim tokovima, na tržištu se pojavljuju ravni (pločasti) elektromagnetni (EM) merači brzine. Merni princip je takav da elektromagnetni senzori treba da rade bez poteškoća u uslovima zaprljanosti senzora nanosom kao i da pokazuju veliku linearnost izmerenog signala pri minimalnim brzinama i dubinama vode. Tehnika elektromagnetnog merenja protoka u cevovodima pod pritiskom je odavno zauzela svoje mesto na tržištu kao veoma pouzdana i u stručnoj literaturi je obrađena, međutim, elektromagnetno merenje brzine u otvorenim tokovima je još uvek nedovoljno izučena oblast u literaturi.

Svi EM senzori rade po principu Faradejevog zakona: kalemovi u senzoru prave elektromagnetno polje, a voda koja prolazi kroz polje indukuje struju. Indukovana struja je proporcionalna brzini vode u zoni elektromagnetnog polja. Iz opisanog principa rada, jasno je da dve veličine imaju ključni uticaj na veličinu napona koji će se indukovati: oblik i jačina elektromagnetnog polja koje pravi senzor kao i polje brzina vode. Ukoliko se ova dva polja na pravilan način dovedu u zavisnost sa izlaznim naponom senzora, za merna mesta u uslovima realnog korišćenja moguće je izvršiti kalibraciju senzora kompjuterskim modelovanjem polja brzina.

U okviru istraživanja koja su opisana u ovom radu ispitani su razni aspekti elektromagnetnog polja koje pravi ravni EM senzor. U radu je prikazana uspostavljena metodologija i rezultati merenja elektromagnetnog polja. Proveren je uticaj provodnog fluida kao i feromagnetnih objekata na oblik i intenzitet magnetnog polja. Takođe, dati su osnovni principi za korišćenje heurističkog algoritma neuralnih mreža za obradu izmerenih vektora magnetnog polja. Pokazano je da algoritam neuralnih mreža, uz pravilno postavljanje klasifikacionog problema, može efikasno obraditi izmereni signal.

## 2 Metodologija

### 2.1 Teorijske osnove rada EM senzora

Elektromagnetni senzori za merenje brzine zasnivaju se na Faradejevom principu magnetne indukcije. Osnovni princip je sledeći: voda koja je provodnik se kreće određenom brzinom kroz elektromagnetno polje koje pravi senzor, pa se po Faradejevom zakonu indukcije, u vodi, na elektrodama senzora indukuje razlika potencijala proporcionalna brzini vode [3]. Napon koji se meri  $E$  se može opisati razlikom potencijala na elektrodama preko jednačine [4]:

$$E = \int_A (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot \vec{V} dA \quad (1)$$

gde je  $\vec{V}$  – brzina strujanja,  $A$ - integraciona zona EM senzora,  $\vec{B}$  - magnetno polje, a  $\vec{j}$  predstavlja „virtuelnu struju“. Virtuelna struja predstavlja gustinu struje koja se uspostavlja u fluidu prolaskom jedinične struje iz jedne elektrode u drugu. Vektorski proizvod  $\vec{B} \times \vec{j}$  definiše Bevirov težinski vektor  $\vec{w}$ . Bevir je definisao uslov „idealnog“ merača po kom je uređaj neosetljiv na varijacije u rasporedu brzina ukoliko je rotor težinskog vektora jednak nuli [5].

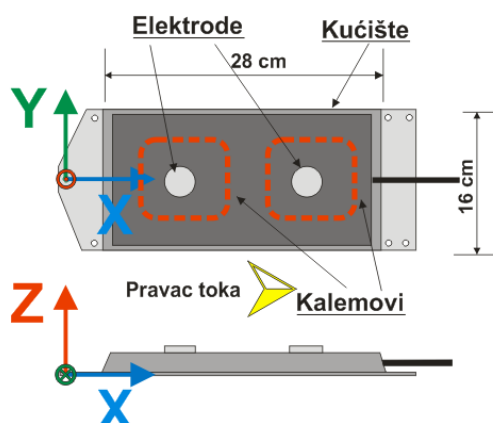
U praksi se uobičajno umesto vektora koriste težinske funkcije. Izvestan broj istraživača se bavio formulisanjem metodologija za procenu težinskih funkcija pomoću Grinove teoreme [6], dvostrukih Furijeovih redova [7] ili analitičkih rešenja ekvivalentnih Laplasovih jednačina [8], međutim, ovi istraživači su se isključivo bavili sistemima pod pritiskom.

## 2.2 Opis laboratorijske opreme

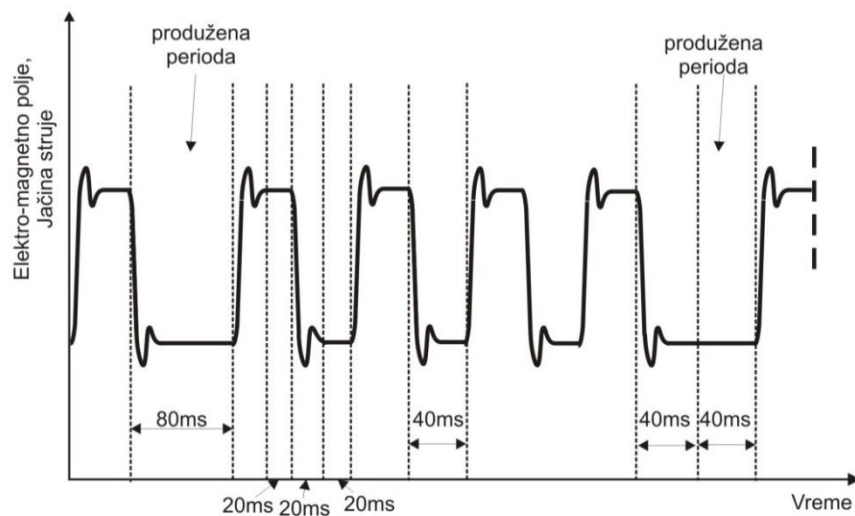
### 2.2.1 Ravni elektromagnetni senzor za merenje brzine

Za analizu magnetnog polja ravnog elektromagnetnog senzora za merenje brzine (u daljem tekstu ravni EM senzor) korišćen je senzor DC-2 proizvođača „Svet instrumenata“. Senzor se sastoji od inox kućišta (masa), dve elektrode i dva kalemova koja su namotana u pravougaoni oblik oko prednje i zadnje elektrode (Slika 1). Prema podacima koje nudi proizvođač, tačnost uređaja je  $\pm 1\%$ , preciznost je 0.001 m/s, dok je mereni opseg  $\pm 15$  m/s u oba smera. Fabrička kalibracija uređaja pokazuje veliku linarnost indukovano napona i izmerene brzine.

Pobuda kalemova za generisanje elektromagnetnog polja vrši se jednosmernom strujom jačine 80 mA. Smer struje menja znak na svakih 40 ms (efektivna frekvencija pobude  $1/(2 \times 0,04) = 12,5$  Hz), sa izuzetkom svake četvrte periode gde je perioda produžena na 80 ms (Slika 2). Razlog za produženje, odnosno, povremenu promenu frekvencije pobude, je smanjenje moguće greške alijasinga (slučaj kada se poklopi frekvencija pobude sa umnoškom frekvencije vrtloga) kao i smanjenje uticaja promena elektro-hemijskog potencijala na pokazivanje sonde. Pri svakoj promeni znaka, potrebno je 20 ms da se magnetno polje stabilizuje (a samim tim i izmeren indukovani napon na mernim elektrodama), pa je koristan signal zadnjih 20 ms pre nove promene znaka (osim kod produžene periode gde je koristan signal 60 ms). Struja prednjeg i zadnjeg kalemova je uvek suprotnog pravca.



Slika 1. Skica ravnog EM senzora sa lokalnim koordinatnim sistemom.



Slika 2. Pobuda ravnog elektromagnetnog senzora.

Osnovni izlazni signali ravnog EM senzora su osrednjeni napon između svake od dve elektrode i mase senzora, kao i tzv. unutrašnja impedansa (koja se koristi kao kvalitativni indikator promene provodnosti vode i prisustva sedimenta na elektrodama). Merenje izlaznih signala se vrši pomoću univerzalnog industrijskog mernog instrumenta DC2.34 [9]. Instrument vrši analogno/digitalnu konverziju signala u trenucima stabilne jačine struje (zadnjih 20 ms pre promene znaka) i kao konačnu vrednost daje osrednjeni napon dve elektrode jednog ciklusa produžene periode. DC2.34 se koristi definisanje parametara pobudne struje, frekvencije uzorkovanja i dužine osrednjavanja ravnog EM senzora.

Napajanje instrumenta DC2.34 vrši se jednosmernom strujom preko unutrašnjeg NiMh akumulatora. Pri svim merenjima, akumulator je bio priključen na spoljni izvor (punjač 12V priključen na električnu mrežu). U slučajevima potpunog pražnjenja akumulatora između merenja, pre novog merenja akumulator se punio 20 min zbog stabilizacije napajanja. Napon napajanja tokom merenja se smatra konstantim (promena manja od 0.5%).

### 2.2.2 Senzor za merenje elektromagnetnog polja (magnetometar)

Za merenje elektromagnetnog polja korišćen je senzor proizvođača Melexis oznake MLX-90363 (u daljem tekstu magnetometar) koji meri jačinu magnetnog polja u tri ortogonalna pravca. Merenje magnetnog polja zasniva se na Halovom principu, tj. na pojavi da tok struje kroz široki provodnik krivi svoju pravu trajektoriju usled prisustva magnetnog polja. Ovo odstupanje od prave trajektorije može se izmeriti merenjem napona u pravcu upravnom na tok struje. U slučaju kada provodnik nije u magnetnom polju, pomenuti napon je jednak nuli, dok se u slučaju skretanja struje napon menja srazmerno jačini magnetnog polja koje deluje na provodnik i krivi tok.

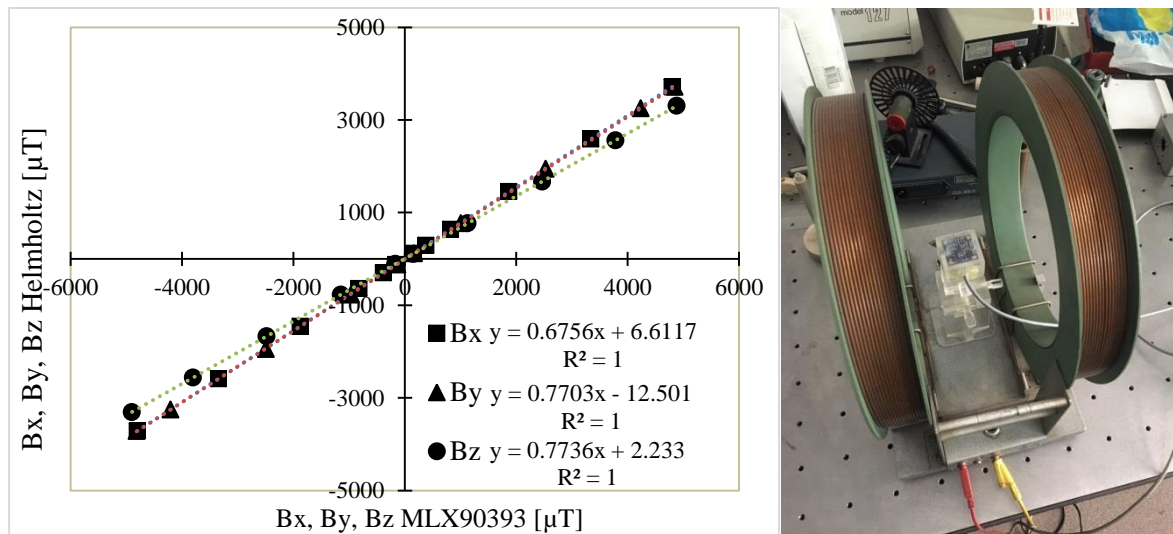
Magnetometar poseduje više režima rada, od kojih je najznačajniji brzo snimanje (egl. Burst mode). U režimu brzog snimanja, moguće je napraviti 60 merenja jačine elektromagnetnog polja sa intervalom merenja (sample rate) od 11 ms između svakog merenja. Ovaj režim rada se koristi za merenje elektromagnetnog polja koje generiše ravni EM senzor jer je frekvencija snimanja više od duplo veća od frekvencije promene znaka elektromagnetnog polja.

Sam magnetometar je postavljen u kućište od pleksiglasa približnih dimenzija 4x4x4 cm. Ovim je omogućena zaštita senzora kao i mogućnost njegovog preciznijeg pozicioniranja dok samo kućište ne utiče na mereno magnetno polje. Kućište je moguće pričvrstiti preko nosača za pozicioner u kanalu (opisan u Poglavlju 2.2.3) radi snimanja elektromagnetnog polja u kanalu.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Komunikacija i prikupljanje snimljenih podataka iz magnetometra obavlja se preko Arduino programabilnog čipa koji se sa kompjuterom povezuje serijskom vezom preko USB porta.



Slika 3. Kalibracija i rezultati kalibracije magnetometra.

Magnetometar je kalibrisan uz pomoć Helmholtzovih (Helmholtz) navoja. Kalibracija je izvršena u laboratoriji Elektrotehničkog Fakulteta Univerziteta u Beogradu, uz pomoć profesora Peđe Mihailovića sa odseka za fizičku elektroniku. Aparatura se sastoji od dva solenoida kroz koje teče struja jednakog inteziteta a koji su postavljeni duž iste ose na rastojanju koje je jednako njihovom poluprečniku. Jačina elektromagnetog polja koje prave solenoidi je u linearnoj zavisnosti od jačine struje koja se propušta kroz solenoide, tako da je za kalibraciju magnetometra potrebno meriti samo jačinu struje. Magnetometar takođe poseduje sondu za merenje trenutne temperature koja je potrebna za temperaturnu kompenzaciju. Kalibracija magnetometra je obuhvatila i eksperimentalno utvrđivanje krive temperaturne kompenzacije izmerenih jačina magnetnog polja.

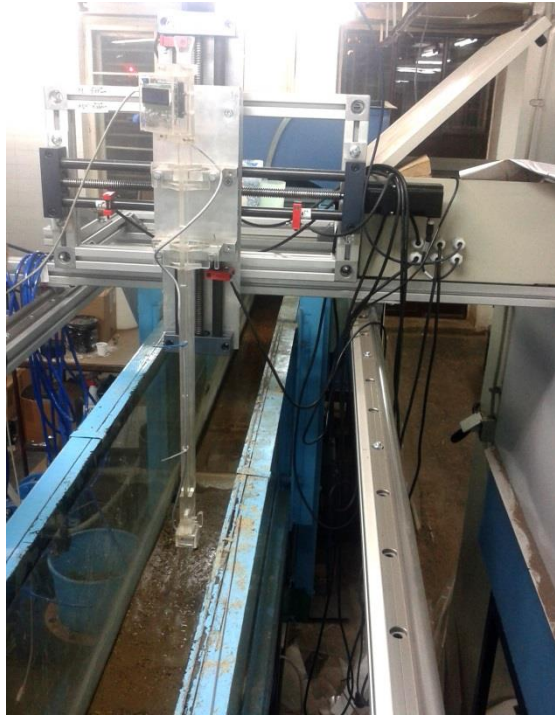
Kalibracija magnetometra izvršena je u tri ortogonalna pravca. Rezultati kalibracije pokazali su da je kalibraciona kriva magnetometra skoro idelano linearna (Slika 3).

### 2.2.3 Kontrola položaja magnetometra i sistematizacija izmerenih podataka

Jedan deo merenja elektromagnetnog polja ravnog EM senzora vršena su u hidrauličkom kanalu u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Radi lakšeg i preciznijeg merenja magnetnog polja u kanalu korišćen je pozicioner za kontrolu položaja magnetometra. Pozicioner se duž kanala kreće po šinama montiranim iznad kanala a u ravni poprečnog preseka kanala uz pomoć step motora (Slika 4). Ovim su značajno olakšana tačkasta merenja u kanalu jer je pozicioneru moguće lako programirati algoritam kretanja tokom merenja.

Za korišćenje magnetometra i pozicionera napravljeno je grafičko korisničko okruženje (eng. *GUI – Graphic User Interface*) pomoću kog se unose koordinate za pomeranje pozicionera kao i algoritam kretanja. Takođe, pomoću korisničkog okruženja moguće je pratiti trenutni položaj pozicionera u odnosu na zadati algoritam kretanja grafičkim putem. GUI zapisuje snimljene podatke svake tačke u kojoj se meri jačina magnetnog polja u odvojeni *txt* fajl gde je ime fajla pozicija magnetometra u odnosu na relativni koordinatni početak svake zone snimanja.

Za potrebe merenja magnetnog polja van hidrauličkog kanala gde se magnetometar pomerao ručno, GUI prikazuje i grafike sortiranih snimljenih vrednosti radi vizuelne kontrole merenih podataka. Za svaki Z nivo, GUI prikazuje maksimalne i minimalne vrednosti snimljene u tom nivou kao i relativni odnos tekuće tačke u odnosu na pomenute vrednosti. Uz pomoć ovih podataka, raster za snimanje je proređivan u okolini gde se smatralo da su vrednosti polja dovoljno male.



Slika 4. Pozicioner sa magnetometrom.

## 2.3 Opis mernih mesta

U cilju određivanja jačine i oblika magnetnog polja koje generiše ravni EM senzor, izvršena su dva osnovna merenja magnetnog polja, merenje van hidrauličkog kanala („ručno“ merenje) i merenje u hidrauličkom kanalu (automatizovano merenje pozicionerom). Oba merenja vršena su u po unapred definisanom 3D rasteru.

Pored toga, u hidrauličkom kanalu izvršena su i dva dodatna merenja. Cilj ovih merenja je ispitivanje uticaja na jačinu i oblik elektromagnetnog polja feromagnetnih objekata u okolini ravnog EM senzora kao i uticaj vode koja teče na oblik elektromagnetnog polja.

Na Slici 1 prikazan je lokalni koordinatni sistem u odnosu na ravni EM senzor koji se koristi za određivanje pozicije magnetometra i vektora izmerenog elektromagnetnog polja pri svim merenjima.

Sva merenja obavljena su u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

### 2.3.1 Merenja van kanala

Osnovna svrha ovog merenja je početno određivanje zone do koje magnetno polje ravnog EM senzora doseže, kao i merenje onih delova magnetnog polja koje u hidrauličkom kanalu nije moguće izmeriti zbog fizičkog ograničenja širine kanala.

Da bi se magnetno polje izmerilo što tačnije, potrebno je postaviti merno mesto sa što manje okolnih elektromagnetnih smetnji. Ovo je postignuto tako što je ravni EM senzor postavljen na drvenu ploču koja je udaljena od svih feromagnetnih predmeta i uzdignuta od poda nearmiranim betonskim blokovima oko 30 cm. Ravni EM senzor je tokom celog merenja držan u istom položaju.

Merenja su izvršena po tačkastom rasteru u 3 dimenzije najveće gustine 2.5 x 2.5 cm u horizontalnoj ravni i 1 cm u vertikalnoj ravni. Pozicioniranje magnetometra u horizontalnoj ravni vršeno je pomoću ploče od pleksiglasa na koju je zalepljena šema rastera odštampana na papiru gustine 2.5 x 2.5 cm. Centar kućišta postavljan je na centar odštampanog rastera. Merenja su rađena u

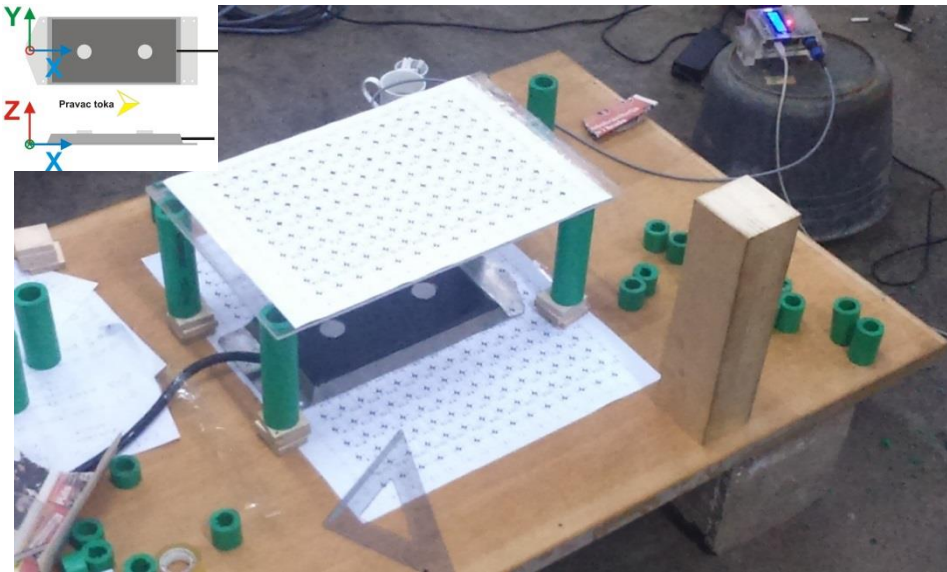


# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

serijama po horizontalnoj ravni, gde se posle svake horizontalne serije ploča od pleksiglasa podigne za 1 ili 2 cm uz pomoć nogara koji su izrađeni od plastike.

Udaljavanjem od ravnog EM senzora jačina elektromagnetnog polja se smanjuje tako da su merene tačke po rasteru proređivane, mada se osnovna šema rastera po kom je jačina elektromagnetnog polja merena zadržala. Ukupna širina koja je obuhvaćena merenjem je po 22,5 cm u oba smera Y ose, dužina 32,5 cm (pozitivan smer X ose) dok je najveća visina 22 cm (Z osa). Takođe, merenja sa leve strane rastera u odnosu na Y osu su urađena sa dosta proređivanja u odnosu na desnu stranu.

Na Slici 5 prikazano je merno mesto van kanala. U gornjem desnom uglu slike vidi se Arduino uređaj za komunikaciju sa magnetometrom.



Slika 5. Merenje magnetnog polja van kanala.

## 2.3.2 Merenja u kanalu

Pri prvom merenju najgušćeg rastera, ravni EM senzor za merenje brzine postavljen je u delu hidrauličkog kanala gde je levi zid (gledano u pozitivnom pravcu X ose) od prefarbanog lima a desni zid od stakla. Merenja su rađena u serijama po poprečnim presecima upravim na X osu sa automatskim pomeranjem između tačaka uz pomoć pozicionera.

Gustina merenja elektromagnetnog polja je u donjoj zoni 1 cm u sva 3 pravca ( $Z < 17$  cm po lokalnom koordinatnom sistemu), dok je za zonu od 17 do 30 cm gustina merenja 2 cm za vertikalni i pravac upravan na X osu, dok je u pravcu X ose zadržana gustina od 1 cm u obe zone. Najniži nivo koji je meren je  $Z = 2.5$  cm (magnetometar na 2 mm od vrha EM senzora). Proređenje merenja utvrđeno je na osnovu rezultata merenja elektromagnetnog polja van kanala gde se pokazalo da je jačina elektromagnetnog polja u gornjoj zoni zanemarljiva (manja od  $2 \mu T$  što je red veličine standardne devijacije magnetometra u 3 *burst* serije merenja ambijentalnog magnetnog polja).

Ukupno je izmereno 32 poprečna preseka, što daje dimenzije snimljenog rastera  $34 \times 19 \times 27$  cm (prva dva poprečna preseka su na međusobnom rastojanju 1,5 cm dok su ostali preseki na rastojanju 1 cm). Ukupan broj tačaka koji je izmeren je  $372 \times 32 = 11904$ .

### 2.3.3 *Uticaj feromagnetnih objekata i vode koja teče*

Za merenje uticaja feromagnetnih objekata, ravni EM senzor pomeren je u hidrauličkom kanalu u položaj gde su oba bočna zida od stakla. Ovo merenje izvršeno je radi utvrđivanja da li metalni zid sa leve strane sonde iz prvog merenja utiče na jačinu i oblik elektromagnetnog polja koje generiše senzor. Ovo merenje izvršeno je u 2 poprečna preseka, na rastojanju po X osi od 12 i 26 cm, jer je prvim merenjem utvrđeno da su ovo karakteristični poprečni preseki gde je jačina elektromagnetnog polja u dva pravca najveća dok je u jednom pravcu približno jednaka nuli.

Merno mesto za merenje uticaja na magnetno polje vode koja teče je skoro identično prethodno opisanom mernom mestu, s izuzetkom da je u kanalu ispod ravnog EM senzora postavljen prag visine 15 cm. Tokom merenja magnetometrom kroz hidraulički kanal je tekla voda različitim kontrolisanim protocima. Uloga praga je da smanji dubinu vode iznad EM senzora jer magnetometar nije otporan na vodu a potrebno je izmeriti tačke sa što jačim magnetnim poljem radi pouzdanijeg poređenja (već je rečeno da je zona iznad sonde gde su elektromagnetna polja koja proizvodi sonda merljiva do visine oko 15 cm). Pored toga, pragom su se postigle veće brzine vode iznad EM senzora, što je značajno jer je pretpostavka da ukoliko se elektromagnetno polje menja usled protoka vode, fenomen će biti primetniji sa većim brzinama vode preko ravnog EM senzora. Određene su 4 tačke u poprečnom preseku X=12 cm gde je merena jačina elektromagnetnog polja za više različitih protoka, ukupno 18 protoka u rasponu od 5,1 do 20,7 l/s.

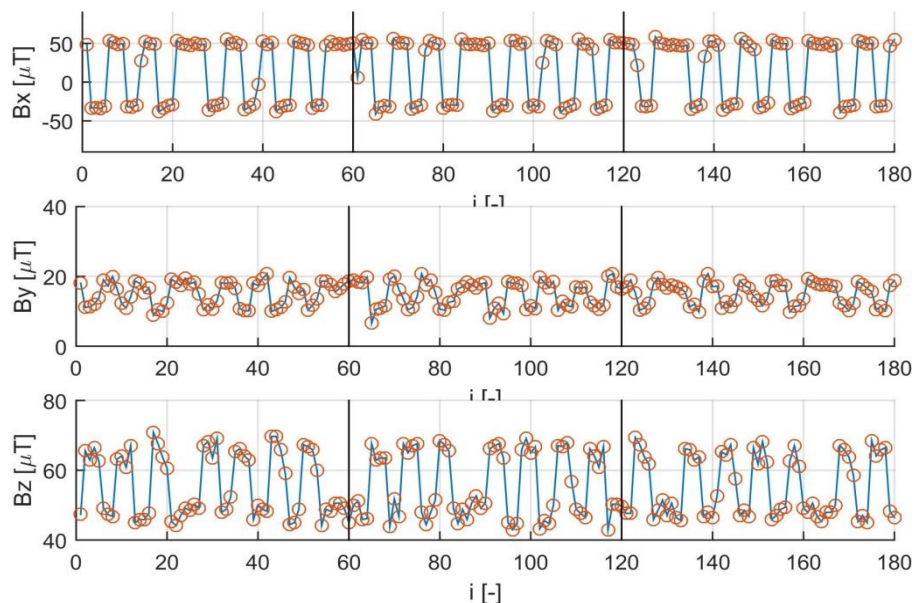
## 2.4 **Obrada rezultata**

### 2.4.1 *Obrada merenja magnetnog polja u tački*

Elektromagnetno polje je u svakoj tački na svim mernim mestima mereno magnetometrom sa tri uzastopna *Burst* snimanja (60 snimanja u jednom *Burst*-u na po 11 ms). S obzirom da se promena elektromagnetnog polja koje generiše ravni EM senzor za merenje brzine usled promene smera struje kroz kalemve senzora dešava na svakih 40 ms, u jednom smeru struje se očekuju po 3 ili 4 podataka o jačini generisanog elektromagnetnog polja. Međutim, magnetometar će snimiti i jačinu elektromagnetnog polja u trenucima promene elektromagnetnog polja usled promene smera struje (promena polariteta elektromagnetnog polja), kao i trenutke u kojima se elektromagnetno polje stabilizuje (prvih 20 ms u periodu prema Slici 2).

Da bi se dobio konačni podatak o jačini elektromagnetnog polja u jednoj tački, potrebno je razdvojiti podatke koji su snimljeni u tački pri različitim poloaritetima elektromagnetnog polja na dve grupe, izbaciti podatke koji su snimljeni tokom promene i stabilizacije elektromagnetnog polja i odrediti u kojoj grupi se dešava produženje periode. Podaci snimljeni magnetometrom u jednoj tački prikazani su na Slici 6.

Koristi se usvojena konvekcija o znaku elektromagnetnog polja takva da je polje kom pripada znak produžene periode „pozitivno“, dok je suprotno polje „negativno“.



Slika 6. Izmerene vrednosti magnetnog polja u jednoj tački. Vertikalnim linijama su razdvojene serije *Burst* snimanja

### 2.5 Obrada rezultata neuralnim mrežama

Za obradu podataka o magnetnom polju koristi se neuralna mreža koja pripada grupi kompetitivnih klasifikujućih neuralnih mreža [10]. Zadatak ovakve mreže je da za ulazni vektor odredi kojoj klasi (grupi) on pripada. Svaki neuron u mreži predstavlja po jednu klasu. Neuron je definisan svojim težinskim vektorom koji je iste dimenzionalnosti kao i ulazni vektor. Težinski vektor neurona može se shvatiti kao položaj neurona u prostoru u kom se nalaze ulazni vektori. Kada se mreži prosledi ulazni vektor, unutar mreže se računa razdaljina ulaznog vektora i svakog težinskih vektora tj. neurona, a zatim se neuronu koji je najbliži ulaznom vektoru dodeli izlaz 1 dok svi ostali neuroni imaju izlaz 0 čime se vrši klasifikacija.

Prvi korak pri formiranju mreže je definisanje broja grupa u koje će se ulazni vektori grupisati. Nakon toga sledi treniranje mreže, tj. određivanje težinskih vektora mreže. Osnovni algoritam treniranja kompetitivnih (takmičarskih) mreža je da za ulazni vektor odredi najbliži neuron u prostoru (pobednički neuron) i njega približi odgovarajućem ulaznom vektoru. Proces približavanja pobedničkog neurona ulaznom vektoru predstavlja učenje neuralne mreže. Nakon dovoljno iteracija, neuroni su postavljeni u različitim grupama (klasterima) ulaznih vektora [11].

U zavisnosti od dimenzionalnosti ulaznih vektora, klasifikujuće neuralne mreže mogu biti jednodimenzionalne, dvodimenzionalne i višedimenzionalne. Iako je ulazni vektor za obradu elektromagnetnog polja dvodimenzionalan (jačina polja i vreme), u obradi merenja elektromagnetnog polja pokazalo se da dvodimenzionalna mreža nema značajnih prednosti u odnosu na jednodimenzionalnu mrežu.

Rezultat snimanja elektromagnetnog polja u jednoj tački je matrica dimenzije 180,3 gde svaki red predstavlja po jedno snimanje EM polja u *Burst* modu a svaka kolona jačinu EM polja za tri ortogonalna pravca. Ulazni podatak za neuralnu mrežu je jedna kolona matrice, tj. 180 jednodimenzionalnih vektora.

Zadatak neuralne mreže je da podeli ulazne podatke u 4 grupe prema njihovom položaju u 1-D prostoru. Osnovna ideja je da će se u dve unutrašnje grupe naći rezultati koji su snimljeni u trenucima promene polariteta dok će spoljne grupe sadržati korisne podatke o jačini elektromagnetnog polja u suprotnim polaritetima. Kao konačna vrednost jačine pozitivnog i negativnog elektromagnetnog polja

uzimaju se srednje vrednosti spoljnih grupa. Osrednjavanje spoljnih grupa ima još jednu funkciju. S obzirom da nije bilo moguće uspešno razdvojiti podatke u trenucima stabilnog magnetnog polja (zadnjih 20 ms poluperiode) od podataka snimljenih tokom stabilizacije magnetnog polja, osrednjavanjem cele spoljne grupe se smanjuje uticaj tačaka snimljenih tokom stabilizacije magnetnog polja na konačnu vrednost.

Nakon što je neuralna mreža vratila dve osrednje vrednosti, potrebno je odrediti koja vrednost pripada produženoj periodi, tj razdvojiti ih po usvojenoj konvenciji znaka elektromagnetnog polja. Ovo se postiže novom neuralnom mrežom koja vrši klasifikaciju u dve grupe. Nakon izvršene klasifikacije, u svakoj grupi se vrši se pretraga za 6 uzastopno izmerenih podataka. Grupa koja ima više ovakvih podataka je grupa u kojoj je snimljena produžena perioda. Ukoliko ni jedna grupa nema 6 uzastopnih podataka, smatra se da je jačina magnetnog polja dovoljno mala da se može uzeti vrednost 0. U tačkama u okolini spajanja pojedinačnih *Burst* serija (tačke 60 i 120) mogući niz od 6 uzastopnih podataka ne uzima u obzir jer nisu snimljene sa rastojanjem od 11ms već malo većim usled kratke pauze između dve uzastopne *Burst* serije.

Obrada merenja elektromagnetnog polja neuralnom mrežom kao rezultat daje pozitivno i negativno elektromagnetno polje u svakoj tački prema usvojenoj konvenciji. Ovi rezultati su pomereni u odnosu na nulu za jačinu ambijentalnog magnetnog polja (zemljino geomagnetno polje čija je magnituda reda veličine 60  $\mu$ T i okolne smetnje). Uvodi se pretpostavka da je ambijentalno magnetno polje nepromenjivo u toku jednog snimanja kao i da kalemovi ravnog EM senzora za merenje brzine prave jednako polje u oba smera ali sa različitim predznakom. Da bi se pri spajanju rezultata u prostoru izbegla analiza dva elektromagnetna polja (pozitivno i negativno) i iz rezultata izbacila vrednost ambijentalnog magnetnog polja, primenjena je sledeća formula:

$$B = \frac{Bp - Bn}{2} \quad (2)$$

Kao konačna vrednost jačine elektromagnetnog polja u tački, uzima se odstupanje pozitivnog polja sa odgovarajućim predznakom u odnosu na ambijentalno magnetno polje. Sa ovako obrađenim rezultatima pristupiće se analizi elektromagnetnog polja u prostoru. Ovim se opravdava postupak u obradi rezultata neuralnim mrežama gde se za zanemarljivu razliku pozitivnog i negativnog polja usvaja vrednost i jednog i drugog polja nula a ne ambijentalno magnetno polje.

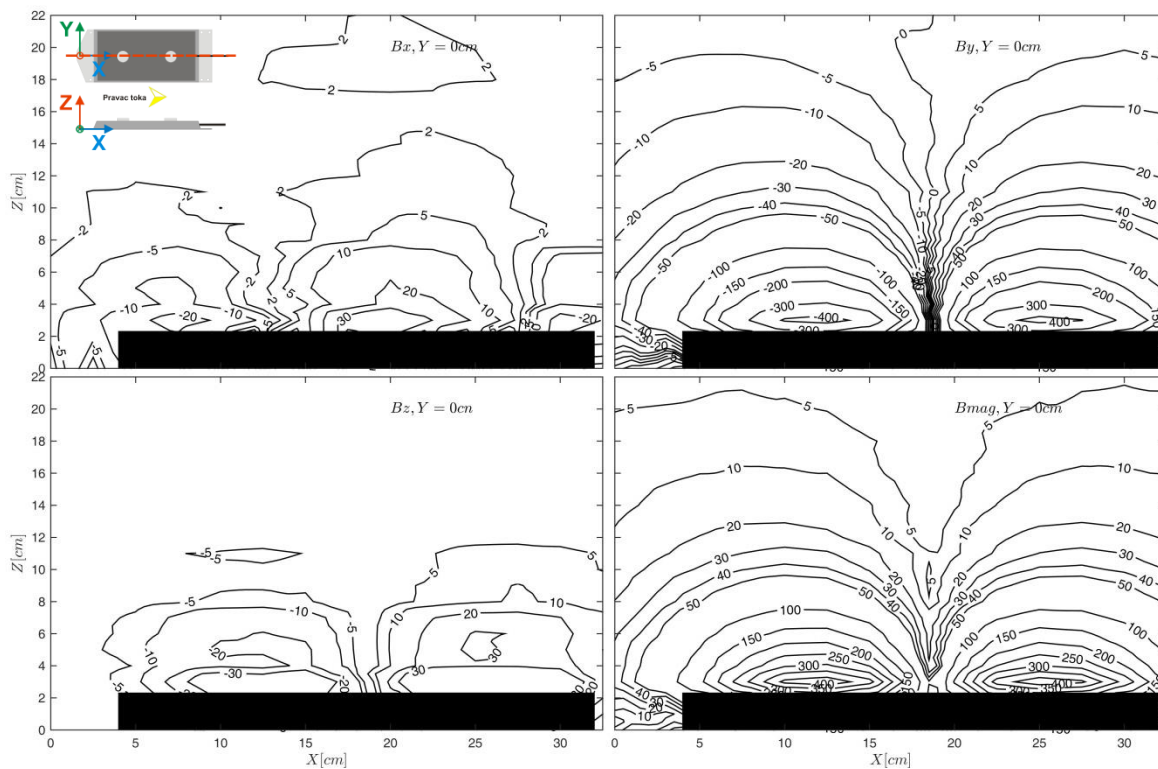
## 3 Rezultati i diskusija rezultata

### 3.1 Elektromagnetno polje van kanala

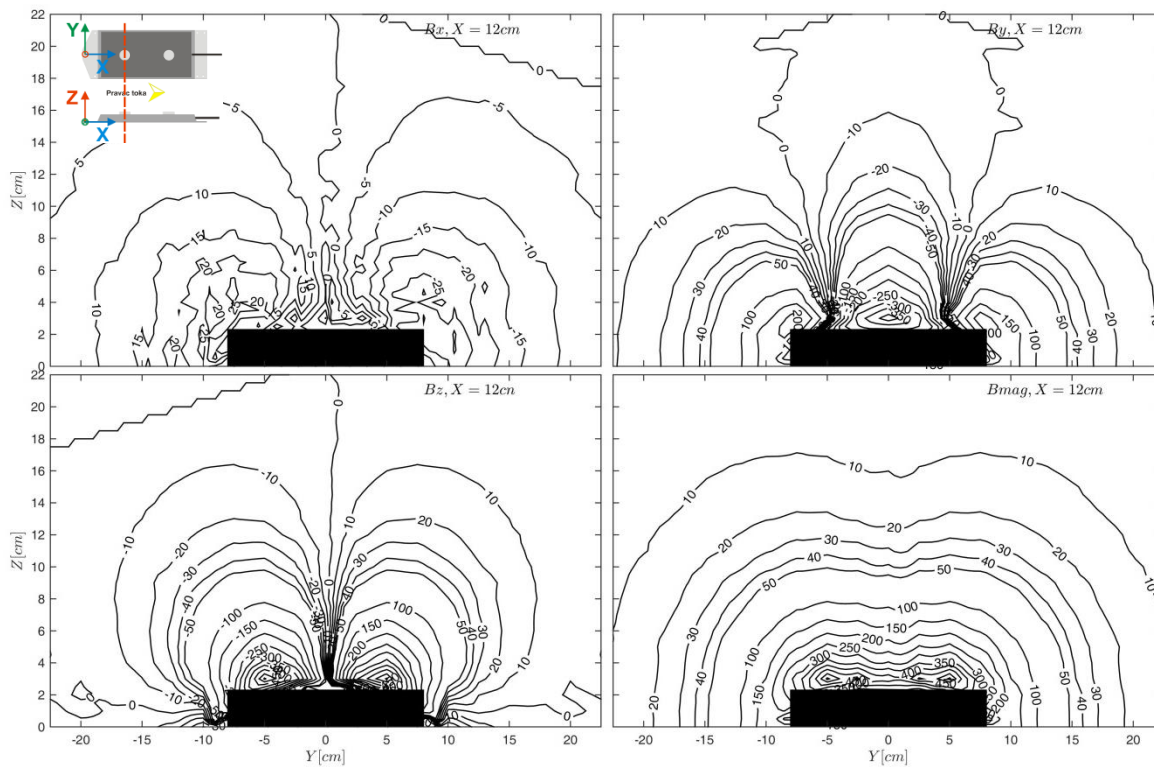
U ovom poglavlju prikazaće se rezultati merenja elektromagnetnog polja van hidrauličkog kanala. Merno mesto je opisano u poglavlju 2.3.1. Merenja elektromagnetnog polja s desne strane ravnog EM senzora u odnosu na XZ osu bila su dosta gušća u odnosu na levu stranu. Upoređivanjem rezultata sa leve i desne strane utvrđeno je da je polje dovoljno simetrično da se za potrebe grafičkog prikaza polja, polje sa leve strane može preslikati na desnu stranu. Pretpostavlja se da su mala odstupanja od simetričnih vrednosti prouzrokovana nesavršenom simetričnošću kalemova u ravnom EM senzoru kao i greškom usled pozicioniranja magnetometra. Na Slici 7 prikazane su konturne linije elektromagnetnog polja za vektore polja  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  kao i konturne linije magnitude polja za ravan XZ,  $Y = 0$ . Na slici 8 prikazan je presek po Y ravni za  $X = 12$  cm (presek iznad prve elektrode).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 7. EM polje na mernom mestu van kanala,  $Y = 0$ . Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.



Slika 8. EM polje na mernom mestu van kanala,  $X = 12$  cm. Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

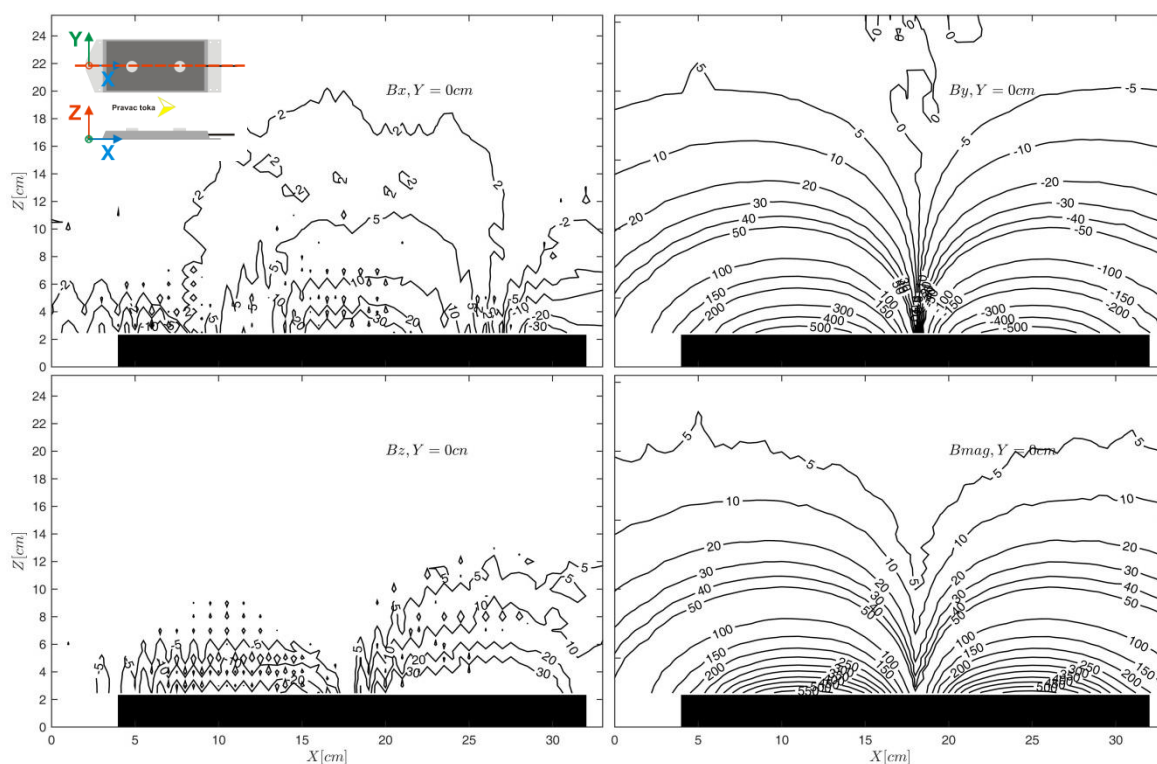
U prikazu na Slikama 7 i 8 nisu uključena merenja u zoni iznad samog uređaja, gde je magnetometar bio postavljen na ravni EM senzora. U ovoj zoni su izmerene najveće vrednosti jačine elektromagnetnog polja. Najveća izmerena vrednost magnitude je  $1137 \mu\text{T}$  ( $B_x = 239 \mu\text{T}$ ;  $B_y = -110 \mu\text{T}$ ;  $B_z = 1106 \mu\text{T}$ ). Zona u kojoj su vrednosti elektromagnetnog polja približno 1% od maksimalne izmerene vrednosti je  $Z = 15.2 \text{ cm}$ , dok je širina po 21 cm sa leve i desne strane.

### 3.2 EM polje u kanalu

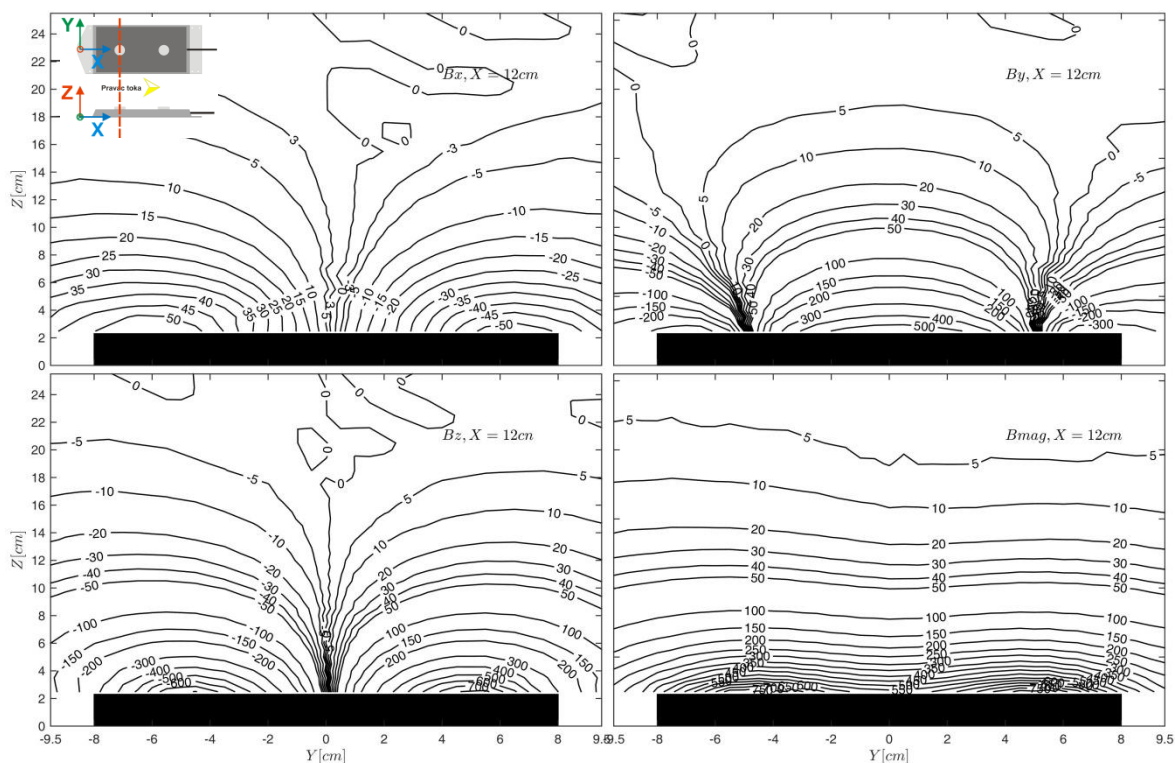
Merenja elektromagnetnog polja u hidrauličkom kanalu vršena su od visine  $Z = 2.5 \text{ cm}$  (3 mm iznad vrha elektrode ravnog EM senzora). Elektromagnetno polje je mereno gušće, sa rasterom  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ . Pored toga, pozicioniranje magnetometra u kanalu je sa manjom greškom, jer je rađeno uz pomoć pozicionera.

Na Slici 9 prikazane su konturne linije elektromagnetnog polja za vektore polja  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  kao i konturne linije magnitude polja za ravan  $XZ$ ,  $Y = 0$ . Na Slici 10 prikazan je presek po  $Y$  ravni za  $X = 12 \text{ cm}$  (presek iznad prve elektrode).

Na Slici 10 može se primetiti da se elektromagnetno polje „iskrivilo“ u gornjoj levoj zoni (pogled u  $X$  pravcu). Merenjem uticaja feromagnetnih objekata na elektromagnetno polje utvrdiće se da li je u pitanju uticaj metalnog zida i drugih okolnih smetnji sa leve strane hidrauličkog kanala.



Slika 9. EM polje na mernom mestu u kanalu,  $Y = 0$ . Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.



Slika 10. EM polje na mernom mestu van kanala,  $X = 12$  cm. Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

### 3.3 Rezultati merenja uticaja feromagnetnih objekata i vode koja teče

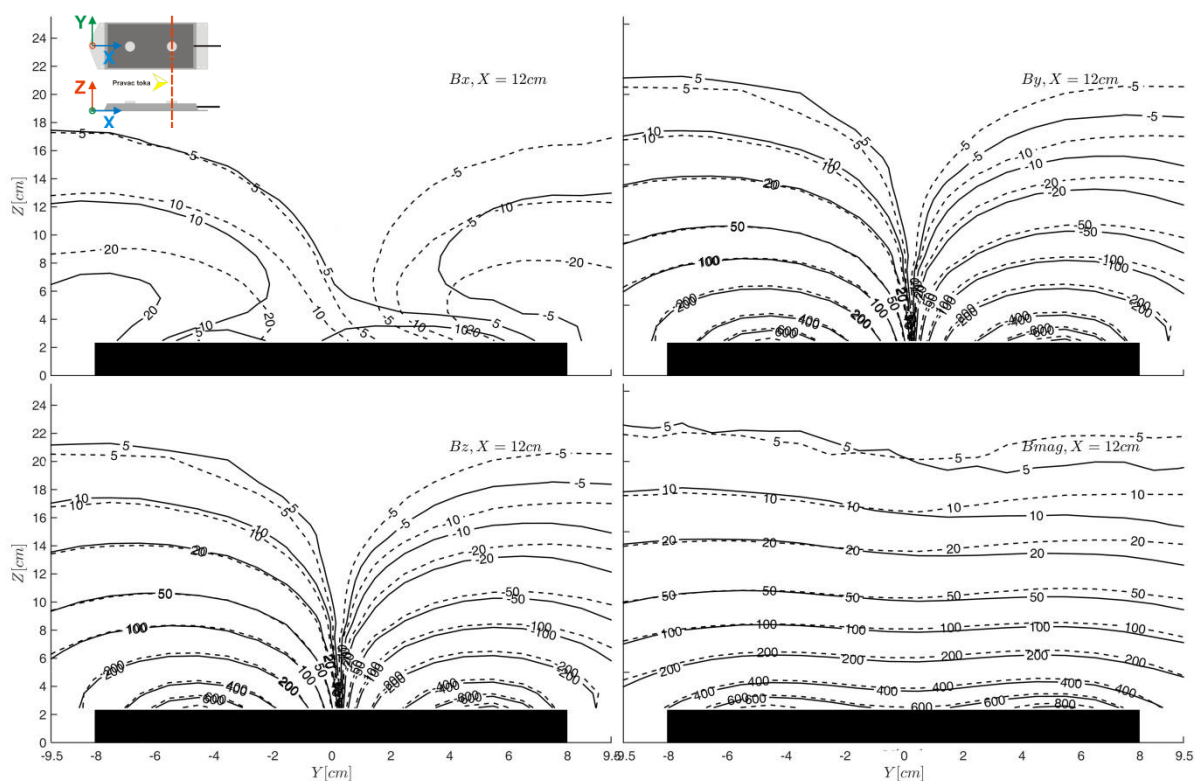
#### 3.3.1 Uticaj feromagnetnih objekata na EM polje

S obzirom na uočenu nesimetričnost elektromagnetnog polja u hidrauličkom kanalu, merenje je ponovljeno u dva karakteristična preseka,  $X = 12$  cm i  $X = 26$  cm (merenja iznad elektroda). Ravni EM senzor za merenje brzine je sada pomeren u deo kanala gde su oba zida od stakla. Na Slici 11 prikazani su rezultati ovog merenja. Punom linijom su prikazani rezultati iz gustog merenja elektromagnetnog polja gde se metalni zid nalazio sa leve strane ravne sonde ( $Y > 0$ ), dok je isprekidanom linijom prikazano ponovljeno merenje. Kod ovog merenja, elektromagnetno polje je simetrično. Takođe, ovo merenje se u desnoj zoni poklapa sa prethodnim gustim merenjem. Iz ovoga se može zaključiti da feromagnetni objekti imaju uticaj na jačinu i oblik elektromagnetnog polja.

#### 3.3.2 Uticaj vode koja teče na EM polje

Rezultati merenja uticaja vode koja teče na jačinu i oblik elektromagnetnog polja pokazali su da je jačina svih vektora elektromagnetnog polja u 4 tačke snimanja praktično ista za slučajeve kada voda ne teče kroz hidraulički kanal kao i za slučajeve kada voda teče sa kontrolisanim protokom. Rezultati merenja prikazani su u Tabeli 1, kao i grafički na Slici 12. Iz ovog se može zaključiti da voda koja teče nema uticaj na elektromagnetno polje, tako da se izmerene jačine elektromagnetnog polja mogu smatrati za jačine koje će se javiti u eksploataciji EM senzora. Ovakvi rezultati su očekivani ukoliko se uzme u obzir Hartmanov broj koji predstavlja odnos elektromagnetnih i viskoznih sila u fluidu. Jednačina za Hartmanov broj glasi:

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 11. Merenje uticaja feromagnetnih objekata u zoni zidova od stakla za presek  $X = 26$  cm. Crvenom linijom na skici EM senzora je obeležen presek za koji su prikazani rezultati.

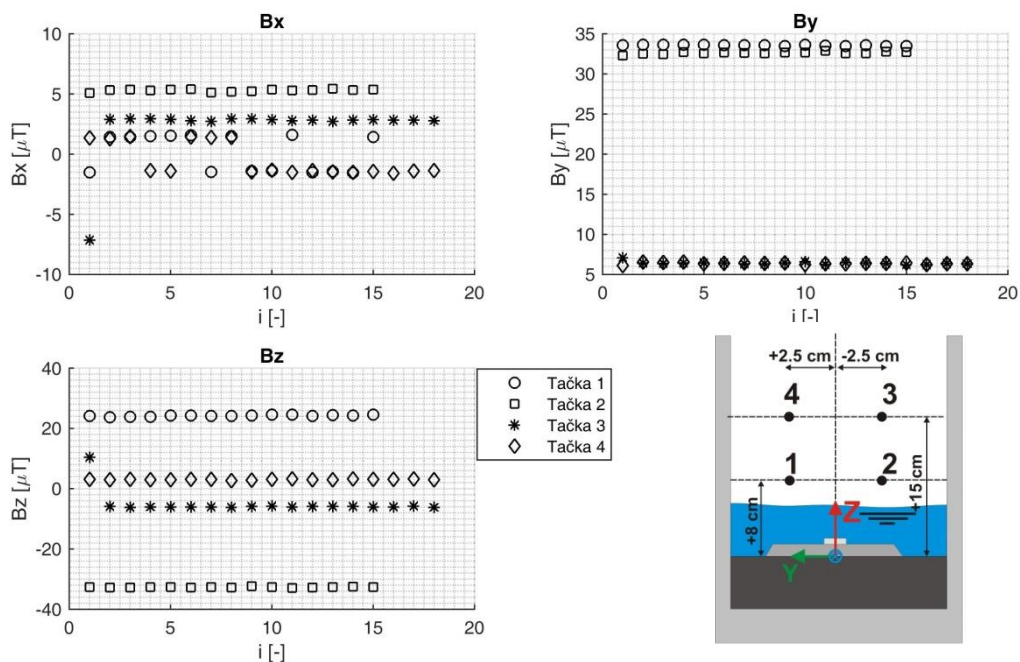
$$Ha^2 = \frac{\sigma L B^2}{\rho \nu} \quad (3)$$

gde  $B$  predstavlja intenzitet magnetnog polja,  $L$  – hidraulički radijus,  $\sigma$  – električnu konduktivnost vode,  $\nu$  – kinematički koeficijent viskoznosti i  $\rho$  – gustinu vode. Za vrednosti  $B = 1000 \mu T$ ,  $\sigma = 0.05$  S/m,  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L = 0.1$  m, prema jednačini (3) dobija se da je Hartmanov broj manji od  $1 \cdot 10^{-4}$  što je za nekoliko reda veličine manje od vrednosti pri kojoj bi se pokazao uticaj elektromagnetnog polja [12].

Tabela 1. Rezultati merenja magnetnog polja sa i bez vode u 4 tačaka.

Tačka merenja	Pravac	Merenje bez vode ( $\mu T$ )	Srednja vrednost merenja sa vodom ( $\mu T$ )	Apsolutna razlika merenja bez vode i sa vodom ( $\mu T$ )
1	$B_x$	-1.53	0.23	-1.75
	$B_y$	33.58	33.56	0.02
	$B_z$	24.09	24.22	-0.13
2	$B_x$	5.09	5.31	-0.22
	$B_y$	32.29	32.63	-0.34
	$B_z$	-32.66	-32.69	0.03
3	$B_x$	-7.14	2.84	-9.98
	$B_y$	7.08	6.40	0.68
	$B_z$	10.34	-5.99	16.33
4	$B_x$	1.35	-0.61	1.96
	$B_y$	6.14	6.40	-0.26
	$B_z$	3.12	3.04	0.07





Slika 12. Uticaj vode koja teče na magnetno polje. Na X osi su predstavljena različita merenja. Na skici desno su prikazane merne tačke u hidrauličkom kanalu.

## 4 Zaključak

Merenje elektromagnetnog polja koje generišu kalemovi ravne EM sonde za merenje brzine moguće je senzorom Melexis MLX-90363 nakon njegove kalibracije. Magnetometar zajedno sa filterom klasifikujuće neuralne mreže može da izmeri i veoma male promene elektromagnetnog polja koje su za red veličine manje od ambijentalnog magnetnog polja, (promena znaka u opsegu od  $4 \mu T$  u odnosu na magnitudu ambijentalnog polja od  $60 \mu T$ ). Filtriranje podataka klasifikujućim neuralnim mrežama daje prihvatljive rezultate, jer se pri vrednostima većim od standardne devijacije šuma magnetometra ( $2 \mu T$ ) ni u jednoj tački (od 11000 u kanalu i skoro 2500 van kanala) nije primetilo pogrešno određivanje „znaka“ elektromagnetnog polja u odnosu na okolne tačke. Takođe, konturne linije su čak i pri jako niskim vrednostima kontinualne, tj. prate oblik kakav bi se i očekivao bez „testerastih“ delova koji bi ukazivao na loše rezultate.

GUI za snimanje EM polja van kanala je dosta olakšalo i ubrzalo ovo zamorno i dugo merenje. Zahvaljujući GUI, na 2500 ručno merenih tačaka napravljena je samo jedna gruba greška pogrešnog pozicioniranja. Ono što je značajnije unapredilo merenje EM polja je korišćenje automatizovanog pozicionera. Uz pomoć pozicionera, praktično jedini koraci u merenju su ručno pomeranje pozicionera duž kanala i ponovno pokretanje algoritma kretanja nakon obavljenog snimanja u jednom preseku, što se grubo svodi na par minuta posla na svakih dva sata za jedan presek.

Analizom rezultata utvrđeno je da feromagnetni objekti imaju uticaj na izgled i jačinu elektromagnetnog polja. Takođe, utvrđeno je da voda ne utiče na izgled i jačinu elektromagnetnog polja.

Nakon što je oblik i jačina elektromagnetnog polja ravnog EM senzora izmerena, sledeći korak istraživanja predstavljao bi merenje polja brzina i izlaznog signala ravnog EM senzora za različite protoke u hidrauličkom kanalu. Kombinovanjem ovih merenja i izmerenog elektromagnetnog polja mogla bi se uspostaviti metodologija za lokalnu kalibraciju ravnog EM senzora uz pomoć numeričkih simulacija polja brzina za lokaciju mernog mesta.

## Literatura

1. Kouyi, G. L., Besson, F., Bier, M. A., Chocat, B., & Lucchinacci, P. (2010). Assessment of flow rate in a complex sewer pipe by means of a water depth sensor and modelling. *NOVATECH 2010*.
2. Michalski, A. (2000). Flow measurements in open irrigation channels. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(1), 12-16.
3. Shercliff, J. A. (1962). The theory of electromagnetic flow measurement. Cambridge University Press.
4. Bevir, M. K. (1970). The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. *Journal of Fluid Mechanics*, 43(3), 577-590.
5. Ivetić, D., Prodanović, D., & Stojadinović, L. (2018). Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage systems. *Journal of Hydrology*, 566, 455-469.
6. Smyth, C. C. (1971). Derivation of weight functions for the circular and rectangular channel magnetic flowmeters, by means of Green's theorem and conformal mapping. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4(1), 29.
7. Hemp, J., & Versteeg, H. K. (1986). Prediction of electromagnetic flowmeter characteristics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(8), 1459.
8. Hu, L., Zou, J., Fu, X., Yang, H. Y., Ruan, X. D., & Wang, C. Y. (2009). Divisionally analytical solutions of Laplace's equations for dry calibration of electromagnetic velocity probes. *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3130-3150.
9. Cvitkovic, M. (2013). DC.2.34 Univerzalni industrijski merni instrument REV 1.17
10. Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). Neural network design. Martin Hagan.
11. Kohonen, T. (2012). Self-organization and associative memory(Vol. 8). Springer Science & Business Media.
12. Vantiegheem, S., Albets-Chico, X., & Knaepen, B. (2009). The velocity profile of laminar MHD flows in circular conducting pipes. *Theoretical and computational fluid dynamics*, 23(6), 525.

## Анализа ублажавања поплавних таласа у акумулацији Мохарач

Марија Миловановић<sup>1</sup>, Андријана Тодоровић<sup>2</sup>, Роберт Љубичић<sup>3</sup>, Јасна Плавшић<sup>4</sup>

**АПСТРАКТ:** Циљ овог рада је да се провери да ли брана Мохарач и њен бочни прелив имају капацитет да приме поплавни талас који је добијен обрадом ажурираних података о рачунским кишама и сливу. Треба имати у виду да је дошло до повећања меродавних падавина, и самим тим до повећања улазних протока у акумулацију. У раду је приказана методологија добијања улазних података за прорачун трансформације поплавног таласа, као и рад програма HEC-HMS који је коришћен за прорачун. На крају, приказани су резултати добијени коришћењем овог софтверског пакета и форми рачунских хидрограма. Максимум улазног хидрограма добијен је за кише трајања 1 h, док је максимум запремине, нивоа воде у акумулацији и излазног хидрограма добијен за кише трајања 2 h. Закључено је да бочни прелив, сабирни канал и прелазна деоница имају капацитет да пропусте меродавне велике воде, под условом да се формира нормална дубина на изласку из прелазне деонице. Препорука је да се ови резултати провере детаљнијим хидрауличким прорачунима.

**Кључне речи:** брана, прелив, акумулација, велике воде, поплавни талас, меродавне кише, меродавни протоци

## Study of the flood wave attenuation in the Moharač reservoir

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to determine whether the dam Moharač and its spillway have the capacity to impound and discharge the flood wave that was obtained by processing the updated data on design rainfall and on the catchment. It should be borne in mind that there has been an increase in the design precipitation and that caused an increase in the reservoir inflow. The paper presents the methodology for obtaining input data for the calculation of the flood wave transformation and an explanation of how to use the HEC-HMS software. Finally, the results of using this software are presented in the form of design hydrographs. The maximum value of the inflow hydrograph peak was obtained for the storm duration of 1 h, while the maximum storage, water level and outflow hydrograph peak were obtained for the storm duration of 2 h. It was concluded that all of the components of the side channel spillway have the capacity to convey the flood wave, provided that the normal depth was formed at the exit of the downstream transitional reach.

**Keywords:** dam, spillway, reservoir, floods, flood wave, design storms, design flows

<sup>1</sup>Марија Миловановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду – Грађевински факултет, marija.milovanovic13@gmail.com

<sup>2</sup>Доц. др Андријана Тодоровић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду – Грађевински факултет, atodorovic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup>Роберт Љубичић, маст. инж. грађ., Универзитет у Београду – Грађевински факултет, rljubicic@grf.bg.ac.rs

<sup>4</sup>В. проф. др Јасна Плавшић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду – Грађевински факултет, jplavsic@grf.bg.ac.rs

## 1 Увод

Хидротехничке грађевине омогућавају газдовање водама – чување, спровођење, коришћење, као и спречавање њеног разорног дејства (Савић, 2009). Акумулација је део речне долине преграђене браном и служи за изравнање протока. Према намени акумулације могу бити једнонаменске и вишенаменске. Код једнонаменских акумулација постоји само један корисник, док код вишенаменских неколико корисника дели расположиве количине воде и често долази до конфликта њихових циљева.

Предмет овог рада је одређивање степена заштите од великих вода на акумулацији Мохарач. Акумулација се налази на потоку Мохарач изнад насеља Ердевик и предвиђена је у оквиру система вишенаменских акумулација Фрушке горе. Пројектована је и изграђена 80-тих година XX века као вишенаменска акумулација, која за главни задатак има заустављање и ублажавање поплавних таласа, а поред главне намене требало је да служи за водоснабдевање насеља и индустрије, наводњавање, рекреацију и сл. Данас се користи само за одбрану од поплава. Поплаве и друга штета дејства вода изазивају велике воде, које имају стохастички карактер, па се објекти и системи за ублажавање тих дејстава димензионишу на усвојене меродавне велике воде одређених вероватноћа појаве (Бабић Младеновић, 2018). Брана је димензионисана тако да прихвати поплавне таласе вероватноће појаве 1% и 0,1% уз задату коту нормалног успора и уз услов да се при евакуацији великих вода преко бочног прелива не превазиђе капацитет корита низводно од бране. Циљ овог рада је да се провери, користећи нове податке, да ли је брана адекватно димензионисана. У другом поглављу описани су брана „Мохарач“ и слив који припада овој брани. Треће поглавље садржи неопходне податке и подлоге које се користе за даљи прорачун, док се у четвртном поглављу детаљно описује прорачун трансформације поплавног таласа и услови под којим је рађено моделирање. На основу резултата добијених применом софтвера HEC-HMS изведени су закључци и предлози за наредна испитивања.

## 2 Опис објекта и слива

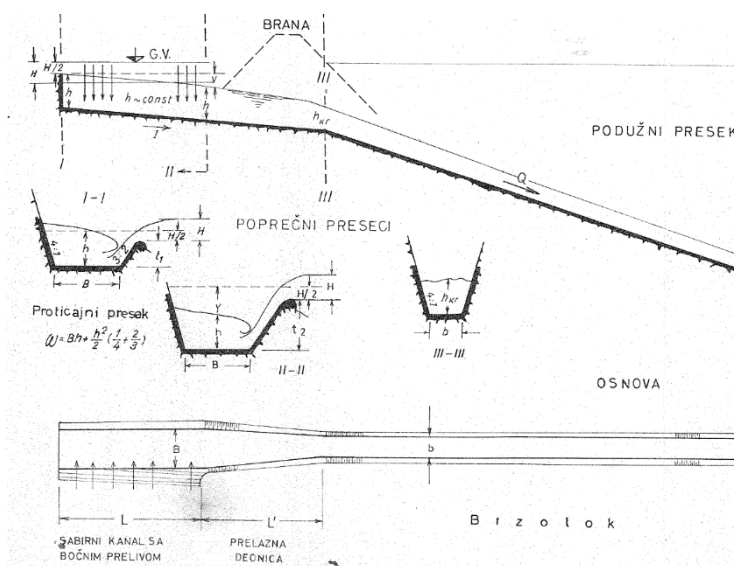
### 2.1 Брана и акумулација Мохарач

Брана „Мохарач“ спада у високе бране. У питању је земљана насута брана хомогеног пресека, максималне висине  $h=12,70$  m. Кота круне бране је 128,7 mnm, док ширина круне бране износи 6 m ради могућности једносмерног саобраћаја. Брана је димензионисана на поплавне таласе вероватноће појаве  $Q_{1\%}$  и  $Q_{0,1\%}$ . Корисна запремина акумулације износи  $2,45 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, док запремина акумулације на коти нормалног успора 126,2 mnm износи  $2,51 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. Пројектом је предвиђен цилиндрични прелив, али је након анализе елабората о слегању бране ипак изведен армиранобетонски бочни прелив због могућих последица деформације веза између шахта и испусног цевовода. Темељни испуст мањег профила изграђен је за пражњење акумулације и испуштање наноса. У овом раду занемариће се рад темељног испуста. Бочни прелив је димензионисан на проток  $Q_{0,1\%} = 6,62$  m<sup>3</sup>/s. На основу резултата аналитичке и експерименталне студије бочних прелива публиковане од стране Института за водопривреду „Јарослав Черни“, усвојена је диспозиција прелива која има следеће елементе:

1. Узводни део који чини сабирни канал и непризматична прелазна деоница;
2. Брзоток са слапиштем.

Карактеристике бочног прелива су:

- Ширина дна сабирног канала  $B = 2,15$  m;
- Дужина сабирног канала  $L = 15$  m;
- Дубина сабирног канала на почетку деонице  $t_1 = 0,87$  m;
- Дубина сабирног канала на крају деонице  $t_2 = 1,44$  m;



Слика 1. Подужни пресек и основа сабирног канала и прелазне деонице

- Пад сабирног канала и прелазне деонице  $I_1 = I_2 = 4\%$ ;
- Ширина дна брзотока  $b_s = 1,075 \text{ m}$ ;
- Нагиб страна брзотока  $m_1 = m_2 = 0,25$ ;
- Дужина слапишта  $L_s = 8 \text{ m}$ .

На слици 1 приказани су подужни пресек и основа сабирног канала и прелазне деонице.

## 2.2 Сливна површина

Акумулација се налази на 1,2 km североисточно од насеља Ердевик, у западном Срему. Правац пружања је североисток-југозапад у дужини од око 2 km. Површина слива износи 19,41 km<sup>2</sup>.

Око 50% површине слива је пошумљено, док остатак чине виногради, оранице и ливаде. Једна од важнијих карактеристика слива је његов нагиб, јер је гравитација битан покретач воде. Musy и Higy (Musy and Higy, 2011) предложили су формулу за рачунање просечног нагиба слива:

$$J_{sl} = \frac{L * \Delta Z}{A}$$

где су:  $J_{sl}$  просечан нагиб слива,  $L$  укупна дужина изохипси на сливу,  $\Delta Z$  еквидистанца између изохипси,  $A$  укупна површина слива.

Облик слива утиче на концентрацију воде од које зависе димензије и облик корита, као и подужни профил реке. Утицај облика слива се често описује коефицијентом концентрисаности слива  $K$ . Најмања вредност коефицијента  $K=1$  је за кружни слив. Што је коефицијент већи од јединице, то је слив издуженији и неправилнији. Добијена вредност коефицијента  $K$  износи 1,22.

Уколико су сви остали параметри исти, веће велике воде треба очекивати при мањим вредностима коефицијента  $K$ . Коефицијент  $K$  рачуна се према формули:

$$K = 0,28 * \frac{O}{A^{0,25}}$$

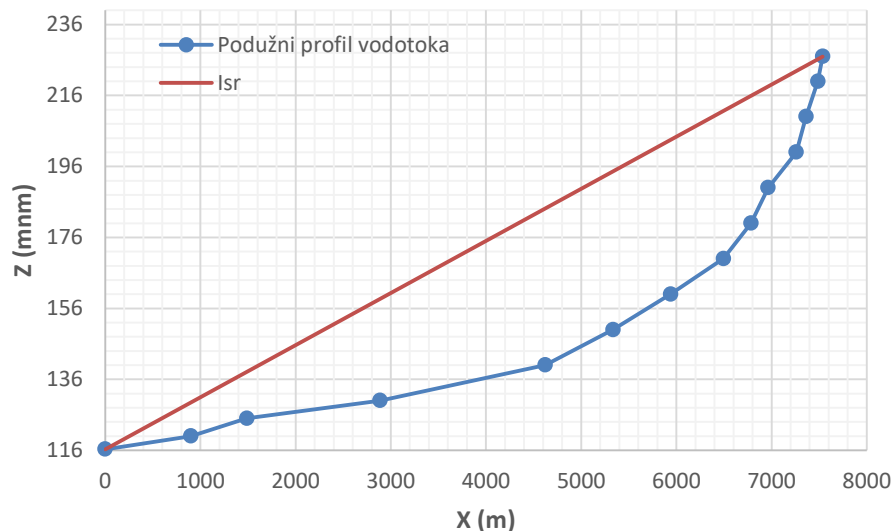
где су  $O$  обим слива у km и  $A$  површина слива у km<sup>2</sup>.

Главни ток простире се на западној страни слива, са извором на 227 mm. Дужина главног тока износи 7537 m. Просечан нагиб главног тока представља однос разлике надморске

висине најудаљеније тачке на главном току  $Z_{max}$  и надморске висине излазног профила слива  $Z_0$ , и дужине главног тока  $L$ :

$$I_{sr} = \frac{Z_{max} - Z_0}{L}$$

Подужни профил главног водотока приказан је на слици 2.



Слика 2. Подужни профил главног водотока

Време концентрације представља најдуже време путовања воде од хидраулички најудаљеније тачке до излазног профила слива. Може се одредити на основу више образаца, а метода брзина је препоручена за отицај са малих природних сливова код којих се време путовања одређује као однос дужине и брзине течења. Потребно је посебно одредити време путовања за површинско течење и време течења у водотоку.

$$t_c = \frac{1}{60} \sum \frac{L_i}{v_i} \text{ (min)}$$

где су  $L_i$  дужина путање течења (m) и  $v_i$  просечна брзина течења (m/s). За мале руралне сливове може да се користи и формула Кирпича:

$$t_c = 0,0195 * L^{0,77} * S^{-0,385}$$

где су  $L$  дужина тока од извора до излаза (m) и  $S$  просечан нагиб слива (m/m). Према овој формули добијено је време концентрације  $t_c = 40,29 \text{ min}$ .

### 3 Подаци и подлоге за хидролошке прорачуне

#### 3.1 Рачунске кише

Рачунске кише су кишне епизоде и оне представљају основне улазне податке за хидролошке прорачуне и за пројектовање хидротехничких објеката за заштиту од великих вода. Једна од основних карактеристика кишне епизоде је трајање кише, тј. тачно одређен интервал времена у коме падне нека висина кише. У овом раду разматране су кише трајања 1h, 2h, 3h, 6h, 12h и 24h, повратних периода 100, 200, 500 и 1000 год. Урађена је статистичка анализа годишњих максимума дневних киша  $P_{dn,max}$  методом "година-станица". Рачунске висине киша

се углавном приказују у форми зависности висина кише – трајање – повратни период, тј. зависност НТР. НТР криве се приказују на дијаграму код кога се на апсциси налази трајање кише, на ординати висина кише, а повратни период се појављује као параметар. Добијене су статистичком анализом  $P_{dn,max}$ , тј. помоћу редукционих кривих за краћа трајања. Редукционе криве су бездимензионалне криве које се рачунају у односу на рачунску висину дневне кише за локацију плувиографске станице (Сремска Митровица) за коју је на располагању НТР зависност.

Бездимензионалне зависности (редукциони коефицијенти) рачунају се на следећи начин:

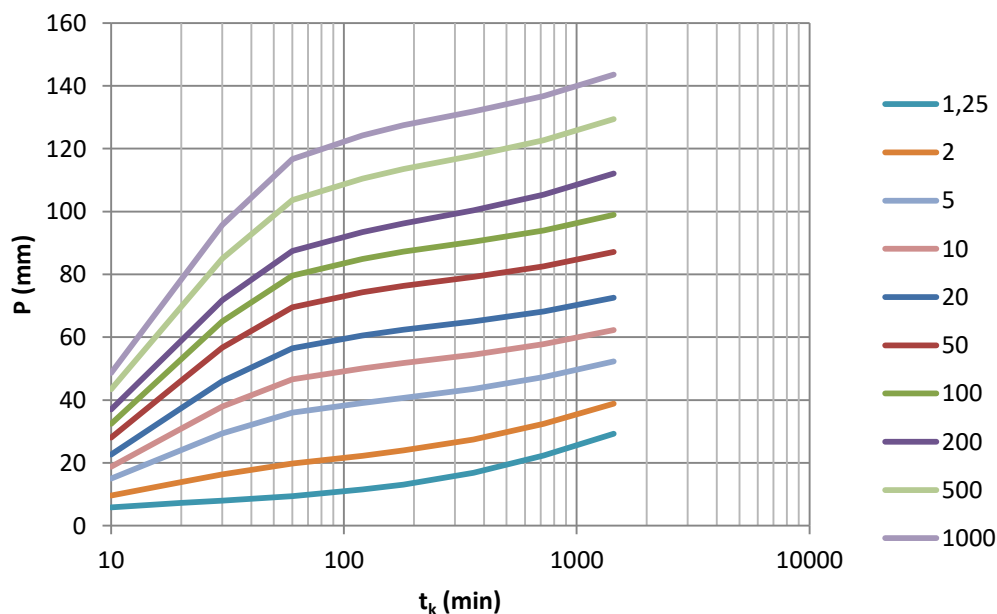
$$X(t_k, T) = \frac{P(t_k, T)}{P_{dn}(T)}$$

Затим се рачунске кише за слив од интереса добијају множењем коефицијента просечном висином рачунске дневне кише на сливу:

$$P_{sliv}(t_k, T) = X(t_k, T) * P_{dn,sliv}(T)$$

Величина  $P_{dn,sliv}(T)$  добијена је интерполацијом између две станице са познатим мерењима, Кукујевци и Лежмимир. Добијене НТР криве приказане су на слици 3.

Када је потребно да се формирају временски неравномерне кише на основу зависности НТР могу да се користе кише са наизменичним блоковима. Трајање кише се подели на  $n$  временских интервала дужине  $\Delta t$ . Са НТР кривих се читају висине киша трајања  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ , итд. за одговарајуће повратне периоде и затим се посматрају као ординате сумарне линије кише. Израчунају се прираштаји и интензитет кише у сваком временском интервалу. Након тога, блокови трајања  $\Delta t$  се групишу тако да је у средини блок са највећим интензитетом, док се остали блокови ређају наизменично десно и лево у опадајућем редоследу. Тако је формиран хијетограм рачунске кише.



Слика 3. НТР криве за слив бране „Мохарач“

### 3.2 Крива запремине

Крива запремине представља зависност коте нивоа воде у језеру и запремине воде у акумулацији. Добијена је на основу криве површине акумулације. Прво се одређује део

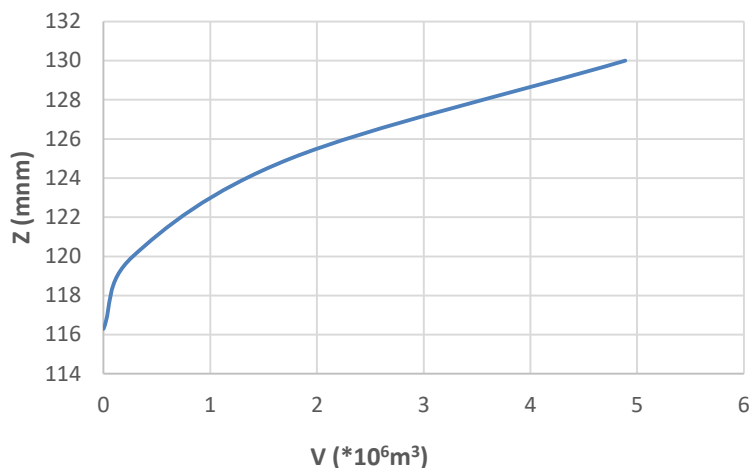
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

запремине између две коте  $\Delta V$ , а потом укупна запремина до те коте. Површине акумулације добијене су дигитализацијом по изохипсама.

$$A_{i,sr} = \frac{A_i + A_{i+1}}{2}$$

$$\Delta V = \Delta Z * A_{i,sr}$$

где су  $A_i$  површина акумулације на коти  $Z_i$ ,  $A_{i+1}$  површина акумулације на коти  $Z_{i+1}$ ,  $\Delta Z$  разлика надморских висина. Добијена крива запремине приказа је на слици 4.



Слика 4. Крива запремине

### 3.3 Крива преливања преко бочног прелива

За евакуацију великих вода преко брана користи се бочни прелив. Бочни прелив је једном страном ослоњен на обалу, док је другом страном окренут ка акумулацији. Прелив је активан када је кота нивоа воде у акумулацији виша од коте круне прелива. Проток преко прелива рачуна се као:

$$Q = C_q * L_p * \sqrt{2 * g * h_p^3}$$

где су  $C_q$  коефицијент преливања,  $L_p$  дужина прелива,  $g$  гравитационо убрзање и  $h_p$  висина преливног млаза.

Коефицијент преливања,  $C_q$ , у општем случају зависи од односа висине преливног млаза,  $h_p$ , и коте слободне површине воде у сабирном каналу мерене у односу на ККП,  $h_D$ . Уколико је на целој дужини преливне ивице испуњен услов да је однос  $h_D/h_p \leq 0,5$ , преливање се може сматрати непотопљеним а коефицијент преливања износи  $C_{q0} = 0,42$  (из пројекта бране). Са повећањем протока расте и однос  $h_D/h_p$ , а кад он постане већи од 0,5 преливање на том делу прелази у потопљено и тада је коефицијент преливања мањи (с тим да потапање прелива најчешће почиње на узводном крају сабирног канала). Корекција коефицијента преливања може се проценити као (Савић, 2009):

$$C'_q = C_{q0} \left( 1 - \frac{3,23(h_D/h_p)^{4,95}}{9,3 - 6,1(h_D/h_p)^{4,95}} \right).$$

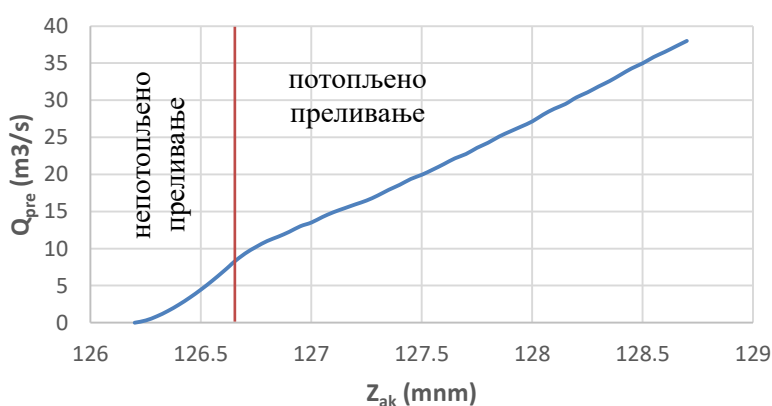
Одређивање криве преливања мора се вршити упоредо са одређивањем криве нивоа у сабирном каналу. За потребе прорачуна претпостављена је критична дубина на излазу из сабирног канала (услед великог подужног пада сабирног канала и прелазне деонице од 4%), као



и мирно течење у самом сабирном каналу. Одређивање линије нивоа започиње од претпостављене низводне критичне дубине, и прорачун се врши у узводном смеру. Коришћењем закона одржања количине кретања, и водећи рачуна о томе да у сабирном каналу постоји бочни дотицај који изазива не само успутну промену протока већ и количине кретања, може се добити израз за одређивање линије нивоа у сабирном каналу (Савић, 2009):

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{v^2}{2g} + z \right) + \frac{vq}{gA} = 0,$$

где је са  $v$  обележена средња профилска брзина, са  $z$  кота дна канала у посматраном пресеку, са  $q$  јединични бочни дотицај, и са  $A$  површина попречног пресека. Претходна једначина решавана је нумерички, методом коначних разлика. Корак дискретизације је био  $\Delta X = 1$  m. У оквиру рада приказују се само резултати прорачуна криве преливања (слика 5).



Слика 5. Крива преливања преко бочног прелива

## 4 Прорачун трансформације таласа у акумулацији

С обзиром на то да на улазу у акумулацију „Мохарач“ не постоје осматрања протока, улазни хидрограми су добијени применом синтетичких јединичних хидрограма и SCS-CN методе за прорачун ефективне кише. Трансформација таласа рађена је у HEC-HMS-у.

### 4.1 Улазни хидрограм

Веза између падавина и отицаја одређена је помоћу CN методе коју је развила америчка агенција Soil Conservation Service (SCS). Основна претпоставка ове методе је да важи пропорција:

$$\frac{I}{d} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

где су  $I$  стварни губитак,  $P_e$  ефективна киша,  $d$  ретенциони капацитет (максимални губитак),  $P$  укупна киша ( $P = P_e + I + I_a$ ),  $I_a$  почетни губитак.

Ако се у претходној једначини елиминише стварни губитак, тако што се стави  $I = P - I_a - P_e$ , а затим се једначина реши по ефективној киши, добија се израз:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + d)}$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

За потребе прорачуна ефективних падавина, израчунат је број криве CN (табела 1), који се користи уместо ретензионог капацитета  $d$ . Број CN је бездимензионалан и вредности му се крећу између 0 и 100. За водене и непропусне површине вредност броја CN је 100, док је за природне површине  $CN < 100$ . CN бројеви су класификовани према врсти земљишта и намени површина и по тој класификацији земљишта су подељена у четири хидролошке групе тла. На основу педолошких подлога и испитивања из оригиналног пројекта процењено је да земљиште спада у хидролошку групу тла C. На једном сливу су углавном заступљене различите групе тла, као и површине другачијих намена, па се сходно томе одређује просечан CN број за слив:

$$CN_{sliv} = \sum_i \frac{A_i}{A} * CN_i$$

Прорачун ефективних падавина је урађен са претпостављеним почетним губитком  $I_a = 10\%$ . Веза CN и  $d$  представљена је следећим изразом:

$$d = 25,4 * \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) (mm)$$

$$I_a = 0,1 * d (mm)$$

Добијена вредност почетног губитка је  $I_a = 5,629$  mm.

Табела 1. Прорачун CN броја

Намена земљишта	$A_i$ (%)	CN
окопавине	30	88
	12	84
шуме	50	77
ливаде	8	86
	$CN_{sr}$	81,86

Јединични хидрограм је један од најчешће коришћених модела којим се описује веза између падавина и отицаја. Овај хидрограм се користи за изучене сливове, тј. сливове на којима постоје осматрања кише и протока на излазном профилу слива. На неизученим сливовима се користе синтетички јединични хидрограми. Америчка агенција SCS (данас NRCS) развила је бездимензионални јединични хидрограм код кога се време изражава у односу на време пораста хидрограма  $T_p$ , а ординате у односу на максималну ординату јединичног хидрограма  $u_{max}$ . Брајковић и Јовановић (Јовановић, 1989) су предложили модификацију SCS јединичног хидрограма због веће применљивости на различите сливове. Време опадања хидрограма  $Tr$  се дефинише множењем коефицијента пропорционалности  $r$  ( $r = 1,67$  за SCS методу) са временом пораста хидрограма:

$$Tr = r * T_p (h)$$

Друга модификација се односи на време кашњења  $t_p$ , које одређује време пораста хидрограма. Брајковић и Јовановић сматрају да време кашњења није константно за слив, већ да зависи од трајања кише:

$$t_p = a * t_k + t_0 (h)$$

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2} (h)$$

где коефицијент  $a$  одређује део трајања кише који је обухваћен у времену кашњења (сматра се да коефицијент  $a$  зависи од површине слива), а  $t_0$  представља време кашњења тренутног јединичног хидрограма (јединичног хидрограма за  $t_k \rightarrow 0$ ).

$$t_0 = 0,4 * L^{0,67} \left( \frac{L * L_c}{\sqrt{I_u}} \right)^{0,086} \quad (h)$$

где су  $L$  дужина тока у km,  $L_c$  дужина тока до тежишта слива у km и  $I_u$  уравни нагиб слива у %.

Из тога да површина испод синтетичког јединичног хидрограма треба да буде једнака површини слива следи:

$$u_{max} = 0,75 * \frac{A}{T_p}$$

Добијени су синтетички јединични хидрограми за трајања кише 30 min, 45 min, 90 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h и 24 h.

### 4.2 Трансформација поплавних таласа

Трансформација таласа добија се решавањем билансних једначина. Полази се од једначине континуитета интегрисане на целој деоници водотока и добија се:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{izl} - Q_{ul}$$

Излазни проток кроз отвор непроменљивих карактеристика је једнозначна функција нивоа, а његов максимум се јавља при максималном нивоу у акумулацији, тј. када је  $\frac{dz}{dt} = 0$ .

У спроведеном прорачуну постоји само један излаз (преливање преко бочног прелива), нема течења кроз испуст, преливања преко бране, ни евапорације. Почетни услов је да се вода у акумулацији налази на коти нормалног успора од 126,2 mm. Разматрана трајања кише су 1h, 2h, 3h, 6h, 12h и 24h, за повратне периоде 100, 200, 500 и 1000 год.

### 4.3 Примена софтверског пакета HEC-HMS за прорачун трансформације таласа

За моделирање падавине-отицај постоје различити модели, а избор модела врши се према задатку који тај модел треба да изврши. Један од модела за симулацију овог процеса је модел који је развио Хидролошки инжењерски центар (HEC) америчке војске, Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Овај модел је направљен 1992. године и намењен је за симулацију површинског отицаја услед једне кишне епизоде и користи методе које су погодне за хидролошке анализе великих вода у оквиру димензионисања хидротехничких објеката.

Модел се састоји од 4 компоненте:

1. Модел слива;
2. Метеоролошки модел;
3. Контролне спецификације;
4. Улазни подаци-временске серије.

За сваку компоненту дефинишу се процеси или се задају улазни подаци:

1. Модел слива: у овом прорачуну су за модел слива дефинисане ефективне падавине (loss) путем SCS-CN методе. Задат је CN број и почетни губитак (инфилтрација). Након тога дефинисана је трансформација падавина у отицај у виду задавања синтетичких јединичних хидрограма по методи Јовановића и Брајковића. Унета је и крива прелива за акумулацију.
2. Метеоролошки модел: задају се падавине и облик хијетотограма. Коришћена је киша са наизменичним блоковима. Ово је начин на који се формира временски неравномерна киша на основу зависности НТР. Задато је да се блок са највећим интензитетом налази у средини кише. Временски интервал је 15 min.

3. Контролне спецификације: уносе се контролне спецификације (почетан и крај симулације, временски корак у прорачунима).
4. Уносе се временске серије падавина.

Дефинишу се прорачуни (simulation run) на основу модела слива, метеоролошког модела и контролних спецификација.

## 5 Резултати и дискусија

Резултати симулација представљени су табеларно и графички. За све повратне периоде максимум таласа се добија за трајање кише 1 h, а максимум запремине, нивоа акумулације и излазног протока за кишу трајања 2 h (табела 2). За трајање кише 1 h, повратног периода 100 година, улазни пик је умањен за 74,3%, док је за исто трајање кише и повратног периода 1000 година дошло до смањења за 76%. За трајање кише 2h, повратног периода 100 година, улазни пик је умањен за 69,5%, док је за исто трајање кише и повратног периода 1000 година дошло до смањења за 71%.

У оригиналном пројекту усвојен је максимум улазног таласа  $Q_{1\%}=23 \text{ m}^3/\text{s}$  и  $Q_{0,1\%}=40,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , што значи да се пик улазног таласа у овој анализи повећао 2,5 пута. Бочни прелив димензионисан је на максимални излазни проток који износи  $6,62 \text{ m}^3/\text{s}$ , а то је скоро 4 пута мање од протока добијеног коришћењем нових података. Такође, у оригиналном пројекту било је усвојено време концентрације од 3 h и усвојене рачунске кише истог трајања. У овом раду највећи протоци су добијени за знатно краће трајање кише 1 h, што указује и на мање време концентрације. Поређења ради, у оригиналном пројекту киша трајања 3 h повратног периода 100 година износила је 65 мм, док та киша према иновираним зависностима ХТП износи 87 мм. Слично томе, киша трајања 3 h повратног периода 1000 година износила је 99 мм, а са иновираним подацима 127 мм. Ово указује на значајно веће рачунске кише за прорачун отицаја.

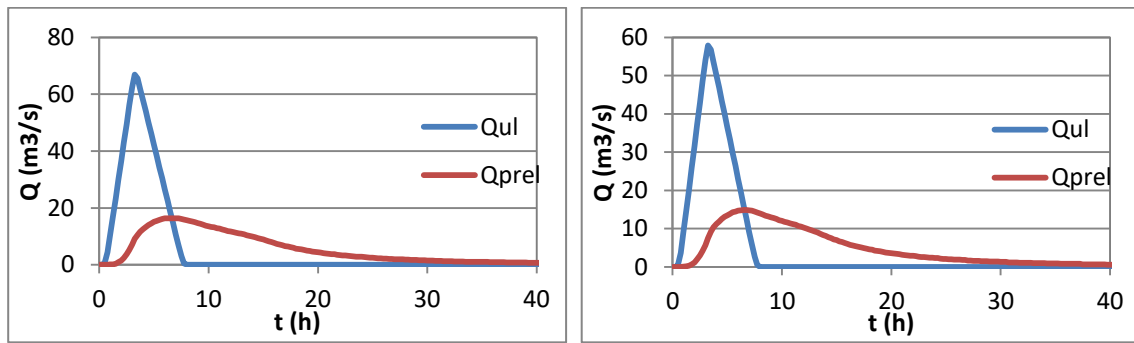
Овде су приказани хидрограми за  $t_k=1 \text{ h}$  и  $t_k=2 \text{ h}$  (слике 5.1 до 5.4). Такође, свако трајање кише је дуже од времена концентрације, па ће цео слив учествовати у формирању отицаја на излазном профилу.

Табела 2. Табеларни приказ резултата прорачуна

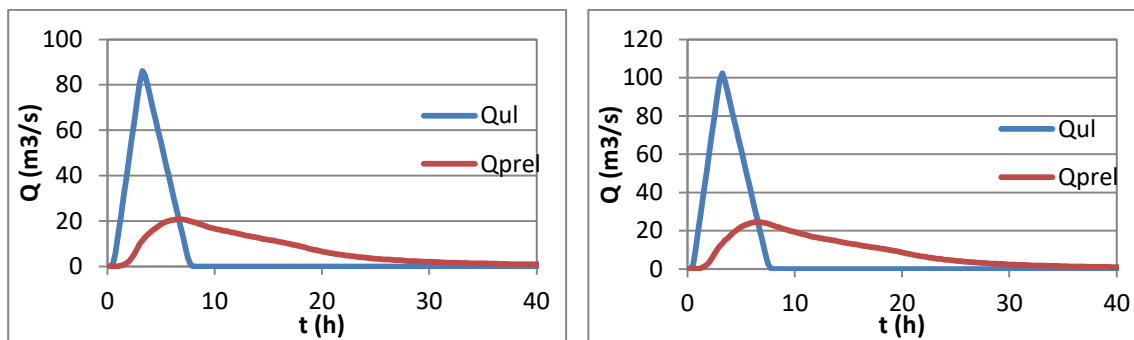
$t_k=1\text{h}$	$Q_{ul}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$V_{ak}$ (* $10^3\text{m}^3$ )	$Z_{ak}$ (mm)	$Q_{izl}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
T100	57,9	3069,8	127,1	14,9
T200	66,9	3161,8	127,2	16,4
T500	86,1	3357,4	127,6	20,8
T1000	102,3	3519,5	127,8	24,5

$t_k=2\text{h}$	$Q_{ul}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$V_{ak}$ (* $10^3\text{m}^3$ )	$Z_{ak}$ (mm)	$Q_{izl}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
T100	50,2	3094,6	127,1	15,3
T200	58	3192,5	127,3	17,1
T500	74	3390,1	127,6	21,5
T1000	87,4	3553,2	127,9	25,4

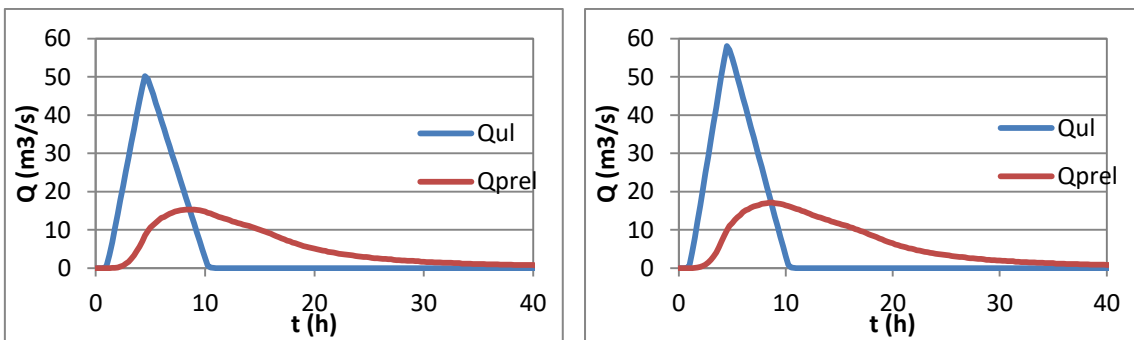
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



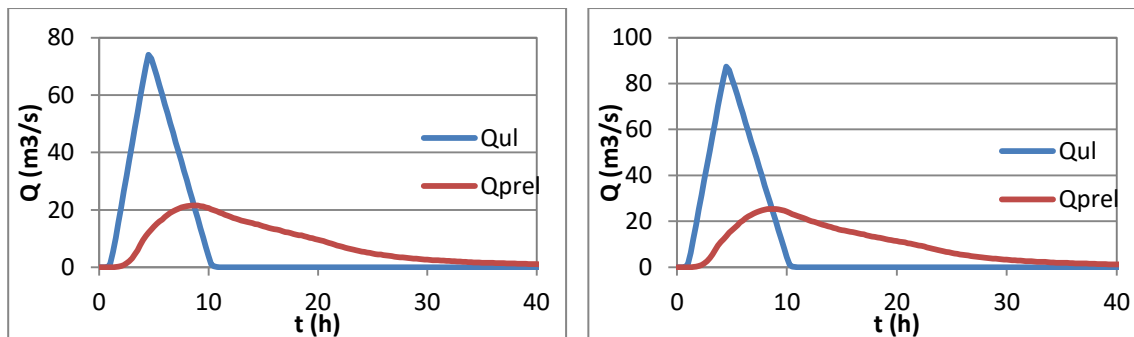
Слика 6. Улазни и излазни хидрограм за  $t_k = 1h$ , T100 (лево) и  $t_k = 1h$ , T200 (десно)



Слика 7. Улазни и излазни хидрограм за  $t_k = 1h$ , T500 (лево) и  $t_k = 1h$ , T100 (десно)



Слика 8. Улазни и излазни хидрограм за  $t_k = 2h$ , T100 (лево) и  $t_k = 2h$ , T200 (десно)



Слика 9. Улазни и излазни хидрограм за  $t_k = 2h$ , T500 (лево) и  $t_k = 2h$ , T1000 (десно)

## 6 Закључак

Циљ овог рада била је провера да ли је брана димензионисана да прими поплавне таласе великих вода које су добијене прорачунима са ажурираним подацима. Трансформација је урађена у програму HEC-HMS, а претходно су детаљном анализом расположивих података добијене неопходне улазне величине за прорачун.

Добијени меродавни протоци су већи од оних протока према којима су брана и евакуациони објекти димензионисани. Међутим, анализе у оквиру овог рада показују да бочни прелив, сабирни канал и прелазна деоница имају капацитет да пропусте меродавне велике воде, под условом да се формира нормална дубина на изласку из прелазне деонице. Препорука је да се ови резултати провере детаљним хидрауличким прорачунима који превазилазе оквире овог рада, и, уколико је могуће, да се уради симулација на физичком моделу. Ови прорачуни би требало да, поред преливања преко прелива, обухвате и течење у сабирном каналу, непризматичној прелазној деоници, брзотоку, слапишту и каналу. Овим поступком би се прецизно проценио утицај повећања меродавних великих вода на угроженост евакуационих органа бране и становништво у низводним насељима.

За поузданију процену дотока великих вода у акумулацију било би пожељно да се спроведе мерења на улазу у акумулацију, уместо прорачуна са применом метода за неизучене сливове. Такође, услед претходно наведеног повећања меродавних вода, препорука је да се ураде додатне анализе обезбеђености хидротехничких објеката. Нови подаци могу да укажу на то да је дошло до повећања вероватноће превазилажења протока према којима су објекти својевремено димензионисани.

## Захвалница

Аутори се захваљују Радету Милутиновићу из фирме „HIDRO CLB CONSULT“ из Новог Сада на уступљеној пројектној документацији, помоћи при обиласку терена и корисним сугестијама током израде овог рада. Аутори се такође захваљују проф. др Стевану Прохаски на достављеним подацима о падавинама. Рад је делимично настао у оквиру истраживања у пројектима технолошког развоја ТР 37009 и ТР 37010 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

## Литература

1. Главни пројекат акумулације на потоку „Мохарач“ код Ердевика, Хидробиро, Нови Сад, 1980.
2. Плавшић, Ј., Инжењерска хидрологија, скрипта, Грађевински факултет, Београд, 2017.
3. Савић, Љ., Увод у хидротехничке грађевине, друго издање, Грађевински факултет, Београд, 2009.
4. Капор, Р., Хидраулика, друго измењено и допуњено издање, Грађевински факултет, Београд, 2011.
5. Иветић, М., Рачунска хидраулика - отворени токови, скрипта, Грађевински факултет, Београд, 2000.
6. Прохаска, Ј. и Бартош Дивац, В. са сарадницима, Интензитети јаких киша у Србији, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2014.
7. Бабић Младеновић, М., Уређење водотока, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, 2018.

## Управљање акумулацијама Врба и Клиње у периоду наилаaska великих вода

Тамара Судар<sup>1</sup>, Тина Дашић<sup>2</sup>

**АПСТРАКТ:** Рудници са отвореним коповима и термоелектране су енергетски системи државног нивоа значајности. Такви системи захтијевају висок степен заштите од великих вода, због неслагљивих директних и индиректних штета које плавлeње таквих система може да узрокује. Њихова заштита остварује се комбинацијом активних и пасивних мјера заштите од поплава, уз обезбјеђивање одговарајућег хидролошког мониторинга. У чланку се разматра каскада од двије акумулације "Врба" и "Клиње" које чине окосницу водопривредног система ријеке Мушнице (Источна Херцеговина, БиХ). Основна намјена ових акумулација је снабдијевање технолошком водом ТЕ Гацко, заштита низводних подручја (прије свега површинских копова и објеката РиТЕ Гацко) од великих вода, као и побољшање режима малих вода. У раду је анализирана могућност повећања ефикасности водопривредног система у периодима наилаaska великих вода. Формиран је математички модел за трансформацију поплавних таласа, којим је анализиран спрегнути рад двије акумулације и испитани су ефекти претпражњења акумулација за разне прорачунске случајеве (полазне коте у акумулацијама и велике воде разних вјероватноћа појаве). На основу спроведених анализа одређена су правила управљања акумулацијама у периоду наилаaska великих вода. Правила управљања дефинисана су у виду радних дијаграма пожељних нивоа воде у акумулацијама у појединим временским пресецима. Показало се да и акумулације које контролишу мањи дио слива уз правилно управљање могу имати значајну улогу у активној одбрани од поплава низводних подручја.

Кључне ријечи: активна заштита од поплава, акумулације у каскади, управљање акумулацијама, ријека Мушница

## Management of the Vrba and Klinje reservoirs during flood flows

**ABSTRACT:** Open-pit mines and thermal power stations are thermal power facilities of the state-level significance. These facilities must have a high level of protection against flood flows, due to immense direct and indirect damage caused by their flooding. These facilities are protected by a combination of active and passive flood protection measures, and an appropriate hydrological monitoring. The paper deals with two adjacent reservoirs, Vrba and Klinje, which form the backbone of the Musnica River water management system in Eastern Herzegovina in B&H. The main purpose of these reservoirs is to supply Gacko TPS with process water, to protect downstream areas from flood flows (primarily open-pit mines and facilities of Gacko mine and TPS), and to improve the low flow regime. The paper analyses the possibility of increasing the efficiency of the water management system in periods of flood flows. A mathematical model for the transformation of flood waves was developed, analysing the joint operation of the two reservoirs by pre-release of water in various cases (initial levels in reservoirs and flood flows of different likelihoods). The reservoir management procedures during flood flows were determined on the basis of the analyses. Based on the operating diagram, the management procedures specify time periods and desirable water levels in the reservoirs. The analyses showed that even the reservoirs which manage a smaller part of the basin can play a significant role in active flood defence of downstream areas, if managed appropriately.

Keywords: active flood defence, adjacent reservoirs, reservoir management, the Musnica River.

<sup>1</sup> Тамара Судар, студент, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, sudartamara@gmail.com

<sup>2</sup> В. проф. др Тина Дашић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, mtina@grf.bg.ac.rs

## 1 Увод

У условима све нестационарних хидролошких режима, када су таласи великих вода све чешћи и разорнији, а маловодни периоди екстремнији и дужи, пасивне мјере одбране од поплава често нису довољне за адекватну заштиту брањеног подручја. У таквим условима акумулације и мјере активне заштите од великих вода које се њима реализују постају све значајније. То значи да акумулације морају да задовоље два важна захтјева: са једне стране морају обезбиједити потребне количине воде корисницима, док се са друге стране пред њих ставља задатак заштите од поплава низводних подручја. Ова два задатка имају различите захтјеве са становишта пуњења и пражњења акумулације. Са аспекта корисника система добро је да је акумулација што дуже пуна, како би се располагало што већом количином воде у дефицитарном периоду. Са аспекта заштите од поплава тежња је да се ослободи што већи простор за прихватање поплавног таласа. Због свега тога, а да би се могућности акумулације искористиле на најбољи начин, неопходно је управљање спроводити према унапријед дефинисаним оперативним плановима управљања.

У раду се анализира систем од двије акумулације (Врба и Клиње), на ријеци Мушници, која припада сливу ријеке Требишњице, Источна Херцеговина, БиХ (слика 1). Управљање овим системом веома је деликатно јер се низводно налазе рудник и термоелектрана Гацко (РиТЕ Гацко) – важан енергетски систем за кога се захтијева висока поузданост функционисања. Због тога је неопходно обезбиједити поуздано снабдијевање водом, али и поуздану заштиту од великих вода.

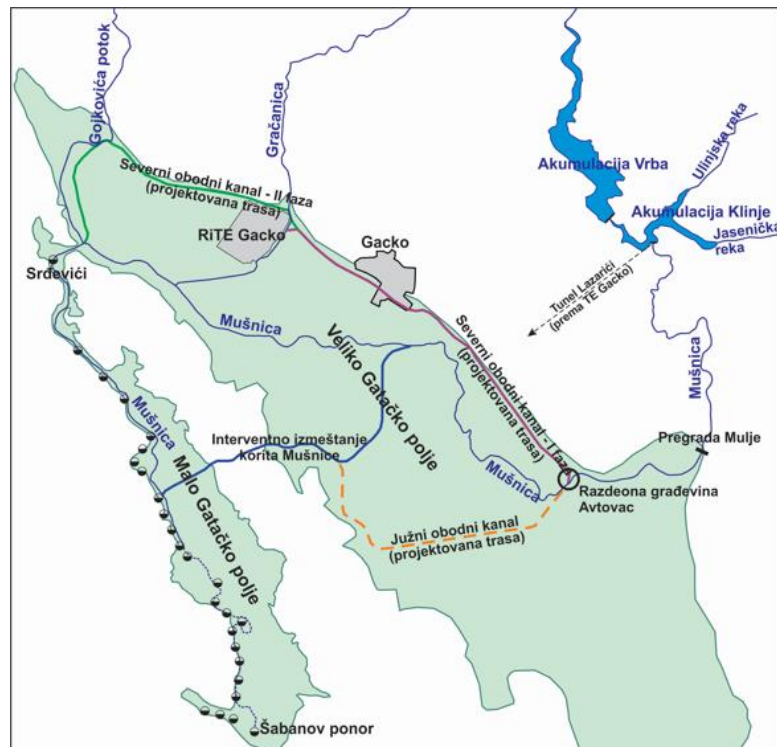
## 2 Опис разматраног система

Ријеку Мушницу формирају водотоци Врба, Улињски поток и Јасенички поток, као и притоке Грачаница и Гојковића поток (слика 1). Површина слива до ВС „Срђевићи“ – кључног хидрографског чворишта у Гатачком пољу износи око 260 km<sup>2</sup>. Водни токови у Гатачком пољу (Великом и Малом), Кулском и Церничком пољу припадају подручју са значајним падавинама (просјечно око 2000 mm/god). Пошто се ради о карстном подручју, водени токови су доминантно подземни, а на површини се појављују само у подручју карстних поља. Ток Мушнице након проласка кроз Велико Гатачко поље понире у бројним понорима од понора Срђевићи до Шабановог понора и подземно тече према извориштима ријеке Требишњице, а исти подземним везама доминантно утичу на формирање таласа великих вода на изворишту ријеке Требишњице у Билећи (Билећка акумулација).

Вишенамјенско коришћење вода ријеке Мушнице отпочело је крајем XIX вијека (од 1898. године) када је изграђена брана и формирана акумулација Клиње. Водом из акумулације Клиње вршено је наводњавање дијела Гатачког поља под мелиорационим системом, како би се продужио вегетативни период и обезбиједила друга жетва. 1980. и 1982. године спроведена је анализа потреба за техничком водом ТЕ Гацко за I и II фазу изградње, на основу чега је одређена потребна запремина акумулације Врба.

Велике воде које се формирају у Гатачком пољу због ограниченог капацитета одводње преко понорских зона у Малом Гатачком пољу плаве ово поље које има улогу природне ретензије. Велике воде и нивои ових вода у Гатачком пољу су значајни због утицаја на рудник и ТЕ Гацко, па су уз ове објекте на ријекама Мушница и Гојковића поток изграђени пропратни насипи и извршене регулације водотока.





Слика 1. Шематски приказ тока ријеке Мушнице (Дашић и сарадници, 2016)

Figure 1. Schematic view of Mušnica River (Dašić et al, 2016)

## 2.1 Подаци о бранама и вишенамјенским акумулацијама

Примарни корисник воде акумулација Врба и Клиње је РиТЕ Гацко, која тренутно (у I фази изградње) користи 600 L/s. Поред тога, неопходно је испуштати воду за потребе обезбјеђивања еколошки прихватљивог протицаја низводно од бране Клиње у количини од 120 L/s у зимском периоду до 180 L/s у љетњем периоду године. Акумулације раде спрегнуто. Главну улогу у изравнавању вода има узводна акумулација Врба, која има већу запремину. Из ње се вода дириговано упушта у низводну акумулацију Клиње, одакле се водозахватом и транспортним цјевоводом одводи према РиТЕ Гацко или се испушта у природни ток ријеке Мушнице.

### 2.1.1 Брана и акумулација „Клиње“

Брана Клиње (слика 2) је најстарија лучно-гравитациона брана на Балкану. Изграђена је од клесаног камена са везивом од пуцоланског малтера, у периоду од 1892-1898. године.

Конструкција бране је изведена са слободним преливом на десном боку и два темељна испуста у десном и лијевом боку. У десни темељни испуст уграђена је челична цијев ф 1000 mm за одвод техничке воде према ТЕ Гацко.

Кота круне бране је на 1027,30 mnm, а конструктивна висина 27 m. За евакуацију великих вода користи се слободни прелив који се налази у десном боку, ширине око 22 m и капацитета  $Q_{\max}=180 \text{ m}^3/\text{s}$ . Преливни праг је на коти 1024 mnm. За испуштање воде из акумулације Клиње користи се десни темељни испуст капацитета  $7,65 \text{ m}^3/\text{s}$ , док лијеви темељни испуст капацитета  $36,50 \text{ m}^3/\text{s}$  тренутно није у функцији. Површина слива до бране Клиње износи око  $75 \text{ km}^2$ , а просјечни вишегодишњи проток  $Q_{\text{sr}}=3,18 \text{ m}^3/\text{s}$ . Кота нормалног успора је 1024 mnm, при којој се формира запремина од  $1,43 \times 10^6 \text{ m}^3$ .



Слика 2. Брана Клиње – постојеће стање

Figure 2. Klinje dam – present state

### 2.1.2 Брана и акумулација „Врба“

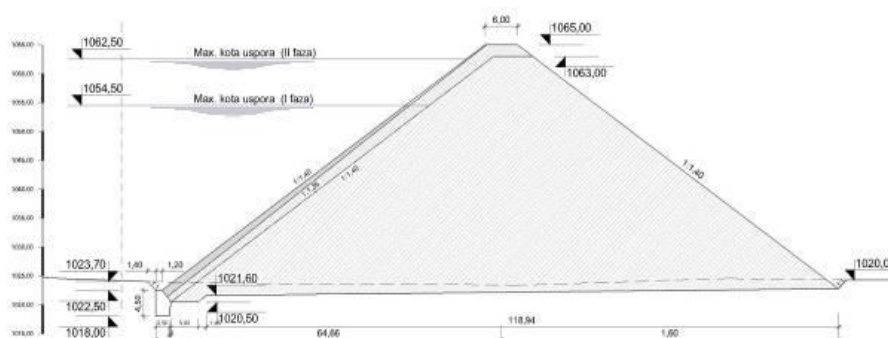
Брана Врба је насута брана од каменог набачаја са узводним армирано-бетонским екраном (слика 3). Кота круне бране је 1065 mnm, дужина у круни 221,90 m, ширина у круни је 5 m, максимална грађевинска висина 43,70 m, а кота круне прелива 1060 mnm. За испуштање и евакуацију вода користе се темељни испуст и прелив са сегментним уставама. Запремина акумулације при коти успора 1062,5 mnm износи  $14,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Поред основне намјене - диригованог упуштања воде у акумулацију Клиње, темељни испуст се може користити и у ванредним околностима, за испуштање при наиласку великих вода, када може спрегнуто да ради са слободним преливом. Капацитет темељног испуста код 100% отворености затварача је до  $27,12 \text{ m}^3/\text{s}$ .

За испуштање воде темељним испустом ка акумулацији Клиње користе се табласти регулациони затварач и дисперзни затварач који је подесан за контролисано регулисање протока од максимално  $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$  при коти 1062,50 mnm и  $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$  при коти у акумулацији Врба од 1030 mnm, али и за мања испуштања.

Слободни прелив са два преливна поља и сегментним затварачима димензија  $(2 \times 11 \times 2,5)$  m налази на лијевом боку, преливна ивица је на коти 1060 mnm (слика 4). Пропусни капацитет прелива са радом два преливна поља износи  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , што одговара рачунској великој води повратног периода од  $T=10\ 000$  година.

Површина слива акумулације Врба је око  $30 \text{ km}^2$ , а средњи годишњи протицај износи  $Q_{sr}=1,24 \text{ m}^3/\text{s}$ . Акумулација Врба је предвиђена за допуну потреба за водом ТЕ Гацко, а за ту намјену испушта од 0 до  $808 \text{ L/s}$ . Максимални ниво у акумулацији је 1062,50 mnm, а минимални 1030 mnm.



Слика 3. Брана Врба- попречни пресјек [6]

Figure 3. Vrba dam – cross-section [6]



Слика 4. Преливни праг са уставама и брзоток прелива бране Врба

Figure 4. Spillway sill and chute of the uncontrolled spillway of the Vrba dam

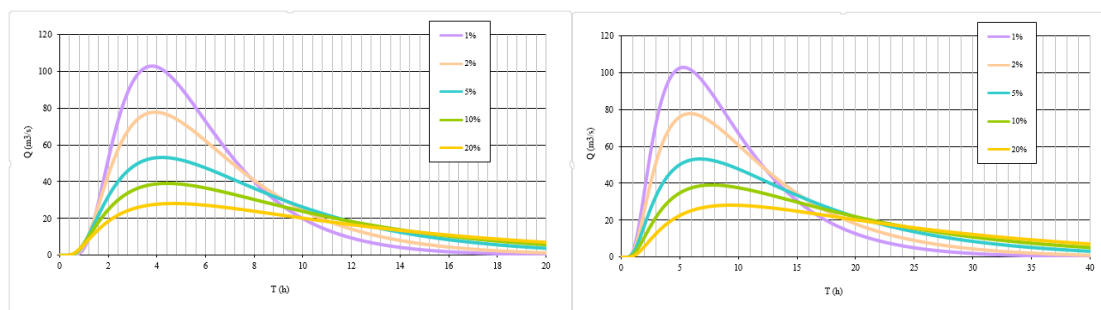
## 2.2 Подаци о великим водама на сливу

Подаци о великим водама добијени су методом прилагођавања теоријских расподијела емпиријским на бази дневних протока. Запремине хидрограма дефинисане су на бази вјероватноћа трајања кише од 3 дана (варијанта 1) и 5 дана (варијанта 2). Добијени хидрограми дају исте вриједности максималних протока (за таласе одређеног повратног периода), док се запремине таласа разликују. Коришћени су подаци за двије кључне водомјерне станице (ВС Врба и ВС Клиње). У табели 1 приказане су вриједности запремина таласа за различите водомјерне станице, различите повратне периоде и различита трајања кише. Дијаграмима су приказане вјероватноће појаве великих вода за водомјерне станице Врба и Клиње (слике 5, 6, 7).

Табела 1. Запремина поплавних таласа у функцији трајања кише, за различите водомјерне станице

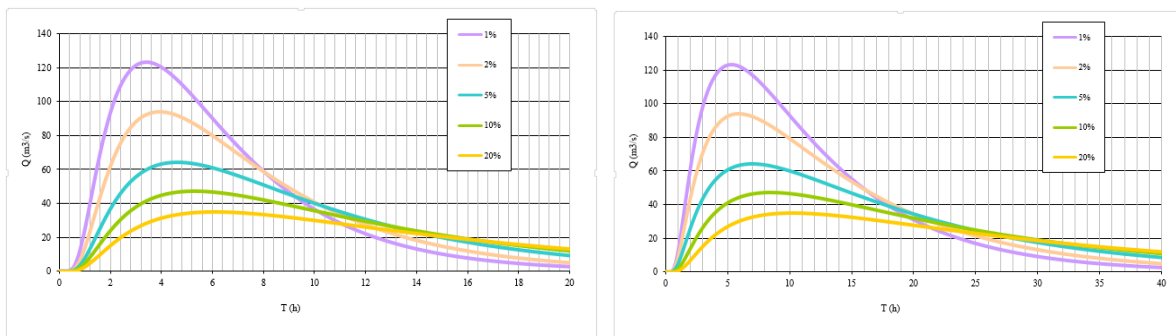
Table 1. The volume of flood waves in relation to the rainfall duration, for different gauging stations

p	T	ВС Врба		међуслив		ВС Клиње	
		3	5	3	5	3	5
0,01%	10000	3,229	5,524	5,028	9,537	8,234	13,902
0,1%	1000	2,699	4,786	4,077	7,832	6,909	12,132
1%	100	2,172	3,999	3,208	6,241	5,574	10,195
2%	50	2,010	3,744	2,957	5,774	5,160	9,559
5%	20	1,789	3,387	2,628	5,154	4,594	8,663
10%	10	1,614	3,092	2,375	4,676	4,142	7,911



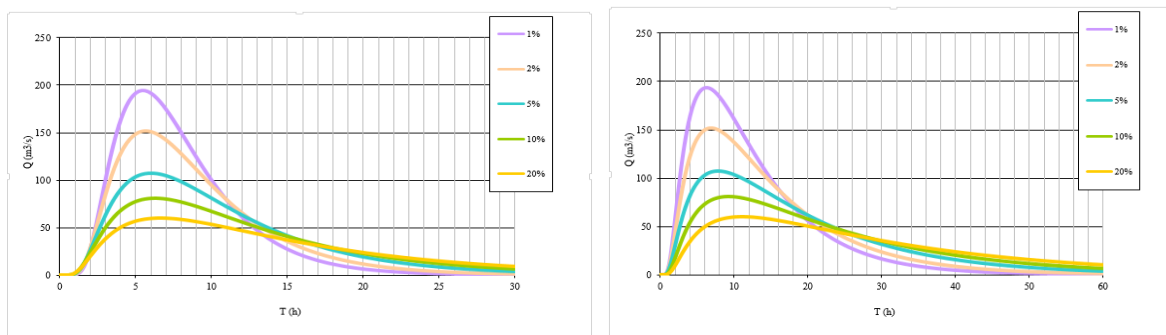
Слика 5. Таласи великих вода на ВС Врба, варијанта 1 (лијево) и варијанта 2 (десно)

Figure 5. Flood waves at the Vrba GS , variant 1 (left) and variant 2 (right)



Слика 6. Вјероватноће појаве великих вода – међуслив, варијанта 1 (лијево) и варијанта 2 (десно)

Figure 6. Probability of flood flows – drainage basin, variant 1 (left) and variant 2 (right)



Слика 7. Вјероватноће појаве великих вода на ВС Клиње, варијанта 1 (лијево) и варијанта 2 (десно)

Figure 7. Probability of flood flows at the Klinje GS, variant 1 (left) and variant 2 (right)

### 2.3 Постојеће стање и могућности побољшања управљања

Утицај акумулација и улога у активној одбрани од поплава до сада је коришћен веома скромно, јер су велике воде долазиле у пуне акумулације (без претпражњења) и преливале се преко евакуационих органа на бранама, што показују реализовани нивои у акумулацији Врба 2012-2017. година (слика 13).

Значајнији ефекти ретензирања у акумулацијама видљиви су само у случају када су хидролошки услови били такви да акумулација није на коти нормалног успора. У периоду јануар-јун и новембар-децембар ниво воде у акумулацији је изнад коте нормалног успора 1060 mm, а у периодима јул-септембар изнад коте 1058 mm (изузев 2017. године).

С обзиром да на низводном дијелу ријека Мушница протиче кроз зоне веома осјетљиве на плавлeње (рудник и ТЕ Гацко) неопходно је сачинити добру полазну основу и квалитетан и спроводљив план за постепени прелазак са пасивног на активно управљање, које је могуће остварити првенствено значајнијом улогом коју треба да испуни акумулација Врба у спрегнутом раду са акумулацијом Клиње. Да би се то могло и остварити, поред анализа које су спроведене и приједлога управљања датог у овом раду, неопходно је извршити детаљне ремонте, реконструкције и замјене кључне хидромеханичке и електромашинске опреме на објектима брана. Истовремено се мора осавременити мјерно-информациони систем на кључним хидролошким тачкама система како би се осигурала одговарајућа функционалност и поузданост информација.

### 3 Могућности ублажавања поплавних таласа у акумулацијама

У циљу сагледавања могућности прихватања таласа великих вода спрегнутим радом акумулација Врба и Клиње спроведена је анализа трансформације поплавних таласа у овим акумулацијама, за различите улазне таласе и различите почетне услове. Анализиран је наилазак таласа рачунских великих вода повратних периода 1%, 2% и 5%, за варијанте 1 и 2, што представља два реална сценарија формирања великих водних таласа на подручју Источне Херцеговине. Улазни хидрограми приказани су у дијелу 2.2. За акумулацију Врба користе се дијаграми приказани на слици 5, док се за акумулацију Клиње одређују као збир трансформисаног (излазног) таласа из акумулације Врба и таласа са међуслива.

Почетним условима дефинисана је почетна кота у акумулацијама, како би се испитали ефекти претпражњења акумулација на ублажавање (ретензирање) поплавних таласа. Разматране почетне коте у акумулацији Врба су: 1060 mnm (акумулација испуњена до коте прелива), 1058 mnm (у акумулацији се обезбјеђује слободан простор од  $1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  за прихватање таласа великих вода), 1056 mnm (запремина за прихватање таласа износи око  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). Због знатно веће запремине, утицај акумулације Врба на ублажавање поплавног таласа далеко је значајнији у односу на акумулацију Клиње. Због тога су разматрана само два почетна нивоа у акумулацији Клиње: 1024 mnm (акумулација испуњена до коте круне прелива) и 1022 mnm (чиме се ослобађа запремина од  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). Веће обарање коте у акумулацији Клиње је ризично јер би могло да угрози рад захвата техничке воде за ТЕ Гацко.

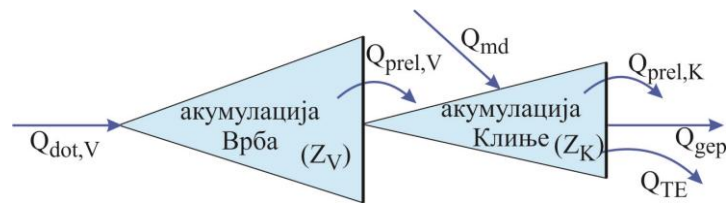
С обзиром да се могућност ретензирања поплавних таласа провјерава за различите почетне нивое воде у акумулацији, анализирано је и вријеме које је потребно да би се постигло одговарајуће претпражњење акумулације. Прорачун је спроведен на основу кривих протока темељних испуста и под претпоставком да у периоду претпражњења доток воде у акумулацију одговара вриједности  $2 \times Q_{sr}$  (што за акумулацију Врба износи  $2,48 \text{ m}^3/\text{s}$ , а за Клиње  $6,36 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

На основу резултата прорачуна закључује се да се у акумулацији Врба спуштање нивоа са коте нормалног успора 1060 mnm на коту 1058 mnm се може извршити за 22 часа, док је за спуштање до коте 1056 mnm потребан 41 час. Код акумулације Клиње обарање са коте нормалног успора 1024 mnm на коту 1022 mnm може се извршити десним темељним испустом (који је тренутно у функцији) за 47 часова. Вријеме пражњења провјерено је и за случај рада оба темељна испуста, при чему се ниво у акумулацији спусти за само 3,5 часа, што рјечито говори о значају оспособљавања за рад лијевог темељног испуста.

#### 3.1 Прорачунска шема трансформације поплавних таласа

Прорачун трансформације поплавних таласа у акумулацијама Врба и Клиње спроводи се у два корака, рачунајући прво узводну, па низводну акумулацију (слика 8):

1. Прорачун трансформације поплавног таласа у акумулацији Врба. Улазни параметри су: доток у акумулацију, који одговара улазном таласу за ВС Врба ( $Q_{dot,v}$ ) и почетни ниво воде у акумулацији ( $Z_{V0}$ ), док се као излазни подаци добијају нивои воде у акумулацији ( $Z_V$ ) и проток воде низводно – трансформисан талас ( $Q_{prel,v}$ ).
2. Прорачун трансформације таласа у акумулацији Клиње. Улазни параметри су: почетни ниво воде у акумулацији ( $Z_{K0}$ ), доток трансформисаног таласа из акумулације Врба ( $Q_{prel,v}$ ) и доток са међуслива ( $Q_{md}$ ). Као излазни подаци добијају се нивои воде у акумулацији ( $Z_K$ ) и проток воде низводно од бране – трансформисан талас ( $Q_{prel,K}$ ). Као излазни проток из акумулације урачуната је и количина воде која се захвата за потребе ТЕ Гацко  $Q_{TE}=0,60 \text{ m}^3/\text{s}$ , као и количина воде која се константно испушта низводно у виду гарантованог протока  $Q_{gep}=0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Слика 8. Прорачунска шема трансформације поплавних таласа у акумулацијама Врба и Клиње

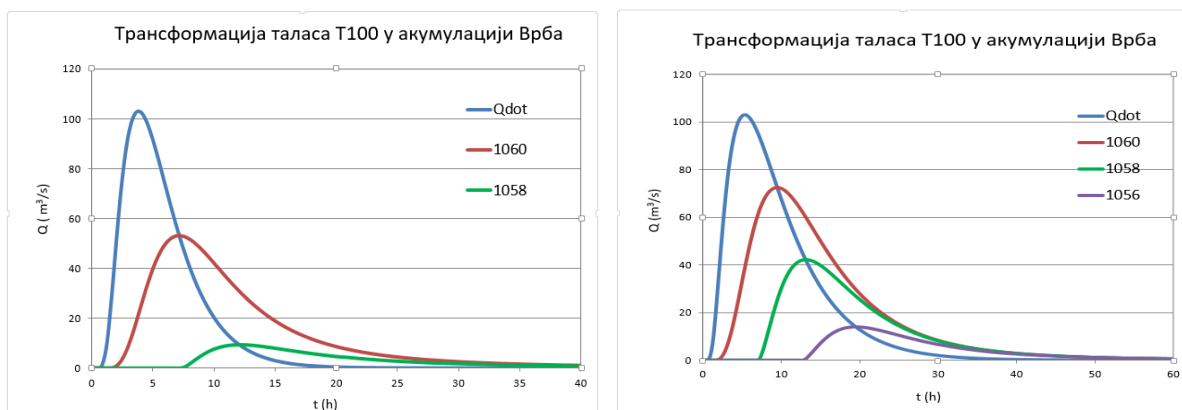
Figure 8. Calculation diagram of the flood wave transformation in the Vrba and Klinje reservoirs

За прорачун трансформације поплавног таласа у акумулацијама користи се „квази-стационарна“ метода, која се заснива на рјешавању једначине одржања масе (билансне једначине), за познати доток (поплавни талас), криву запремине акумулације, почетне и граничне услове. Као што је у претходном дијелу већ истакнуто, анализирани су различити почетни услови - почетни нивои воде у акумулацијама, а низводни гранични услов дефинишу криве протока евакуационих органа.

### 3.2 Резултати прорачуна

Резултати прорачуна указују на значајне ефекте трансформације поплавних таласа у акумулацији Врба, посебно поплавних таласа мањих запремина (варијанта 1). Максималан проток таласа стогодишње велике воде смањи се на пола (са протока од око  $105 \text{ m}^3/\text{s}$  на проток од око  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) чак и када талас наиђе на пуну акумулацију (кота  $1060 \text{ mm}$ ). Уколико би поплавни талас наишао у тренутку када је ниво воде у акумулацији на коти  $1058 \text{ mm}$  талас би се готово у потпуности ретензирао, проток низводно био би само око  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Нешто другачија ситуација је са таласима из варијанте 2 (запремине поплавних таласа између  $3,387$  и  $3,999 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). На слици 9 може се уочити да се снижењем почетног нивоа воде испод коте  $1058 \text{ mm}$  може постићи значајно ретензирање, док се снижењем коте испод  $1056 \text{ mm}$  постиже готово потпуно ретензирање таласа стогодишњих великих вода (са преливањем до само  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  у максимуму).



Слика 9. Трансформација поплавног таласа повратног периода 1%, варијанта 1 (лијево), варијанта 2 (десно)

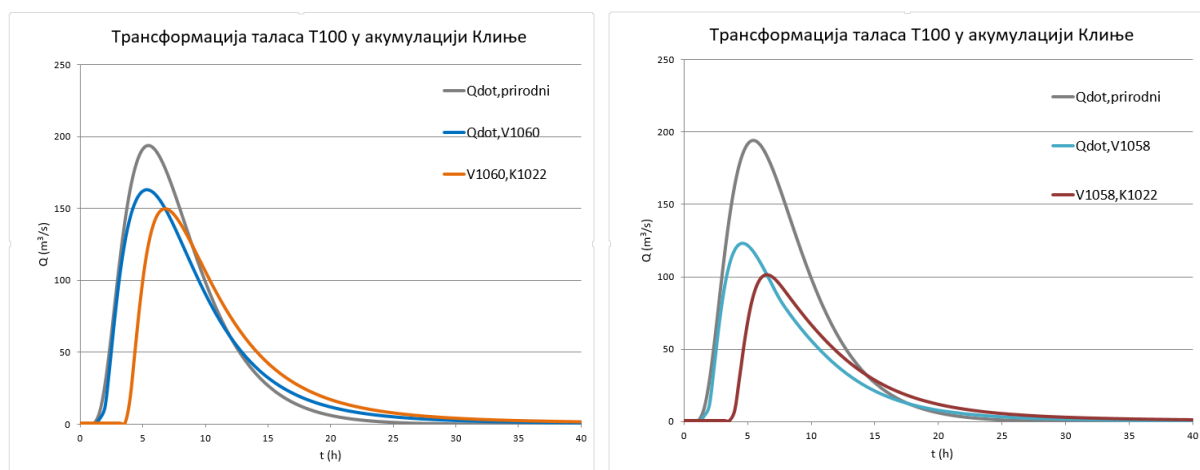
Figure 9. Transformation of flood wave (100-year return period), variant 1 (left) and variant 2 (right)

Резултати анализе трансформације поплавних таласа у акумулацији Клиње за велике воде вјероватноће појаве 1% дати су на слици 10. Да би се сагледали ефекти ублажавања таласа великих вода у акумулацијама упоређиван је поплавни талас који би се јавио у профилу ВС Клиње у природним условима  $Q_{\text{dot,природни}}$  (случај да не постоје акумулације), са

трансформисаним таласима при различитим почетним нивоима воде у акумулацијама. Анализом добијених резултата долази се до следећих закључака (варијанта 1):

- Значајно ублажавање таласа великих вода постиже се у акумулацији Врба. Без претпражњења те акумулације велике воде на профилу Клиње смањује се у пика за око 16% (са 194 на 163  $\text{m}^3/\text{s}$ ), док се у случају спуштања почетног нивоа за 2 m максималан проток смањује за око 37% (са 194 на 123  $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- Акумулација Клиње нема значајан ефекат на трансформисање улазног таласа (пик поплавног таласа смањује се само за 10  $\text{m}^3/\text{s}$  без претпражњења те акумулације, односно за 12  $\text{m}^3/\text{s}$  ако се ниво у њој спусти за 2 m), али има утицај на помијерања времена појаве пика трансформисаног таласа (2 до 4 часа), што може да буде значајно са аспекта избјегавања суперпонирања великих вода низводно.
- У спрегнутом раду (када се прије наиласка поплавног таласа намјенски снижавају коте у акумулацијама) остварују се ефекти и на смањење пика таласа и на продужавање времена до појаве пика.

Слични ефекти трансформације поплавних таласа у спрегнутом раду двије акумулације јављају се и у случајевима наиласка великих вода вјероватноћа појаве 2% и 5%. Примјетна је значајнија трансформација пика поплавних таласа у акумулацији Врба, али се уочава сличан временски помак појаве пика трансформисаног таласа из акумулације Клиње (за коту 1024 mm – око 2 часа и 1022 mm – око 4 часа).



Слика 10. Трансформација поплавног таласа стогодишње воде (1%) у акумулацији Клиње

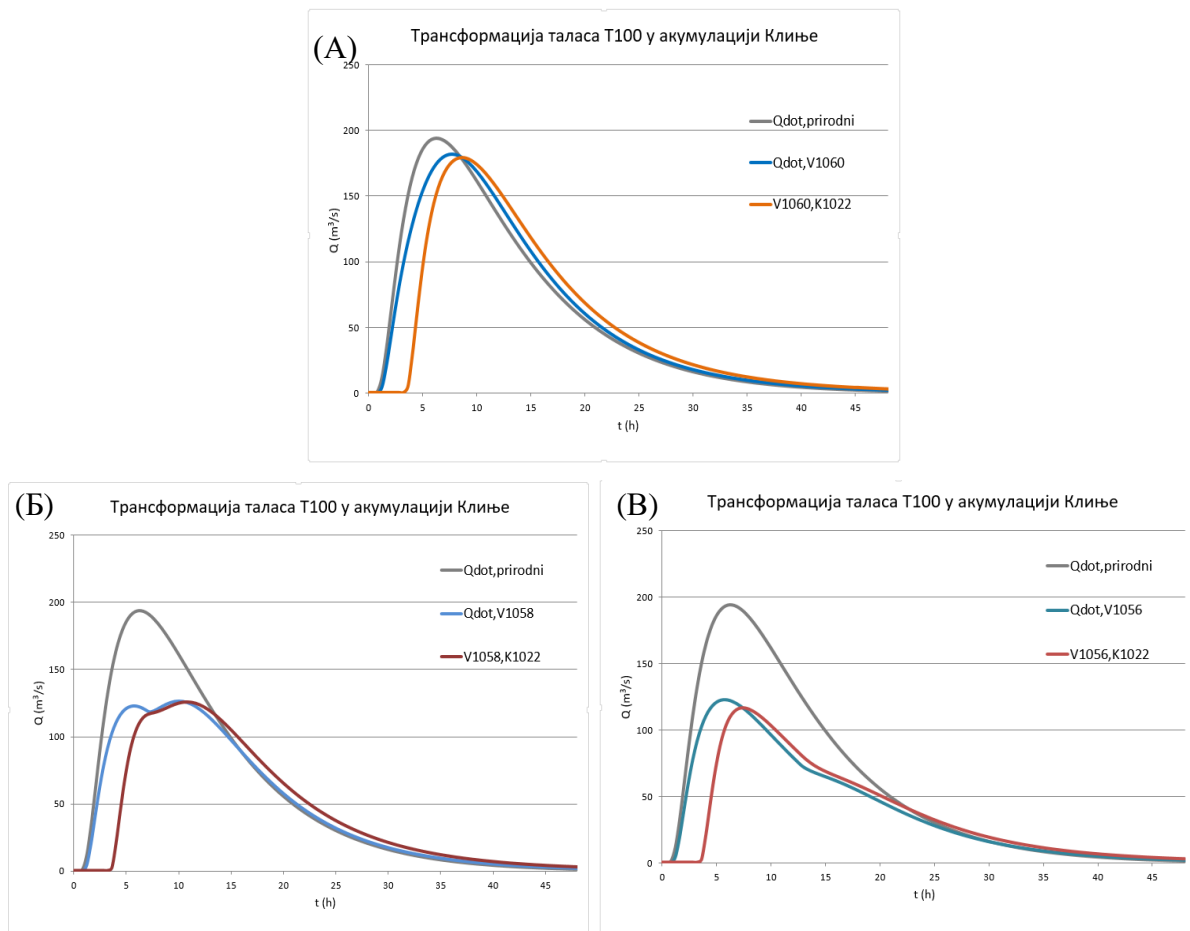
Figure 10. Transformation of a 100-year flood wave (1%) in the Klinje reservoir

У случају када се поплавних таласа из варијанте 2 (слика 11), добијају се интересантни резултати (нарочито при претпражњењу акумулације Врба), који упућују на важне закључке, који ће се примијенити код одређивања правила управљања акумулацијама. Ефекти трансформације упоређивани су са поплавним таласом који би се јавио у профилу ВС Клиње у природним условима  $Q_{\text{dot,prirodni}}$ , а анализом добијених резултата долази се до следећих закључака:

- Уколико поплавни талас наилази на пуне акумулације ефекти ублажавања таласа су мали: пик таласа се у акумулацији Врба смањује за око 7% (са 194 на 182  $\text{m}^3/\text{s}$ ), а у акумулацији Клиње само за 3  $\text{m}^3/\text{s}$ . Тако трансформисан поплавни талас излази из акумулације Клиње са пиком који је помјерен за око 1,6 часова у односу на улазни хидрограм. Претпражњењем само акумулације Клиње од 2 m (полазна кота 1022 mm) не постижу се бољи ефекти на смањење пика таласа, али се он помијера на око 3,6 часова у односу на улазни талас (слика 11-А).
- Претпражњењем акумулације Врба за 2 m (почетни ниво 1058 mm) значајно се смањује поплавни талас (за око 35%, са 194  $\text{m}^3/\text{s}$  на 127  $\text{m}^3/\text{s}$ ), преливање воде почиње

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

тек око 8 часова од почетка поплаве, а његов пик се јавља након 13 часова (са око 8 часова закашњења у односу на улазни талас). Због тога укупни улазни хидрограм у акумулацију Клиње има два пика. Први је резултат наиласка поплавног таласа са међуслива, који достиже максимум након 5 часова, након чега се протоци смањују. Међутим, након 3 часа (8 часова од почетка наиласка великих вода) долази трансформисани таласа из акумулације Врба, због чега се након 13 часова јавља други пик (слика 11-Б). Трансформисани излазни хидрограм из акумулације Клиње је због ове појаве значајно развучен у пику (до 10 часова). На слици је приказан излазни талас за почетни ниво воде у акумулацији Клиње на 1022 mm.



Слика 11. Трансформација поплавног таласа стогодишње воде (1%) у акумулацији Клиње

Figure 11. Transformation of a one-hundred-year flood wave (1%) in the Klinje reservoir

- Претпражњењем акумулације Врба за 4 m (почетни ниво 1056 mm) пик таласа смањује се за око 37% (са 194 на 123 m<sup>3</sup>/s), али се појава пика помијера за око 15 часова у односу на улазни талас. На збирном улазном и трансформисаном излазном хидрограму из акумулације Клиње видљиво је спорије умањење протицаја на силазном дијелу хидрограма (слика 11-В), што је последица дотока трансформисаног таласа из акумулације Врба. Пик поплавног таласа није много мањи него код полазне коте 1058 mm у акумулацији Врба, али је вријеме трајања пика поплавног таласа значајно краће и износи око 5 часова.

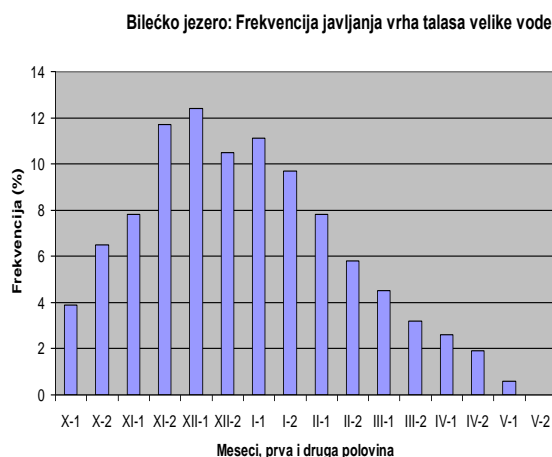
Слични ефекти трансформације поплавних таласа у спрегнутом раду двије акумулације су и у случају наиласка великих вода вјероватноће појаве 2% и 5%. Примјетна је значајнија



трансформација пика поплавних таласа у акумулацији Врба, али се уочава слично временско помијерање пика трансформисаног таласа из акумулације Клиње.

#### 4 Дефинисање правила управљања акумулацијама у условима наиласка великих вода

Да би се могла дефинисати правила управљања акумулацијама у условима наиласка великих вода потребно је прије свега анализирати периоде у којима долази до таквих догађаја. Пошто за разматрано подручје нису били доступни подаци о учесталости поплавних таласа искоришћени су подаци детаљнијих истраживања која су спроведена на сливу Требишњице (Ђорђевић и сар., 2012). Подаци са слива ријеке Требишњице могли су бити искоришћени и за слив Мушнице, јер средоземни циклони истовремено захватају читав јужни масив Динарида, на коме се излучују падавине великих интензитета. На слици 12 приказана је фреквенција појаве поплавних таласа на улазу у Билећку акумулацију. Видљиво је да се поводњи најучесталије јављају у хладном дијелу године, од почетка октобра до прве половине маја, али са различитим учесталостима. Највећа учесталост појаве таласа великих вода јавља се у периоду од друге половине новембра до краја јануара. Високе учесталости настајања поводња су од друге половине октобра закључно са првом половином марта.



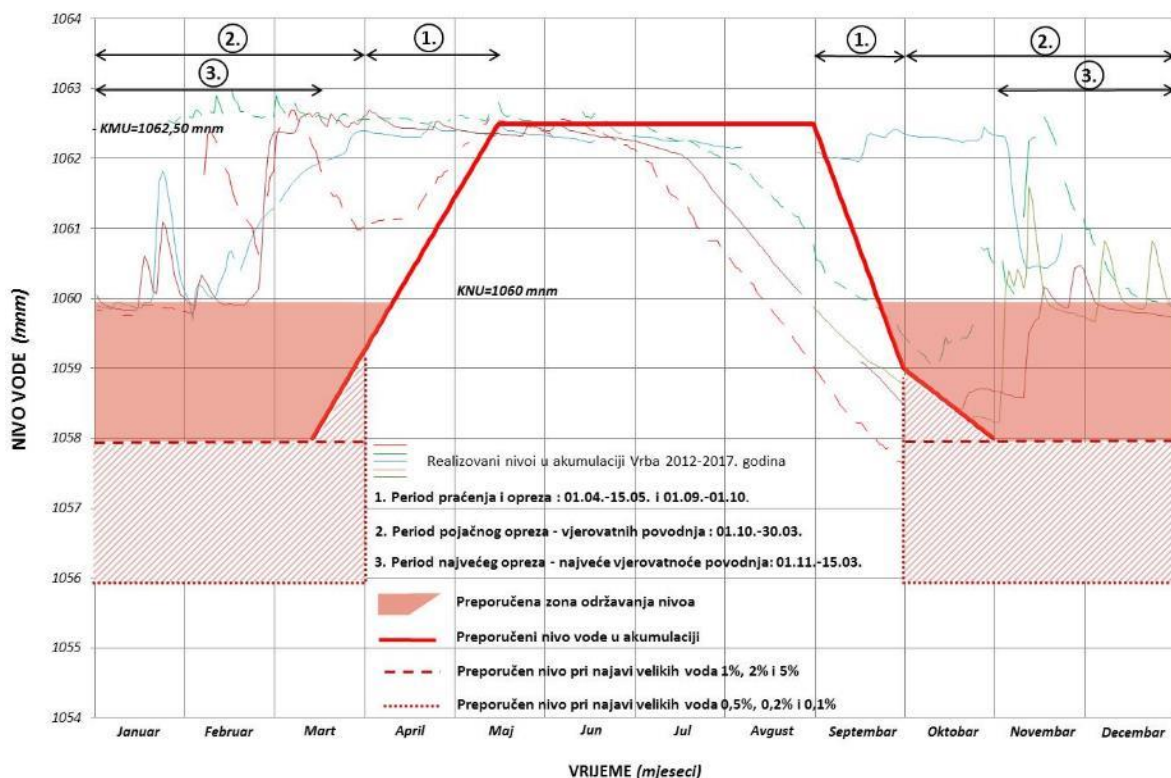
Слика 12. Фреквенција појаве таласа велике воде на уласку у Билећку акумулацију (Ђорђевић и сар., 2012)

Figure 12. Frequency of flood waves for Bileća Reservoir (Ђорђевић et al, 2012)

У општем случају, правила управљања треба дефинисати тако да се омогући поуздана испорука воде корисницима, али и поуздана заштита у случају наиласка великих вода, посебно у случајевима када је једна од намјена акумулације и заштита од поплава. У нормалним условима акумулацијом се управља тако да се задовоље сви корисници, односно да се максимизира добит од испоручене воде. Међутим, у условима наиласка великих вода управљање се веома често подређује управо захтјеву максималне заштите низводног подручја. С обзиром да низводно од разматраних акумулација Врба и Клиње ријека Мушница протиче кроз комплекс рудника и ТЕ Гацко, проблем заштите од поплава, односно ублажавања таласа великих вода веома је значајан.

Након спроведених анализа и прорачуна могуће је дефинисати начелна правила управљања акумулацијама у условима наиласка великих вода. Полазна кота 1058 mm у акумулацији Врба се показала као оптимална за прихватање и трансформацију поплавних таласа приказаних у варијантама 1 и 2, вјероватноће појаве 1%, 2% и 5% и та кота се може предложити као доње ограничење - доња анвелоба у периодима наиласка великих водних таласа. За рјеђе вјероватноће појаве великих вода (0,2%, 0,5% и 0,1 %) нису спроведене

анализе, али сагледавајући запремину тих рјеђих таласа, резултате трансформације поплавних таласа и времена пражњења акумулације, препоручује се спуштање нивоа воде у акумулацији Врба на коту 1056 mm (као доњу анвелопу) у периодима када се најави могућност таквог догађаја.



Слика 13. Приједлог радног дијаграма за управљање акумулацијом Врба

Figure 13. Proposal of the operating diagram for the management of the Vrba reservoir

На основу свих наведених разматрања дефинисан је приједлог оперативно-радног дијаграма у коме су дефинисане препоручене минималне коте нивоа у акумулацији Врба и зоне у оквиру којих би се морао одржавати ниво воде (слика 13).

Иако није наведен као значајан, период од 02.05.÷30.09. у условима екстремних падавина се треба третирати на одговарајући начин и примјенити мјере активне заштите од поплава.

Помоћу наведеног дијаграма могуће је дефинисати правила управљања акумулацијама на годишњем нивоу са аспекта заштите од поплава, према исказаним периодима ризика од поплавних таласа:

- у периоду праћења и опреза од [1.04.÷15.5.] и [01.09.÷01.10.] приоритет је рад у условима задовољења примарног корисника техничком водом (РиТЕ Гацко) и испуштање гарантованог еколошког протицаја. Уколико се појаве већи водни таласи, они су мањих запремина и могуће их је успјешно трансформисати у акумулацијама. У овом периоду кота на почетку периода треба да што више тежи коти максималног успора  $Z_{KMU}=1062,50$  mm. Ово је уједно и горња анвелоба коју је пожељно одржавати у што дужем периоду. Испуштање воде из акумулације Врба обавља се темељним испустом са дисперзионим затварачем из кога се испушта гарантовани еколошки протицај и техничка вода за РиТЕ Гацко  $Q_{TE}=600$  L/s, а на брани Клиње се такође дисперзионим затварачем на десном темељном испусту испушта гарантовани еколошки протицај у износу од 120 L/s. Кота у акумулацији Клиње треба да тежи коти нормалног успора  $Z_{KNU}=1024$  mm.
- у периоду појачаног опреза – вјероватних поводња од [01.10.÷30.03.] могу се очекивати поплавни таласи, а приоритет је и даље испорука воде примарном кориснику. Акумулација

Врба треба да је на око 1,5 m испод коте максималног успора, односно пожељно на коти 1061 mm са спуштеним сегментним уставама на слободном преливу, док је кота у акумулацији Клиње на коти нормалног успора 1024 mm. Резерва у акумулацији Врба од 1,5 m до коте максималног успора омогућава прихватање поплавних таласа мањих запремина, док је код наиласка таласа великих вода запремина до  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , потребно постепено отворити уставе на слободном преливу и коту у акумулацији спустити на коту нормалног успора  $Z_{\text{KNU}}=1060 \text{ mm}$ . Манипулација хидромеханичком опремом на бранама се обавља на исти начин као у претходном случају.

- у периоду највећег опреза – највеће вјероватноће поводња од [01.11÷15.03.] се очекују велики поплавни таласи (у неким случајевима и најнеповољнији сценарио, суперпонирање наглог топљења снијега и наилазак „Ђеновског циклона“). У појединим интервалима овог периода испоруке воде примарном кориснику су на истом нивоу важности као и активна одбрана од поплава. Коте у акумулацијама су на котама нормалних успора: у акумулацији Врба  $Z_{\text{KNU}}=1060 \text{ mm}$  (обавезно подигнуте сегментне уставе на слободном преливу), а у акумулацији Клиње  $Z_{\text{KNU}}=1024 \text{ mm}$ . Када се на основу поузданих временских прогноза очекују већи и значајни поплавни таласи, потребно је оборити ниво воде у акумулацијама и припремити их за активну улогу заштите од поплава. У тим хидролошким ситуацијама врши се селективно претпражњење акумулација темељним испустима на бранама и то:

- акумулације Врба до коте 1058 mm – анvelope одбране од поплава (слика 13) када се очекују велики водни таласи вјероватноћа појаве 1%, 2% и 5% (запремина поплавних таласа од  $2 \div 4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). У акумулацији Клиње претпражњењем је пожељно доћи до коте акумулације на 1022 mm.
- акумулације Врба до коте 1056 mm – анvelope одбране од поплава (слика 13) када се очекују екстремно велики водни таласи настали од више везаних таласа или суперпонирања наглог топљења снијега и наиласка „Ђеновског циклона“, вјероватноћа појаве 0,5%, 0,2% и 0,1% (запремина поплавних таласа од  $4,5 \div 6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). У акумулацији Клиње претпражњењем је пожељно доћи до коте 1022 mm.

Претпражњења се обављају темељним испустима на бранама. За акумулацију Врба потребна времена спуштања до коте 1058 mm су 22 часа а до коте 1056 mm 41 час, а за акумулацију Клиње са десним испустом до коте 1022 је потребно 47 часова, а са оба испуста за 3,5 часова. У току претпражњења се у више наврата провјеравају прогнозе и хидролошка ситуација на ширем подручју и по потреби се преиспитују претпражњења (са јачањем циклона се појачавају, а са слабљењем циклона се по потреби и обуставља претпражњење).

У периоду када престану са радом темељни испусти, активирају се затварачи за испуштање гарантованог еколошког протицаја на обје бране, а снабдијевање водом ТЕ Гацко се обавља без прекида.

Услов за спровођење правила управљања акумулацијама у условима наиласка великих вода је оперативност опреме на евакуационим органима (темељним испустима и преливима), као и одговарајући (развијен и поуздан) систем мониторинга хидролошких величина, укључујући поузданост временских прогноза о падавинским ситуацијама на сливу.

## 5 Закључак

У овом раду размотрене су постојеће карактеристике вишенамјенског система Мушнице, са посебним освртом и детаљном анализом улоге акумулација Врба и Клиње у активnoj заштити од поплава. Сагледавајући преузете техничке карактеристике и податке о бранама са евакуационим органима, акумулацијама и улазне хидролошке подлоге, додатном анализом и прорачуном трансформације поплавних таласа у више претпостављених реалних хидролошких сценарија показано је да ове акумулације могу имати значајнију улогу у активnoj одбрани од поплава, нарочито у спрегнутом раду.

Код спрегнутог рада ових акумулација у периоду наиласка великих поплавних таласа примјетна су значајна умањења пикова на профилу ВС Клиње, која се постижу трансформацијом таласа у акумулацији Врба, посебно уколико се изврше претпражњења. Уочава се и одређени допринос акумулације Клиње, пре свега у продуженом времену до појаве пика поплавног таласа када се изврши претпражњење.

Правила управљања акумулацијама дефинисана су након спроведених прорачуна трансформације поплавних таласа у акумулацијама, са сљедећим кључним закључцима:

- мали, средњи и велики поплавни таласи успјешно се трансформишу у акумулацији Врба од коте нормалног до коте максималног успора;
- у периодима године када се очекују поплавни таласи већих и екстремних запремина, неопходно је на основу поузданих показатеља извршити дириговано претпражњење:
  - акумулације Врба до коте 1058 mnm, када се очекују велики водни таласи вјероватноћа појаве 1%, 2% и 5%, запремина  $2\div 4 \times 10^6 \text{ m}^3$  (варијанте 1 и 2), акумулација Клиње је на пожељној коти 1022 mnm
  - акумулације Врба до коте 1056 mnm, када се очекују екстремно велики водни таласи настали од више везаних таласа или супрепонирања наглог топљења снијега и наиласка „Ђеновског циклона“, вјероватноћа појаве 0,5%, 0,2% и 0,1% (запремина поплавних таласа од  $4,5\div 6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), акумулација Клиње је на пожељној коти 1022 mnm.

Да би се активна улога акумулација Врба и Клиње у трансформацији поплавних таласа и остварила, неопходно је успоставити одговарајућу оперативност и поузданост хидромеханичке опреме на бранама, обезбиједити веома квалитетан, аутоматски хидролошки мониторинг и one-line прикупљање података на сливу ријеке Мушнице (кључна је кишомјерна станица „Чемерно“ уз мјерење висине сњежног покривача, формирати нову кишомјерну станицу уз акумулације, обезбиједити аутоматско прикупљање података на ВС Врба, Клиње и Автовац), аутоматско мјерење нивоа воде у акумулацијама, те обезбиједити приступ и коришћење поузданих временских прогноза укључујући одговарајућу хардверску и софтверску подршку са математичким моделима у управној згради, која је смјештена уз брану Врба.

## Литература

1. Дашић Т., Ђорђевић Б., Милановић П., Станић М., Јаћимовић Н., Судар Н. (2016) Развој метода за управљање водама и уређење територије у зони система осетљивих на поплаве – на примеру рудника и термоелектране Гацко, *Водопривреда*, 48 (282-284): 137-146.
2. Ђорђевић Б. (1990) *Водопривредни системи*, Научна књига, Београд, ИСБН 86-23-41056-4
3. Ђорђевић Б., Дашић Т., Судар Н. (2012) Повећање ефикасности управљања акумулацијама у периоду одбране од поплава – на примеру хидроенергетског система на Требишњици, *Водопривреда*, 44 (255-257): 43-58
4. Савић Љ. (2009) *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет Београд
5. Судар Т. (2018) *Управљање акумулацијама Врба и Клиње на реци Мушници (слив Требишњице)*, Дипломски рад
6. Завод за водопривреду Бијељина & Институт за водопривреду Јарослав Черни, Београд (2016) *Управљање водним ресурсом у сливу ријеке Мушнице – I Фаза*

## **Analiza uticaja merenja potrošnje vode za piće na specifičnu potrošnju u domaćinstvima**

Ognjen Govedarica<sup>1</sup>, Dragan Savić<sup>2</sup>, Aleksandar Đukić<sup>3</sup>, Branislav Babić<sup>4</sup>

**APSTRAKT:** Cilj ovog rada je da ispita da li i na koji način uvođenje merenja potrošnje vode domaćinstava utiče na specifičnu potrošnju vode stanovništva u domaćinstvima. Analiza je sprovedena na obimnom fondu podataka o potrošnji vode za piće u različitim delovima Engleske. U radu su prikazani rezultati linearne regresione analize podataka o potrošnji vode stanovništva u Engleskoj u periodu 1999-2016 godine, za šest vodovodskih kompanija. Sprovedene analize su pokazale da sa povećanjem udela potrošača kojima se meri potrošnja vode dolazi do smanjenja specifične potrošnje vode. Prosečno smanjenje specifične potrošnje vode u posmatranom periodu, za sve razmatrane kompanije, iznosilo je 20,2 L/st.dan. Primena regresione analize bila je izuzetno uspešna za podatke o potrošnji Kompanija 2, 5 i 6, dok su najmanje dobra slaganja dobijena za podatke za Kompaniju 3. Zaključeno je da najveći uticaj na promenu specifične potrošnje vode tokom vremena imaju početna vrednost specifične potrošnje i početni udeo potrošača kojima se meri potrošnja, dok su potrebna dalja ispitivanja da bi se utvrdio uticaj drugih faktora.

**Ključne reči:** snabdevanje vodom za piće, specifična potrošnja vode, merenje potrošnje, linearna regresija, koeficijent determinacije

## **Impact analysis of water metering on average household water consumption**

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to examine whether and how the introduction of water metering influences household specific drinking water consumption. The analysis was carried out on a comprehensive set of data on drinking water consumption in various parts of England. The results of the linear regression analysis of data on the household water consumption for the total of six water companies in England in the period 1999-2016 are presented. Linear regression analyzes showed that with the increase in the share of consumers whose consumption is measured, there is a decrease in specific water consumption. The average decrease in the specific water consumption in the observed period was 20.2 L/cap.day for all companies under consideration. The application of the regression analysis was very successful for Companies 2, 5 and 6, while less good results were obtained for Company 3 data. It was concluded that the greatest impact on the change of specific water consumption over time has the initial value of specific consumption and the initial share of measured consumers, while further analyses is needed to determine the impact of other factors.

**Keywords:** drinking water supply, specific water consumption, water metering, linear regression, coefficient of determination

---

<sup>1</sup> student master studija, Ognjen Govedarica, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, ognjengovedarica@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. dr Dragan Savić, dipl.građ.inž., Univerzitet u Egziteru, Ujedinjeno Kraljevstvo, D.Savic@exeter.ac.uk

<sup>3</sup> Doc. dr Aleksandar Đukić, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, djukic@grf.bg.ac.rs

<sup>4</sup> Doc. dr Branislav Babić, dipl.građ.inž., Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, babic@grf.bg.ac.rs

## 1 Uvod

Svet se u poslednjih nekoliko decenija suočava sa problemom nedostatka i zagađenja voda, koji je posledica razvoja tehnologije, demografskog rasta, urbanizacije, zagađenja životne sredine, itd. Ranije analize ukazuju da su potrebe za vodom progresivno rasle sa razvojem društva (Đorđević, 1990). U okviru ukupnih potreba za vodom društva, posebno mesto zauzimaju potrebe za snabdevanjem vodom za piće domaćinstava. Zadovoljenje ljudskih potreba za vodom za piće, kako u pogledu količina tako i u pogledu kvaliteta, imaju presudan značaj na opstanak i razvoj ljudskih zajednica, i zbog toga se prilikom planiranja i realizacije vodoprivrednih sistema ovim potrebama daje apsolutni prioritet.

Za potrebe lakšeg praćenja i poređenja podataka o potrošnji vode za piće stanovništva (u domaćinstvima), u praksi se potrošnja često iskazuje kao količnik ukupne zapremine vode za piće utrošene u domaćinstvima u razmatranoj oblasti vodosnabdevanja tokom godinu dana podeljena sa ukupnim brojem stanovnika u istoj razmatranoj oblasti, i iskazuje se u jedinicama L/st.dan ili L/dom.dan. Vrednosti specifične potrošnje vode mogu varirati u širokim granicama, i zavise od niza faktora (Milojević, 2003). Sredinom i većim delom druge polovine XX veka beležen je rast specifične potrošnje vode u domaćinstvima, ali u poslednjim decenijama XX veka dolazi, najpre u razvijenim zemljama, do stagnacije i blagog opadanja specifične potrošnje vode za piće. Razloga za ovo ima više i oni uključuju smanjenje raspoloživih količina čiste vode, ekonomske faktore, efikasnije korišćenje vode zbog primene uređaja koji troše manje vode, izmena navika potrošača, povećanje svesti potrošača o potrebi uštede vode, i dr.

Cilj ovog rada je da ispita da li i na koji način uvođenje merenja potrošnje vode domaćinstava utiče na specifičnu potrošnju vode za piće. Pretpostavka je da svest potrošača da se njegova potrošnja vode meri utiče na njegove navike kroz pozitivne ekonomske efekte uštede vode. Pored ovoga, mogući značajan uticaj ima i odnos stanovništva prema zaštiti životne sredine, odnosno svest o pozitivnim efektima smanjenja zahvatanja vode, smanjenja potrošnje energije za pumpanje, za preradu vode i naročito za zagrevanje te vode u domaćinstvima. Analiza je sprovedena na obimnom fondu podataka o potrošnji vode u različitim delovima Engleske. Potrošnja vode stanovništva u Engleskoj je analizirana iz dva razloga. Prvi je što postoji obiman fond kvalitetnih podataka o potrošnji vode u proteklom periodu. Drugi, još i važniji razlog je taj što, za razliku od centralne i zapadne Evrope, gde je merenje potrošnje vode u domaćinstvima praktično obaveza, u Engleskoj još uvek postoji značajan broj domaćinstava čija se potrošnja vode za piće ne meri, već se procenjuje od strane vodovodne kompanije korišćenjem različitih podataka i metodologija.

U ovom redu su prikazani rezultati regresione analize podataka o potrošnji vode stanovništva u Engleskoj u periodu 1999-2016 godine, i njihovom poređenju za šest vodovodnih kompanija.

### 1.1 Vodosnabdevanje u Engleskoj

U Engleskoj specifična potrošnja vode stanovnika u domaćinstvima je od 1930. godine rasla za oko 1% godišnje, i danas ona prosečno iznosi ispod 150 L/st.dan (Waterwise, 2012). Međutim vrednost specifične potrošnje vode nije ista u svim delovima Engleske. U 2008. godini vrednosti specifične potrošnje su se kretale u opsegu od 107 do 176 L/st.dan (Environment Agency, 2009). Najveću specifičnu potrošnju vode ima stanovništvo na jugozapadu i istoku zemlje, koji su ujedno i najsiromašniji vodom (Environment Agency, 2008). Imajući u vidu sve prethodno navedeno, Vlada Ujedinjenog Kraljevstva je kao cilj zadala da se do 2030. godine prosečna specifična potrošnja vode za piće smanji na 130 L/st.dan, a ukoliko je moguće, čak i na 120 L/st.dan (DEFRA, 2008).

Može se postaviti pitanje: „Šta i u kolikoj meri može da utiče na smanjenje specifične potrošnje vode?“. Ako se zna podatak da u 2008 godini procenat stanovnika Engleske čija se potrošnja meri iznosi u proseku nešto manje od jedne trećine stanovništva i ako se zna da se potrošnja vode još od sedamdesetih godina prošlog veka u najvećoj meri naplaćuje prema vrednosti imovine, lako se može zaključiti da u proseku nešto manje od 70% stanovništva ne plaća vodu koju zaista potroši (DEFRA, 2008). Ovde treba voditi računa da se radi o prosečnim vrednostima i da procenat stanovnika kojima

se meri potrošnja vode dosta varira unutar Engleske: 2009 godine u opsegu od 10 do 60% (Waker, 2009), dok je danas taj procenat veći tako da neke kompanije mere potrošnju i do 95% domaćinstava.

Postoji preporuka da udeo potrošača (domaćinstava) u Engleskoj kojima se meri potrošnja vode za piće treba da dosegne vrednost od 80% do 2020. godine kako bi se precizno utvrdila promena potrošnje vode usled klimatskih promena i rasta stanovništva (Walker, 2009). Prosečan račun za vodu za piće stanovnika kojima se meri potrošnja je u fiskalnoj 2009/10 godini iznosio £312, a prosečan račun stanovnika kod kojih se ne meri potrošnja vode je iznosio £367 (Waker, 2009). Drugim rečima stanovnici čija se potrošnja vode ne meri su u proseku godišnje plaćali £55 više od stanovnika kojima je merena potrošnja vode, odnosno skoro 18% više. Može se zaključiti da ušteda u potrošnji vode samo zbog cene (koja je relativno niska) neće značajno promeniti uticaj na budžet domaćinstva, ali druge posledice smanjenja potrošnje mogu biti veoma značajne, kako finansijski tako i za životnu sredinu.

Već su ranije studije (Smith i Rogers, 1990) ukazivale da potrošači vode računaju o načinu korišćenja vode kada se njihova potrošnja meri. Dosadašnje procene ukazuju na to da stanovništvo kome se meri potrošnja vode troši oko 10-15% manje vode od stanovništva kome se potrošnja ne meri (Environment Agency, 2009). Merenje potrošnje vode kod potrošača takođe pomaže da se identifikuju gubici usled curenja vode (DEFRA, 2008). Zbog toga je merenje potrošnje vode kao mera za smanjenje specifične potrošnje razmatrana u nekoliko radova (Ornaghi i Tonin, 2015; Smith i Rogers, 1990; Gadbury i Hall, 1989; Staton, 2010; Georgy, 2009 itd.). Važno je istaći da merenje potrošnje vode za piće može imati i druge ciljeve osim smanjenja potrošnje, kao na primer poboljšanje znanja o distributivnim sistemima vodovoda (Staton, 2010). Analize podataka o potrošnji vode omogućavaju vodovodnim kompanijama kvalitetnije informacije na osnovu kojih će moći bolje da prognoziraju prihode i planiraju troškove koji će odgovarati stanju na terenu (Gadbury i Hall, 1989). Sve navedeno ukazuje da povećanje udela potrošača kojima se meri potrošnja vode za piće doprinosi postizanju pozitivnih ciljeva u zaštiti životne sredine i socijalnoj ravnopravnosti (Staton, 2010).

Do sada se javljao problem nedostatka dovoljnog broja kvalitetnih podataka kojima bi se opravdala pretpostavka da potrošači čija se potrošnja meri koriste manje vode (Walker, 2009). Ovaj problem su naveli u svom radu i Ornaghi i Tonin (2015). U okviru ovog rada prikupljen je i analiziran veliki fond podataka o potrošnji vode u Engleskoj za duži niz godina, što je omogućilo po prvi put sprovođenje kompleksnih analiza u cilju ocene uticaja pojedinih analiziranih faktora na specifičnu potrošnju vode za piće u domaćinstvima u Engleskoj.

## 2 Metodologija

### 2.1 Podaci o potrošnji vode

Sva vodovodna preduzeća u Ujedinjenom Kraljevstvu privatizovana su 1989. godine. U Ujedinjenom Kraljevstvu danas posluje 30 kompanija koje se bave vodosnabdevanjem, od toga u Engleskoj posluje 26 kompanija. Svaka kompanija vodom snabdeva jedno područje Engleske, i na tom području joj je dat monopol (Lobina i Hall, 2001).

Pribavljen je obiman fond podataka o merenoj i nemerenoj potrošnji vode stanovništva, kao i broj stanovnika kojima se meri i kojima se ne meri potrošnja vode, za period od 1999. do 2016. godine za šest vodovodnih kompanija. Podaci su kompletni, odnosno sadrže neprekidne nizove podataka za celi razmatrani period od 17 godina.

U ovom radu nije razmatrana veza između specifične potrošnje vode potrošača kojima se meri potrošnja (tzv. «mereni potrošači») i broja merenih potrošača, kao ni veza između specifične potrošnje vode potrošača kojima se ne meri potrošnja (tzv. «nemereni potrošači») i broja nemeranih potrošača. Ovo je urađeno jer nam nije cilj da ispitamo kako povećanje ili smanjenje broja korisnika koji mere potrošnju utiče na specifičnu potrošnju merenih odnosno nemeranih potrošača, već nas zanima kako utiče na ukupnu specifičnu potrošnju vode. Drugim rečima, razmatraće se veza između ukupne specifične potrošnje i broja merenih odnosno nemeranih potrošača.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na osnovu dobijenih podataka uvedena je pretpostavka da se razmatrana funkcionalna zavisnost može odrediti pomoću linearne regresione analize. Regresiona analiza biće sprovedena za svih šest kompanija, i to za dva slučaja:

- ukupna specifična potrošnja u odnosu na udeo merenih potrošača
- ukupna specifična potrošnja u odnosu na udeo nemeranih potrošača

Analizirani podaci, rezultati regresionih analiza, zajedno sa diskusijom rezultata, su dati u poglavlju 3 ovog rada.

## 2.2 Linearna regresiona analiza

Regresija predstavlja postupak određivanja funkcionalne veze između dve ili više promenljivih. Linearna regresiona analiza predstavlja najjednostavniji slučaj regresije (Mrekle, 2010). Ona pretpostavlja linearnu vezu između promenljivih (Kottegoda i Rosso, 2008), gde je zavisnost oblika:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

gde je:  $Y$  zavisna promenljiva,  $X$  nezavisna promenljiva,  $\beta_0$  i  $\beta_1$  regresioni koeficijenti ( $\beta_0$  predstavlja odsečak na ordinatnoj osi, a  $\beta_1$  nagib regresione prave),  $\varepsilon$  slučajna greška.

Koeficijenti regresione prave određeni su metodom najmanjih kvadrata, koja predstavlja najčešće korišćen metod u ovakvim slučajevima (Kottegoda i Rosso, 2008).

Kao ocenu kvaliteta linearne veze koristićemo koeficijent determinacije -  $R^2$ . Koeficijent determinacije predstavlja relativnu meru koja pokazuje odnos objašnjene varijanse i ukupne varijanse (James i ostali, 2013), odnosno koliko je varijansa objašnjena linearnom regresijom.  $R^2$  se može predstaviti kao:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

gde je  $RSS$  rezidualna (neobjašnjena) suma kvadrata, a  $TSS$  ukupna suma kvadrata.  $TSS$  je jednaka zbiru regresione (objašnjene) sume i rezidualne (neobjašnjene) sume (James i ostali, 2013).

Kod linearne regresije može se pokazati da je koeficijent determinacije jednak kvadratu koeficijenta korelacije (James i ostali, 2013). Vrednost  $R^2$  kreće se u opsegu od 0 do 1. Ako je vrednost  $R^2$  jednaka 0 onda ne postoji linearna veza između razmatranih promenljivih, a ako je jednaka 1 postoji linearna veza, tj. sve tačke leže na regresionoj pravoj.

Vrednost  $R^2$  koja bi se mogla smatrati prihvatljivom kao ocena linearne regresije, zavisi pre svega od oblasti u kojoj se primenjuje. U biologiji, psihologiji i sličnim oblastima, gde se problemi u analizi podataka najčešće javljaju usled grubih aproksimacija veza između promenljivih koje se razmatraju, ili usled složenih odnosa između samih promenljivih, prihvatljive su manje vrednosti  $R^2$ . Ali u oblastima kao što su fizika, hemija i druge naučne oblasti, koje zahtevaju jasnije poznavanje veze između promenljivih za posmatrani problem, usled same prirode tih problema, zahteva veća vrednost  $R^2$  (James i ostali, 2013).

Kako na specifičnu potrošnju vode, pored merenja, utiče i niz faktora koji se javljaju u problemima za koje je moguće utvrditi samo grubu regresionu zavisnost (cena vode, ponašanje društva prema vodi kao prirodnom resursu, itd.), kao i faktori za koje je moguće utvrditi precizniju regresionu vezu između promenljivih (nedostaci vodometra, nedostaci cevni materijala, prirodni uslovi, itd.) prihvatice se kao zadovoljavajuća vrednost  $R^2$  koja je veća od 0,5.

## 3 Rezultati diskusija

Na narednim slikama od 3.1 do 3.6. prikazani su podaci o ukupnoj specifičnoj potrošnji vode stanovništva, u razmatranom periodu od 17 godina, u zavisnosti od udela nemeranih i merenih potrošača, za razmatranih šest vodovodskih kompanija u Engleskoj.



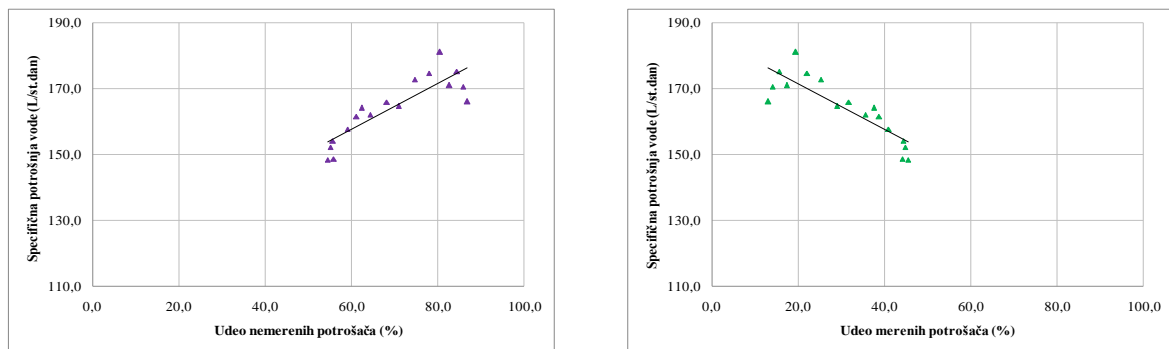
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

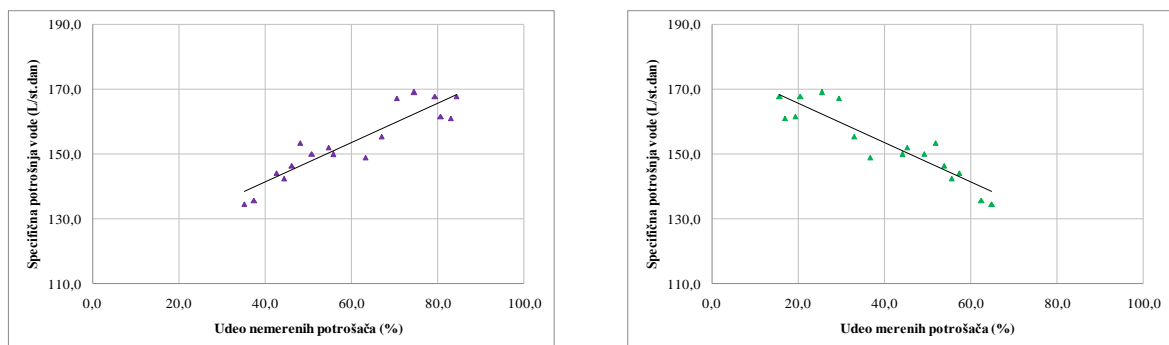
Pored originalnih podataka o specifičnoj potrošnji i broju potrošača za svaku godinu, na dijagramima su prikazane i regresione prave dobijene metodom najmanjih kvadrata. U cilju lakšeg vizuelnog poređenja dobijenih rezultata po kompanijama, svaki dijagram je urađen sa istom skalom na apscisi i ordinati.

Specifična potrošnja vode se u razmatranom periodu kretala u opsegu 110-190 L/st.dan. Udeo merenih potrošača u razmatranom periodu nalazi se u opsegu od samo nekoliko % do 90%, a udeo nemeranih potrošača ide od 10% do blizu 100%.

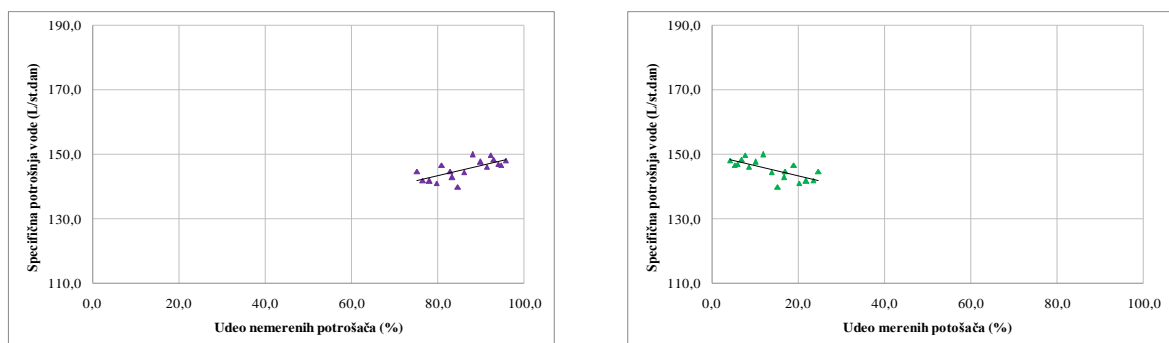
Iz priloženih podataka možemo zaključiti da nisu sve vodovodne kompanije imale isti udeo merenih potrošača na početku razmatranog perioda, jer se udeo merenih potrošača od ukupnog broja potrošača kretao od 4% do 16%.



Slika 3.1 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 1)



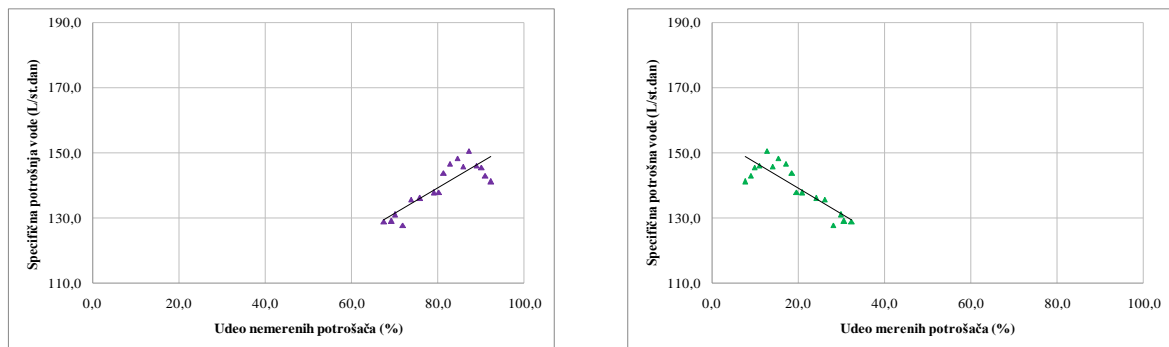
Slika 3.2 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 2)



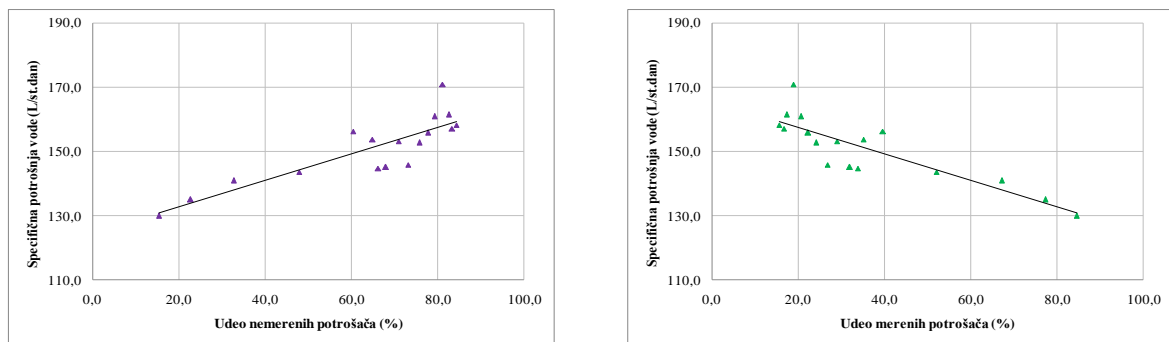
Slika 3.3 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 3)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

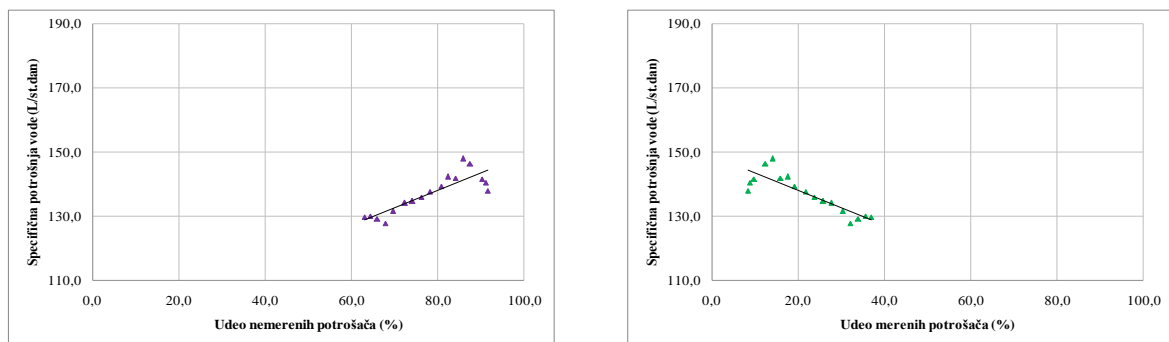
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 3.4 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 4)



Slika 3.5 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 5)



Slika 3.6 Promena specifične potrošnje vode u odnosu na udeo nemeranih (levo) i merenih (desno) potrošača (Kompanija 6)

Na prethodno prikazanim dijagramima možemo da uočimo da za svaku razmatranu vodovodnu kompaniju postoji trend da se specifična potrošnja vode povećava sa povećanjem udela nemeranih potrošača (Slika 3.1-Slika 3.6 levo), odnosno da se smanjuje sa povećanjem udela merenih potrošača (Slika 3.1-Slika 3.6 desno).

Može se zapaziti da postoji rasipanje podataka u odnosu na pretpostavljenu zavisnost u prvih nekoliko godina razmatranog perioda kod određenog broja kompanija, dok u kasnijim godinama podaci dosta dobro prate pretpostavljenu zavisnost (Slika 3.2; Slika 3.4; Slika 3.5 i Slika 3.6). Takođe se može zapaziti da postoje i kompanije kod kojih postoji rasipanje podataka i u kasnijim godinama, na primerna Slici 3.1 i Slici 3.3.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na slikama su zajedno sa originalnim podacima prikazane i regresione prave. Izračunata je vrednost koeficijenta  $R^2$  za sve analizirane slučajeve i kod pet kompanija vrednost  $R^2$  je veća od 0,7, što ukazuje da dobijene linearne zavisnosti dobro opisuju zavisnost specifične potrošnje vode od uдела potrošača (merenih i nemeranih), dok se kod samo jedne kompanije dobija vrednost  $R^2$  manja od 0,5.

U Tabeli 3.1 prikazane su vrednosti  $R^2$  za sve vodovodne kompanije. Ove vrednosti su dobijene analizom svih podataka uključujući i podatke koje izlaze iz opsega poverenja 95%. Vrednost  $R^2$  za merene i za nemerane potrošače je jednaka.

Analizom je utvrđeno da su kod najvećeg broja kompanija podaci o specifičnoj potrošnji vode u razmatranom periodu u okviru intervala poverenja od 95%. Takođe analiza pokazuje da postoje kompanije kod kojih se javljaju tačke koje izlaze iz ovog intervala poverenja.

Pojava tačaka koje se nalaze izvan ovog opsega poverenja utiče na valjanost regresione analize, kao i na vrednost  $R^2$ . Kod svih kompanija kod kojih se javljaju ove tačke urađena su dodatna ispitivanja kako bi se utvrdilo koliko je povećanje, odnosno smanjenje  $R^2$  kada se one isključe iz razmatranja. Promena regresione prave i  $R^2$  koja nastaje prilikom eliminisanja tačaka koje izlaze iz intervala poverenja 95% iz dalje analize, biće detaljno analizirana za svaku kompaniju.

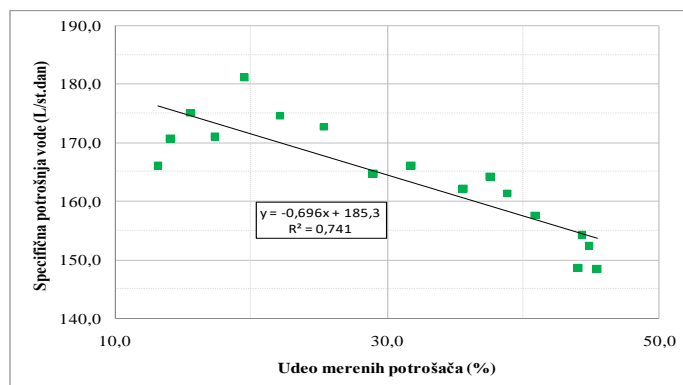
Tabela 3.1 Tabelarni prikaz vrednosti koeficijenta determinacije po vodovodnim kompanijama

Vodovodna kompanija	Koeficijent determinacije $R^2$ (-)
1	0.741
2	0.840
3	0.472
4	0.736
5	0.738
6	0.743

### 3.1.1 Vodovodna Kompanija 1

Velika odstupanja od regresione prave na početku razmatranog perioda mogu se objasniti malim brojem potrošača čija se potrošnja meri, koje je uzrokovalo da kompanija više pažnje posveti potrošačima čija se potrošnja ne meri, zato što su oni u tom trenutku imali znatno veći udeo u profitu.

Obradom podataka su uočeni podaci koji izlaze iz intervala poverenja 95%.  $R^2$  računat sa tim podacima iznosi 0,741, a kada se oni izbacе iz analize dolazi do povećanja  $R^2$  i on tada iznosi 0,830. Vrednosti kako prvobitnog  $R^2$  tako i popravljenog  $R^2$  su zadovoljavajuće visoki.

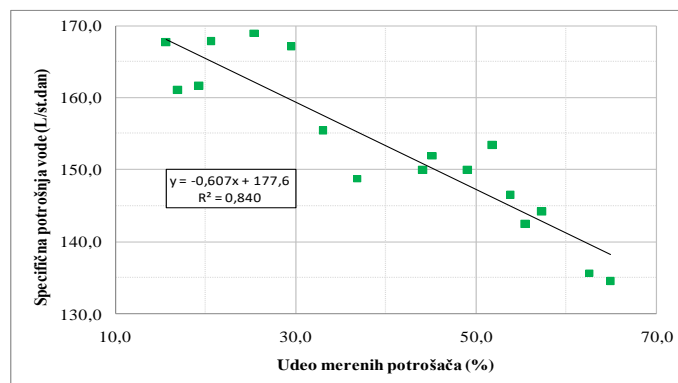


Slika 3.7 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 1)

### 3.1.2 Vodovodna Kompanija 2

Specifična potrošnja vode stanovništva koje snabdeva vodom Kompanija 2 u razmatranom periodu je u intervalu od 135 L/st.dan do skoro 170 L/st.dan, što je nešto manje nego kod prethodne kompanije. Udeo potrošača čija se potrošnja meri se povećao za skoro 50% tokom razmatranog perioda (sa oko 16% na 85%).

Podaci dosta dobro prate regresionu pravu, nema velikih odstupanja što takođe pokazuje i visoka vrednost  $R^2$  od 0,840. Svi podaci se nalaze u okviru intervala poverenja od 95%. Teritorija koju snabdeva ova kompanija nalazi se na jugu Engleske, koji ima problema sa raspoloživim količinama vode. To za posledicu ima visoke cene snabdevanja vodom, što objašnjava značajno povećanje broja merenih potrošača, kao i potrebu kompanije da kontroliše potrebe za vodom i smanji gubitke vode.

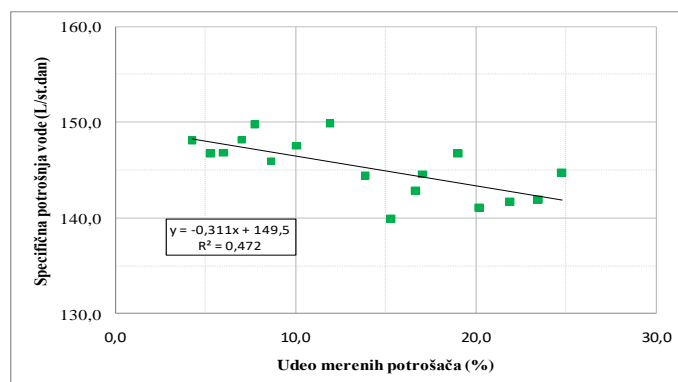


Slika 3.8 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 2)

### 3.1.3 Vodovodna Kompanija 3

Kod ove kompanije specifična potrošnja vode potrošača u razmatranom period se kretala u uskom opsegu od 140 L/st.dan do 150 L/st.dan, tako da je dobijen mali nagib regresione prave. Takođe u ovom slučaju imamo i značajno rasipanje podataka oko regresione prave što potvrđuje i relativno niska vrednost  $R^2$  od 0,472. Postoji određeni broj podataka koji izlaze iz opsega poverenja 95%. Isključenjem ovih podataka iz regresione analize vrednost  $R^2$  se povećava na prihvatljivu vrednost 0,553.

Kod Kompanije 3 registrovan je skroman priraštaj udela merenih potrošača od oko 20% tokom razmatranog perioda. Udeo potrošača čija se potrošnja meri na kraju razmatranog perioda je samo 24,8%, što je znatno ispod državnog proseka od 30%.



Slika 3.9 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 3)

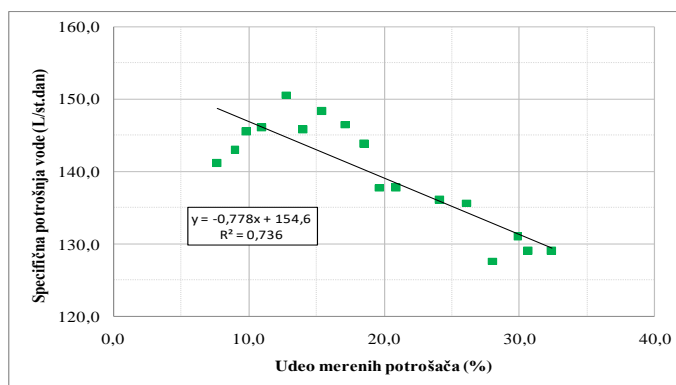
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Iz svih iznetih podataka može se izvesti zaključak da sprovedena regresiona analiza za ovu kompaniju daje ipak samo grubu ocenu smanjenja specifične potrošnje vode sa povećanjem udela merenih potrošača.

### 3.1.4 Vodovodna kompanija 4

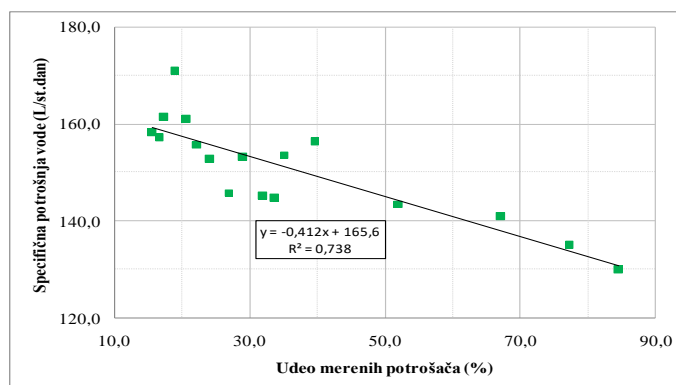
Povećanje udela merenih potrošača koje snabdeva vodom Kompanija 4 je u razmatranom periodu oko 25%, tako da je udeo merenih potrošača na kraju razmatranog perioda iznosio 32,5%, što je na nivou državnog proseka. Ovako mala zastupljenost merenja se može objasniti time da se specifična potrošnja vode kretala u opsegu od 120-155 L/st.dan, što ne predstavlja veliku specifičnu potrošnju. Drugim rečima potrošači koje snabdeva ova kompanija, nezavisno od toga da li mere ili ne mere svoju potrošnju uglavnom racionalno koriste vodu. Kao i kod većine kompanija i ovde imamo veće rasipanje podataka na početku razmatranog perioda, koje se smanjuje povećanjem udela merenih potrošača.  $R^2$  ima zadovoljavajuću vrednost 0,736.



Slika 3.10 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 4)

### 3.1.5 Vodovodna kompanija 5

Specifična potrošnja vode stanovništva koje snabdeva vodom Kompanija 5 u razmatranom periodu je u intervalu od 130 L/st.dan do preko 170 L/st.dan. Udeo potrošača čija se potrošnja meri se znatno povećao, sa početnih 15% na 85% tokom razmatranog perioda. U početnim godinama primetno je rasipanje rezultata, ali pri kraju razmatranog perioda skoro da svi podaci leže na regresionoj pravoj.



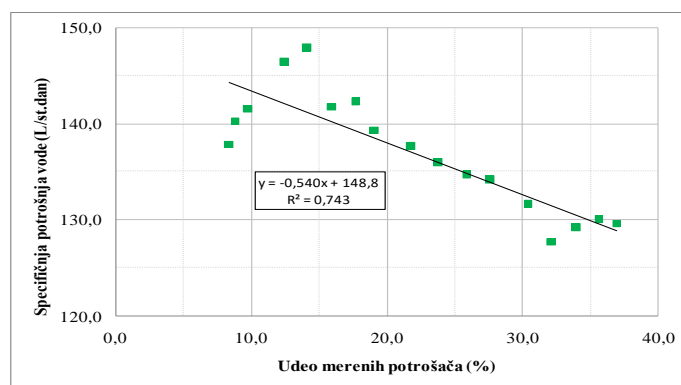
Slika 3.11 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 5)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Međutim postoji deo podataka koji izalze iz intervala poverenja 95%. Vrednost  $R^2$  sa tim podacima iznosi 0,739, a kada se ti podaci isključe iz analize, vrednost  $R^2$  se poveća na 0,795. Pojava podataka koji izlaze iz ovog intervala je delom posledica velikog opsega specifične potrošnje. Ova kompanija se nalazi na jugu Engleske, gde su evidentirani problemi sa raspoloživim količinama vode pogodnih za vodosnabdevanje, pa nije čudno povećanje udela merenih potrošača za čak 70%, kao ni mala vrednost ostvarene specifične potrošnje vode od 130 L/st.dan u poslednjoj godini razmatranog intervala.

## 3.1.6 Vodovodna kompanija 6

Regresiona analiza rađena sa svim podacima za ovu kompaniju, dala je zadovoljavajuću vrednost  $R^2$  od 0,743. Daljom analizom podataka utvrđeno je da se i kod ove kompanije javljaju vrednosti koje izlaze iz opsega poverenja 95%. Kada se ovi podaci izbace, vrednost popravljenog  $R^2$  iznosi 0,859. Veliki skok u vrednosti  $R^2$ , kao i njegovu visoku vrednost možemo da objasnimo činjenicom da većina podataka leži na regresionoj pravoj, pa kada se izbace svi podaci sa velikim odstupanjem dobija se još bolji regresioni model. Udeo merenih potrošača u razmatranom periodu se povećao za oko 30% (sa 8% na 37%), i sada je njegova vrednost malo iznad državnog proseka. Specifična potrošnja vode se kretala u relativno uskim granicama od 120-150 L/st.dan.



Slika 3.12 Dijagram promene specifične potrošnje vode u odnosu na udeo merenih potrošača (Kompanija 6)

## 3.2 Smanjenje specifične potrošnje vode u razmatranom periodu

Iz podataka u Tabeli 3.2 može se zaključiti da se sa povećanjem udela merenih potrošača specifična potrošnja vode u razmatranom periodu, prema rezultatima regresione analize, smanjila u proseku za 20,2 L/st.dan. Najmanje smanjenje specifične potrošnje imamo kod Kompanije 3, kod koje je zapaženo veliko rasipanje podataka i kod koje je udeo merenih potrošača na kraju razmatranog perioda iznosio svega 24,8%.

Takođe se može zapaziti mali priraštaj udela merenih potrošača kod onih kompanija čija je specifična potrošnja vode na početku razmatranog perioda bila manja od 150 L/st.dan (Kompanija 3, Kompanija 4 i Kompanija 6), što može ukazati na to da kompanije nisu našle ekonomski interes za dalja ulaganja u merenje protoka pri ovakvom stanju potrošnje. Imajući u vidu odluku Vlade Ujedinjenog Kraljevstva da se specifična potrošnja u budućnosti smanji na 130 L/st.dan, kompanije koje su već imale nisku specifičnu potrošnju vode verovatno nisu ulagale u edukaciju i informisanje svojih korisnika o merenju potrošnje vode, već su povećavali broj merenja samo onoliko koliko je bilo potrebno da se približe ciljanoj vrednosti. Očekivano je bilo da će se kod kompanija koje su na početku razmatranog perioda imale mali udeo merenih potrošača, najviše i uvećati taj broj. Međutim to nije bio slučaj kod Kompanije 3, Kompanije 4 i kod Kompanije 6.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U Tabeli 3.3 razmatran je slučaj povećanja udela merenih potrošača na kraju razmatranog perioda u ukupnom broju potrošača za 10%. Takođe je prikazano potencijalno smanjenje specifične potrošnje vode, odnosno suma smanjenja specifične potrošnje vode u razmatranom periodu i smanjenja specifične potrošnje vode usled povećanja udela merenih potrošača za 10%.

Tabela 3.2 Promene udela merenih potrošača i specifične potrošnje vode tokom razmatranog perioda

Vodovodna kompanija	Udeo merenih potrošača na početku razmatranog perioda (%)	Specifična potrošnja vode na početku razmatranog perioda (L/st.dan)	Udeo merenih potrošača na kraju razmatranog perioda (%)	Specifična potrošnja vode na kraju razmatranog perioda (L/st.dan)	Smanjenje specifične potrošnje u razmatranom periodu (L/st.dan)
1	13,1	165,96	44,8	152,21	22,1
2	15,7	167,65	64,9	134,44	29,9
3	4,3	148,02	24,8	144,67	6,4
4	7,7	141,05	32,5	128,89	19,3
5	15,7	158,18	84,6	129,85	28,5
6	8,4	137,84	36,9	129,62	15,4

Tabela 3.3 Procenjeno smanjenje specifične potrošnje vode ako bi se udeo merenih potrošača uvećao za 10%

Vodovodna kompanija	Udeo merenih potrošača u ukupnom broju potrošača uvećan za 10% (%)	Potencijalno smanjenje specifične potrošnje (L/st.dan)
1	54,8	29,0
2	74,9	35,9
3	34,8	9,5
4	42,5	27,1
5	94,6	32,6
6	46,9	20,8

Uzimajući u obzir sve podatke i informacije, verovatno se ne može očekivati da kompanije kod kojih je specifična potrošnja vode stanovništva na kraju razmatranog perioda bila bliska ciljanoj vrednosti od 130 L/st.dan (kao što su razmatrane Kompanije 4, 5 i 6), značajnije povećaju udeo stanovništva (domaćinstava) kojima mere potrošnju vode, jer su te kompanije već ostvarile cilj koji je postavila Vlada Ujedinjenog Kraljevstva.

Značajno povećanje udela merenih potrošača ne može se očekivati kod kompanije kao što je Kompanija 5, kod koje je udeo merenih potrošača već dostigao visoku vrednost od preko 80%. Dodatno povećanje broja merenih potrošača može se očekivati kod kompanija kao što je Kompanija 1, Kompanija 2 i Kompanija 3.

Kod Kompanije 1 može se očekivati značajno povećanje udela merenih potrošača zato što ta kompanija nije smanjila specifičnu potrošnju vode do zahtevane vrednosti (ona je i dalje preko 150L/st.dan). Povećanje udela merenih potrošača u ovoj kompaniji u razmatranom periodu se pokazalo kao efikasna mera za smanjenje potrošnje vode. S obzirom na to da je udeo merenih potrošača na kraju razmatranog perioda bio samo 44,8%, može se očekivati da bi dalje povećanje udela merenih potrošača moglo dovesti do značajnijeg smanjenja specifične potrošnje vode stanovništva.

Kompanija 2 ima vrednost specifične potrošnje stanovništva na kraju razmatranog perioda nešto veću od 130 L/st.dan, te je moguće očekivati dodatno povećanje broja merenih potrošača. Povećanjem udela merenih potrošača u ovoj kompaniji zasigurno bi se smanjila specifična potrošnja vode, a udeo merenih potrošača bi prevazišao dve trećine od ukupnog broja stanovnika u tom delu države, odnosno približio bi se preporučenoj vrednosti od 80% (Walker, 2008).

Povećanje broja merenih potrošača u Kompaniji 3 je neophodano zato što je njihov udeo na kraju razmatranog perioda bio manji od jedne trećine stanovnika koji žive na teritoriji koju snabdeva ta kompanija. Povećanjem merenih potrošača ova kompanija bi imala bolji uvid u stvarne količine potrošene vode.

## 4 Zaključak

Sprovedene analize su pokazale da sa povećanjem broja potrošača kod kojih se meri potrošnja vode dolazi do smanjenja specifične potrošnje vode. Do sličnog zaključka se došlo i u drugim radovima (Ornaghi i Tonin, 2015; Smith i Rogers, 1990; itd.), ali je u ovom radu korišćen veći broj podataka dobijenih merenjem u dužem vremenskom periodu, i za različite vodovodne kompanije, odnosno uslove potrošnje vode. Zbog toga je neophodno istaći da različite kompanije imaju različite načine proračuna bilansa voda, što može uzrokovati da gubici vode pokvare sliku o stvarnoj potrošnji.

Prosečno smanjenje specifične potrošnje vode u posmatranom periodu, za sve razmatrane kompanije, prema rezultatima regresione analize iznosilo je 20,2 L/st.dan. Primena regresione analize bila je izuzetno uspešna za podatke o potrošnji vode u Kompanijama 2, 5 i 6, dok su najmanje dobra slaganja dobijena za podatke za Kompaniju 3.

Može se zaključiti da dinamika smanjenja specifične potrošnje vode, kao i dinamika povećanja udela merenih potrošača, zavise od:

- Prosečne vrednosti specifične potrošnje vode - ukoliko je veća specifična potrošnja vode, priraštaj smanjenja specifične potrošnje biće veći sa prirastom udela merenih potrošača. Međutim ako su potrošači koje snabdeva vodom kompanija već dostigli niske vrednosti specifične potrošnje sa relativno malim udelom merenih potrošača, nije realistično očekivati značajnije smanjenje specifične potrošnje u budućnosti, a verovatno ni značajnije povećanje udela merenih potrošača.
- Područja zemlje koju vodom snabdeva kompanija – ukoliko se vodovodna kompanija nalazi na jugu ili jugoistoku zemlje, oblastima koje su siromašnije vodom i imaju veće prosečne temperature u toku godine, očekivano je da će te kompanije podsticati korisnike da štede vodu.
- Načina poslovanja kompanije – ne treba zaboraviti da su kompanije koje se bave vodosnabdevanjem u Engleskoj monopolističke. Zbog toga cena vode nije funkcija ponude i potražnje, jer nema takmičenja između kompanija, već ona varira od kompanije do kompanije i kod nekih kompanije može imati pozitivan uticaj na dinamiku smanjenja potrošnje vode.

U sprovedenim analizama nisu uzeti u obzir klimatološki uslovi u područjima koje snabdevaju vodovodne kompanije koji mogu uticati na promene potrošnje od godine do godine (na primer u nekim godinama su leta znatno toplija od prosečnih što za posledicu može da ima porast potrošnje vode u tom periodu). U ovom radu takođe nije analiziran uticaj jedinične cene vode na potrošnju. Za potrebe određivanja uticaja ovih i drugih faktora na promenu potrošnje vode potrebno je sprovesti dodatne analize.

## Literatura

1. DEFRA. (2008). FutureWater – The Government's water strategy for England. London: DEFRA, str 19-24 i 76-80
2. Đorđević, B. (1990). Vodoprivredni sistemi. Beograd: Naučna knjiga, str 5-21.
3. Environment Agency. (2008). Water resources in England and Wales – current state and future pressures. Bristol: Environment Agency.
4. Environment Agency. (2009). Water for people and the environment – Water Resources Strategy for England and Wales. Bristol: Environment Agency. str 1-29



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

5. Gadbury, D. Hall, M.J. (1989). Metering Trials for Water Supply. *Water and Environmental Journal*, str 182-187.
6. Georgy, R. (2009). Metering Secondary Water in Residential Irrigation Systems. *All Graduate Theses and Dissertations*.
7. James, G. Witten, D. Hastie, T. Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning – with Applications in R*. New York: Springer. str 61-71.
8. Kottegoda, N. Rosso, R. (2008). *Applied Statistic for Civil and Environmental Engineers*. 2nd ed.. Milano:Blackwell Publishing Ltd. str. 327-342
9. Lobina, E. Hall, D. (2001). *UK Water privatization – briefing*. London: PSIRU.
10. Merkle, M. (2010). Verovatnoća i statistika za inženjere i student tehnike. Beograd: Akademska misao. str 246-250.
11. Milojević M. (2003). *Snabdevanje vodom i kanalisanje naselja (šesto izdanje)*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd
12. Ornaghi, C. Tonin, M. (2015). *The Effect of Metering on Water Consumption – Policy Note*. Southampton: University of Southampton.
13. Smith, A. L. Roger, D.V. (1990). *Isle if Wight Water Metering Trial*. *Water and Environmental Journal*. str 403-407
14. Staddon, C. (2010). *Do Water Meters Reduce Domestic Consumption?: a summary of available literature*. Bristol: University of the West of England.
15. Waker, A. (2009). *The Independent Review of Charging for Household Water and Sewerage Services – Final Report*. London: DEFRA, str 1-50 i 187-226.
16. Waterwise. (2012). *Water – The Facts, Why do we need to think about water?.* London: Wastewise.

## **U susret 60. godišnjici regionalne saradnje eksperata podunavskih zemalja u oblasti hidrologije u okviru programa IHP UNESCO**

Stevan Prohaska<sup>1</sup>

APSTRAKT: Regionalna saradnja eksperata podunavskih zemalja u oblasti hidrologije započeta je 1961. godine na inicijativu najistaknutijih naučnika-hidrologa u to doba u regionu dunavskog sliva. Dogovoreno je tada da se saradnja eksperata podunavskih zemalja odvija u dva pravca, preko zajedničke organizacije regionalnih konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama, i izrade regionalnih hidroloških monografija i tematskih projekata za sliv Dunava. Konferencije podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama imaju do sada bogatu i uspešnu tradiciju. Do sada je održano ukupno 27 konferencija. U periodu 1965–1974 završene su nacionalne monografije Hidrološki bilans Dunava, rađene po istoj metodologiji u osam podunavskih zemalja. Nakon toga za ceo dunavski sliv urađene su Hidrološka monografija Dunav i njegov sliv, i Hidrologija reke Dunav (Hydrology of the Danube River). U radu će biti dat prikaz svih do sada održanih Konferencija, kao i urađenih i započetih projekata, sa osnovnim podacima o vremenu i mestu održavanja, glavnom organizatoru i realizatoru, o nazivu projekata i sl.

Ključne reči: Međunarodni hidrološki program, Dunav, podunavske zemlje, konferencije, monografija

## **Towards 60th anniversary of regional expert cooperation in Danubean countries in the field of hydrology within Unesco IHP programme**

ABSTRACT: Regional cooperation of the experts from the Danubean countries in the field of hydrology has started in 1961, following the initiative of the most prominent hydrologic scientists of the time in the Danube River basin. It was agreed then that the cooperation should be driven in two directions: through joint organization of regional conferences of Danubean countries on hydrological forecasting, and through publication of hydrological monographs and thematic projects for the Danube basin. The conferences of the Danubean countries on hydrological forecasting have rich and successful tradition, with total of 27 conferences held so far. National monographs on the Danube water balance were prepared in eight Danubean countries following the same methodology and were completed between 1965 and 1974. Later, two important publications were prepared: the Hydrological Monograph of the Danube River Basin, and the Hydrology of the Danube River. The paper presents the conferences held in the past, and the completed and ongoing projects, including data on conference venues, dates and organizers, as well as on the projects.

Keywords: International Hydrological Programme, Danube, Danubean countries, conferences, monograph

---

<sup>1</sup> Prof. dr. Stevan Prohaska, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, [stevan.prohaska@icerni.rs](mailto:stevan.prohaska@icerni.rs)

## 1 Uvodne napomene

Regionalna saradnja eksperata podunavskih zemalja u oblasti hidrologije započeta je 1961. godine na inicijativu najistaknutijih naučnika-hidrologa u to doba u regionu dunavskog sliva – Dimitreskua, Kaczmareka, Kalinina i Lasylofyy-a. Ideja je bila da se premosti jaz između dva politička bloka u to vreme (Zapadni – NATO i Istočni – Varšavski pakt), koji su osam podunavskih zemalja, koje su tada delile sliv Dunava, držali praktično odvojene „gvozdenom zavesom“. Dogovoreno je tada da se saradnja eksperata podunavskih zemalja odvija u dva pravca, preko zajedničke organizacije:

- Regionalnih konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama
- Izrade regionalnih hidroloških monografija i tematskih projekata za sliv Dunava

Konferencije podunavskih zemalja po hidrološkim prognozama imaju do sada bogatu i uspešnu tradiciju kao glavno okupljanje za razmenu iskustava i sinteze znanja iz hidrologije dunavskog sliva. U početku naziv konferencije je bio „Konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama“, da bi kasnije, raspadom istočnog bloka i sa naglim povećanjem broja podunavskih zemalja ovoj konferenciji bio promenjen naziv u „Konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama i hidrološkim osnovama u vodoprivredi“. Do sada je održano ukupno 27 konferencija, a Jugoslavija, odnosno Srbija, su do sada bile organizatori tri konferencije.

S ciljem racionalnog korišćenja vodnog potencijala Dunava i odbrane od velikih voda, Komiteti za MHD su 1970. godine pokrenuli inicijativu da se pristupi izradi Hidrološke monografije sliva Dunava. Ova inicijativa je bila u skladu sa jednim od osnovnih ciljeva Međunarodne hidrološke decenije MHD UNESCO-a (1965–1974) da se u slivovima međunarodnih reka podstakne regionalna saradnja u domenu hidrologije. U tom periodu završene su nacionalne monografije „*Hidrološki bilans Dunava*“, rađene po istoj metodologiji u osam podunavskih zemalja. Koordinatori čitavog posla bili su Institut VUVH iz Bratislave, koji je koordinirao rad grupe eksperata iz Čehoslovačke, Mađarske, Bugarske i SSSR-a i Tehnički sekretarijat (NK za IHP SFRJ) iz Beograda, koji je koordinirao rad grupe eksperata iz Nemačke, Austrije, Jugoslavije i Rumunije. Nakon toga za ceo dunavski sliv urađene su:

1. Hidrološka monografija *Dunav i njegov sliv* na nemačkom (Minhen, 1986) i ruskom jeziku (Kijev, 1988).
2. *Hidrologija reke Dunav (Hydrology of the Danube River)*, štampana je na četiri jezika (engleski, ruski, nemački i francuski) (UNESCO, Bratislava 1988).

U periodu od 1975. do 1985. godine održan je niz sastanaka, kako eksperata svih osam podunavskih zemalja (svake druge godine) tako i koordinatora (svake godine) i dogovorena je izrada međunarodnih regionalnih projekata u okviru I, II i III etape saradnje podunavskih zemalja iz oblasti hidrologije – ukupno osam projekata. Raspadom niza socijalističkih zemalja Istočne Evrope formirane su nove države u slivu Dunava (sada ih ukupno ima 19) koje su se takođe priključile regionalnoj saradnji u okviru programa UNESCO-IHP, a broj projekata koji su urađeni, ili se trenutno rade, se povećao na 11.

U radu će biti dat prikaz svih do sada održanih konferencija, kao i urađenih i započetih projekata, sa osnovnim podacima o vremenu i mestu održavanja, glavnom organizatoru i realizatoru, o nazivu projekata i sl.

## 2 Regionalne konferencije podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama

Prva konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama organizovana je u Budimpešti 1961. godine, na inicijativu najistaknutijih naučnika u to doba u regionu dunavskog sliva (Dimitrescu, Kaczmarek, Kalinin, Lasyloffy i dr.). Ideja je bila da se premosti jaz između dva bloka –

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia

u to vreme osam podunavskih zemalja odvojenih gvozdenom zavesom. Konferencije podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama imaju do sada bogatu i uspešnu tradiciju kao glavno okupljanje za razmenu iskustava i sintezu znanja iz hidrologije dunavskog sliva.

U početku, regionalne konferencije podunavskih zemalja održavane su svake dve godine naizmenično u osam podunavskih zemalja. Redosled zemalja domaćina konferencije utvrđuje se na radnim sastancima eksperata. Do sada je održano ukupno 27 konferencija, a hronološki redosled održavanja konferencija, mesto održavanja, broj učesnika i procentualna zastupljenost pola učesnika prikazani su u tabeli 1. Kasnije, sa naglim povećanjem broja podunavskih zemalja ovoj regionalnoj konferenciji je promenjen naziv u Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management.

Tabela 1. Spisak konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama i hidrološkim osnovama u upravljanju vodama

Table 1. List of conferences of Danube countries on hydrological forecasting and hydrological water management bases

Konferencija	Godina	Mesto	Broj učesnika	% zastupljenosti pola	
				muški	ženski
I	1961	Bukurešt	25	100	-
II	1963	Grac	16	100	-
III	1965	Bukurešt	25	98	2
IV	1967	Bratislava	16	87	13
V	1969	Beograd	51	89	11
VI	1971	Kijev	52	94	6
VII	1973	Varna	42	85	15
VIII	1975	Regensburg	65	92	8
IX	1977	Budimpešta	51	82	18
X	1979	Beč	44	87	13
XI	1982	Bukurešt	58	92	8
XII	1984	Bratislava	74	93	7
XIII	1986	Beograd	49	92	8
XIV	1988	Kijev	45	81	19
XV	1990	Sofija	48	87	13
XVI	1992	Kelheim	91	83	17
XVII	1994	Budimpešta	127	87	13
XVIII	1996	Grac	138	87	13
XIX	1998	Osijek	137	74	26
XX	2000	Bratislava	155	64	36
XXI	2002	Bukurešt			
XXII	2004	Brno			
XXIII	2006	Beograd	309	64	36
XIV	2008	Bled	250		
XXV	2011	Budimpešta			
XXVI	2014	Degendorf			
XXVII	2017	Varna			

### 3 Regionalne hidrološke monografije i tematski projekti u slivu Dunava

S ciljem racionalnog korišćenja vodnog potencijala Dunava i odbrane od velikih voda, Komitet za MHD SFRJ je 1970. godine pokrenuo inicijativu da se pristupi izradi Hidrološke monografije sliva Dunava. Ova inicijativa je bila u skladu sa jednim od osnovnih ciljeva Međunarodne hidrološke decenije MHD UNESCO-a (1965–1974) da se u slivovima međunarodnih reka podstakne regionalna saradnja u domenu hidrologije. U tom periodu završene su nacionalne monografije *Hidrološki bilans*

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

*Dunava*, rađene po istoj metodologiji u osam podunavskih zemalja. Koordinator čitavog posla bili su Institut VUVH iz Bratislave, koji je koordinirao rad grupe eksperata iz Čehoslovačke, Mađarske, Bugarske i SSSR-a i Tehnički sekretarijat (NK za IHP SFRJ) iz Beograda, koji je koordinirao rad grupe eksperata iz Nemačke, Austrije, Jugoslavije i Rumunije.

U periodu od 1971. do 1986. godine održan je niz sastanaka, kako eksperata svih osam podunavskih zemalja (svake druge godine) tako i koordinatora (svake godine) i dogovorena je izrada međunarodnih regionalnih projekata iz oblasti hidrologije.

U okviru I etape saradnje (1971–1986) osam podunavskih zemalja je zajednički, na bazi međusobno usaglašenih nacionalnih monografija *Hidrološki bilans Dunava*, radilo na izradi projekata i štampanju sledećih publikacija:

1. Hidrološka monografija *Dunav i njegov sliv* na nemačkom (Minhen, 1986) i ruskom jeziku (Kijev, 1988).
2. *Hidrologija reke Dunav (Hydrology of the river Danube)*, štampana je na četiri jezika (engleski, ruski, nemački i francuski) (UNESCO, Bratislava 1988).

Raspadom niza socijalističkih zemalja Istočne Evrope formirane su nove države u slivu Dunava (sada ih ukupno ima 19) koje su se takođe priključile regionalnoj saradnji u okviru programa UNESCO-IHP. Danas su aktivni učesnici u regionalnoj saradnji sledeće zemlje: Nemačka, Austrija, Češka, Slovačka, Mađarska, Slovenija, Hrvatska, Bosna i Hercegovina, Srbija, Rumunija, Bugarska, Moldavija i Ukrajina.

Kroz ostale etape, u periodu od 1993. do 2017. godine, navedene podunavske zemlje učestvovala su u realizaciji jedanaest tematskih projekata. Do sada su završeni i publikovani sledeći projekti, odnosno podprojekti, a neki su u toku realizacije:

- Projekat N° 1: *Režim suspendovanog i vučenog nanosa na Dunavu i njegovim pritokama* (Budimpešta, 1993 – rukovodilac dr Rakoci, Mađarska) – na ruskom i nemačkom jeziku.
- Projekat N° 2: *Termički režim Dunava i režim leda na Dunavu* (Bratislava, 1993 – rukovodilac dr Stančikova, Slovačka) – na ruskom i nemačkom jeziku.
- Projekat N° 3: *Dugoročne fluktuacije padavina u slivu* (NK – IHP Austrije) – nezavršen projekat.
- Projekat N° 4: *Koincidencija velikih voda Dunava i njegovih glavnih pritoka* (Bratislava, 1999 – rukovodilac dr Prohaska, Jugoslavija) – na engleskom jeziku.
- Projekat N° 5: *Reambulacija Hidrološke monografije sliva reke Dunav*
  - Podprojekat N° 5.1: *Katastar glavnih hidrauličkih objekata u slivu Dunava* (Bukurešt, 2004 – rukovodilac dr Pasoj, Rumunija) – na engleskom jeziku.
  - Podprojekat N° 5.2: *Reambulacija vodnog režima Dunava i njegovog sliva* (Koblencz, 2004 – rukovodilac dr Belz, Nemačka) – na ruskom, engleskom i nemačkom jeziku
  - Podprojekat N° 5.3: *Reambulacija vodnog bilansa u slivu Dunava* (Bratislava, 2006 – rukovodilac dr Petrović, Slovačka) – na engleskom jeziku.
  - Podprojekat N° 5.4: *Karakterizacija režima oticaja i njegova stabilnost u slivu Dunava* (Budimpešta 2006 – rukovodilac Kovacs, Mađarska) – na engleskom jeziku.
- Projekat N° 6: *Stanje rečnog korita Dunava*
  - Podprojekat N° 6.1: *Paleogeografija Dunava i njegovih pritoka* (Budimpešta, 1999 – rukovodilac dr Nepel i dr., Mađarska) – na engleskom jeziku.
  - Podprojekat N° 6.2: *Regulacija korita Dunava* (Bratislava, 1999 – rukovodilac dr Stančikova, Slovačka) – na ruskom i nemačkom jeziku.
  - Podprojekat N° 6.3: *Sprudovi na Dunavu* (Budimpešta, 1993 – rukovodilac dr Goda, Mađarska) – na ruskom i nemačkom jeziku.
  - Podprojekat N° 6.4: *Meandri i padovi na reci Dunav kao i geomorfološki parametri u rečnom koritu (Analiza geomorfoloških procesa)* – nezavršen podprojekat
- Projekat N° 7: *Regionalna analiza maksimalnih godišnjih proticaja* (Bukurešt, 2004 – rukovodilac dr Stanescu, Rumunija) – na engleskom jeziku.
- Projekat N° 8: *Hidrološka bibliografija koja se odnosi na sliv Dunava*

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Podprojekat N° 8.1: *Hidrološka bibliografija koja se odnosi na sliv Dunava* (Koblenz, ??? – rukovodilac dr Schreoder, Nemačka) – nezavršen podprojekat
- Podprojekat N° 8.2: *Spisak kodova reke Dunav* (Ljubljana, 2000 – rukovodilac dr Brilly, Slovenija) – na engleskom, ruskom i nemačkom jeziku.
- Projekat N° 9: *Režim poplava na rekama u slivu Dunava* (Bratislava, ??? – rukovodilac dr Pekarova, Slovačka) – nezavršen projekat.
- Projekat N° 10: *Bilans nanosa u slivu Dunava* (Beč, ??? – rukovodilac dr Nachtnebel, Austrija) – nezavršen projekat.
- Projekat N° 11: *Male vode i hidrološke suše u slivu Dunava* (Sofija, ??? – rukovodilac dr Dakova, Bugarska) – nezavršen projekat.

Za potrebe izrade tematskih projekata eksperti iz podunavskih zemalja-učesnica obezbeđuju podatke sa svoje teritorije, učestvuju u oceni rezultata i davanju saglasnosti za publikovanje. Rad eksperata podunavskih zemalja odvija se preko redovnih (jednom godišnje u pojedinim zemljama) i vanrednih (jednom u dve godine – za vreme održavanja konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama) radnih sastanaka eksperata podunavskih zemalja. Radnim sastankom rukovodi zemlja/ekspert koordinator saradnje koji se bira u intervalu od dve do tri godine, svaki put iz druge podunavske zemlje učesnice u regionalnoj saradnji IHP-UNESCO-a.

Spisak dosadašnjih koordinatora regionalne saradnje podunavskih zemalja na polju hidrologije dat je u tabeli 2.

Na sastanku eksperata podunavskih zemalja, koji je održan u Varni septembra 2018. godine, funkciju budućeg koordinatora Regionalne saradnje podunavskih zemalja u oblasti hidrologije, preuzeo je Prof. dr Mitja Brily, sa Univerziteta u Ljubljani, Slovenija.

Tabela 2. Spisak dosadašnjih koordinatora Regionalne saradnje podunavskih zemalja u oblasti hidrologije  
Table 2. List of former Coordinator of the Regional cooperation of the Danube countries participating in the field of hydrology

Faza saradnje	Period	Koordinacija	
		Institucija(e)	Expert(i)
I	1971–1986	(a) Water resources Institute VUVH, Bratislava (CS) (b) Technical Secretariat, Beograd (YU)	(a) A. Sikora (CS), A. Stančik (CS) (b) S. Jovanović (YU) M. Andjelić (YU) S. Prohaska (YU) M. Miloradov (YU)
II	1987–1992	German IHP/OHP National Committee	K. Hofius (D)
III	1993–1996	Austrian IHP National Committee	O. Behr (A), D. Gutknecht (A), F. Nobilis (A)
IV	1999–2002	Slovak IHP National Committee	P. Miklanek (SK), P. Petrovič (SK)
V	2003–2005	Hungarian IHP/OHP National Committee	M. Domokos (H)
VI	2006–2008	IHP National Committee of Serbia	M. Miloradov (SR)
VII	2009–2011	IHP National Committee of Croatia	D. Biondić (CR)
VIII	2012–	IHP National Committee of Romania	D. Radulescu (RO)

## Uvođenje „pametnih komponenti“ u instalacije vodovoda i kanalizacije „pametnih gradova budućnosti“

Denisa Đorđević<sup>1</sup>, Željka Ostojčić<sup>2</sup>

APSTRAKT: Koncept pametnih gradova budućnosti omogućuje prikupljanje, prenos, obradu i analiziranje podataka o vodovodnoj i kanalizacionoj mreži putem informativnih i komunikacijskih tehnologija. U okviru strategije razvoja pametnih gradova potrebno je osmisliti i isprojektovati mrežu „pametnih elemenata“ na instalacijama vodovoda i kanalizacije koji bi pomoću određenih senzora prikupljali potrebne podatke o protoku, kvalitetu, brzini, pritisku i ostalim potrebnim komponentama pitke, tehnološke i otpadne vode. Ovakav pristup je neophodan zbog povećanog stepena urbanizacije u čijim uslovima će obezbediti poboljšanje kvaliteta života. Radom su obrađena merna mesta (njihov broj i lokacija), vrste podataka koji su potrebni (tipovi senzora), potencijalni korisnici, kao i konstrukciju i instalacione uslove pametnih elemenata. Opisani su benefiti ovog pristupa i interakcija sa ostalim sistemima pametnih gradova.

Ključne reči: pametni gradovi, digitalne tehnologije, online monitoring

## Introduction of “smart components” in the water supply and sewerage installation of “smart cities of the future”

ABSTRACT: Concept of smart cities of the future ensures the collection, transmission, and processing and analysis data's of water and sewage network through information and communication technologies. Within the framework of the strategy for the development of smart cities, it is necessary to design and project a network of "smart elements" on water and sewer installations that will with certain sensors collect the necessary data about flow, quality, speed, pressure and other necessary components of drinking, technological and waste water. Such an approach is necessary because of the increases degree of urbanization in which conditions it will ensure an improvement the quality of life. This article is about measuring points (the number and location), types of data needed to be measured (sensor types), potential users, also the construction and installation conditions of smart elements. The benefits of this approach and interactions with other systems of smart cities are described.

Key words: smart cities, digital technologies, online monitoring

---

<sup>1</sup> Denisa Đorđević, dipl.građ.inž., Pipelife Serbia, Beograd, Srbija, [denisa.djordjevic@pipelife.com](mailto:denisa.djordjevic@pipelife.com)

<sup>2</sup> Željka Ostojčić, dipl.građ.inž., Hidroprojekt Saobraćaj, Beograd, Srbija, [zeljka.ostojic@hps.rs](mailto:zeljka.ostojic@hps.rs)

## 1 Uvod

Pametni grad je urbana sredina koja koristi različite vrste elektronskih senzora za prikupljanje informacija potrebnih za upravljanje imovinom i resursima. Tu spadaju podaci prikupljeni od građana, uređaja i imovine koji se zatim obrađuju i analiziraju za praćenje i upravljanje saobraćajem i transportom, energetikom, vodovodnom i kanalizacionom infrastrukturom, policijom, informacionim sistemima, školama, bolnicama i drugo [1].

Koncept pametnog grada spaja informacionu i komunikacionu tehnologiju i razne fizičke uređaje povezane u mreži mrežom kako bi se optimizovala efektivnost gradskih usluga, prate trendovi razvoja i ulaže u inovacije pojedinih sistema. Ovaj pristup dovodi do poboljšanja kvaliteta života i smanjenju troškova. Pametne aplikacije omogućuju praćenje parametara *online* i reagovanje u realnom vremenu.

Velike demografske (porast broja stanovništva i starenje populacije), tehnološke, ekonomske i ekološke promene izazvale su interesovanje za pametne gradove, što uključuje i klimatske promene, restrukturiranje ekonomije, prelazak na online maloprodaju i pritiske na smanjenje javnih financije. Europska unija (EU) uložila je mnogo napora za osmišljavanje strategije za postizanje "pametnog" urbanog rasta za svoja šira gradska područja i ulaže u razvoj ICT (informacione i komunikacijske tehnologije) usluge u cilju poboljšanja javnih usluga i kvalitete života. Arupova procena je da će globalno tržište „pametnih gradova“ iznositi 400 milijardi dolara godišnje do 2020. godine. Primeri implementacije tehnologije pametnih gradova su Dubai, Southampton, Amsterdam, Barcelona, Madrid, Stockholm.

U Republici Srbiji gradovi poput Novog Sada, Pančeva i Beograda su počeli sa razvojem i ulaganjima u koncept „*pametnog grada*“.

### 1.1 Vodovod i kanalizacija u pametnim gradovima

Industrija vode i otpadnih voda, kao i mnoge druge, trenutno prolazi kroz proces transformacije korišćenjem ICT-a (Information and Communication Technologies) i stvaranjem podataka u realnom vremenu. Cilj je povećanje operativne i menadžerske efikasnosti, smanjenje troškova i emisije ugljenika, kao i povećanje energetske efikasnosti i smanjenje zagađenja kroz pametno online merenje ključnih parametara vode.



Slika 1. Pametni gradovi

Figure 1. Smart Cities



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U Evropi postoji 3,500,000 km mreža distributivne vodovodne mreže (EUREAU, 2009). Vodoprivredna preduzeća suočavaju se sa brojnim izazovima. U narednih 10 - 30 godina moraju biti rehabilitovani veliki delovi mreža za distribuciju vode što zahteva hitne intervencije i optimizaciju ovih investicija. U mnogim zemljama postoji potreba za poboljšanjem kvaliteta vode a često evropska direktiva o pitkoj vodi nije ispunjena u pogledu mikrobioloških i hemijskih parametara, što predstavlja pretnju ljudskom zdravlju.

Na kraju, efikasnije treba koristiti resurse za proizvodnju i distribuciju vode. Većinom a distributivnih vodovodnih mreža se ne upravlja aktivno u realnom vremenu, nego se koristi reaktivan pristup proizvodnji, upravlja se pritiscima u crpnim stanicama po unapred zadatim grafikonima, kvalitet vode proverava uzorkovanjem, a reaguje se na osnovu rezultata laboratorijskih analiza, žalbi kupaca i signala zdravstvenih ustanova ovlašćenih za kontrolu kvaliteta. Kontinuirana merenja nisu uobičajna praksa, optimizacija je nemoguća bez njih i zbog toga se gube ogromni resursi:

- Curenje i gubici vode (gubici vode u rasponu od 5 - 50% ukupne proizvedene vode, izvor EU);
- Ekonomično gazdovanje imovinom i proizvodnja vode;
- Optimalno upravljanje pritiscima ( potencijal štednje je 10 - 15% potrošnje energije za distribuciju i dodatne uštede: smanjen broj curenja kao rezultat smanjivanja nepotrebno visokih pritisaka i prolaznih uticaji koji su uzrok curenja ).

Evropsko partnerstvo za inovacije na vodama (EIP Vater) prepoznao je ove izazove i utvrdilo sledeće prioritete rada vezanih za probleme mreži distribucije vodosnabdevanja:

## 1. Tematski prioriteti

- Tretman vode i otpadnih voda uključujući obnovu resursa
- Voda i njena veza sa energijom

## 2. Prioriteti ukrštanja sa drugim tehnologijama:

- - Sistemi za praćenje procesa i donošenje odluka uz korišćenje povratne sprege
- - Pametne tehnologije.

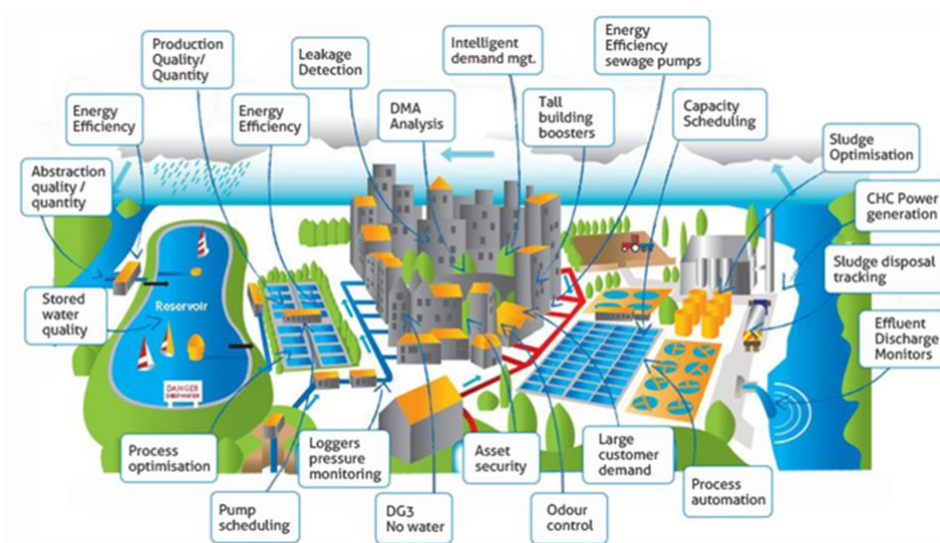
SmartWater4Europe doprinosi uvođenju EIP vode ubrzanjem inovacija, prioriteto u oblastima koje doprinose rešavanju društvenih izazova, poboljšanju konkurentnosti Evrope i doprinose stvaranju radnih mesta i ekonomskom rastu. Osim toga, ponudu i potražnju treba povezati, kao uzrok i posledicu, samo se na takav način može ubrzati prihvatanje inovacija i ubrzalo uvođenje tržišta.

Tržište SmartWater4Europe se brzo razvija i to ne samo u Evropi, očekuje se da će pametno merenje vode generisati kumulativne investicije od 7,8 milijardi dolara do 2020. godine, a njegova snaga leži u sposobnosti da ponudi vodovodnim preduzećima puteve prema operativnijim upravljanjem troškovima i smanjenju zagađenja, uz istovremeno poboljšanje upravljanja uslugama i snabdevanjem.

## 1.2 Uopšten koncept „pametnih vodovoda i kanalizacije“

Kontinualno praćenje tehnoloških parametara je princip koji se sve više primenjuje u raznim sferama industrije i urbanog okruženja, i na kome se zasniva koncept „pametnih gradova“. Vodovodna mreže je njihov integralni deo sa pitkom vodom kao strateškim resursom. Povećanje stepena urbanizacije prouzrokuje potrebu za online kontrolom, obradom i čuvanjem podataka, a razvoj u sferi digitalizacije nam to omogućuje.

Koncept SWAN (Smart Water Network) uključuje identifikovanje curenja na mreži i kod krajnjih korisnika, dobijanje zavisnosti između pojedinih elemenata tečenja ( kao što su proticaj, pritisak, kvalitet vode...), omogućava detekciju loma, praćenje kvaliteta u realnom vremenu, online kontrolu potrošnje, uspostavljanje potrošačkih obrasca i korišćenje prognoznih analitičkih metoda za regulisanje snabdevanja i podešavanje alarma za predviđanje i sprečavanje anomalija i havarija [2].



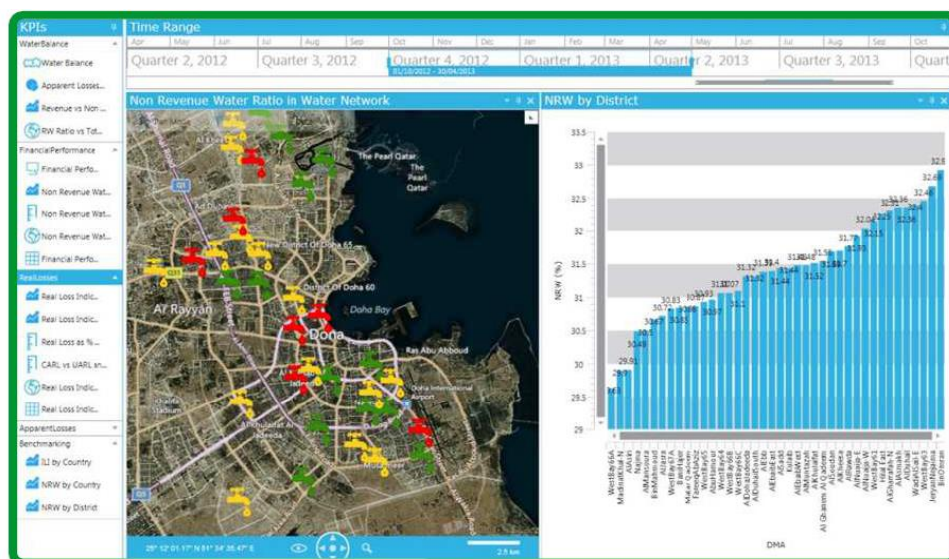
Slika 2. Prikaz pametne vodovodne mreže

Figure 2. Smart Water Network

## 2 „Pametna vodovodna mreža“ (Smart Water Network)

### 2.1 Funkcija uvođenja „pametnih komponenti“ u vodovodnu mrežu

Smart Water Network (SVAN) je vodovodna industrija i ona je ekvivalentna energetskejoj industriji Smart Grid su umrežene vodovodne kompanije koje pokušavaju da odrede kako će nove SWAN tehnologije pomoći u održavanju ili poboljšati nivo usluga i profitabilnosti postojećih stopa naplate vode i kako se podaci, merenja performansi i integrisanih sistema mogu usmeriti na upravljanje vodom i dovesti u vezu sa podsticanjem produktivnosti poslovanja [3].



Slika 3. Primer vizuelizacije podataka prikupljenih inteligentom mrežom

Figure 3. Raw data gathered from intelligent devices istransformed into information

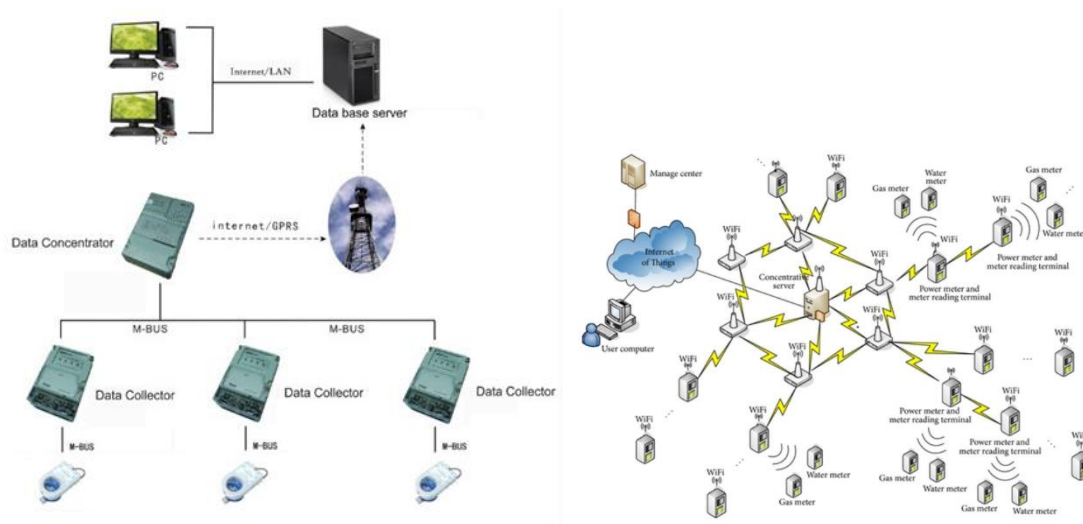
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Zajednički izazov za vodosnabdevanje je održavanje i poboljšanje usluga i profitabilnosti nivoa postojećih stopa naplate vode. Smanjenje stvarnih (fizičkih) i očiglednih komercijalnih gubitaka vode je ključno pitanje. Većina komunalnih preduzeća beleži značajne gubitke vode.

Prvi problem sa kojim se susrećemo u komunalnom sektoru jeste da ne postoje podaci o gubicima, a i ako postoje nema potrebnih alata i softvera za njihovu obradu. Postavlja se i pitanje kako uskladiti projektovane uslove sa stvarnim stanjem na terenu. Danas je moguće vršiti „pametna merenja“ (Smart Metering“) i poboljšati efikasnost vodosnabdijevanja. Prikupljeni podaci se koriste za pružanje vizuelizacije mreže u realnom vremenu.

Status i racionalizacija funkcija poslovne inteligencije (BI-Business intelligence) omogućavaju korisnicima i zainteresovanim stranama dadonose bolje odluke kao rezultat solidnog izveštavanja i nedvosmislenog planiranja. U SWAN okruženju, softver koji analizira signale u realnom vremenu iz nadređenom kontrolnog sistema zajedno sa sistemom za prikupljanje podataka (SCADA-Supervisory Control And Data Acquisiton – dispečersko upravljanje i prikupljanje podataka) mogu ukazivati na prisutnost i približnu lokaciju curenja u distributivnom sistemu. Mrežna simulacija i povezivanje sa softverom za upravljanje omogućuje efikasne komunikacije sa ekipama na terenu i kupcima, I smanjuje broj popravki, omogućuje uslugu korisnicima i čini potrošače zadovoljnim . Sistemi za kontrolu pritiska koriste kontrolni softver koji deluje u realnom vremenu.

Hidraulički modeli koji povezuju softver za analizu i druge informacione tehnologije (IT-Information Techology) čiji alati podržavaju "zameniti ili popraviti" odluke, programi imaju aplikacija za procene stanja i upravljanje mrežnim resursima. Upravljanje podacima (MDM-Master Data Management), spojeno sa naprednom metričkom infrastrukturom / automatsko čitanje vodomera (AMI- Advanced Metering Infrastructure / AMR- Automatic Meter Reading) sistemi [4], pomoć u identifikaciji gubitaka nastalih usled neispravnih brojlila ili greškaka u ručnoj obradi izmerenih i očitanih podataka.KPI-i (Key Performance Indicators) koji proističu iz takvih sistema, omogućavaju korisnicima da analiziraju industrijske performanse i druge interne podatke, pomažući da se identifikuju oblasti koje treba poboljšati obezbeđujući konzistentnu komunikaciju sa svim zainteresovanim stranama.



Slika 4. AMI-Napredna infrastrukturna merenja/ AMR-Automatsko očitavanje sistema

Figure 4. (AMI- Advanced Metering Infrastructure / AMR- Automatic Meter Reading) systems

### 2.1.1 Elementi pametne vodovodne mreže

Pametne vodene mreže donose profit vodovodnim preduzećima gde su one već implemetirane u osnovnoj infrastrukturi. Prostor SWAN predstavlja upotrebu informacione tehnologije za optimizaciju imovine komunalnog preduzeća. Implementacijom ove tehnologije, "glupa" infrastruktura (bez podataka), koju čine fizički elementi mreže kao što su cevi, pumpe, rezervoara i ventili, postaje inteligentna kroz primenu senzora za prikupljanje podataka i softvera za pomoć u tumačenju podataka što pokreće određene informacione korake koji poboljšavaju efikasnost poslovanja.

Tri ključna elementa „pametnih vodovodnih mreža“ su:

- Informacije: potpuno iskorišćavanje svih podataka koje generiše vodovod
- Integracija: korišćenje trenutnih informacionih sistema za maksimiziranje prethodnih investicija
- Inovacije: dizajniranje sistema dovoljno fleksibilnog da odgovori na buduće izazove

SWAN nije samo pojedinačni sistem koji optimizuje efikasnost mreže, već i sredstvo za povezivanje više sistema radi deljenja podataka platforme. SWAN tehnologije poboljšavaju efikasnost, dugovečnost i pouzdanost osnovne fizičke vodovodne mreže kroz bolje merenje, prikupljanja i analizu podataka preuzimajući određene reakcije za širok spektar događaja u mreži.

„Pametna“ vodovodna mreža nam omogućava:

- Praćenje u realnom vremenu, automatizaciju i optimizaciju složenih operativnih procesa
- Deljenje baze podataka i sinhronizaciju, izbegavajući neefikasnu dupliranje informacija i greške
- Vizuelizaciju informaciju koje dolaze iz različitih sistema u jedinstvenoj i standardizovanoj platformi, kao što je geografski informacioni sistem (GIS)
- Implementaciju poslovne inteligencije, kao što su KPI, benchmarking, izveštaji, generisanje i planiranje

Postoje neki osnovni nivoi SWAN integracije sa kojima se pružaju usluge neposrednim korisnicima. Jedan primer je transformacija podataka u realnom vremenu kroz informacije koje služe za brže donošenje odluka u oblastima izvan dispečerske sobe. Kretanjem u realnom vremenu informacije van kontrolne sobe, korisnici postaju svesni šta se dešavala terenu u svakom trenutku i brzo reaguju kada se pojavi problem [5].



Slika 5. Generisani izveštaji mogu uključiti broj klijenata na koje utiče prekid i efikasnost poslovanja i održavanje

Figure 5. Reports generated can include the number of customers impacted by outages and the efficiency of maintenance crews.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

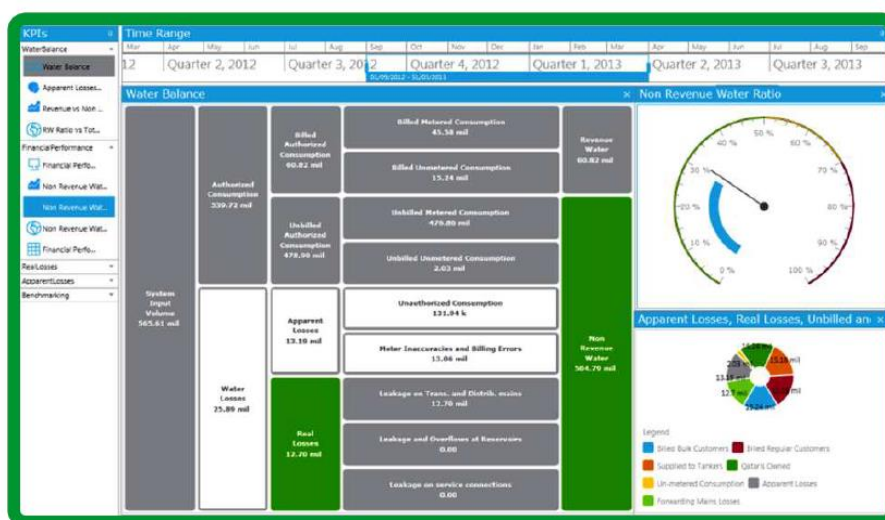
Praćenje podataka u realnom vremenu unapređuje održavanje mreže jer sistem automatski generiše informacije u toku događaja. Na primer, kada postoji neispravan deo opreme ili kada cevi propuštaju vodu, rukovodioci komunalnih usluga mogu odmah poslati ekipu na tačnu lokaciju incidenta sa tačnim informacijama o toj vrsti opreme. Korišćenje naprednog GIS sistema za odlazak osoblja na preciznu lokaciju incidenta smanjuje troškove popravke. "Smart Water Network" nije samo pojedinačni sistem, već sistem više elemenata i povezivanje više sistema za razmenu prikupljenih podataka sa različitim platformama. "

Pametne vodene mreže utiču na efikasnost kontrole troškova, tako što je interval reakcije na incident koji se dogodio i rešavanja na problem fiksiran, čime se smanjuje rizik i troškovi koji se odnose na taj događaj. Pored poboljšanja vremena reakcije na problem, dokazano je da je povezivanje podataka u realnom vremenu sa terena ključno za izgradnju tačnih hidrauličkih modela koje radnici komunalnih službi koriste da uporede planirano i projektovano stanje sa onim što se zapravo dešava u mreži. Izvođenjem online simulacija, korisnici imaju vrlo moćan alat koji im omogućava da uspostave tačnu bazu podataka kako bi se procenila operativna efikasnost njihove mreže.

### 2.1.2 Menadžment gubitaka u vodovodnoj mreži (Water loss management)

Neprofitabilni menadžment vodom (NRW- Non-revenue water) može imati koristi od SWAN aplikacije jer to uključuje različita odeljenja komunalnih i multidisciplinarnih timova. SWAN podržava efikasno upravljanje gubicima vode:

- Implementacija softvera koji obavlja određene zadatke, kao što je automatsko otkrivanje curenja
- Uvođenje novih tehnologija u tradicionalno ručno vršene aktivnosti: na primer, mobilna GIS rešenja koja podržavaju operacije u toku upravljanja
- Integrisanje sistema za informacije sa dodanom vrednosti: na primer, povezivanje SCADA sistema i hidrauličkog modela za detekciju curenja ili neispravne opreme za merenje
- Smanjivanje nepravilnosti u merenjima pomoću naprednog upravljanja vodomera, što se integriše u korisnički informacioni sistem (CIS-Customer Information System) i određeni softver za određivanje optimalnog broja merenja i veličinu vodomera
- Eliminisanje grešaka pri upravljanju podacima putem automatske implementacije metričnog čitanja (AMR), napredne metričke infrastrukture (AMI) i podataka sa merača (MDM) .



Slika 6. Podaci o brzini vode u realnom vremenu povezani sa mrežnom analizom-otkrivanje curenja vode

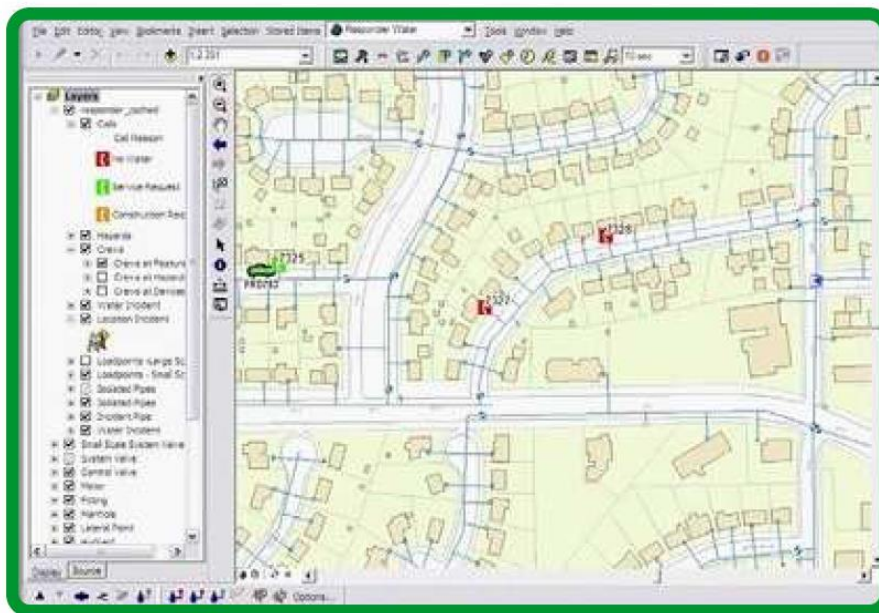
Figure 6. Real-time water velocity data is linked to network analysis to detect leaks along the water network.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

SWAN adresira četiri aspekata NRV-a: aktivna kontrola curenja, popravke cevi, upravljanje pritiskom i upravljanje imovinom. Aktivna kontrola curenja podrazumeva sisteme za otkrivanje curenja (LDS), poznate i kao računarski gasovod monitoring (CPM). To su specifični softverski alati koji analiziraju signale u realnom vremenu iz SCADA sistema. Oni omogućavaju operateru da proceni prisutnost i približnu lokaciju curenja u različitim područjima vodne mreže [6].

Podaci o brzini vode u realnom vremenu su povezani sa mrežnom analizom-otkrivanja curenja vode. Čak i korisnici sa niskim gubicima vode mogu imati koristi od pametne vodovodne mreže, pošto se troškovi održavanja gubitka vode svode na minimum i mogu znatno premašiti cenu efikasnog aktivnog sistema za kontrolu curenja. Sistem za menadžment gubitaka (OMS-Outage Management System) korišćenjem geodatabase baze podataka povezan sa drugim sistemima preduzeća - kao što su CIS, SCADA sistem, sistem za upravljanje računarskim održavanjem (CMMS-Computerized Maintenance Management System) i hidrauličkim modelom- obezbeđuje naprednije, sveobuhvatno rešenje za upravljanje popravkama na cevnoj mreži. Ovaj integrisani pristupolakšava komunikaciju i operacije na terenu kako bi se efikasno upravljalo resursima i minimizirale neugodnosti za kupce. Efikasno upravljanje pritiscima u mreži obično upoređuju podatke o instalacijipreme i uređaja - npr. ventili za smanjenje pritiska i pumpe promenljive brzine – sanjiovim odgovarajućim podacima iz kontrolnog softvera. Napredne mrežne operacije karakterišu dinamičkapodešavanja ventila i rasporeda pumpi na osnovu varijabilne potražnje vode. U slučaju nestanka vode, GIS sistem pomaže operaterima u identifikovanje položaja ventila i detekciji procurivanja kojamožle biti uzrok nestanka vode i koje ometaju regularnu uslugu [7].

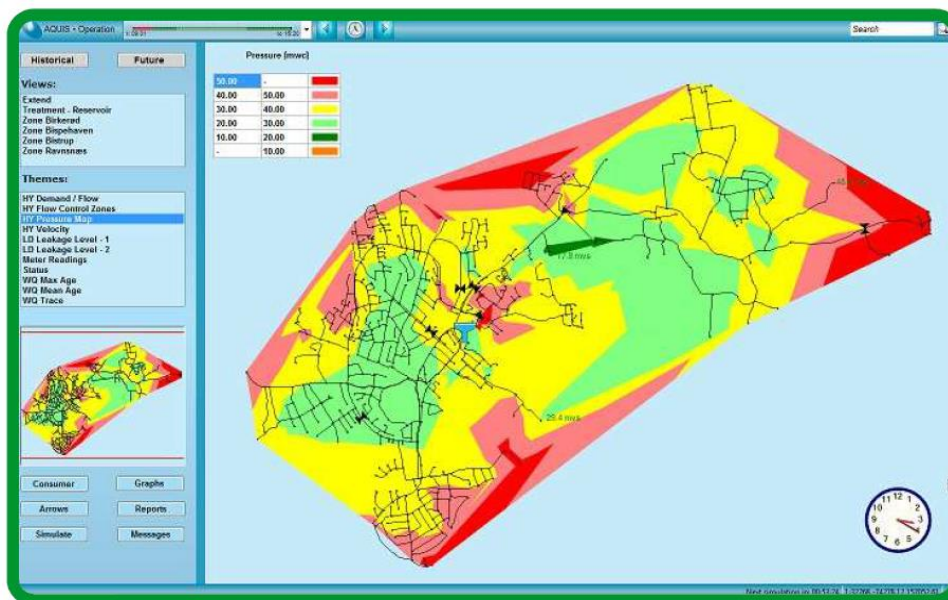


Slika 7. Kada je potrebna popravka curenja nestanak, baziran na GIS-u sistem pomaže operaterima u identifikovanje ventila i ishrane koje bi bile najmanje ometajući uslugu

Figure 7. When a leak repair requires an outage, a GIS-based system assists operators in identifying the valves and washouts that would be least disruptive to service.

Kada je reč o upravljanju imovinom, većina komunalnih preduzeća opterećena je primenom zastarelih imovinsko-finansijskih prava i često se suočava sa dilemom "zamene ili popravu". Hidraulički modeli, GIS, CMMS, i drugi tehnološki alati pokazali su se efikasnim u podržavanju odluka koje uključuju prediktivno i korektivno održavanje. Ovo omogućava operaterima da naprave odluke o tome gde i kada treba preduzeti ove akcije, štedeći vreme i novac u procesu. Vodoprivreda podstiče komunalna preduzeća da implementiraju KPI da bi identifikovali oblasti poboljšanja, da definišu realne ciljeve, projektuju akcione planove i poboljšaju praćenje tokom

vremena. Vlada, zakonodavci i regulativa po pitanju zaštite životne sredine postavljaju stroge smernice za procurivanje. Objavljivanje izvještaja i KPI o gubicima vode je sada obaveza u mnogim zemljama širom sveta. Međutim, generisanje i tumačenje KPI postaje dosadan i radno intenzivan process kada zahteva pristup podacima čuvanim u odvojenim sistemima. SWAN tehnologija može automatizovati ove procese i pruža tačne i pouzdane podatke koji omogućavaju efikasnu kompilaciju KPI-a[8].



Slika 8. Online hidraulički model identifikuje gde je pritisak problemi mogu postojati

Figure 8 An online hydraulic model identifies where pressure problems might exist.

### 2.1.3 Online Monitoring kvaliteta vode

Kontinualno praćenje kvaliteta pitke vode direktno na cevi u vodovodnoj mreži je sastavni deo pametnih gradova budućnosti. Loš kvalitet vode je opasnost po javno zdravlje. Posledice diskontinualnog praćenja su dug period reakcije na eventualne akcidente bez pravog saznanja o poreklu zagađenja. Ručno uzorkovanje i laboratorijski testovi zahtevaju puno vremena, osoblja, reagensa, transportne troškove i organizaciju, što povećava troškove. Rešenje je sistem za on-line menadžment kvaliteta pitke vode, sa senzorima, generisanjem podataka i njihovim prikupljanjem, analizom rezultata, alarmnim sistemom i istraživanjem događaja.

*Online monitoring* kvaliteta ima brojne prednosti kao što su dobijanje informacija o kvalitetu vode u realnom vremenu, na svim delovima mreže, sa trenutnim registrovanjem poremećaja i kratkim vremenom reakcije, alarmnim sistemima, bazom podataka sa istorijom događaja, novim saznanjima o zavisnosti pojedinih parametara, implementaciju "pametnih komponenti" u vodovodne sisteme, smanjenjem troškova kontrole kvaliteta, olakšanim praćenjem, i kao krajnji produkt - kvalitetniju vodu za piće uz veću sigurnost i poverenje korisnika [9].

Za razliku od dosadašnje prakse, ovim konceptom se predlaže praćenje kvaliteta pitke vode direktno na cevi na pojedinim izabranim tačkama u distributivnoj mreži u svakom vremenskom trenutku, za razliku od diskontinualnog odabira na slavini potrošača ili online praćenja tehnološkog procesa. Napredni modeli poslovanja nude ceo sistem sa njegovim održavanjem („leasing“ sistema) i kontinualnom nadogradnjom softvera prema zahtevima korisnika i kao i povećanjem broja mernih tačaka i proširenjem opsega mernih parametara.



Slika 9. Prikaz vizuelizacije *online* merenja na „*pametnom*“ telefonu korisnika

Figure 9. View of the visualization of online measurements on the smartphone of the user

S obzirom na raznolikost vodovodnih sistema u pojedinim naseljima nameće se rešenje da treba nuditi sistem za kontinualno praćenje parametara kvaliteta vode, ne samo njegove pojedine komponente, odnosno, da treba za svaku vodovodnu mrežu isprojektovati online monitoring kvaliteta vode, prema uslovima i podacima sa terena. Strateški je bitno odrediti tzv. **indikatorske parametre**, koji nam ukazuju na to da nešto sa kvalitetom nije u redu. Ovakav sistem kontrole ne isključuje laboratorijske analize niti u ovoj fazi razvoja može da ih zameni, ali u realnom vremenu ukazuje na simptome da se kvalitet vode menja i u kom smeru, i na neophodnost laboratorijske provere kvaliteta u tom trenutku i na tom mestu.

### 3 Primena „*pametnog* merenja“ (Smart meteringa) u kanalizaciji

#### 3.1 Koncept ranog otkrivanja i prevencije zagađivača

Inteligentni sistemi u kanalizacionoj mreži predstavljaju napredne sisteme za upravljanje otpadnim vodama i praćenja zagađivača od strane lokalnih vlasti, vodovodnih preduzeća i korporacija. Pristup uvođenja „*pametnih koponentni*“ u kanalizacionu infrastrukturu menja načina na koji opštine i kompanije razmišljaju o upravljanju otpadnim vodama. Umesto da se reaguju na kontaminaciju, prikupljanje potrebnih podataka u realnom i njihovo čuvanje i obrada nam omogućuju kreiranje jedinstvenog proaktivnog rešenja koje sprečava akcidente događaje, odnosno pojavu zagađenja. Pametna merenja u kanalaizacija nam omogućuju upravljanje otpadnim vodama i na pružanje inteligentnog, sveobuhvatnog sistema koji poboljšava kvalitet otpadnih voda, smanjenje troškova održavanja i stvaranje novog prihoda.

Sistem managementa kvaliteta otpadne vode se razvio iz potrebe koja je postojala u industriji za kompletno rešenje od početka do kraja procesa koje bi moglo automatizovati procese, minimizirati zahteve za radnom snagom i maksimizirati efikasnost. Korisnicima je potrebno konsolidovati bazu podataka, smanjiti zagađenje, identifikovati izvor kontaminacije i identifikovati zagađivače.

Sveobuhvatno rešenje kontrole kvaliteta optadne vode nudi sistem za praćenje i upravljanje kanalizacijom širom čitavog grada, predviđa događaje zagađenja i radikalno smanjuje troškove. Pružajući kompletan pregled, sistem koristi pametne jedinice koje se šire i strateški postavljaju širom grada. Softver prati podatke, nudeći potpunu i preciznu *up-to*-minutnu sliku, automatski, brzo i efikasno reagujući u realnom vremenu. Rana detekcija je od presudnog značaja za sprečavanje zagađenja i uštedu troškova čišćenja. Proaktivna, preventivna tehnologija blokira zagađivače a postoje i neposredne posledice , odmah se generišu prihodi od onih koji su odgovorni za kontaminaciju.

Sistem online kontrole kvaliteta pruža pogled ptičje perspektive za ceo grad i predstavlja potpunu kartu onoga što se dešava na terenu u bilo kom trenutku, u realnom vremenu. Podaci se čuvaju



jer nema potrebe za brisanjem kritičnih informacija, pošto podaci koji su potrebni za kvalitet otpadnih voda, plaćanje i ažuriranje osoblja na terenu sve dolaze direktno do korisnika.

Inovativne, samoaktivirajuće „Smart“ jedinice nadgledaju kvalitet otpadnih voda u realnom vremenu i omogućavaju automatsko uzorkovanje i upravljanje procesima, kako bi se spreči akcidentni događaji zagađenja. Senzori su postavljeni na strateške tačke za praćenje izvora zagađenja, širom grada, od udaljenih lokacija do direktno ispod glavne ulice. Instalacija je brza i jednostavna bez infrastrukturnih zahteva. Sistem se može instalirati da efikasno funkcioniše godinama, neprekidno prenoseći informacije bez potrebnih izvora energije.

Jedinice smeštene u šahtove za otpadne vode smeštene su u visoko elastično zaštitno kućište, zaštićeno od bilo kakvog oštećenje i neovlašćenog pristupa, uz održavanje njihove osetljivosti na najmanju promjenu nivoa pH. Jedinica antene emituje signal koji se šalje neprekidno, i aktivira se samo kada registruje zagađenje. Ovaj potpuno automatizovani sistem dramatično smanjuje potrošnju resursa, bez troškova električne energije i bez radne snage i potrebne za održavanjem ili praćenjem[9].



Slika 10. Jedinica sa sensorima za registrovanje zagađenja

Figure 10. Unit with sensors for registering pollution

### 3.2 Elementi pametne kanalizacije

Primarni cilj „Smart metering“-a u kanalizacionoj mreži je efikasno upravljanje otpadnim vodama i kontrola zagađivača, što podrazumeva značajno umanjeње nečistoće lokalnih otpadnih voda i isporuka što čistije reciklirane vode. Da bi se ovo postiglo potreban je sistem za upravljanje otpadnim vodama čije su komponente prikazane na sledećoj slici [11].



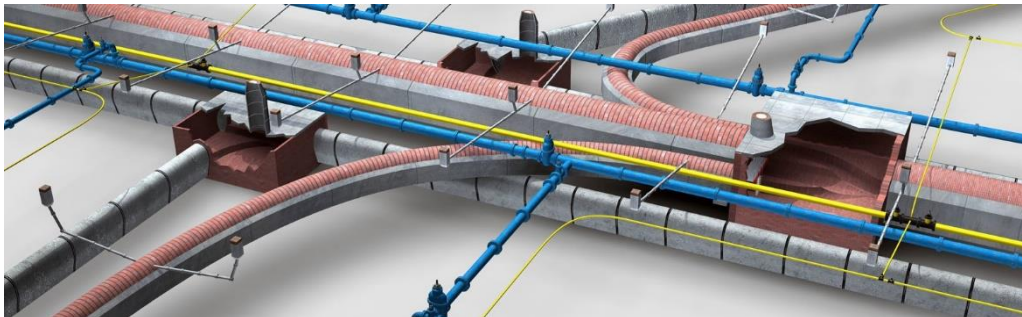
Slika 11. Elementi sistema za kontrolu, detekciju, otkrivanje i sprečavanje zagađenja

Figure 11. Elements of the system for control, detection, detection and prevention of pollution

1. Osmatranje, uzimanje uzoraka i analiza-Smat Sensor System (sistem sa pametnim sensorima), podrazumeva vršenje se monitoring stepena toksičnosti vode, otkrivanje akcidentnog događaja zagađenja u trenutku kada se dogodi (u realnom vremenu), i uzimanje toksičnog uzorka za analizu.
2. Prikupljanje podataka i analiza-analizira se tačnu kompozicija mrlje zagađivača, sa granularnom preciznošću, u najranijoj fazi kontaminacije vode kako bi se pomoglo brzom otkrivanju izvora toksičnosti.
3. Identifikacija zagađivača - prati se hemijsku trag prema specifičnim izvorima zagađenja i dolazi do odgovorno lica za pojavu zagađenja
4. Izvršenje-pravna regulativa-automatsko izračunavanje kazni prema lokalnoj regulativi, formiranje zvaničnih obaveštenja i slanje kaznene naknade preuzeću ili licu koje je izazvalo zagađenje.

### 3.3 Novi trendovi u koncepciji kanalizanja kao proizvod uvođenja „smart“ komponenti

Uz povećanu zakonsku regulativu o zaštiti životne sredine i potrebu za unapređenjem usluga za korisnike, projektovanje se navodi na uvođenje "pametnih" komponenti, usmerenih na prikupljanje i analizu podatke, kako bi poboljšale sistemi odvođenja i prečišćavanja otpadnih voda. Tradicionalno, sistemi otpadnih voda su delovali "pasivno" sa sistemskim modeliranjem i dugoročnim ciljevima zasnovanim na već istorijskim podacima, kao što su padavine, nivoi vode i podaci o potrošnji i broju stanovnika. Međutim, sada postoji sve veći pomak koji se odnosi na online modele koji se mogu unaprediti kroz vreme i tako obezbeđivanje zdravije i pravilnije funkcionisanja sistema otpadnih voda. Pametan sistem otpadnih voda obezbeđuje rešenja za poboljšanje kvaliteta vode, povećanje energetske efikasnosti, smanjenje prekomerne količine otpadnih voda, industrijskih zagađivača i povećanje ukupne efikasnosti sistema.



Slika 11. „Pametna“ kanalizaciona mreža u budućnosti

Figure 11. „Smart“ sewage network in the future

Postoje dva uobičajena tipa sistema kanalizanja otpadnih voda: separadni - sa odvojenom sanitarnom kanalizacijom (FK-fekalna kanalizacija) koja sakuplja samo upotrebljene fekalne otpadne i kišnom kanalizacijom (KK) koja prikuplja površinske vode, sa jedna strana, a sa druge kombinovani sistem-opšte kanalizacione sisteme(OK), koji se sastoje od jedne cevi osmišljene za prikupljanje i prenošenje otpadnih voda u domaćinstvima, industrijskih otpadnih voda i kišnih voda u postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda.

Preterane količine otpadnih voda u oba ova sistema predstavljaju pretnju po zdravlje ljudi, životnu sredinu i rezultuju visokim troškovima održavanja tokom procesa transporta otpadnih voda a posebno je u smislu resursa zahtevno prečišćavanje, jer je potrebno obezbeđivanje radne snage, upravljanje sistemom, remedijacija, fakturisanje i kompenzacija.

Preopterećene kanalizacione mreže uzorkuju zapušnja, prekide u oticanju operativne i strujne kvarove. Opšti sistem kanalizacije (OK) nije projektovan tako da sakuplja velike količine kišne vode, čime se mogu izazvati izlivanja kod korisnika i poplave, kao i izlivanje zagađene vode u okolno to, i

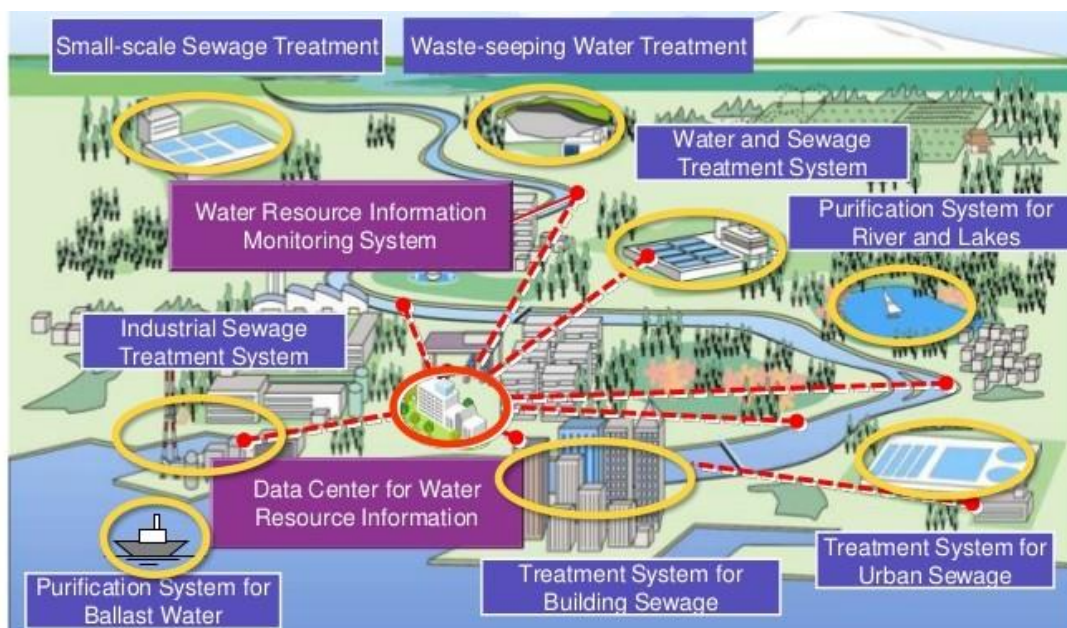
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

na taj način mogu da se ugroze podzemne vode. Suprotno od toga, separatan sistem je projektovan tako da sistem kišne kanalizacije (KK) može da prelije ili propusti veće količine kišne vode u vodotoke ili zelenu površinu.[11]

Odgovarajuća menagement i upravljanje su neophodni kako bi se smanjilo nekontrolisano ispuštanje u životnu sredinu i sprečila zagađenja. Investiranje u pametne, data-upravljачke tehnologije može pomoći u smanjenju rizika od zagađenja tako što će obezbediti predviđene kapacitete, održati postojeću infrastrukturu, smanjiti količinu otpadnih voda u kanalizaciji, povećati pronosnu moć kišne vode tretman i obavestiti javnost u slučaju akcidenta. Tehnologije „pametne otpadne vode“ mogu da spreče i zaustave izlivanje, i ako je to neizbežno, odrede prioritete unutar sistema. Ova rešenja proizilaze iz dostupnosti podataka o protoku, nivou, kvalitetu vode i vremenskim intervalima između neregularnosti koje su uočene kako bi predvideli i pružili ažurirani podaci o problemima na mreži kao što su zagušenja, poplave i pucanje cevi. Pomoću ovih informacija korisnici mogu uočiti probleme pre nego što se pojave, smanjujući količinu zagađene vode koja se izliva u okolinu. Na primjer, korištenjem pametnih CSO (Combined System Overflow) rešenja, inženjeri na mreži mogu odlučiti o najboljem načinu za odvajanje fekalne i kišne kanalizacije, kao i koju zapreminu dotoka da zadrže u rezenzijama zavisno od koncentracije zagađivača.

Da bi se anulirao ili bar smanjio uticaj preliivanja kanalizacionog sistema, moraju se koristiti podaci dugoročnih osmatranja ili simulacioni modeli. Senzori deluju kao sistem za kontrolu koji može da pomogne u prevenciji neželjnih događaja upućivanjem alarma upravnicima sistema, čime se smanjuje vreme reagovanja. Postoje dva uobičajena tipa uređaja za nadgledanje događaja za prelive: Single Purpose / Basic Alarmni uređaji (SP / BAD) i True Real-time monitori (TRM). SP / BADs obezbeđuju alarmne notifikacije i smanjuju šanse za preliivanjem iz sistema.

Iako su SP / BAD obično plasirani po nižoj ceni, TRM sistemi su napredniji i ispunjavaju projektne zahteve. Ova rešenja obezbeđuju osmatranje udaljenih lokacija u realnom dvosmernikomunikaciju između menadžera sistema i sektora održavanja, podatke o nivou i protoku sa generisanjem izveštaja. Ovakvi alati omogućavaju korisnicima ne samo da zabeleže događaje u slučaju prelazanja zadatih vrednosti, već takođe da omoguće predviđanje i izbegavanje alarmne situacije (danima ili nedeljama unapred). Ovi uređaji mogu dalje pomoći u preusmeravanju sredstava korisnika na područja sistema gde mu je najviše potrebno.



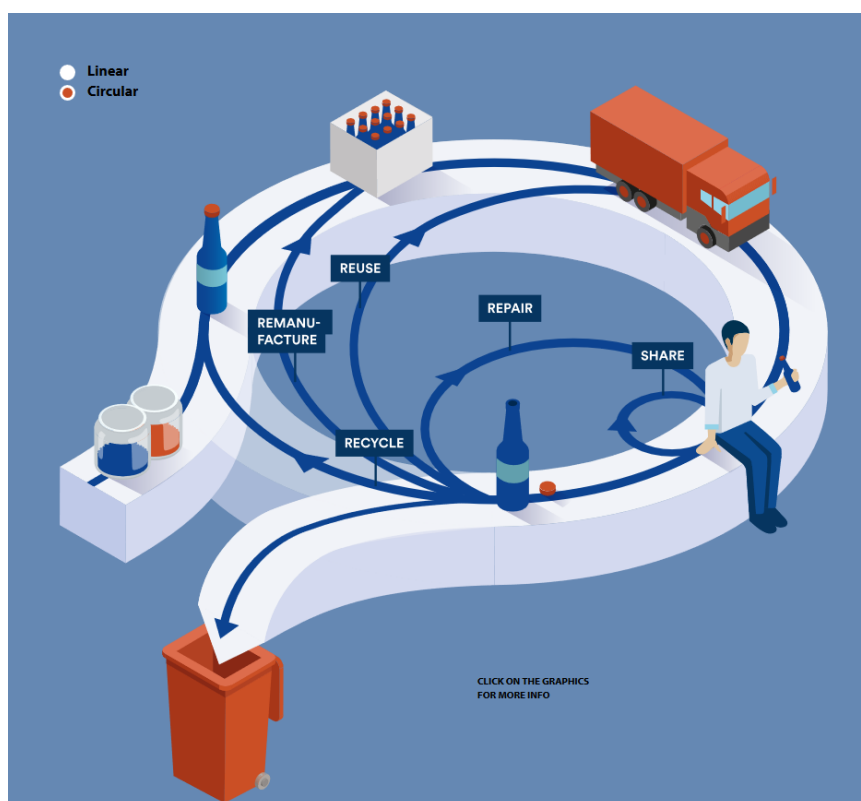
Slika 12. „Pametna kanalizacija“-shema sistem

Figure 12. „Smart sewage“-system shema

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Drugi primeri inteligentnih rešenja za otpadne vode integrišu informatiku iz SCADA i GIS sistema usimuliraju padavine i otcijaj pod različitim uslovima. Na primer, rešenja za hidrauličko modeliranje dozvoljavaju operateru da modelira slivne sisteme i slivova. Ovo pruža tačnu predstavu terenu pomoću jednačina površina i mapiranja površinske topografije, nivoa vode, i podataka o sistemskoj infrastrukturi. Takvi alati dozvoljavaju korisniku da istražuju sve načine za kontrolu sistema i pruža prave informacije u svakom trenutku. Pored toga, pametne kanalizacione mreže mogu poslati alarmne poruke preko različitih medija, kao što je interneta ili aplikacije za pametne telefone.

Pre usvajanja projekta pametne mreže za otpadne vode, mora se izraditi „studija opravdanosti“ zasnovana na uticajima svih pojedinačnih elemenata, kao što su finansijske uštede, uticaj na životnu sredinu i usluge klijenata. Važno je razmotriti koji su aspekti optimizovani. Na primer, prilikom ispitivanja troškova-benefit analize prevencije zagađenja, u jednačini mora figurisati više parametara, ne samo radna snaga koja se koristi u remedijaciji, ali i troškovi javnih odnosa, izveštavanje autoriteta, sporovi i kompenzacije. Cilj projekta Smart Water Networks je ubrzati razvoj pametnih mreža vode i otpadnih voda širom sveta. Više tehničkih izvještaja o pametnim otpadnim vodama biće dostupno uskoro članovima SWAN-a, zajedno sa studijama slučajeva praktičnih referenci. Nov način upravljanja otpadnim vodama je rešenje u okviru jedinstvenog sistema za upravljanje alarmnim sistemima kao deo *SWAN interactive arhitekture* ([www.swan-tool.com](http://www.swan-tool.com)). Osim toga, SWAN ubrzava razvoj pametnih otpadnih voda, na čiju temu se organizuju brojne radionice, istraživačke studije i seminari. Integracija SWAN principa u projektovanje sistema za kanalizaciju i prečišćavanje otpadnih vode je takođe povezana sa mnogim drugim granama i industrije i njihova implementacija otvara vrata neophodnosti komunikacije između različitih tehnoloških grana.



Slika 13. Shematski prikaz koncepta „cirkularne“ ekonomije

Figure 13. Schematic representation of the concept of "circular" economy

## 3.4 Kanalizacija kao element „cirkularne ekonomije“

Cirkularna ekonomija predstavlja nov pristup koji integriše ekonomiju i sistem upravljanja otpadom. Trenutni ekonomski model većine (ako ne i svih) država i kompanija podrazumeva korišćenje resursa naše planete kako bi se proizvelo što više proizvoda od kojih će najveći deo, nažalost, završiti kao otpad. U slučaju Srbije – otpad na deponiji. Ovakav koncept korišćenja i upotrebe resursa se u teoriji naziva linearnim. Malo je reći da je ovo neodrživo sa aspekta životne sredine; radi se o pristupu koji je i ekonomski neisplativ.

Cirkularna ekonomija može biti odgovor na narastajuće potrebe čovečanstva uz poštovanje granica koje naša planeta poseduje: dakle, održivi razvoj u svom najboljem izdanju. Koncept je zamišljen tako da vodi obnovi ekosistema, uz veliki broj inovacija i sa značajnim uticajem na navike društva u celini.

Cirkularna ekonomija u kanalizaciji nije usmerena na problematiku dobijanja i korišćenja vode, ali i u širem smislu prečišćavanje otpadnih voda sa produkcijom mulja. Onovni princip cirkularne ekonomije u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda je ponovno iskorišćenje prečišćene vode i materijalno i energetskom korišćenje mulja. U osnovne principe ovog procesa možemo da svrstamo uštedu vode, korišćenje toplotne energije iz otpadnih voda i korišćeje energije mulja kao i njegove mase.

## 4 Zaključak

Primena principa cirkularne ekonomije u oblasti vodosnabdevanja i kanalisanja neminovno vodi ka inovativnim "pametnim" rešenjima, koja u uslovima ubrzane urbanizacije i potrage za alternativnim izvorima vode i energije postaju neminovnost. Krajnji cilj svakog vodovodnog sistema je da isporuči korisniku kvalitetnu vode u potrebnoj količini i po što nižoj ceni, sa minimalnim utroškom energetskih resursa i uz maksimalnu redukciju zagađenja životne sredine. Istovremeno, sistem kanalizacije treba da obezbedi efikasnu i brzu evakuaciju fekalnih voda u količini produkovanog vodovodnim sistemom i atmosferskih voda u količini produkovanog kanalizacionim sistemom i da ih uz minimalno učešće energije transportuje do prirodnih ili vetačkih recipijenata i prečisti do zahtevanog kvaliteta, uz vraćanje dela vode u proces kruženja vode u prirodi i/ili tehnološki process. Pronalaženje ovakvih rešenja podrazumeva korišćenje velikog broja podataka, multidisciplinarnu i višekriterijumsku analizu prilikom donošenja odluka i to u svim fazama razvoja sistema vodovoda i kanalizacije.

SWAN tehnologije olakšavaju planiranje sistema, pojednostavljaju svakodnevne operacije i održavanje, i poboljšavaju upravljanje mrežnim gubicima vode i njegovim kvalitetom. Ove tehnologije se neprestano razvijaju i obezbeđuju održiva rešenja za hidrotehničke objekte. Pored toga, softver i alati za veštačku inteligenciju (BI) omogućavaju komunalnom preduzeću da koriste podatke iz više diskretnih sistema. Prikupljeni podaci se onda koriste za izračunavanje ključnih indikatora učinka (KPI-Key Performas Indicator) koji pružaju tačne i objektivne informacije u vezi karakteristika vode. Sposobnost da se prezentuju na različite načine takođe omogućava korisnicima da komuniciraju sa različitim vrstama korisnika.

Benefiti ovakvog pristupa su merljivi sa aspekta ukupnog utroška energije, resursa, sirovina. Ali ne samo toga, već i zadovoljstva korisnika i menadžera uključenih u "pametnu" proizvodnju pitke vode - vodovod i "pametno" upravljanje nusproduktima ovakve proizvodnje – kanalizacija.

## Literatura

1. Europe's water: efficient use is a must. European Environment Agency [online]. [cit. 2015-01-05]. <http://www.eea.europa.eu/articles/europe2019s-water-efficient-use-is>
2. Europe's water: efficient use is a must. European Environment Agency [online]. [cit. 2015-01-05]. <http://www.eea.europa.eu/articles/europe2019s-water-efficient-use-is>
3. European Smart Metering Industry Group [online]. Belgie [cit. 2015-01-05]. : <http://esmig.eu/>

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

4. Miller, M. J., Leinmiller, M. Why Smart Water Network Boost Efficiency. In: Water World [online]. [cit. 2014-12-28]. [http://www.wwdmag.com/sites/default/files/998-2095-08-06-14AR0\\_EN.pdf](http://www.wwdmag.com/sites/default/files/998-2095-08-06-14AR0_EN.pdf)
5. What is the smart grid?. Smart Grid [online]. [cit. 2014-12-27]. [https://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/smart\\_grid](https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid)
6. About SW4EU: Background. Smart Water for Europe [online]. [cit. 2015-01-05]. <http://www.smartwater4europe.com/about-sw4eu/background/>
7. IWidget: Project overview. iWidget: Smart meters, Smart water, Smart societies [online]. 2013 [cit. 2015-01-05]. <http://www.i-widget.eu/project/project-overview.html>
8. Sistemi za kontrolu, detekciju i sprečavanje polutanata firme „KONDO“, <http://kando.co.il/#/solution> (2018)
9. Article: „The need for Smart Wastewater Networks“: <https://www.swan-forum.com/wp-content/uploads/sites/218/2016/08/WIPAC-The-Need-for-Smart-Wastewater-Networks.pdf> (2016)

## **Efekti primene savremenih sistema za smanjenje kišnog oticaja na primeru naselja Vojlovica, Pančevo**

Lazar Anđelić<sup>1</sup>, Dušan Prodanović<sup>2</sup>, Nenad Jaćimović<sup>3</sup>, Damjan Ivetić<sup>4</sup>

APSTRAKT: Ubrzani razvoj gradova i urbanizacija ruralnih područja predstavljaju realnost već nekoliko desetina godina u nazad, a taj trend će se neminovno nastaviti i u budućnosti. Urbanizacija utiče na povećanje onog dela urbanog oticaja koji potiče od padavina. Tradicionalni sistemi koji su ranije projektovani za odvođenje urbanog oticaja imali su za cilj da što brže taj oticaj odvedu do recipijenta. U poslednjih petnaest, dvadeset godina javila se potreba za razvojem sistema koji će se baviti kako kontrolom i smanjenjem količine urbanog oticaja, tako i poboljšanjem njegovog kvaliteta uz minimalno narušavanje životne sredine i ekosistema. Tema ovog rada je ispitivanje mogućnosti za implementaciju savremenih sistema za smanjenje kišnog oticaja na teritoriji naselja Vojlovica u Pančevu, korišćenjem modela oticaja u programu EPA SWMM. U radu je izvršeno poređenje rezultata modela oticaja u postojećim uslovima i modela sa korišćenjem savremenih sistema za smanjenje oticaja kao što su zemljani kanali, propusne staze, rezervoari.

Ključne reči: urbani slivovi, smanjenje oticaja, kontrola oticaja, SWMM

## **Effects of the application of modern systems for the reduction of rain runoff on the example of the settlement Vojlovica, Pančevo**

ABSTRACT: The accelerated development of cities and the urbanization of rural areas present the reality for several decades now, and this trend will continue inevitably in the future. Urbanization influences the increase of that part of the urban runoff from the precipitation. Traditional systems that were previously designed for the removal of urban runoff were intended to take the runoff to the recipient as quickly as possible. In the last fifteen, twenty years there has been a need for the development of a system that will deal with controlling and reducing the amount of urban runoff, as well as improving its quality with minimal environmental and ecosystem degradation. The topic of this paper is to examine the possibilities for implementation of modern systems for reducing the runoff in the territory of Vojlovica settlement in Pančevo, using the model of runoff in the software EPA SWMM. In this paper, is made comparison of the results of the runoff model in the existing conditions and models with implementation of modern systems for the reduction of the runoff, such as channels, permeable pavements, reservoirs.

Keywords: urban runoff, storm runoff reduction, runoff control, SWMM

---

<sup>1</sup> Lazar Anđelić, dipl.građ.inž., Rudarski institut d.o.o., Beograd, [lazar.andjelic84@gmail.com](mailto:lazar.andjelic84@gmail.com)

<sup>2</sup> Prof. dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Prof. dr Nenad Jaćimović, Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [njacimovic@grf.bg.ac.rs](mailto:njacimovic@grf.bg.ac.rs)

<sup>4</sup> Damjan Ivetić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet - Univerzitet u Beogradu, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Ubrzani razvoj gradova i urbanizacija ruralnih područja predstavljaju realnost već nekoliko desetina godina u nazad, a taj trend će se neminovno nastaviti i u budućnosti. Prema nekim podacima u gradovima trenutno živi oko 50% svetskog stanovništva. Gradsko stanovništvo koristi oko 75% svih raspoloživih resursa dok gradska područja zauzimaju tek nešto iznad 2% kopnene površine planete. Smatra se da će do polovine 21.veka ubrzana urbanizacija dovesti do toga da u gradovima živi 75% svetske populacije. Ovakav razvoj, osim benefita, sa sobom donosi i određene probleme. Urbanizacija, jasno je, utiče na povećanje urbanog oticaja. S jedne strane, povećanjem broja stanovništva povećavaju se količine otpadnih voda, dok sa stanovišta hidrologije i hidroloških procesa, urbanizacija utiče na povećanje onog dela urbanog oticaja koji potiče od padavina. Tradicionalni sistemi koji su ranije projektovani za odvođenje urbanog oticaja imali su za cilj da što brže taj oticaj odvedu do recipijenta. Pri tom nisu se bavili komponentom poboljšanja kvaliteta tog oticaja pre njegovog ispuštanja u recipijent. U poslednjih petnaest, dvadeset godina javila se potreba za razvojem sistema koji će se baviti kako kontrolom i smanjenjem količine urbanog oticaja, tako i poboljšanjem njegovog kvaliteta uz minimalno narušavanje životne sredine i ekosistema. U literaturi se mogu naći različiti nazivi za ovakve sisteme. Dva najčešće korišćena su: Održivi sistemi za odvođenje urbanog oticaja (eng. Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS) i sistemi koji uz minimalno narušavanje prirodnog režima i stanja na slivu utiču na smanjenje količine i poboljšanje kvaliteta urbanog oticaja (eng. Low Impact Development Systems – LIDs).

Prema definiciji koju je dala Svetska komisija u svom izveštaju iz 1987 (World Commission on Environment and Development – WCED, 1987), održivi razvoj je „onaj koji zadovoljava potrebe i zahteve sadašnjeg stanovništva bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje zahteve“. Dakle, održivi razvoj ima dve komponente, jednu u sadašnjosti i drugu u budućnosti. (Maksimović n.d.) Sistemi i rešenja koja razvijamo u cilju poboljšanja svojih životnih uslova ne smeju biti razvijana na račun ugrožavanja resursa za naredne generacije.

Održivi sistemi za odvođenje urbanog oticaja (SUDS) za primarni cilj imaju, kao i tradicionalni sistemi, odvođenje oticaja ali i poboljšanje njegovog kvaliteta i unapređenje životne sredine. (Kellagher, i drugi 2007) Prema tome postoje tri komponente kojima ovakav sistem treba da se pozabavi: količina oticaja, kvalitet oticaja i unapređenje životne sredine. Idealan održivi sistem (SUDS) je onaj koji podjednako zadovolji sva tri zahteva, vodeći računa o tome da jedan zahtev dobije prednost u odnosu na drugi. Prednosti SuDS-a bi bile maksimizirane uz zajednički rad, odnosno saradnju između inženjera, urbanista, planera, arhitekta i lokalne uprave.

Kao velike pretnje čovečanstvu u budućnosti navode se prirodne i meteorološke katastrofe (poplave, ouje, klizišta, suše itd.). Ovi događaji pokazuju najveći porast u poređenju sa svim drugim katastrofama. Kako bi se smanjio njihov uticaj, danas se teži uvođenju rešenja, odnosno sistema zasnovanih na prirodi (NBS – *Nature-Based Solutions*), umesto tradicionalnih sistema za zaštitu od prirodnih i meteoroloških katastrofa. Prema *Olsen and Bishop (2009)* i *van der Nat et al. (2016)* takva rešenja su i isplativija i primenljivija od tradicionalnih inženjerskih rešenja. Takođe, još jedna bitna stvar je i uticaj ovakvih rešenja na društvene, ekonomske i kulturološke aspekte, pa je to još nešto o čemu treba voditi računa uz sami tehnički razvoj.

## 2 Tema

Pančevo je grad u Banatu, na obali reke Tamiš. Sam grad, sa prigradskim naseljem Starčevo, broji oko 85.000 stanovnika. Pančevo predstavlja urbani centar regiona i kao takav ima potencijal za širenje. Zahvaljujući svojoj arhitekturi, odnosno urbanizmu, grad Pančevo poseduje i veliki potencijal za implementaciju održivih sistema za odvođenje urbanog oticaja (SuDS).

Tema ovog rada je poređenje rezultata implementacije održivih sistema za odvođenje urbanog oticaja na teritoriji grada Pančeva, naselja Vojlovica, korišćenjem modela oticaja u programu EPA SWMM. Model u EPA SWMM-u je dinamički model padavine/oticaaj, koji se koristi kako za



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

pojedinačni slučaj tako i za dugoročnu simulaciju kvaliteta i kvantiteta oticaja, prvenstveno u urbanim sredinama.

SWMM obuhvata razne hidrološke procese koji generišu oticanje sa urbanih područja kao što su:

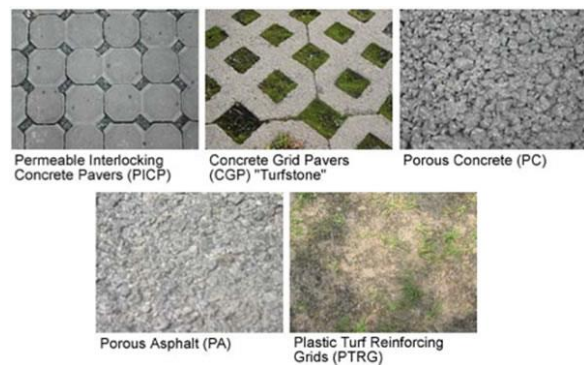
- vremenski promenljive padavine
- isparavanje sa površine stajaćih voda
- akumuliranje i topljenje snega
- prihvatanje i skladištenje padavina u depresijama
- infiltracija padavina u nezasićene slojeve podzemnih voda
- prelivanje između podzemnih voda i drenažnih sistema
- nelinearno snabdevanje rezervoara
- prihvatanje i zadržavanje padavina/oticaaja različitim sistemima koji minimalno narušavaju prirodni režim i stanje na slivu

U okviru ovog rada biće prikazani rezultati primene tri LID (eng. Low Impact Development) elementa, “rain garden”, koji će u konkretnom slučaju predstavljati kanal određenih dimenzija iskopan u prirodnom materijalu u okviru odabranog subcatchment-a (Slika 1), “permeable pavement” odnosno propusni pločnik-staza, koji će u ovom modelu biti implementiran u subcatchment na kom se nalazi parking i predstavljace vodopropusne behaton ploče (Slika 2), kao i sistem postavljanja “rezervoara” između dva šahta, a ispod standardnog cevovoda, koji će biti modeliran primenom SWMM alata “orifice link” i “storage node” (Slika 3).



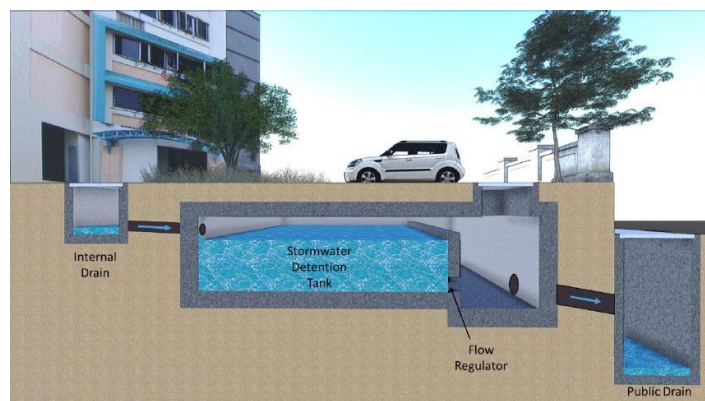
Slika 1. Primer izgleda jednog zatravnjenog kanala

Figure 1. An example of a grassy channel



Slika 2. Primeri nekoliko vodopropusnih pločnika

Figure 2. Examples of several permeable pavements



Slika 3. Primer korišćenja rezervoara između šahtova kišne kanalizacije

Figure 3. An example of using a reservoir between two manholes of rainwater drainage

## 3 Model

### 3.1 Uvod

U programskom paketu EPA SWMM, verzija 5.1 i novije, postoji mogućnost za korišćenje gotovih "alata" za modeliranje nekih karakterističnih SUDS, odnosno LID, elemenata. Takvi elementi se prvo definišu, sa svim svojim karakteristikama, a zatim se implementiraju u željenu slivnu površ (Subcatchment). Za svaki element je potrebno znati osnovne karakteristike, dimenzije, stepen pokrivenosti vegetacijom, kvalitet i karakteristike zemljišta, odnosno materijala itd. U uputstvu za korišćenje programa (User Manual), detaljno su opisani svi parametri koje treba uneti, u kojim se dimenzijama unose kao i šta konkretno predstavljaju.

Jedan od osnovnih podataka koje treba uneti za svaki LID element je procenat površine koji zauzima unutar date slivne površi (Subcatchment). Najveći problem korisnicima, sudeći prema stručnim, predmetnim internet forumima, predstavlja uticaj određenog LID elementa na samu slivnu površ, odnosno, način na koji se menjaju površina i procenat nepropusnih (samim tim i propusnih) površina unutar definisane slivne površi. Razjašnjenje ovog problema i toga kako program "posmatra" LID elemente, dato je u nastavku.

Pri definisanju LID elementa, odnosno pri njegovom implementiranju u subcatchment, potrebno je definisati površinu koju zauzima jedan LID element kao i koliko takvih elemenata ima na izabranom subcatchment-u. Program će tada sam sračunati koliki je procenat površine subcatchment-a koju će zauzimati LID element. Međutim, taj podatak neće imati uticaj na karakteristike samog subcatchment-a. Unutar prozora za unošenje podataka o subcatchment-u, potrebno je izmeniti podatke o procentu vodonepropusnih površina. Novi procenat vodonepropusnih površina predstavljao bi odnos vodonepropusne površine na kojoj se ne nalazi LID i ukupne površine bez LID elementa.

Način na koji se to radi, može se prikazati na primeru jednog subcatchment-a ukupne površine 10ha. U koliko smo definisali da je bez LID elemenata procenat vodonepropusnih površina 30%, to znači da je ukupna vodonepropusna površina 3ha, dok je ukupna vodopropusna površina 7ha. Ako izabrani LID svojom površinom zauzima 20% ukupne površine, odnosno 2ha i celom svojom površinom se nalazi na vodopropusnom terenu, to znači da će ukupna površina subcatchment-a bez LID-a biti  $10-2=8$ ha, dok će površine vodopropusnog i vodonepropusnog terena bez LID-a redom biti  $7-2=5$ ha, odnosno  $3-0=3$ ha. Novi procenat vodonepropusnih površina izabranog subcatchment-a će biti  $3/8=37.5\%$ . Istom analogijom, za slivnu površ površine 10ha, gde je po 50% vodopropusnih i vodonepropusnih površina, implementiranjem LID elementa koji zauzima 1ha vodopropusnih i 2ha vodonepropusnih površina dobijamo: površina bez LID-a je  $10-3=7$ ha, površina vodopropusnog terena  $5-1=4$ ha, a površina vodonepropusnog terena  $5-2=3$ ha. Odavde sledi da je sada novi procenat vodonepropusnih površina  $3/7=42.8\%$ .

### 3.2 Podaci modela

Odabir mogućih, odnosno odgovarajućih, optimalnih LID sistema i njihova implementacija u model na teritoriji celog jednog naselja je veoma zahtevan i dugotrajan posao. U ovom radu su odabrane dve slivne površi, odnosno dva subcatchment-a, koja na adekvatan način mogu reprezentovati rezultate primene određenih LID sistema.

Subcatchment S40801 koji u prirodnim, odnosno trenutnim uslovima ima slivnu površ od oko 19.14 ha, sa prosečnim nagibom od oko 0.92% i oko 20.2% vodonepropusnih površina. Čvor, odnosno šaht koji prihvata oticaj sa ove slivne površi je čvor 6834. Kota dna ovog šahta je na 75.99 mnm, sa maksimalnom dubinom 1.2 m od površine terena. Dalje, oticaj ide cevovodom 7666 u kome je maksimalna visina punjenja 0.4 m i dužine oko 471 m, do čvora 6838. Šaht u ovom čvoru je maksimalne dubine 1.47 m, a kota dna je na 74.76 mnm. Na ovoj slivnoj površi, sa svim pratećim segmentima, ispitani su rezultati primene LID sistema „rain garden“, odnosno iskopa zemljanog, zatravnjenog kanala, i implementacije vodopropusnog rezervoara između čvorova 6834 i 6838.

Rezultati primene vodopropusnih pločnika (permeable pavement), prikazani su na subcatchment-u S40641 na čijoj se površini nalazi asfaltirani parking približne dimenzije 60x150m.

Ukupna površina ovog sliva je 59.74 ha, sa prosečnim padom oko 0.79%, dok je procenat vodonepropusnih površina 20.2%. Površinski oticaj sa ovog sliva odlazi u šaht u čvoru 6622, čija je maksimalna dubina 1.81 m i kota dna na 75.19 mm.

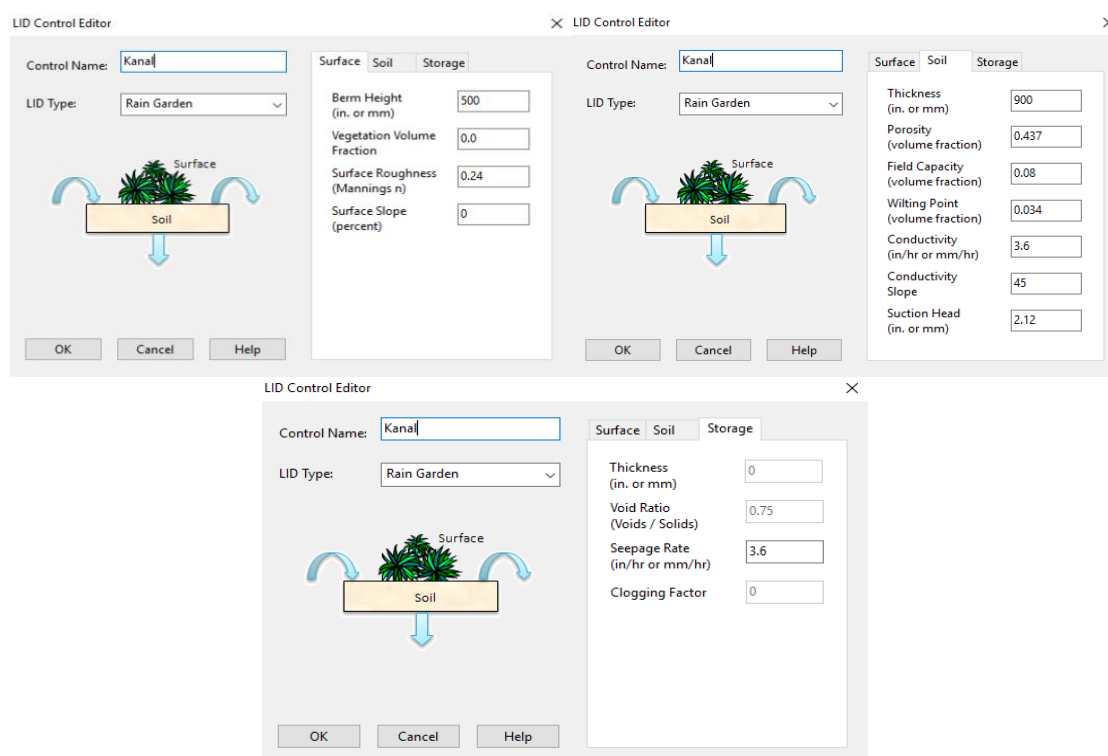
U šahtove na čvorovima 6838 i 6628 dolaze i cevovodi iz drugih šahtova sa određenim količinama vode koje i pre i posle implementacije LID sistema za potrebe ovog rada ostaju iste, pa će se efekti implementacije LID sistema ogledati u razlici ova dva rezultata.

Za potrebe ovog rada, kao ulazni podatak modela, odabrana je merodavna velika kiša (Raingage), 15-minutna kiša intenziteta 118 mm/h/ha. Rezultati svih ovih proračuna dati su u nastavku rada.

## 4 Rezultati

### 4.1 Rain garden – zemljani, zatravnjeni kanal

Implementacija otvorenog, zemljanog kanala u slivnu površ S40801, modelirana je na dva načina, primenom LID alata „rain garden“, i primenom standardnih SWMM alata, vodopropusnog rezervoara, odnosno „storage node“. U nastavku sa date karakteristike oba modela, odnosno korišćenih alata, a rezultati su prikazani na kraju, zbirno, radi lakšeg poređenja.



Slika 4. Karakteristike zadatog „rain garden“-a

Figure 4. Set characteristics of „rain garden“

#### 4.1.1 Rain garden

Kao što je već napomenuto, LID element rain garden u ovom slučaju predstavlja zemljani kanal. Pretpostavljena dubina punjenja kanala je 0.5m, srednja širina 1.0m i dužina 470m. Karakteristike ovog kanala, odnosno zadatog rain garden-a su, prema SWMM LID editoru, date su na Slici 4. U modelu je moguće podesiti procenat oticaja sa vodonepropusnih površina koja dolazi do LID sistema. Ovde je usvojeno da 100% oticaja sa vodonepropusnih površina dolazi do kanala. Dalje, u zavisnosti od trenutne zapunjenosti kanala, voda se zadržava ili preliiva. Kanal je modeliran samo kao rezervoar

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

za vodu, sa ravnim dnom i bez sopstvenog izliva. Sva voda koja se u njemu zadrži, u nekom trenutku će infiltrirati u zemlju.

## 4.1.2 Storage node

Ovaj slučaj, odnosno model, urađen je praktično kao pokušaj modeliranja prethodnog LID sistema, rain garden-a, pomoću standardnih SWMM alata. Postavljen je „storage node“, rezervoar, približno iste zapremine kao kanal u prethodnom slučaju. Visina punjenja rezervoara je ograničena na 0.5m. Dno i stranice rezervoara su vodopropusne, sa istim koeficijentom vodopropusnosti, 3.6 mm/h. Površinski oticaj sa predmetnog sliva, subcatchment-a S40801, sada ide pravo u rezervoar. Kao dodatak ovom modelu, bilo je neophodno postaviti „idealnu“ pumpu (pumpu koja prepumpava kompletnu količinu vode, sa zadatim kotama uključivanja i isključivanja) koja svu vodu iznad kote 0.5 m u rezervoaru prepumpava u šaht u čvoru 6834. Na taj način je regulisan slučaj viška vode, odnosno vode koja prelije reko kanala, a koja svakako na kraju završi u šahtu. Za razliku od prethodnog slučaja, ovde se proračunom u dovoljno dugom vremenskom periodu, može dobiti trenutak kada će rezervoar, odnosno kanal ponovo ostati potpuno prazan u slučaju da nema novih padavina, odnosno dobija se visina zapunjenosti kanala u bilo kom trenutku proračuna.

## 4.1.3 Poređenje rezultata

Zbog preglednijeg prikaza rezultata, tabele su u ovom radu prikazane kao slike. Takođe, iz istog razloga, prikazani su rezultati proračuna do 10h od početka padavina. Svi tabelarni rezultati dati su kao prilozi. U Prilogu 1, prikazani su uporedni rezultati modela trenutnog stanja, sa primenom LID-a (rain garden) i sa primenom „storage node“-a. Na slici 5 je prikazano tabelarno poređenje ovih rezultata.

## 4.1.4 Komentar rezultata

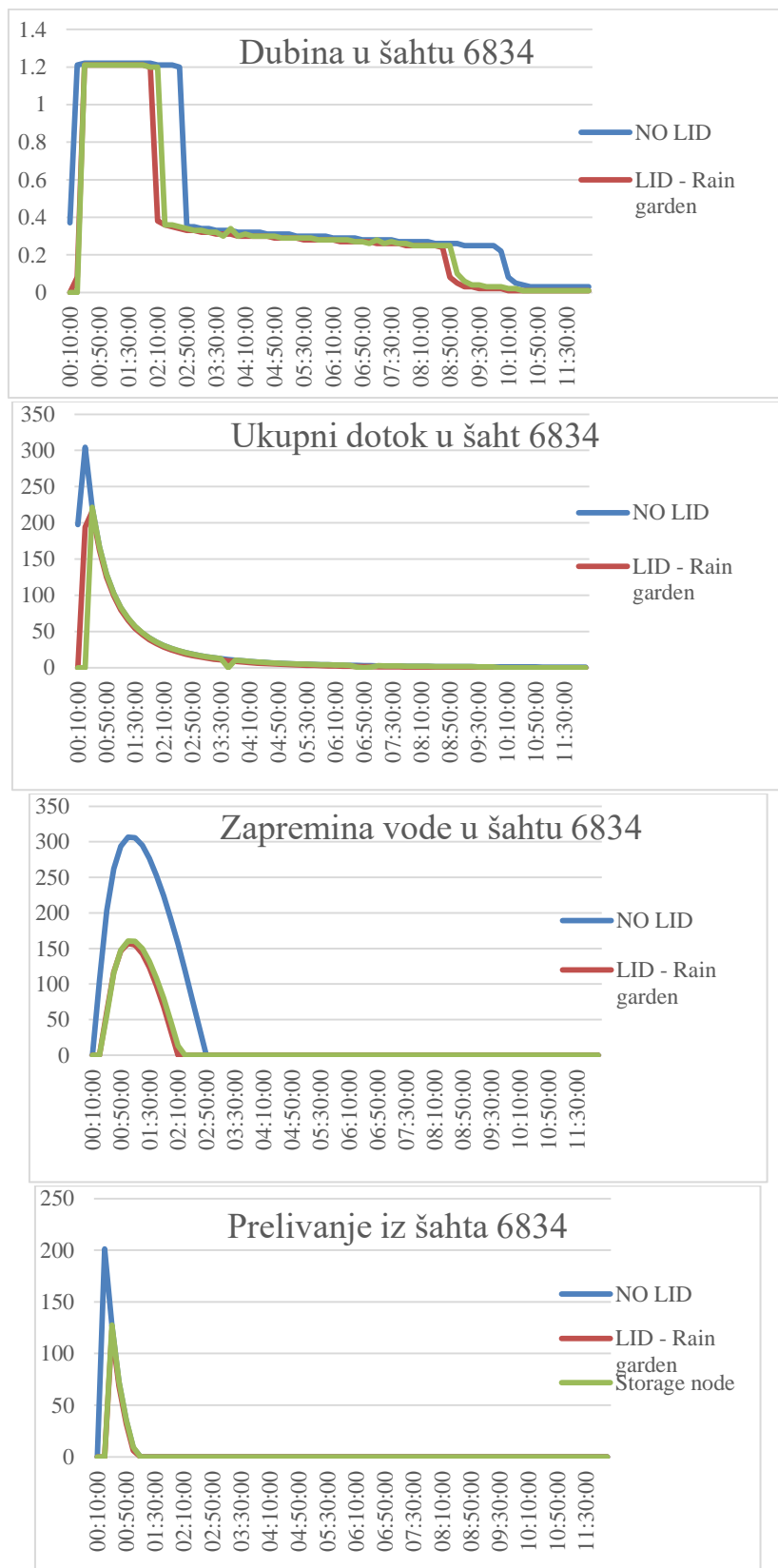
U priloženim dijagramima, prikazani su rezultati modela u šahtu u čvoru 6834. Isti rezultati su prikazani i u tabeli u Prilogu 1. U tabeli su prikazani: Depth – dubina vode u šahtu; Head – apsolutna kota vode u šahtu; Volume – zapremina vode u šahtu; Total inflow – ukupni doticaj vode u šaht; Flooding – prelivanje, količina vode koja preliva iz šahta.

Kao što se može videti na priloženim dijagramima, rezultati dva modela, „rain garden“ i „storage node“ daju jako slične rezultate, što je i u redu jer zapravo predstavljaju isto rešenje. Razlike koje se javljaju u rezultatima mogu biti usled nekoliko faktora. Rezervoar je definisan samo svojom zapreminom i koeficijentom vodopropusnosti dok kod „rain garden“-a u LID Editoru postoji još nekoliko karakteristika zemljišta koje mogu uticati na rezultate. Dalje, pretpostavka je da implementacijom „rain garden“-a u slivnu površ, određena količina vode sa površi može doći i direktno u šaht (osim vode sa vodonepropusnog dela sliva, jer je na početku definisano da ovaj oticaj odlazi u kanal), dok u drugom slučaju ukupan oticaj sa sliva dolazi u rezervoar, odakle višak ide u šaht. Prednost drugog slučaja, odnosno rezervoara, je ta što dovoljno dugim proračunom možemo doći do trenutka kada rezervoar, odnosno kanal ostaje ponovo prazan (kada zemlja upije svu vodu). Takođe, na ovaj način je moguće i pratiti nivo vode u kanalu po vremenu, što u prvom slučaju nije moguće. Za prikazane uslove kanal će potpuno isušiti nakon oko 6 dana i 8h.

Ono što je u ovom modelu bilo najbitnije pokazati, odnosno što predstavlja temu ovog rada, jeste da implementacija LID sistema, u ovom slučaju daje uočljive rezultate. Postavljanjem (iskopavanjem) kanala predloženih dimenzija, što je na datom slivu u konkretnom slučaju na terenu potpuno izvodljivo, smanjilo bi količinu vode koja preliva preko šahta i odložilo pik, odnosno maksimum prelivanja. Iz priloženih tabela se može videti da bi u slučaju velikih kiša maksimum prelivanja bio smanjen za skoro 50%. Ako se u obzir uzme da je ovo samo jedna slivna površ i samo jedan šaht, jasno je da bi implementacija ovog tipa LID sistema na celom slivu (gde uslovi na terenu to dozvoljavaju) znatno poboljšala upravljanje oticajem u periodima velikih kiša. Na velikoj površini naselja Vojlovica, odnosno na velikom broju slivnih površi, postoji mogućnost primene ovog LID sistema, istih ili sličnih karakteristika.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 5. Uporedni rezultati modela u čvoru 6834 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Figure 5. Comparative results of the model in the node 6834 (rain 15min – 118mm/h/ha)

## 4.2 Podzemni, vodopropusni rezervoar između dva šahta

Ovaj primer LID sistema, odnosno sistema za smanjenje površinskog oticaja, modeliran je uz pomoć standardnih SWMM paketa, „orifice link“ i „storage node“, s tim što je u prvom slučaju korišćen vodopropusni rezervoar („storage node“), sa koeficijentom filtracije 3.6mm/h, a u drugom slučaju vodonepropusni, sa dodatkom pumpe čija je kriva zadata na osnovu dubine vode u rezervoaru, odnosno površine koja je pod vodom. Kapacitet pumpe odnosno protok je zadat kao proizvod koeficijenta filtracije i trenutne površine rezervoara koja je pod vodom (površina dna i stranica).

Rezervoar je postavljen između šahtova u čvorovima 6834 i 6838. Treba imati u vidu da čvor 6838 predstavlja i čvor u koji se uliva površinski oticaj sa susednog sliva, kao i još jedan cevovod. Podaci, odnosno količina vode koja dolazi iz ova dva „izvora“ do čvora 6838 su nepromenjeni u svim varijantama, pa su dati rezultati korisni za poređenje implementacije sistema na jednom slivu, odnosno jednom cevovodu.

U modelu u ovom radu, „orifice link“ je zadat kao kružni otvor, prečnika 0.2m i nalazi se pri dnu šahta. Rezervoar, odnosno „storage node“, je širine 1.0m i dužine 470m, što je približno rastojanje između dva šahta. Maksimalna dubina vode u rezervoaru je 1.0m. Cevovod koji direktno spaja dva šahta, pomeren je na veću visinu, odnosno, postavljen je tako da se vrh ove cevi poklapa sa vrhom rezervoara. U nastavku, na slikama 6 i 7, prikazani su uporedni rezultati modela trenutnog stanja i slučaja postavljanja podzemnog rezervoara između šahtova (obe varijante modela) u šahtovima 6834 i 6838. Isti rezultati prikazani tabelarno, dati su u Prilozima 2 i 3.

### 4.2.1 Komentar rezultata

Kao što se može videti u svim priloženim dijagramima i tabelama u Prilozima 2 i 3, rezultati modela ovog sistema postavljeni na dva različita načina, daju gotovo identične rezultate. To pokazuje način na koji funkcioniše koeficijent vodopropusnosti unutar „storage node“ editora, i daje mogućnost za primenu pumpe kao zamene za infiltraciju u modelu, naravno, sa unapred definisanim karakteristikama, odnosno tačno zadatom krivom.

Dalje, kao što je to bio slučaj i sa zemljanim kanalom, i ovaj sistem daje značajno poboljšanje u upravljanju površinskim oticajem. Maksimalno prelivanje vode u oba čvora je odloženo i znatno smanjeno. Mogućnost primene ovog sistema u naselju Vojlovica je takođe široka, ali treba napomenuti da bi izvođenje radova na implementaciji ovakvog sistema zahtevalo mnogo veće radove i ulaganja nego što je to slučaj npr. sa iskopom kanala.

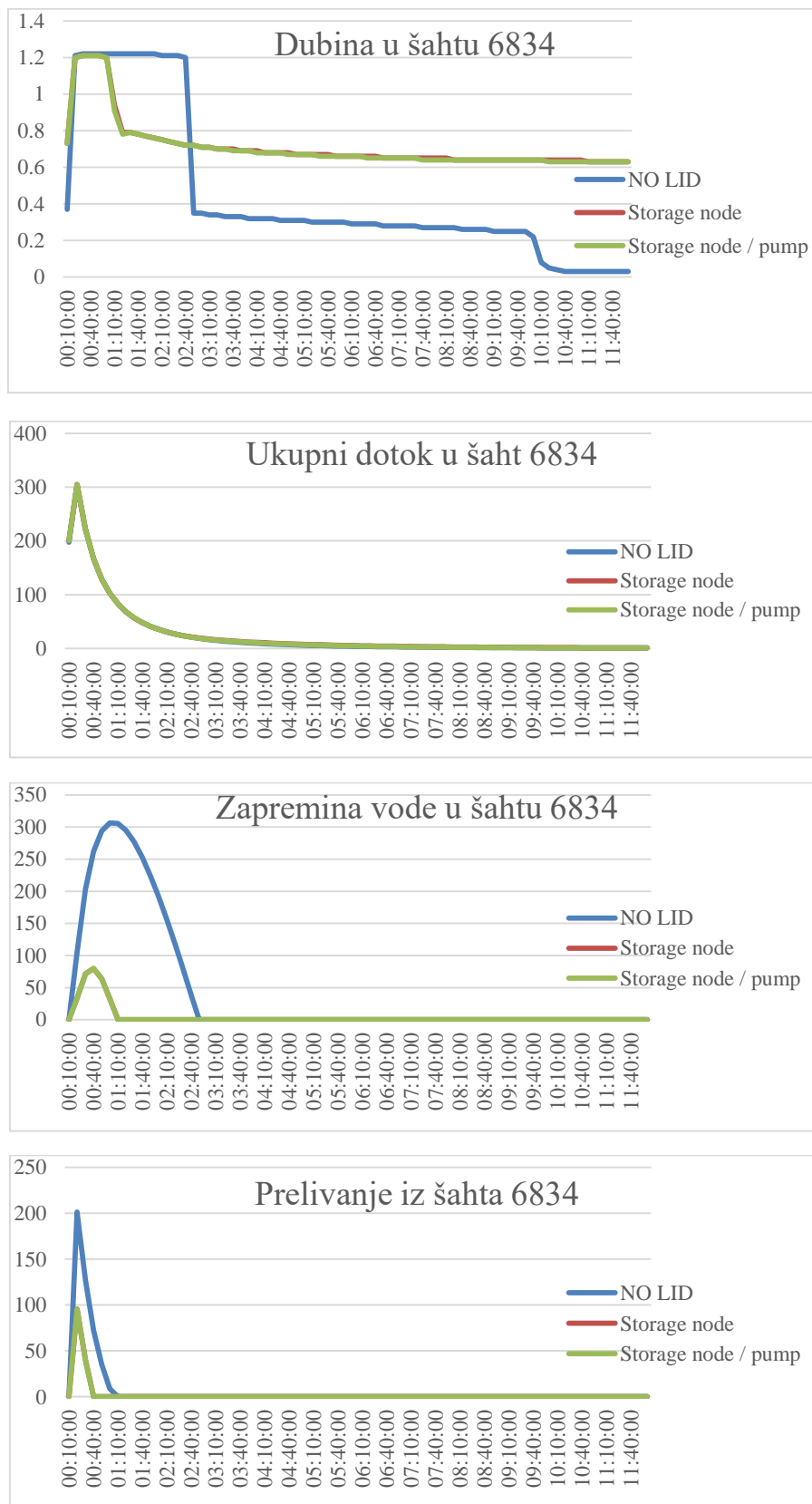
## 4.3 Permeable pavement - vodopropusni pločnik

Vodopropusni pločnik, odnosno „permeable pavement“, predstavlja još jedan LID alat unutar programa SWMM čiji su rezultati primene ispitani u ovom radu. Kao što je ranije već rečeno, rezultati primene ovog LID sistema prikazani su na subcatchment-u S40641 na čijoj se površini nalazi vodonepropusni asfaltirani parking. Pretpostavka je da će LID sistem zauzimati 1.5% vodonepropusnih površina na ovom slivu. Karakteristike ovog LID sistema, date su na slici 8.

### 4.3.1 Poređenje rezultata

U ovom radu izvršeno je poređenje rezultata sa i bez primene LID sistema „permeable pavement“, odnosno uticaj istog na šaht koji prima direktni oticaj sa predmetnog sliva. Odabrani LID sistem u konkretnom slučaju predstavlja parking izveden od vodopropusnih behaton ploča, dimenzija 60x150 m, umesto postojeće asfaltne površine. Na slici 9 prikazani su uporedni rezultati u čvoru 6622, kao i količine površinskog oticaja sa sliva S40641. I ovde treba napomenuti da u predmetnom čvoru postoje i drugi doticaji, ali se oni ne menjaju pa je moguće izvršiti analizu uticaja jednog LID sistema na ovoj slivnoj površi.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

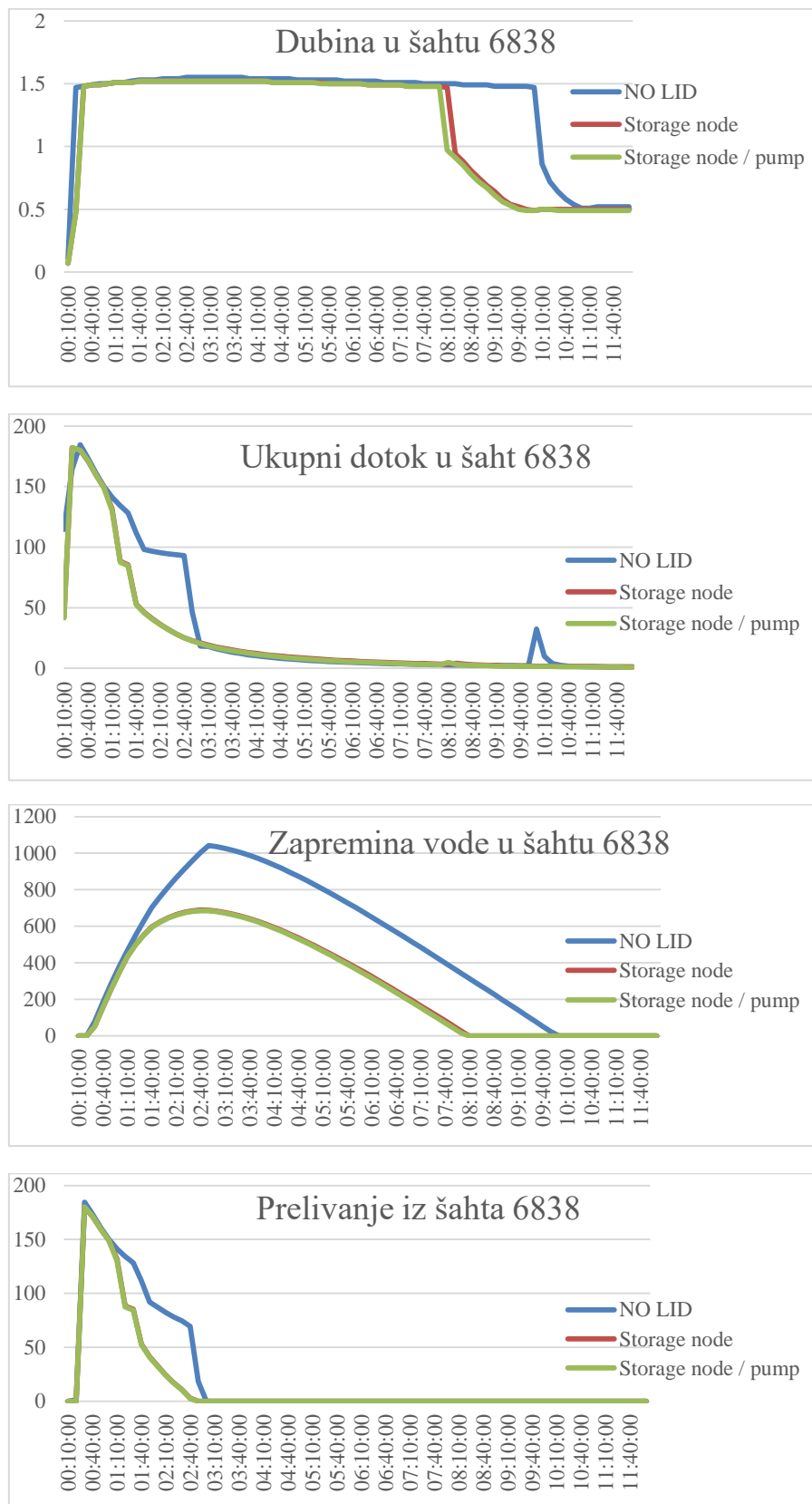


Slika 6. Usporedni rezultati modela u uzvodnom čvoru 6834 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Figure 6. Comparative results of the model in the upstream node 6834 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

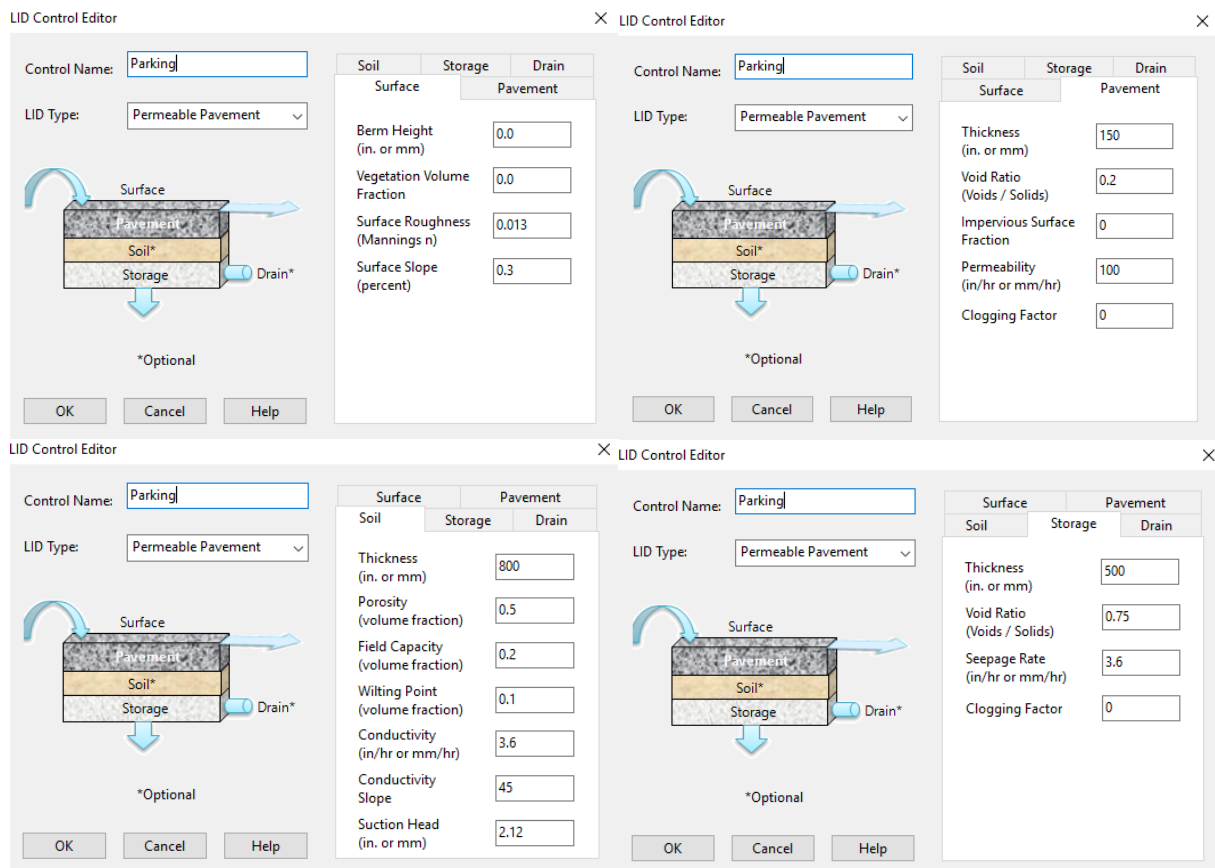


Slika 7. Usporedni rezultati modela u nizvodnom čvoru 6838 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Figure 7. Comparative results of the model in the downstream node 6838 (kiša 15min – 118mm/h/ha)



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

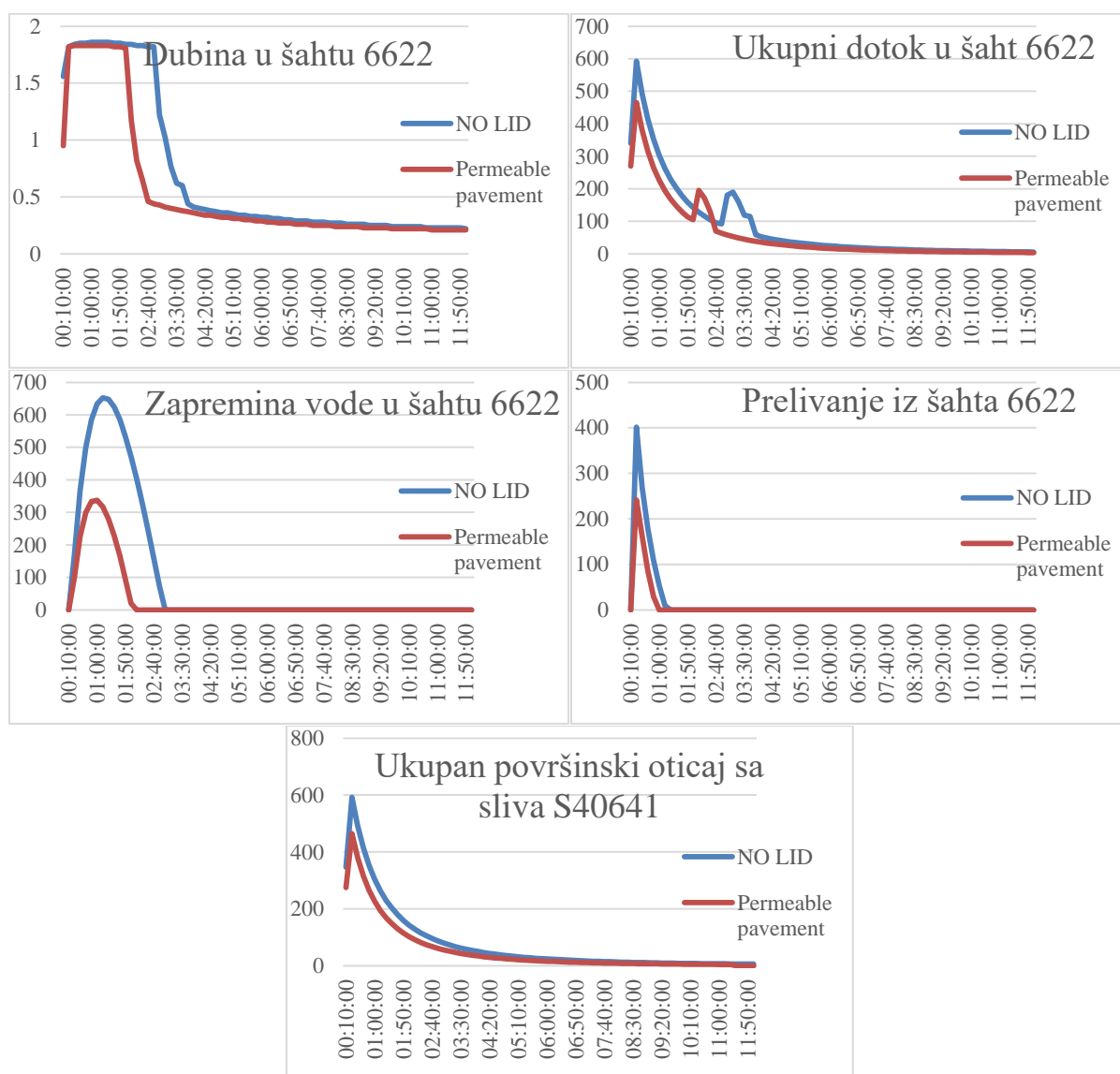


Slika 8. Karakteristike zadatog „permeable pavement“-a

Figure 8. Set characteristics of „permeable pavement“

## 4.3.2 Komentar rezultata

Kao što se može zaključiti prema priloženim dijagramima i tabeli u Prilogu 4, primena ovakvog LID sistema, zamena asfaltirane površine parkinga vodopropusnim pločama, daje veoma dobre rezultate po pitanju smanjenja površinskog oticaja. To se može videti i u rezultatima oticaja sa slivne površi i u rezultatima šahta u koji se taj oticaj izliva. Maksimum preliivanja u ovom šahtu je odložen i smanjen za skoro 50%. Pri tome, treba napomenuti da zadata površina parkinga od 9000m<sup>2</sup>, na ovom slivu predstavlja svega oko 1.5% površine, odnosno, smanjuje procenat vodonepropusnih površina sa 20.2% na oko 18.7%. Iz svega ovoga se može zaključiti da bi zamena asfaltnih površina na parkinzima, vodopropusnim pločama dala i te kako dobre rezultate po pitanju smanjenja površinskog oticaja, bilo da je reč o manjim ili većim površinama. Da bi efekti bili veći, u zavisnosti od konkretnih uslova na terenu, bilo bi potrebno izvršiti i zamenu manjeg ili većeg sloja zemlje ispod samih ploča, kako bi koeficijent filtracije ovog zemljišta bio veći.



Slika 9. Uporedni rezultati modela u čvoru 6622 i subcatchmentu S40641 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Figure 9. Comparative results of the model in the node 6622 and subcatchment S40641 (rain 15min – 118mm/h/ha)

## 5 Zaključak

Tema ovog rada bila je poređenje rezultata implementacije održivih sistema za odvođenje urbanog oticaja na teritoriji grada Pančeva, naselja Vojlovica, korišćenjem modela oticaja u programu EPA SWMM. U radu su prikazani rezultati primene tri LID (eng. Low Impact Development) elementa, “rain garden”, koji u konkretnom slučaju predstavlja kanal iskopan u prirodnom materijalu u okviru odabranog subcatchment-a, “permeable pavement” odnosno propusni pločnik-staza, koji je u ovom modelu implementiran u subcatchment na kom se nalazi parking i predstavlja vodopropusne behaton ploče, kao i sistem postavljanja “rezervoara” između dva šahta, a ispod standardnog cevovoda, koji je modeliran primenom SWMM alata “orifice link” i “storage node”.

Pored toga što su za potrebe ovog rada prikazani rezultati primene LID sistema samo na po jednoj slivnoj površi, rezultati njihove primene su evidentni. U svim prikazanim tabelama, mogu se videti pozitivni efekti primene LID sistema. Odabir optimalnog sistema za smanjenje površinskog

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

oticaja je kompleksan posao i zavisi od mnogo faktora. Konfiguracija terena, izgrađenost naselja, tehničke mogućnosti za izvođenje radova, ekonomski faktor, samo su neki od njih, ali ono što se i iz ovog rada može zaključiti jeste da će svaki implementirani LID sistem, koji je adekvatno osmišljen i isprojektovan, dati dobre rezultate i smanjiti površinski oticaj. Rezultati prikazani u ovom radu samo potvrđuju potrebu za daljim ispitivanjima mogućnosti primene LID sistema u svim urbanim sredinama.

## Literatura

1. Vasilić Ž. (2013): Održivi sistemi za kontrolu urbanog oticaja; dimenzionisanje i analiza funkcionisanja infiltracionog bazena na ekperimentalnom slivu, Seminarski rad, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
2. Maksimović Č.: "General overview of urban drainage principles and practice"
3. Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R.: The SuDS Manual, CIRIA, London 2015.
4. Woods Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R., Shaffer P.: The SUDS Manual, CIRIA, London 2007.
5. Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual Version 5.1

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Prilog 1. Uporedni rezultati modela u čvoru 6834 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Hours	NO LID					LID - Rain garden					Storage node				
	Node 6834					Node 6834					Node 6834				
	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)
0:10:00	0.37	76.36	0	197.66	0	0	75.99	0	0	0	0	75.99	0	0	0
0:20:00	1.21	77.2	104.91	304.52	201.13	0.08	76.07	0	194.26	0	0	75.99	0	0	0
0:30:00	1.22	77.21	203.32	221.06	126.82	1.21	77.2	60.51	215.87	122.17	1.21	77.2	56.33	221.49	127.51
0:40:00	1.22	77.21	262.01	166.51	72.33	1.21	77.2	116.72	162.41	68.66	1.21	77.2	115.46	166.84	73.05
0:50:00	1.22	77.21	293.61	129.06	35.12	1.21	77.2	146.28	125.48	31.99	1.21	77.2	147.48	129.39	35.78
1:00:00	1.22	77.21	306.35	102.43	8.76	1.21	77.2	157.25	99.24	6.01	1.21	77.2	160.62	102.7	9.42
1:10:00	1.22	77.21	305.57	82.89	0	1.21	77.2	154.9	80	0	1.21	77.2	160.23	83.1	0
1:20:00	1.22	77.21	294.81	68.18	0	1.21	77.2	142.7	65.5	0	1.21	77.2	149.83	68.38	0
1:30:00	1.22	77.21	276.52	56.9	0	1.21	77.2	123.09	54.34	0	1.21	77.2	131.89	57.07	0
1:40:00	1.22	77.21	252.44	48.06	0	1.21	77.2	97.77	45.67	0	1.21	77.2	108.14	48.24	0
1:50:00	1.22	77.21	223.83	41.02	0	1.21	77.2	67.99	38.75	0	1.21	77.2	79.83	41.19	0
2:00:00	1.22	77.21	191.62	35.36	0	1.2	77.19	34.67	33.18	0	1.2	77.19	47.92	35.51	0
2:10:00	1.21	77.2	156.52	30.74	0	0.38	76.37	0	28.63	0	1.2	77.19	13.1	30.86	0
2:20:00	1.21	77.2	119.09	26.92	0	0.36	76.35	0	24.87	0	0.36	76.35	0	27.02	0
2:30:00	1.21	77.2	79.75	23.72	0	0.35	76.34	0	21.75	0	0.36	76.35	0	23.83	0
2:40:00	1.2	77.19	38.84	21.04	0	0.34	76.33	0	19.12	0	0.35	76.34	0	21.13	0
2:50:00	0.35	76.34	0	18.76	0	0.33	76.32	0	16.9	0	0.34	76.33	0	18.85	0
3:00:00	0.35	76.34	0	16.82	0	0.33	76.32	0	14.99	0	0.33	76.32	0	16.89	0
3:10:00	0.34	76.33	0	15.13	0	0.32	76.31	0	13.36	0	0.33	76.32	0	15.21	0
3:20:00	0.34	76.33	0	13.69	0	0.32	76.31	0	11.95	0	0.32	76.31	0	13.75	0
3:30:00	0.33	76.32	0	12.42	0	0.31	76.3	0	10.72	0	0.32	76.31	0	12.48	0
3:40:00	0.33	76.32	0	11.32	0	0.31	76.3	0	9.65	0	0.3	76.29	0	0	0
3:50:00	0.33	76.32	0	10.35	0	0.31	76.3	0	8.71	0	0.34	76.33	0	10.39	0
4:00:00	0.32	76.31	0	9.49	0	0.3	76.29	0	7.88	0	0.3	76.29	0	9.54	0
4:10:00	0.32	76.31	0	8.73	0	0.3	76.29	0	7.14	0	0.31	76.3	0	8.77	0
4:20:00	0.32	76.31	0	8.05	0	0.3	76.29	0	6.49	0	0.3	76.29	0	8.09	0
4:30:00	0.32	76.31	0	7.43	0	0.3	76.29	0	5.91	0	0.3	76.29	0	7.48	0
4:40:00	0.31	76.3	0	6.89	0	0.3	76.29	0	5.38	0	0.3	76.29	0	6.93	0
4:50:00	0.31	76.3	0	6.4	0	0.29	76.28	0	4.91	0	0.3	76.29	0	6.43	0
5:00:00	0.31	76.3	0	5.95	0	0.29	76.28	0	4.49	0	0.29	76.28	0	5.99	0
5:10:00	0.31	76.3	0	5.55	0	0.29	76.28	0	4.11	0	0.29	76.28	0	5.58	0
5:20:00	0.3	76.29	0	5.19	0	0.29	76.28	0	3.76	0	0.29	76.28	0	5.22	0
5:30:00	0.3	76.29	0	4.86	0	0.28	76.27	0	3.45	0	0.29	76.28	0	4.88	0
5:40:00	0.3	76.29	0	4.55	0	0.28	76.27	0	3.16	0	0.29	76.28	0	4.58	0
5:50:00	0.3	76.29	0	4.28	0	0.28	76.27	0	2.89	0	0.28	76.27	0	4.3	0
6:00:00	0.3	76.29	0	4.02	0	0.28	76.27	0	2.66	0	0.28	76.27	0	4.05	0
6:10:00	0.29	76.28	0	3.79	0	0.28	76.27	0	2.44	0	0.28	76.27	0	3.81	0
6:20:00	0.29	76.28	0	3.57	0	0.27	76.26	0	2.24	0	0.28	76.27	0	3.59	0
6:30:00	0.29	76.28	0	3.38	0	0.27	76.26	0	2.05	0	0.28	76.27	0	3.4	0
6:40:00	0.29	76.28	0	3.19	0	0.27	76.26	0	1.88	0	0.27	76.26	0	0.77	0
6:50:00	0.28	76.27	0	3.02	0	0.27	76.26	0	1.72	0	0.27	76.26	0	0	0
7:00:00	0.28	76.27	0	2.87	0	0.27	76.26	0	1.58	0	0.26	76.25	0	0.87	0
7:10:00	0.28	76.27	0	2.72	0	0.26	76.25	0	1.44	0	0.28	76.27	0	2.74	0
7:20:00	0.28	76.27	0	2.58	0	0.26	76.25	0	1.32	0	0.26	76.25	0	2.6	0
7:30:00	0.28	76.27	0	2.46	0	0.26	76.25	0	1.2	0	0.27	76.26	0	2.47	0
7:40:00	0.27	76.26	0	2.34	0	0.26	76.25	0	1.1	0	0.26	76.25	0	2.35	0
7:50:00	0.27	76.26	0	2.23	0	0.25	76.24	0	1	0	0.26	76.25	0	2.24	0
8:00:00	0.27	76.26	0	2.13	0	0.25	76.24	0	0.9	0	0.25	76.24	0	2.14	0
8:10:00	0.27	76.26	0	2.03	0	0.25	76.24	0	0.81	0	0.25	76.24	0	2.04	0
8:20:00	0.27	76.26	0	1.94	0	0.25	76.24	0	0.73	0	0.25	76.24	0	1.95	0
8:30:00	0.26	76.25	0	1.86	0	0.25	76.24	0	0.66	0	0.25	76.24	0	1.87	0
8:40:00	0.26	76.25	0	1.78	0	0.24	76.23	0	0.58	0	0.25	76.24	0	1.78	0
8:50:00	0.26	76.25	0	1.7	0	0.08	76.07	0	0.52	0	0.25	76.24	0	1.71	0
9:00:00	0.26	76.25	0	1.63	0	0.05	76.04	0	0.46	0	0.1	76.09	0	1.64	0
9:10:00	0.25	76.24	0	1.56	0	0.03	76.02	0	0.4	0	0.06	76.05	0	1.57	0
9:20:00	0.25	76.24	0	1.5	0	0.03	76.02	0	0.34	0	0.04	76.03	0	1.51	0
9:30:00	0.25	76.24	0	1.44	0	0.02	76.01	0	0.29	0	0.04	76.03	0	1.45	0
9:40:00	0.25	76.24	0	1.38	0	0.02	76.01	0	0.24	0	0.03	76.02	0	1.39	0
9:50:00	0.25	76.24	0	1.33	0	0.02	76.01	0	0.19	0	0.03	76.02	0	1.34	0
10:00:00	0.22	76.21	0	1.28	0	0.02	76.01	0	0.15	0	0.03	76.02	0	0	0

## Prilog 2. Uporedni rezultati modela u uzvodnom čvoru 6834 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Hours	Node 6834 - uzvodni šaht					Orifice link + storage node					Orifice link + storage node + pump				
	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)	Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)
0:10:00	0.37	76.36	0	197.66	0	0.73	76.72	0	200.9	0	0.73	76.72	0	200.9	0
0:20:00	1.21	77.2	104.91	304.52	201.13	1.2	77.19	33.45	304.57	95.61	1.2	77.19	33.45	304.57	95.6
0:30:00	1.22	77.21	203.32	221.06	126.82	1.21	77.2	71.3	221.1	40.08	1.21	77.2	71.28	221.11	40.05
0:40:00	1.22	77.21	262.01	166.51	72.33	1.21	77.2	79.55	166.52	0	1.21	77.2	79.51	166.55	0
0:50:00	1.22	77.21	293.61	129.06	35.12	1.21	77.2	63.93	128.98	0	1.21	77.2	63.86	129.05	0
1:00:00	1.22	77.21	306.35	102.43	8.76	1.2	77.19	32.74	102.43	0	1.2	77.19	32.61	102.4	0
1:10:00	1.22	77.21	305.57	82.89	0	0.94	76.93	0	82.85	0	0.91	76.9	0	82.89	0
1:20:00	1.22	77.21	294.81	68.18	0	0.79	76.78	0	68.2	0	0.78	76.77	0	68.19	0
1:30:00	1.22	77.21	276.52	56.9	0	0.79	76.78	0	56.9	0	0.79	76.78	0	56.91	0
1:40:00	1.22	77.21	252.44	48.06	0	0.78	76.77	0	48.06	0	0.78	76.77	0	48.07	0
1:50:00	1.22	77.21	223.83	41.02	0	0.77	76.76	0	41.02	0	0.77	76.76	0	41.04	0
2:00:00	1.22	77.21	191.62	35.36	0	0.76	76.75	0	35.36	0	0.76	76.75	0	35.37	0
2:10:00	1.21	77.2	156.52	30.74	0	0.75	76.74	0	30.74	0	0.75	76.74	0	30.73	0
2:20:00	1.21	77.2	119.09	26.92	0	0.74	76.73	0	26.91	0	0.74	76.73	0	26.92	0
2:30:00	1.21	77.2	79.75	23.72	0	0.73	76.72	0	23.77	0	0.73	76.72	0	23.73	0
2:40:00	1.2	77.19	38.84	21.04	0	0.72	76.71	0	21.33	0	0.72	76.71	0	21.08	0
2:50:00	0.35	76.34	0	18.76	0	0.72	76.71	0	19.38	0	0.72	76.71	0	18.97	0
3:00:00	0.35	76.34	0	16.82	0	0.71	76.7	0	17.74	0	0.71	76.7	0	17.22	0
3:10:00	0.34	76.33	0	15.13	0	0.71	76.7	0	16.32	0	0.71	76.7	0	15.74	0
3:20:00	0.34	76.33	0	13.69	0	0.7	76.69	0	15.09	0	0.7	76.69	0	14.45	0
3:30:00	0.33	76.32	0	12.42	0	0.7	76.69	0	13.99	0	0.7	76.69	0	13.32	0
3:40:00	0.33	76.32	0	11.32	0	0.7	76.69	0	12.99	0	0.69	76.68	0	12.3	0
3:50:00	0.33	76.32	0	10.35	0	0.69	76.68	0	12.09	0	0.69	76.68	0	11.39	0
4:00:00	0.32	76.31	0	9.49	0	0.69	76.68	0	11.27	0	0.69	76.68	0	10.57	0
4:10:00	0.32	76.31	0	8.73	0	0.69	76.68	0	10.52	0	0.68	76.67	0	9.83	0
4:20:00	0.32	76.31	0	8.05	0	0.68	76.67	0	9.84	0	0.68	76.67	0	9.14	0
4:30:00	0.32	76.31	0	7.43	0	0.68	76.67	0	9.21	0	0.68	76.67	0	8.52	0
4:40:00	0.31	76.3	0	6.89	0	0.68	76.67	0	8.63	0	0.68	76.67	0	7.96	0
4:50:00	0.31	76.3	0	6.4	0	0.68	76.67	0	8.1	0	0.67	76.66	0	7.43	0
5:00:00	0.31	76.3	0	5.95	0	0.67	76.66	0	7.61	0	0.67	76.66	0	6.95	0
5:10:00	0.31	76.3	0	5.55	0	0.67	76.66	0	7.15	0	0.67	76.66	0	6.51	0
5:20:00	0.3	76.29	0	5.19	0	0.67	76.66	0	6.73	0	0.67	76.66	0	6.1	0
5:30:00	0.3	76.29	0	4.86	0	0.67	76.66	0	6.34	0	0.66	76.65	0	5.72	0
5:40:00	0.3	76.29	0	4.55	0	0.67	76.66	0	5.98	0	0.66	76.65	0	5.37	0
5:50:00	0.3	76.29	0	4.28	0	0.66	76.65	0	5.64	0	0.66	76.65	0	5.05	0
6:00:00	0.3	76.29	0	4.02	0	0.66	76.65	0	5.33	0	0.66	76.65	0	4.74	0
6:10:00	0.29	76.28	0	3.79	0	0.66	76.65	0	5.04	0	0.66	76.65	0	4.46	0
6:20:00	0.29	76.28	0	3.57	0	0.66	76.65	0	4.77	0	0.66	76.65	0	4.2	0
6:30:00	0.29	76.28	0	3.38	0	0.66	76.65	0	4.51	0	0.65	76.64	0	3.95	0
6:40:00	0.29	76.28	0	3.19	0	0.66	76.65	0	4.28	0	0.65	76.64	0	3.72	0
6:50:00	0.28	76.27	0	3.02	0	0.65	76.64	0	4.06	0	0.65	76.64	0	3.51	0
7:00:00	0.28	76.27	0	2.87	0	0.65	76.64	0	3.85	0	0.65	76.64	0	3.31	0
7:10:00	0.28	76.27	0	2.72	0	0.65	76.64	0	3.66	0	0.65	76.64	0	3.13	0
7:20:00	0.28	76.27	0	2.58	0	0.65	76.64	0	3.48	0	0.65	76.64	0	2.95	0
7:30:00	0.28	76.27	0	2.46	0	0.65	76.64	0	3.3	0	0.65	76.64	0	2.79	0
7:40:00	0.27	76.26	0	2.34	0	0.65	76.64	0	3.14	0	0.64	76.63	0	2.64	0
7:50:00	0.27	76.26	0	2.23	0	0.65	76.64	0	2.99	0	0.64	76.63	0	2.5	0
8:00:00	0.27	76.26	0	2.13	0	0.65	76.64	0	2.85	0	0.64	76.63	0	2.36	0
8:10:00	0.27	76.26	0	2.03	0	0.65	76.64	0	2.72	0	0.64	76.63	0	2.24	0
8:20:00	0.27	76.26	0	1.94	0	0.64	76.63	0	2.6	0	0.64	76.63	0	2.12	0
8:30:00	0.26	76.25	0	1.86	0	0.64	76.63	0	2.48	0	0.64	76.63	0	2.01	0
8:40:00	0.26	76.25	0	1.78	0	0.64	76.63	0	2.37	0	0.64	76.63	0	1.9	0
8:50:00	0.26	76.25	0	1.7	0	0.64	76.63	0	2.26	0	0.64	76.63	0	1.81	0
9:00:00	0.26	76.25	0	1.63	0	0.64	76.63	0	2.16	0	0.64	76.63	0	1.72	0
9:10:00	0.25	76.24	0	1.56	0	0.64	76.63	0	2.07	0	0.64	76.63	0	1.61	0
9:20:00	0.25	76.24	0	1.5	0	0.64	76.63	0	1.87	0	0.64	76.63	0	1.51	0
9:30:00	0.25	76.24	0	1.44	0	0.64	76.63	0	1.75	0	0.64	76.63	0	1.44	0
9:40:00	0.25	76.24	0	1.38	0	0.64	76.63	0	1.66	0	0.64	76.63	0	1.38	0
9:50:00	0.25	76.24	0	1.33	0	0.64	76.63	0	1.59	0	0.64	76.63	0	1.33	0
10:00:00	0.22	76.21	0	1.28	0	0.64	76.63	0	1.52	0	0.64	76.63	0	1.28	0

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## 18. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Prilog 3. Uporedni rezultati modela u nizvodnom čvoru 6838 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Hours	NO LID					Orifice link + storage node					Orifice link + storage node + pump				
	Node 6838 - nizvodni šaht					Node 6838 - nizvodni šaht					Node 6838 - nizvodni šaht				
	Depth	Head	Volume	total Inflow	Flooding	Depth	Head	Volume	total Inflow	Flooding	Depth	Head	Volume	total Inflow	Flooding
(m)	(m)	(m3)	(l/s)	(l/s)	(m)	(m)	(m3)	(l/s)	(l/s)	(m)	(m)	(m3)	(l/s)	(l/s)	
0:10:00	0.11	74.87	0	114.51	0	0.07	74.83	0	41.8	0	0.07	74.83	0	41.79	0
0:20:00	1.47	76.23	0.36	164.46	1.38	0.48	75.24	0	182.16	0	0.48	75.24	0	182.16	0
0:30:00	1.48	76.24	79.99	184.51	184.54	1.48	76.24	52.39	180.08	180.08	1.48	76.24	52.39	180.1	180.1
0:40:00	1.49	76.25	187.9	173.23	173.23	1.49	76.25	158.51	171.21	171.2	1.49	76.25	158.52	171.38	171.35
0:50:00	1.5	76.26	288.22	160.93	160.92	1.49	76.25	257.66	159.4	159.43	1.49	76.25	257.67	159.43	159.43
1:00:00	1.5	76.26	381.41	150.05	150.04	1.5	76.26	350.1	148.99	148.98	1.5	76.26	350.11	148.98	148.99
1:10:00	1.51	76.27	468.72	141.29	141.27	1.51	76.27	435.94	131.44	131.46	1.51	76.27	435.92	129.93	129.87
1:20:00	1.51	76.27	551.29	134.16	134.16	1.51	76.27	499.97	88.26	88.27	1.51	76.27	498.73	87.49	87.49
1:30:00	1.52	76.28	629.98	128.3	128.3	1.51	76.27	552.82	85.24	85.24	1.51	76.27	550.83	84.55	84.53
1:40:00	1.53	76.29	703.72	111.6	111.65	1.52	76.28	597.22	52.96	52.98	1.52	76.28	594.91	52.44	52.42
1:50:00	1.53	76.29	761.5	98.02	92.11	1.52	76.28	625.09	46.3	41.48	1.52	76.28	622.47	45.8	40.98
2:00:00	1.53	76.29	815.22	96.64	87.25	1.52	76.28	647.24	40.96	32.79	1.52	76.28	644.35	40.53	32.37
2:10:00	1.54	76.3	866.06	95.49	82.36	1.52	76.28	664.28	36.24	24.18	1.52	76.28	661.1	35.9	23.81
2:20:00	1.54	76.3	914.09	94.54	77.97	1.52	76.28	676.58	32.06	16.95	1.52	76.28	673.18	31.84	16.62
2:30:00	1.54	76.3	959.78	93.71	74.38	1.52	76.28	684.8	28.35	10.7	1.52	76.28	681.25	28.26	10.42
2:40:00	1.55	76.31	1003.16	92.98	69.28	1.52	76.28	689.19	25.3	2.84	1.52	76.28	685.45	25.12	2.42
2:50:00	1.55	76.31	1041.4	46.59	18.23	1.52	76.28	688.17	22.87	0	1.52	76.28	684.45	22.53	0
3:00:00	1.55	76.31	1035.5	18.34	0	1.52	76.28	683.23	20.85	0	1.52	76.28	680.06	20.38	0
3:10:00	1.55	76.31	1026.55	17.94	0	1.52	76.28	675.49	19.12	0	1.52	76.28	672.58	18.57	0
3:20:00	1.55	76.31	1015.21	16.06	0	1.52	76.28	665.77	17.62	0	1.52	76.28	663.03	17.01	0
3:30:00	1.55	76.31	1002.13	14.61	0	1.52	76.28	654.37	16.29	0	1.52	76.28	651.68	15.65	0
3:40:00	1.55	76.31	987.48	13.29	0	1.52	76.28	641.46	15.11	0	1.52	76.28	638.59	14.45	0
3:50:00	1.55	76.31	971.45	12.17	0	1.52	76.28	627.17	14.05	0	1.52	76.28	623.83	13.37	0
4:00:00	1.54	76.3	954.17	11.18	0	1.52	76.28	611.55	13.09	0	1.52	76.28	607.74	12.41	0
4:10:00	1.54	76.3	935.72	10.3	0	1.52	76.28	594.42	12.23	0	1.52	76.28	590.18	11.54	0
4:20:00	1.54	76.3	915.92	9.53	0	1.52	76.28	576.1	11.43	0	1.52	76.28	571.45	10.74	0
4:30:00	1.54	76.3	895.06	8.84	0	1.51	76.27	556.76	10.7	0	1.51	76.27	551.71	10.02	0
4:40:00	1.54	76.3	873.31	8.22	0	1.51	76.27	536.51	10.03	0	1.51	76.27	531.06	9.36	0
4:50:00	1.54	76.3	850.79	7.66	0	1.51	76.27	515.45	9.42	0	1.51	76.27	509.6	8.76	0
5:00:00	1.53	76.29	827.56	7.16	0	1.51	76.27	493.63	8.85	0	1.51	76.27	487.41	8.21	0
5:10:00	1.53	76.29	803.69	6.71	0	1.51	76.27	471.14	8.33	0	1.51	76.27	464.54	7.7	0
5:20:00	1.53	76.29	779.26	6.3	0	1.51	76.27	448.04	7.85	0	1.51	76.27	441.07	7.23	0
5:30:00	1.53	76.29	754.31	5.93	0	1.51	76.27	424.39	7.41	0	1.5	76.26	417.05	6.8	0
5:40:00	1.53	76.29	728.9	5.59	0	1.5	76.26	400.22	7	0	1.5	76.26	392.54	6.4	0
5:50:00	1.53	76.29	703.08	5.28	0	1.5	76.26	375.6	6.61	0	1.5	76.26	367.56	6.02	0
6:00:00	1.52	76.28	676.89	5	0	1.5	76.26	350.55	6.26	0	1.5	76.26	342.18	5.68	0
6:10:00	1.52	76.28	650.36	4.74	0	1.5	76.26	325.13	5.93	0	1.5	76.26	316.42	5.35	0
6:20:00	1.52	76.28	623.52	4.5	0	1.5	76.26	299.36	5.62	0	1.5	76.26	290.32	5.06	0
6:30:00	1.52	76.28	596.41	4.28	0	1.49	76.25	273.27	5.33	0	1.49	76.25	263.91	4.78	0
6:40:00	1.52	76.28	569.05	4.07	0	1.49	76.25	246.89	5.06	0	1.49	76.25	237.21	4.52	0
6:50:00	1.51	76.27	541.47	3.89	0	1.49	76.25	220.25	4.82	0	1.49	76.25	210.26	4.28	0
7:00:00	1.51	76.27	513.68	3.71	0	1.49	76.25	193.37	4.58	0	1.49	76.25	183.08	4.05	0
7:10:00	1.51	76.27	485.71	3.55	0	1.49	76.25	166.28	4.36	0	1.49	76.25	155.68	3.84	0
7:20:00	1.51	76.27	457.58	3.4	0	1.48	76.24	138.98	4.16	0	1.48	76.24	128.08	3.64	0
7:30:00	1.51	76.27	429.29	3.26	0	1.48	76.24	111.5	3.96	0	1.48	76.24	100.31	3.46	0
7:40:00	1.5	76.26	400.88	3.13	0	1.48	76.24	83.86	3.78	0	1.48	76.24	72.38	3.28	0
7:50:00	1.5	76.26	372.34	3.01	0	1.48	76.24	56.06	3.61	0	1.48	76.24	44.3	3.12	0
8:00:00	1.5	76.26	343.69	2.89	0	1.48	76.24	28.13	3.45	0	1.48	76.24	16.09	2.97	0
8:10:00	1.5	76.26	314.95	2.78	0	1.47	76.23	0.12	3.3	0	0.97	75.73	0	4.79	0
8:20:00	1.5	76.26	286.13	2.68	0	0.94	75.7	0	4.14	0	0.91	75.67	0	3.27	0
8:30:00	1.49	76.25	257.23	2.59	0	0.88	75.64	0	3.34	0	0.85	75.61	0	2.74	0
8:40:00	1.49	76.25	228.26	2.5	0	0.81	75.57	0	2.97	0	0.78	75.54	0	2.45	0
8:50:00	1.49	76.25	199.23	2.42	0	0.75	75.51	0	2.74	0	0.72	75.48	0	2.25	0
9:00:00	1.49	76.25	170.15	2.34	0	0.69	75.45	0	2.56	0	0.67	75.43	0	2.1	0
9:10:00	1.48	76.24	141.03	2.26	0	0.64	75.4	0	2.42	0	0.61	75.37	0	1.63	0
9:20:00	1.48	76.24	111.87	2.19	0	0.58	75.34	0	2.02	0	0.56	75.32	0	1.68	0
9:30:00	1.48	76.24	82.68	2.13	0	0.54	75.3	0	2.01	0	0.53	75.29	0	1.67	0
9:40:00	1.48	76.24	53.47	2.07	0	0.52	75.28	0	1.95	0	0.5	75.26	0	1.63	0
9:50:00	1.48	76.24	24.23	2.01	0	0.5	75.26	0	1.88	0	0.49	75.25	0	1.59	0
10:00:00	1.47	76.23	0.17	32.34	0	0.49	75.25	0	1.81	0	0.49	75.25	0	1.53	0

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Prilog 4. Uporedni rezultati modela u čvoru 6622 i subcatchmentu S40641 (kiša 15min – 118mm/h/ha)

Hours	NO LID					Permeable pavement					Subcatchment S4064	
	Table - Node 6622			Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Table - Node 6622			Total Inflow (l/s)	Flooding (l/s)	Runoff (l/s)	
	Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)			Depth (m)	Head (m)	Volume (m3)			NO LID	LID
0:10:00	1.56	76.75	0	339.95	0	0.95	76.14	0	270.44	0	345.99	275.3
0:20:00	1.82	77.01	169.94	592.73	401.89	1.82	77.01	99.86	465	241.69	592.43	464.93
0:30:00	1.84	77.03	366.35	492.58	269.8	1.83	77.02	225.86	380.54	162.54	492.4	380.41
0:40:00	1.85	77.04	499.55	414.75	178.73	1.83	77.02	299.34	315.95	86.23	414.52	315.94
0:50:00	1.85	77.04	585.09	352.99	109.33	1.83	77.02	333.28	265.83	29.35	352.84	265.78
1:00:00	1.86	77.05	633.66	303.46	54.02	1.83	77.02	336.99	226.25	0	303.29	226.1
1:10:00	1.86	77.05	652.31	263.01	10.11	1.83	77.02	317.18	194.33	0	262.96	194.25
1:20:00	1.86	77.05	647.58	229.87	0	1.83	77.02	279.53	168.44	0	229.75	168.34
1:30:00	1.86	77.05	624.03	202.25	0	1.83	77.02	227.96	147.02	0	202.14	147.02
1:40:00	1.85	77.04	585.16	179.05	0	1.82	77.01	165.63	129.36	0	178.95	129.3
1:50:00	1.85	77.04	533.79	159.41	0	1.82	77.01	95.29	114.44	0	159.33	114.43
2:00:00	1.84	77.03	472.22	142.65	0	1.81	77	20.37	105.42	0	142.59	101.85
2:10:00	1.84	77.03	402.33	128.24	0	1.17	76.36	0	195.08	0	128.21	91.12
2:20:00	1.83	77.02	325.8	115.83	0	0.82	76.01	0	171.6	0	115.78	81.91
2:30:00	1.83	77.02	244.11	104.98	0	0.65	75.84	0	129.52	0	104.98	73.95
2:40:00	1.82	77.01	158.86	95.55	0	0.46	75.65	0	69.85	0	95.53	67.04
2:50:00	1.82	77.01	72.9	92.54	0	0.44	75.63	0	63.33	0	87.24	61
3:00:00	1.22	76.41	0	180.9	0	0.43	75.62	0	57.94	0	79.92	55.69
3:10:00	1.02	76.21	0	189.39	0	0.41	75.6	0	53.14	0	73.43	51.01
3:20:00	0.77	75.96	0	159.82	0	0.4	75.59	0	48.93	0	67.65	46.86
3:30:00	0.62	75.81	0	118.8	0	0.39	75.58	0	45.11	0	62.5	43.17
3:40:00	0.6	75.79	0	114.7	0	0.38	75.57	0	41.71	0	57.87	39.87
3:50:00	0.44	75.63	0	58.81	0	0.37	75.56	0	38.63	0	53.71	36.91
4:00:00	0.41	75.6	0	52.3	0	0.36	75.55	0	35.85	0	49.96	34.26
4:10:00	0.4	75.59	0	48.4	0	0.35	75.54	0	33.35	0	46.57	31.86
4:20:00	0.39	75.58	0	45.1	0	0.34	75.53	0	31.08	0	43.48	29.69
4:30:00	0.38	75.57	0	42.21	0	0.34	75.53	0	29.02	0	40.68	27.72
4:40:00	0.37	75.56	0	39.53	0	0.33	75.52	0	27.14	0	38.13	25.93
4:50:00	0.36	75.55	0	37.12	0	0.32	75.51	0	25.42	0	35.79	24.3
5:00:00	0.36	75.55	0	34.91	0	0.32	75.51	0	23.85	0	33.65	22.81
5:10:00	0.35	75.54	0	32.86	0	0.31	75.5	0	22.41	0	31.68	21.44
5:20:00	0.34	75.53	0	30.99	0	0.31	75.5	0	21.09	0	29.87	20.19
5:30:00	0.34	75.53	0	29.25	0	0.3	75.49	0	19.87	0	28.2	19.03
5:40:00	0.33	75.52	0	27.65	0	0.3	75.49	0	18.75	0	26.66	17.97
5:50:00	0.33	75.52	0	26.17	0	0.29	75.48	0	17.71	0	25.24	16.99
6:00:00	0.32	75.51	0	24.8	0	0.29	75.48	0	16.74	0	23.92	16.08
6:10:00	0.32	75.51	0	23.52	0	0.28	75.47	0	15.86	0	22.69	15.24
6:20:00	0.31	75.5	0	22.33	0	0.28	75.47	0	15	0	21.55	14.46
6:30:00	0.31	75.5	0	21.23	0	0.27	75.46	0	14.22	0	20.49	13.73
6:40:00	0.3	75.49	0	20.19	0	0.27	75.46	0	13.5	0	19.5	13.05
6:50:00	0.3	75.49	0	19.22	0	0.27	75.46	0	12.83	0	18.58	12.42
7:00:00	0.29	75.48	0	18.33	0	0.26	75.45	0	12.21	0	17.72	11.83
7:10:00	0.29	75.48	0	17.48	0	0.26	75.45	0	11.63	0	16.91	11.28
7:20:00	0.29	75.48	0	16.69	0	0.26	75.45	0	11.09	0	16.15	10.77
7:30:00	0.28	75.47	0	15.95	0	0.25	75.44	0	10.59	0	15.44	10.28
7:40:00	0.28	75.47	0	15.24	0	0.25	75.44	0	10.12	0	14.77	9.83
7:50:00	0.28	75.47	0	14.56	0	0.25	75.44	0	9.68	0	14.14	9.4
8:00:00	0.27	75.46	0	13.93	0	0.25	75.44	0	9.26	0	13.55	9
8:10:00	0.27	75.46	0	13.34	0	0.24	75.43	0	8.87	0	12.99	8.63
8:20:00	0.27	75.46	0	12.79	0	0.24	75.43	0	8.5	0	12.47	8.27
8:30:00	0.26	75.45	0	12.28	0	0.24	75.43	0	8.15	0	11.97	7.94
8:40:00	0.26	75.45	0	11.79	0	0.24	75.43	0	7.83	0	11.5	7.62
8:50:00	0.26	75.45	0	11.33	0	0.24	75.43	0	7.52	0	11.06	7.32
9:00:00	0.26	75.45	0	10.89	0	0.23	75.42	0	7.23	0	10.64	7.04
9:10:00	0.25	75.44	0	10.48	0	0.23	75.42	0	6.95	0	10.24	6.77
9:20:00	0.25	75.44	0	10.09	0	0.23	75.42	0	6.68	0	9.86	6.52
9:30:00	0.25	75.44	0	9.72	0	0.23	75.42	0	6.44	0	9.5	6.28
9:40:00	0.25	75.44	0	9.37	0	0.23	75.42	0	6.2	0	9.16	6.05
9:50:00	0.24	75.43	0	9.04	0	0.22	75.41	0	5.98	0	8.84	5.83
10:00:00	0.24	75.43	0	8.72	0	0.22	75.41	0	5.76	0	8.53	5.63

## Simultaneous collection of flow, sediment, and selected water-sediment-quality field data on the Danube stretch at Belgrade

Miodrag Spasojević<sup>1</sup>, Mileta Bojović<sup>2</sup>, Bojan Palmar<sup>3</sup>, Milica Nadeždić<sup>4</sup>,  
Miroslav Tanasković<sup>5</sup>

**ABSTRACT:** This paper presents the program and results of the July 2013 field-data collection along a selected sector of the Iron Gates 1 Reservoir, covering about an 8.5 km long stretch of the Danube River. The sector is located downstream from the Sava River mouth at Belgrade. The data-collection program was designed to test the simultaneous flow-sediment-quality monitoring concept, and to provide data for the calibration and validation of relevant (primarily 3-D, but also 2- and 1-D) models, used as decision-support tools in river and reservoir hydro-environmental management. Therefore, the program includes the simultaneous monitoring of flow, sediment, and selected water-sediment quality parameters' spatial distributions, complemented by a detailed bathymetry survey. The flow parameters include flow discharges and velocities. The sediment parameters include suspended-sediment concentrations and grain-size distributions for both suspended and bed sediment. The selected water and sediment quality parameters include concentrations of heavy metals dissolved in water and attached to suspended and bed sediment particles.

**Keywords:** monitoring, reservoirs, rivers, flow, sediment, quality

## Simultano prikupljanje hidrodinamičko-psamoloških i izabranih podataka o kvalitetu vode i sedimenta na Dunavu kod Beograda

**APSTRAKT:** Članak prikazuje program i rezultate prikupljanja terenskih podataka iz jula 2013. godine duž izabranog sektora akumulacije HE Đerdap 1, koji uključuje oko 8.5 km dugu deonicu reke Dunav nizvodno od ušća reke Save kod Beograda. Program prikupljanja podataka je napravljen sa ciljem da se testira koncept simultanog monitoringa vode, sedimenta i kvaliteta, kao i da se obezbede podaci za kalibraciju i verifikaciju odgovarajućih (prvenstveno 3-D, ali takođe i 2- i 1-D) modela, koji služe kao podrška pri donošenju odluka u upravljanju količinama i kvalitetom voda u rekama i akumulacijama. Zbog toga program uključuje simultani monitoring prostornog rasporeda hidrodinamičkih i psamoloških, kao i odabranih parametara kvaliteta vode i sedimenta, upotpunjen detaljnim batimetrijskim snimanjima korita. Hidrodinamički parametri uključuju protoke i brzine vode. Psamološki parametri uključuju koncentracije suspendovanog sedimenta, kao i granulometrijski sastav kako suspendovanog, tako i sedimenta na dnu. Izabrani parametri kvaliteta vode i sedimenta uključuju koncentracije teških metala rastvorenih u vodi i adsorbovanih na čestice sedimenta u suspenziji i na dnu.

**Ključne reči:** monitoring, akumulacije, reke, hidrodinamika, sediment, kvalitet

<sup>1</sup> Miodrag Spasojević, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, [mspasojevic@gf.uns.ac.rs](mailto:mspasojevic@gf.uns.ac.rs)

<sup>2</sup> Mileta Bojović, Energoprojekt – Hidroinženjering, [mbojovic@ephydro.com](mailto:mbojovic@ephydro.com)

<sup>3</sup> Bojan Palmar, Republički hidrometeorološki zavod Srbije, [bojan.palmar@hidmet.gov.rs](mailto:bojan.palmar@hidmet.gov.rs)

<sup>4</sup> Milica Nadeždić, Agencija za zaštitu životne sredine, [milica.nadezdic@sepa.gov.rs](mailto:milica.nadezdic@sepa.gov.rs)

<sup>5</sup> Miroslav Tanasković, Gradski zavod za javno zdravlje Beograd, [mirtanabg@yahoo.com](mailto:mirtanabg@yahoo.com)



## 1 Introduction

Experience with simultaneous flow and sediment field data and its use in 3-D mathematical modelling of flow-sediment interaction on North American alluvial rivers and reservoirs (Holly and Spasojevic, 1999; Raphelt and Spasojevic, 1999; Spasojevic and Holly, 2000; Spasojevic et al., 2001; Spasojevic and Muste, 2002), as well as simultaneous flow, sediment and water quality field data at the Danube River experimental Mohacs-Bezdan reach (Tamás et al., 2012), naturally led to the idea of the simultaneous collection of flow, sediment, and water-sediment quality data. More precisely, it led to the idea of monitoring the flow-sediments-contaminants interaction in alluvial rivers and reservoirs, with a focus on contaminants found both dissolved in water and attached to sediments. Data-collection planning, as well as accompanied mathematical modelling of the flow-sediment-contaminants interaction in alluvial rivers/reservoirs requires taking into account their rather specific and complex nature:

- the river/reservoir flow is the main transport mechanism for sediments and contaminants alluvial rivers
- the river/reservoir flow is constantly changing both in time (reacting to climate, meteorological i.e. hydrological conditions, as well as reservoir operation regimes) and space (reacting to changing river/reservoir bathymetry along the watercourse)
- the water-dissolved and sediment-attached contaminants are subject to constant exchange through adsorption/desorption processes
- the exchange rate depends on the size of sediment particles
- the fate of sediment-attached contaminants is directly linked to the fate of sediment particle of certain size
- depending on local flow conditions, the same sediment particle can travel fast in suspension, travel much slower as bedload, stay at bed surface, or even become trapped at riverbed subsurface layers
- since sediment grains of different sizes travel at different speeds and modes, sediment grain-size distributions are subject to constant change
- thus, depending on flow conditions, sediment transport and grain-size distribution, the same contaminant can travel faster (dissolved in water or attached to suspended sediment), travel much slower (attached to bed-load sediment), stay attached to riverbed surface, or become trapped at the riverbed subsurface sediment layers

## 2 Data-collection program

The selection of the data-collection domain, the Iron Gates 1 Reservoir sector covering the Danube River stretch immediately downstream from the Sava River mouth at Belgrade (Figure 1), started from geographic maps (scale 1:25000), geo-referenced and prepared using Geographic Information System (GIS) software. Figure 1 shows the locations of nine cross sections along the domain, the small portion of the cross-sections' system established by Iron Gates authorities for monitoring the long-term riverbed evolution along the entire reservoir. The domain boundaries are defined by cross section PA54 at the upstream end, and PA51 at the downstream end. Seven of nine cross section locations, shown in Figure 1, were selected to be the approximate locations of data-collection ranges, or data ranges DR (Table 1). For each of the selected data ranges, Table 1 shows the river kilometre (rkm), the corresponding Iron Gates cross section, and the geographic coordinates of the cross sections' left- and right-bank end points, XL,YL, and XR,YR.

The data-collection program was complemented by the domain detailed, bathymetry survey (Figure 2) along transect lines set approximately 100 meters apart. The bathymetry data was used to create the riverbed digital terrain model. Figure 3 shows riverbed elevations ( $Z_{bed}$ ) and seven selected data ranges (marked DR1 to DR7, starting from domain's upstream end) with seven so-called data verticals selected along each range (marked V1 to V7, starting from the river's left bank). The

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

approximate micro-location of each data vertical was selected based on bathymetry data and the results of the data range discharge measurements. The final micro-location of each data vertical was defined during the data-range's detailed measurements and collection of various samples, and recorded using the vertical's GPS coordinates.

The data-collection programme at each data range included the flow measurements (measurements of velocities at data verticals V1 to V7, preceded by the entire range discharge measurements) and the collection of sediment and water-sediment-quality samples (sediment samples at data verticals V2 to V6, suspended-sediment-quality samples at data verticals V1 to V7, and water-quality and bed-sediment-quality samples at data verticals V2, V4, and V6), followed by the appropriate samples' processing. All measurements and sampling at the same data vertical were performed almost simultaneously, i.e. within a relatively short time period, with particular measurements/sampling starting time meticulously recorded. The ship-laboratory Argus (Figure 4) served as the main platform for the entire data-collection campaign.

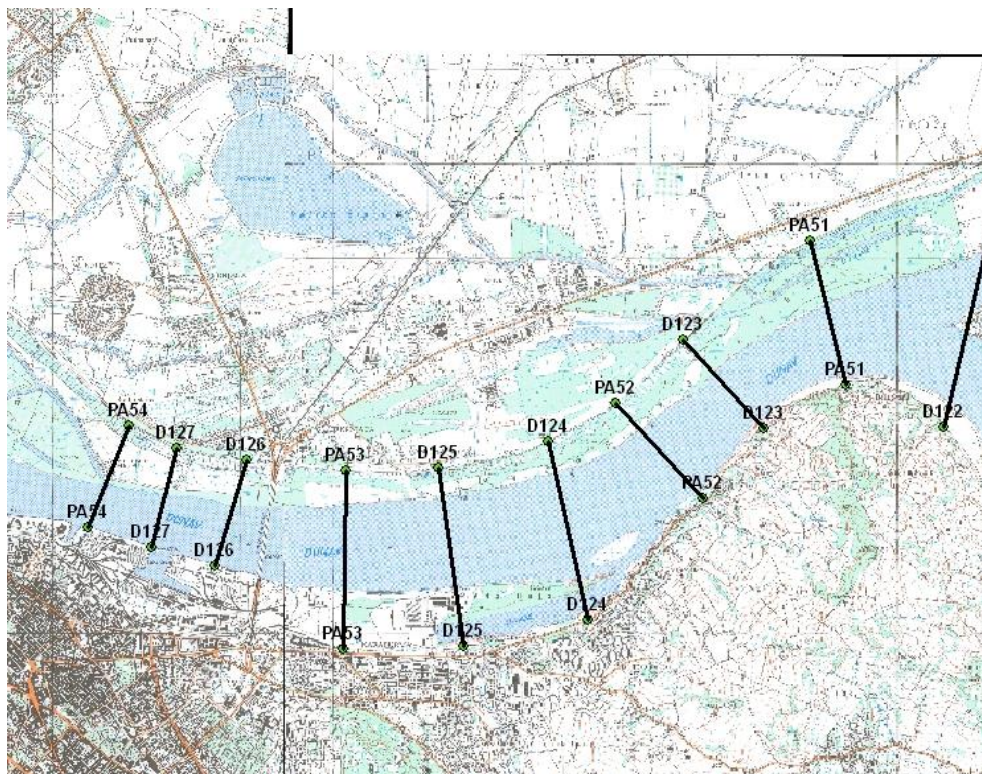


Figure 1. Data-collection domain - geographic maps (scale 1:25000)

Slika 1. Oblast prikupljanja podataka – geografske karte (razmera 1:25000)

Table 1. Selected data ranges

Tabela 1. Izabrani merni profili

Data range	Corresponding cross section	rkm	YL	XL	YR	XR
DR1	PA-54	1168.000	7458829.95	4966214.74	7458392.46	4965124.52
DR2	D-126	1166.900	7460081.87	4965843.90	7459748.04	4964721.17
DR3	PA-53	1165.570	7461142.31	4965733.32	7461110.86	4963835.01
DR4	D-125	1164.450	7462127.09	4965761.07	7462398.31	4963867.67
DR5	D-124	1163.180	7463305.79	4966049.68	7463719.85	4964149.24
DR6	D-123	1160.850	7464738.79	4967131.28	7465600.64	4966185.98
DR7	PA-51	1159.540	7466095.23	4968186.45	7466464.07	4966644.10



Figure 2. The bathymetry survey equipment

Slika 2. Oprema za batimetrijska snimanja

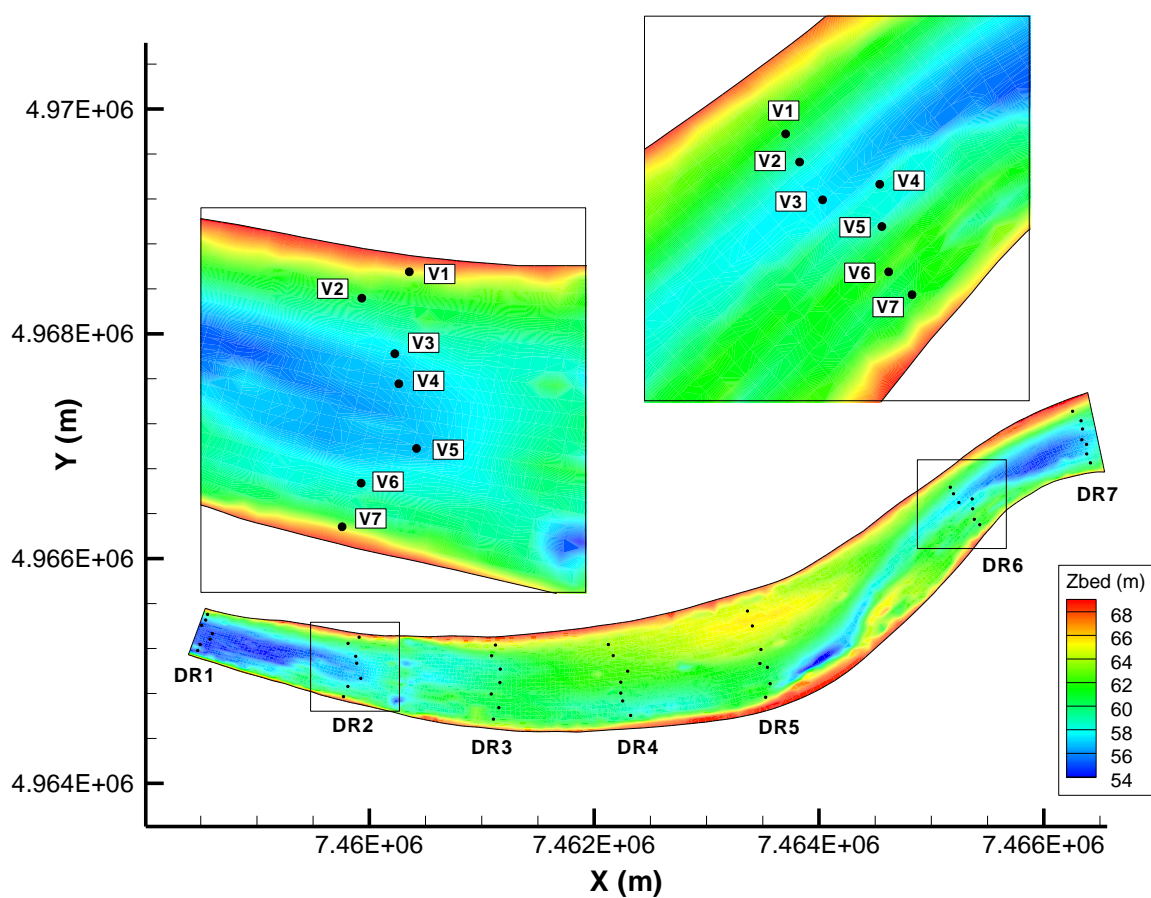


Figure 3. Data-collection domain: riverbed elevations (Zbed), data ranges and verticals

Slika 3. Oblast prikupljanja podataka: kote rečnog dna, merni profili i vertikale



Figure 4. The ship-laboratory Argus

Slika 4. Brod-laboratorija Argus

### 3 Flow-measurements and results' examples

Measurements of flow discharges and velocities were performed using the vessel-mounted, three-component, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), following procedures described by Muste et al. (2004a) and Muste et al. (2004b), respectively. Therefore, the ADCP discharge measurements were performed with a moving-vessel ADCP, with four passes along each range, while the ADCP velocity measurements, along each of data verticals, were performed from a fixed vessel over approximately 10 minute collection intervals. The flow discharge and velocity measurements boat and equipment (the three-component ADCP) are shown in Figure 5.



Figure 5. The flow discharge and velocity measurements equipment

Slika 5. Oprema za merenja brzina i protoka vode

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 2 shows an example of the flow-discharge measurements' results, for data range 1. Measurements were performed on July 11<sup>th</sup> 2013. For each of the four passes along the range, the measurements starting time and the measured discharge value were recorded, while the four-pass average produced the final range discharge.

Table 3, for example, shows the results of the flow-velocity measurements along vertical 4 of data range 1 (the mid vertical with geographic east-west coordinate X=7458603,136 m, and north-south coordinate Y=4965332,325 m). Measurements performed on July 11<sup>th</sup> 2013, started at 3:34 p.m. The table shows the distribution of three velocity components along the flow depth, measured by the three-component ADCP. The u-velocity component is the geographic east-west component, the v-velocity is the geographic north-south component, and the w-velocity is the vertical component.

Table 2. Discharge-measurements results for data range 1

Tabela 2. Rezultati merenja protoka za meri profil 1

Range	Date	Pass	Starting time	Measured discharge Q (m <sup>3</sup> /s)	Average Q (m <sup>3</sup> /s)
1	11.07.2013.	1	10:49:40 a.m.	5379,64	5393,58
		2	10:57:08 a.m.	5389,78	
		3	11:05:09 a.m.	5365,27	
		4	11:14:04 a.m.	5439,63	

Table 3. Measured velocity distribution along vertical 4 of data range 1

Tabela 3. Rezultati merenja rasporeda brzina duž merne vertikalne 4 mernog profila 1

Depth (m)	u (m/s)	v (m/s)	w (m/s)
1,08	1,02	-0,153	-0,003
1,58	1,031	-0,16	0,003
2,08	1,04	-0,166	0,006
2,58	1,054	-0,177	0,007
3,08	1,049	-0,18	0,006
3,58	1,056	-0,192	0,007
4,08	1,067	-0,198	0,008
4,58	1,072	-0,204	0,009
5,08	1,079	-0,213	0,007
5,58	1,082	-0,222	0,011
6,08	1,08	-0,235	0,007
6,58	1,086	-0,238	0,008
7,08	1,084	-0,243	0,007
7,58	1,068	-0,255	0,009
8,08	1,062	-0,256	0,011
8,58	1,051	-0,268	0,008
9,08	1,029	-0,267	0,006
9,58	1,009	-0,272	0,007
10,08	0,995	-0,266	0,006
10,58	0,971	-0,266	0,007
11,08	0,943	-0,253	0,006
11,58	0,921	-0,253	0,005
12,08	0,887	-0,239	0,008
12,58	0,881	-0,234	0,005
13,08	0,862	-0,232	0
13,58	0,841	-0,221	0
14,08	0,813	-0,213	-0,002

The flow discharge and velocity data were complemented by the free-surface elevations data for the domain, extracted from the Iron Gates gauge, Pančevo (located immediately downstream from the data-collection domain), and two Serbian Hydro-Meteorological Service gauges, Belgrade and Zemun (located immediately upstream from the domain).

## 4 Sediment sampling, processing, and data examples

At each data range, sediment samples were collected along five data verticals, numbered 2 to 6. At each of these verticals, five water and suspended-sediment samples were collected at different depths along the vertical, while the bed-sediment sample was collected at a bed-surface location corresponding to the vertical.

Devices used to collect water and suspended-sediment samples and bed-sediment samples (or in general any water-column and bed samples) are shown in Figure 6. To the left is the container for water and suspended sediment sample, equipped with the energy generator that runs the vacuum pump, sucking the sample content through the submerged sampling pipe. To the right is the wrench used to lower the bed-sediment sampler (shown in Figure 7) to the river bed, or the water-column sampling pipe to its water-depth position. The torpedo-shaped weight (Figure 8) was used to lower the 90°-curved end piece of the sampling pipe with the sampling nozzle, and provide that its mouth is oriented in the flow direction, facing the flow.

Water and suspended-sediment samples were processed to determine suspended-sediment concentrations and size-fraction distributions (using the settling-velocity meter). Bed-sediment samples were processed to determine size-fraction distributions, using the standard set of sieves. Sediment samples were processed at Eötvös József College (Baja, Hungary) sedimentation laboratory. Processing of sediment-samples followed procedures described by Tamás et al. (2012).



Figure 6. Equipment for the collection of water-column and bed samples

Slika 6. Oprema za uzimanje uzoraka iz vodene struje i sa dna

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Figure 7. Bed-sediment sampler

Slika 7. Uzorkivač sedimenta sa dna



Figure 8. Equipment for positioning the water-column sampling location

Slika 8. Oprema za pozicioniranje lokacije za prikupljanje uzoraka iz vodene struje

Examples of processed sediment data, shown in Tables 4, 5, and 6, are the result of processing sediment samples collected at vertical 4 of data range 1 (the same mid-vertical of data range 1 with measured velocity distribution along the depth shown in Table 3, with the same measurements date and starting time).

Table 4 shows suspended-sediment concentrations for all five samples collected along the data vertical, Table 5 the suspended-sediment grain size distribution for the sample collected at 0.1 m

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

depth, and Table 6 the bed-sediment grain size distribution for the sample collected at the foot of the vertical.

Table 4. The distribution of suspended-sediment concentrations along data vertical 4 at data range 1

Tabela 4. Raspored koncentracija suspendovanog sedimenta duž merne vertikale 4 u mernom profilu 1

Data vertical	Sample depth (m)	C (g/l)
4	0,1	0,0351
	3,3	0,0547
	9,9	0,0692
	13,2	0,0685
	16,3	0,0855

Table 5. Suspended-sediment grain size distribution data - data range 1, vertical 4, sample depth 0.1 m

Tabela 5. Granulometrijski sastav suspendovanog sedimenta - merni profil 1, vertikala 4, dubina 0.1 m

Settling-velocity diameter (mm)	Smaller then diameter (%)	Size-fraction category
0,5	100,0	medium sand
0,25	100,0	medium sand
0,125	100,0	fine sand
0,1	67,0	fine sand
0,05	49,5	coarse silt
0,02	31,3	coarse silt – medium silt
0,01	19,7	medium silt
0,005	7,6	fine silt
0,001	0,0	clay

Table 6. Bed-sediment grain size distribution data for the foot of vertical 4 at data range 1

Tabela 6. Podatci o granulometrijskom sastavu sedimenta na dnu za podnožje verikale 4 u mernom profilu 1

Sieve diameter	Stayed on the sieve		Fell through the sieve	Size-fraction category
	g	%		
mm			%	
32	0	0,0	100,0	coarse gravel
16	14,7	5,8	94,2	medium gravel
8	8,97	3,5	90,6	medium gravel
4	7,27	2,9	87,8	fine gravel
2	2,76	1,1	86,7	fine gravel – coarse sand
1	2,27	0,90	85,78	coarse sand
0,5	6,13	2,4	83,4	medium sand
0,25	122,41	48,4	35,0	medium sand
0,125	82,5	32,6	2,4	fine sand
0,063	4,64	1,8	0,5	fine sand – coarse silt
<0,063	1,39	0,5	0,0	cohesive sediment
Σg:	253,04			



## 5 Water-sediment-quality sampling, processing, and data examples

At each data range, suspended-sediment-quality samples were collected at all seven data verticals, while water-quality and bed-sediment-quality samples were collected at three selected data verticals (2, 4, and 6), distributed almost evenly across the data range. All samples were collected on July 11<sup>th</sup> 2013.

It is known that water-dissolved and sediment-attached contaminants are subject to constant exchange through adsorption/desorption processes, with the exchange rate diminishing with the particle size increase. Sediment finest or cohesive (< 0,063 mm) fractions (clay and silt), having the decisively highest exchange rate, play the dominant role in sediment-quality determination. In addition, results of previous sediment-data collections (as presented by Holly and Spasojevic, 1999; Raphelt and Spasojevic, 1999; Spasojevic and Holly, 2000; Spasojevic et al., 2001; Spasojevic and Muste, 2002) show that concentrations of suspended-sediment finest fractions do not show correlation to the sampling depth, i.e. have almost uniform vertical distribution along the flow depth.

Therefore, only one suspended-sediment quality sample, per each of seven data verticals, was collected from the water column location close to the water surface. Since coarser sediment fractions, due to larger settling velocities, appear in suspension at predominantly larger depths, the selected sampling location ensures that the sample contains predominantly cohesive sediment fractions (with representative concentration approximately constant over the depth). Bed-sediment-quality samples, also selected to contain predominantly the finest sediment (mud), were collected at bed-surface locations corresponding to data verticals 2, 4, and 6. In addition, since results of previous water-quality data collection campaigns (as presented by Tamás et al., 2012) yielded the conclusion that the water-dissolved (chemical) quality parameters also showed no correlation to the sampling depth, water-quality samples were collected as so-called depth-integrated samples along each of three selected data verticals (2, 4, and 6).

Figure 9 shows the device used to collect suspended-sediment-quality samples. The device is connected to the pump, with an intake submerged close to the water surface, constantly supplying the water with suspended sediment. Centrifugal rotation of the inner part extracts the excessive water, while the foil (Figure 10) inside the cylinder (Figure 9) collects the film of fine sediment, easily turned into a sample with sufficient mass for quality analysis.

Water-quality and bed-sediment-quality samples were collected using essentially the same technique and equipment as the ones used to collect water and suspended sediment samples and bed-sediment samples.

Suspended-sediment quality samples were analysed at Belgrade City Institute for Public Health laboratory, to determine concentrations of three selected heavy metals (zinc - Zn, lead - Pb, and mercury - Hg) attached to suspended sediment particles. Water-quality and bed-sediment-quality samples were analysed at the Serbian Environmental Protection Agency laboratory to determine the concentrations of the same three heavy metals dissolved in water and attached to bed-sediment particles. Both laboratories used standard (accredited) analysis procedures.

An example of suspended-sediment-quality data, shown in Table 7, is the result of processing suspended-sediment-quality samples collected at all seven verticals of data range 1. Other examples of water-quality and bed-sediment-quality data, shown in Tables 8 and 9, are the result of processing water-quality and bed-sediment-quality samples collected at three selected verticals (2, 4, and 6) of data range 1.

Table 7 shows concentrations of three selected heavy metals attached to suspended sediment, while Tables 8 and 9 show concentrations of same heavy metals dissolved in water, and attached to bed sediment, respectively.

Tables 7, 8, and 9 also show the locations of the data verticals (geographic X,Y coordinates) and sampling-start times, the same as the locations and start times for corresponding velocity measurements and the sediment-samples' collection.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Figure 9. Equipment for the collection of suspended-sediment-quality analysis samples

Slika 9 Oprema za uzimanje uzoraka za analize kvaliteta suspendovanog sedimenta



Figure 10. Suspended-sediment-quality analysis sample

Slika 10. Uzorak za analize kvaliteta suspendovanog sedimenta

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 7. Concentrations of heavy metals attached to suspended sediment - data range 1

Tabela 7. Koncentracije teških metala adsorbovanih na suspendovani sediment – merni profil 1

Vertical	X (m)	Y (m)	Start time	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)
1	7458560,659	4965503,141	20:09	149	34,9	0,2
2	7458544,141	4965452,988	18:37	149	34,9	0,2
3	7458508,455	4965405,438	17:01	150	35,3	0,2
4	7458603,136	4965332,325	15:34	150	35,3	0,2
5	7458582,404	4965283,107	14:02	150	35,3	0,2
6	7458494,45	4965235,747	12:38	184	41	0,23
7	7458473,06	4965181,997	11:42	184	41	0,23

Table 8. Concentrations of heavy metals dissolved in water - data range 1

Tabela 8. Koncentracije teških metala rastvorenih u vodi – merni profil 1

Vertical	X (m)	Y (m)	Start time	Zn ( $\mu$ g/l)	Pb ( $\mu$ g/l)	Hg ( $\mu$ g/l)
2	7458544,141	4965452,988	18:37	= 7,6	< 0,5	< 0,1
4	7458603,136	4965332,325	15:34	= 8,2	< 0,5	< 0,1
6	7458494,45	4965235,747	12:38	= 13	< 0,5	< 0,1

Table 9. Concentrations of heavy metals attached to bed sediment - data range 1

Tabela 9. Koncentracije teških metala adsorbovanih na bed sediment – merni profil 1

Vertical	X (m)	Y (m)	Start time	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)
2	7458544,141	4965452,988	18:37			
4	7458603,136	4965332,325	15:34	502	85	0,3
6	7458494,45	4965235,747	12:38	578	148	0,2

## 6 Conclusions

This paper presents the concept, program and proof-of-concept example results of simultaneous rivers/reservoirs' flow, sediment, and water-sediment-quality data collection, accompanied by a riverbed bathymetry-survey (geodesic-data collection). A comprehensive and spatially/temporally synchronized data set, comprising flow data (water discharges, velocities, and free-surface elevations), sediment data (suspended sediment concentrations and grain-size distributions for suspended and bed sediment (sediment data), and water-sediment-quality data (concentrations of contaminants dissolved in water and attached to suspended- and bed-sediment particles), provides for an improved understanding and quantification of complex interaction between flow, sediment, and water-sediment-quality parameters in rivers and reservoirs.

Furthermore, since existing rivers/reservoirs regular monitoring practices typically include several institutions, each in charge of different data and monitoring aspects, the paper can be used as guidance for introducing the concept of integrated flow, sediment, and water-sediment-quality monitoring, stimulating (or conditional to) the closer cooperation between such institutions.

Results of the simultaneous rivers/reservoirs' flow, sediment, and water-sediment-quality data collection presented in this paper, can also be used for improvement (calibration and validation) of related, primarily 3-D (but also 2- and 1-D) models, used as decision-support tools in river and reservoir hydro-environmental management. The models most likely to benefit from such data are

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

those that include key elements of the complex interaction of unsteady flow, sediment transport and bed evolution, and water-dissolved and sediment-attached contaminants in alluvial rivers and reservoirs, such as:

- size-class dependent suspended-sediment concentration and transport and bed-load
- bed evolution, i.e. erosion and deposition patterns
- bed-surface and subsurface sediment layers and size-class distributions
- exchange between suspended and bed-surface sediment
- exchange between bed-surface and subsurface sediment
- transport and concentrations of water-dissolved contaminants
- size-class dependent concentrations of contaminants attached to sediments moving in suspension and bed-load
- size-class dependent concentrations of contaminants attached to bed-surface sediment
- size-class dependent concentrations of contaminants attached to subsurface sediment
- adsorption/desorption between water and sediment (size-class dependent suspended, bed surface and subsurface sediment)

Since the total duration of the actual data-collection campaign was seven days (at the pace of one data range per day), and since the flow conditions were changing during those seven days (e.g. the discharge was gradually decreasing, reaching approximately 1000 m<sup>3</sup>/s difference between the first and the seventh day), the collected data mirror the typical river/reservoir unsteady flow and constituents' transport situation. Therefore, a proper comparison with the data would require running the unsteady model over the seven-day period of data collection, and extracting relevant model results at corresponding data-collection locations and times.

## Acknowledgments

Financial support for measurements presented in this paper, as well as engagement of key investigators, were enabled by two projects. The project "Degradation Processes within HPP Iron Gates I and II Reservoirs, and Pollution Balance" (Energoprojekt – Hydroengineering, 2012/13), financed by Serbian Electrical Company EPS (in charge of Iron-Gates Hydro-Power System), provided for engagement of key experts from Energoprojekt–Hydroengineering and Belgrade City Institute for Public Health, focussed on the projects' requirements regarding the suspended-sediment quality data. The subproject "Monitoring and numerical modeling of hydrodynamic and morphologic processes", of the project "Monitoring and Modeling of Rivers and Reservoirs (MORE)", financed by the Ministry of Science and Technology (Republic of Serbia), provided the principal investigator from Civil Engineering Faculty Subotica, and the key hydrometry expert from Serbian Hydro-Meteorological Service. Serbian Environmental Protection Agency provided the key expert within the scope of their regular work on collecting water and bed-sediment quality data. Ministry of Mining and Energy (Republic of Serbia) enabled the use of the ship-laboratory Argus. Effort of Dr Enikő Anna on processing the sediment samples is especially appreciated. The measurements and data-collection support staff, as well as equipment and/or laboratory support, came from Serbian Hydro-Meteorological Service, Energoprojekt–Hydroengineering, Belgrade City Institute for Public Health, and Serbian Environmental Protection Agency. Dr Zoltan Horvat, as Civil Engineering Faculty graduate student at the time of measurements, helped with preparation of data tables and plots.

## Literature

1. Energoprojekt – Hydroengineering, (2012/13), "Degradation Processes within HPP Iron Gates I and II Reservoirs, and Pollution Balance", Project funded by Serbian Electrical Company EPS, Belgrade, Serbia.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

2. Holly, F.M., and Spasojevic, M., (1999), Three-Dimensional Mobile-Bed Modeling of the Old River Complex, Mississippi River, XXVIII<sup>th</sup> IAHR Congress in Graz, 22-27 August.
3. Muste, M., K. Yu, M. Spasojevic, (2004a). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 1, March, pp. 1-16.
4. Muste, M., K. Yu, T. Pratt, D. Abraham, (2004b). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part II: fixed-vessel measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 1, March, pp. 17-28.
5. Raphelt, N., and Spasojevic, M., (1999), Calibration of 3-Dimensional Mobile-Bed, Hydrodynamic Modeling at the Old River Control Structure Complex on the Mississippi River, Proc. International Water Resources Engineering Conference, Seattle, WA, 8-11 August (Reprint 1473).
6. Spasojevic, M. and Muste, M., (2002), Numerical model study of Berwick Harbor, Morgan City, Louisiana, IIHR Technical Report No. 422, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, April.
7. Spasojevic, M., Muste, M., and Holly, F.M. Jr., (2001), 3-D modeling of the Missouri River at Leavenworth Bend – Analysis of Missouri River Habitat Restoration Measures Using Numerical Modeling, IIHR Limited Distribution Report No. 296, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, October.
8. Spasojevic, M., and Holly, F.M., (2000), Field Data and 3D Mobile-Bed Modeling: Help or Hindrance? Hydroinformatics 2000, Fourth International Conference on Hydroinformatics, Iowa City, 23-27 July.
9. Tamás, E. A., Varga, A., Sziebert, J., Mátrai, I., Lengyel Varga, A., Spasojević, M., (2012), Simultaneous bathymetric, flow, sediment and water quality data collection at the Danybe River experimental Mohacs-Bezdan reach, 16<sup>th</sup> Conference of Serbian Society for Hydraulic Research and Serbian Society for Hydrology, Donji Milanovac, October 22-23, ISBN 978-86-7518-159-0.

## **Monitoring i modelisanje tečenja, sedimenta, morfodinamike i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih pritoka u Srbiji**

Miodrag Spasojević<sup>1</sup>, Zlatan Kovačević<sup>2</sup>, Aleksandar Ostojić<sup>3</sup>, Zoran Marinković<sup>4</sup>, Dušan Krstić<sup>5</sup>

APSTRAKT: Članak prikazuje rezultate monitoringa i parcijalnog modelisanja tečenja, sedimenta, morfodinamike i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih glavnih pritoka u Srbiji, uključujući protoke i nivoe vode, koncentracije i granulometrijski sastav sedimenta, transport suspendovanog sedimenta, promene (eroziju/zasipanje) korita, koncentracije zagađivača rastvorenih u vodi i adsorbovanih na čestice sedimenta. Dugoročni monitoring, numeričke simulacije i prognoze zasipanja, posebno akumulacije HE Đerdap 1, pokazuju da slojevi sedimenta deponovanog na dno imaju dvostruki negativni efekat: zarobljavaju zagađenje adsorbovano na čestice sedimenta i povećavaju nivoe vode, što ugrožava nasipe za zaštitu priobalja od poplava. Prikazane procedure monitoringa i modelisanja i podaci/rezultati sugerišu da ovako definisan kombinovani pristup monitoringa i modelisanja ima potencijal da postane koristan alat za podršku upravljačkim odlukama.

Ključne reči: monitoring, modelisanje, reke/akumulacije, hidrodinamika, morfodinamika, kvalitet

## **Monitoring and modelling the flow, sediment, bed evolution and water-sediment quality in the Danube and its tributaries in Serbia**

ABSTRACT: This paper presents results of flow, sediment, bed evolution, and water-sediment quality monitoring and partial modelling along the Danube and its main tributaries in Serbia, including water discharges and elevations, sediment concentrations and grain-size distributions, suspended sediment transport, river-bed aggradation and degradation, water-dissolved and sediment-attached pollutants. Long-term monitoring, numerical simulations and forecasts of, especially Iron Gates 1 Reservoir, sedimentation show the deposited sediment layers both trapping sediment-attached pollutants and increasing water elevations, thus endangering riparian-land flood-protection dikes. Presented monitoring and modelling procedures and data/results suggest that combined monitoring-modeling approach defined herein has potential to become the useful decision-support tool.

Keywords: monitoring, modelling, rivers/reservoirs, flow, morphodynamics, quality

---

<sup>1</sup> Miodrag Spasojević, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, [mspasojevic@gf.uns.ac.rs](mailto:mspasojevic@gf.uns.ac.rs)

<sup>2</sup> Zlatan Kovačević, Energoprojekt – Hidroinženjering, [zkovacevic@ephydro.com](mailto:zkovacevic@ephydro.com)

<sup>3</sup> Aleksandar Ostojić, Energoprojekt – Hidroinženjering, [aostojic@ephydro.com](mailto:aostojic@ephydro.com)

<sup>4</sup> Zoran Marinković, Energoprojekt – Hidroinženjering, [zmarinkovic@ephydro.com](mailto:zmarinkovic@ephydro.com)

<sup>5</sup> Dušan Krstić, Energoprojekt – Hidroinženjering, [dkrstic@ephydro.com](mailto:dkrstic@ephydro.com)

## 1 Uvod

Spasojević i sar., 2018 definišu elemente složene interakcije vodene struje i sedimenta sa kvalitetom vode i sedimenta u rekama i akumulacijama, o kojima treba voditi računa kako pri planiranju i sprovođenju monitoringa, tako i pri odgovarajućem modelisanju ovog problema.

Ovaj rad se bavi praktičnim problemima monitoringa i modelisanja interakcije strujanja vode, transporta sedimenta, morfodinamičkih promena korita, a zatim i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih glavnih pritoka u Srbiji, oslanjajući se na rezultate četiri studije koje sproveo Energoprojekt-Hidroinženjering 2009/11, 2012/13, 2015/16a i 2015/16b.

Veličina oblasti izučavanja je nametnula primenu linijskog modela. Pri izboru modela su korišćena ranija iskustva sa primenom linijskih modela na prirodne aluvialne vodotoke Severne Amerike (Holly i sar., 1985, Karim i sar., 1987, Holly i sar., 1987, Holly i sar., 1990), kao i prethodna razmatranja primene programa CHARIMA (Holly i sar., 1990) na formiranje modela Dunava i pritoka uzvodno od HE Đerdap (Babić-Mladenović i sar., 2003). Za modelisanje prikazano u ovom radu je korišćen program CHARIMA, koji zadovoljava sve ključne zahteve modelisanja tečenja vode, morfodinamike i transporta sedimenta, kao i zagađivača rastvorenih u vodi i adsorbovanih na čestice sedimenta. Modelisanje prikazano u ovom radu je započelo od modela akumulacije HE Đerdap 1, da bi se zatim proširilo na modelisanje akumulacije HE Đerdap 2 i nizvodne deonice Dunava do ušća Timoka (granica sa Bugarskom), i konačno upotpunilo modelima Dunava, Save i Tise uzvodno od akumulacije HE Đerdap 1.

Raspoloživi podaci su dobijeni prikupljanjem, analizom i sistematizacijom rezultata redovnog relevantnog monitoringa u Srbiji, polazeći od morfoloških podataka, koji su, između ostalog, neophodni i za početno definisanje oblasti modelisanja. Sistematski monitoring morfoloških podataka na Dunavu i pritokama u Srbiji sprovodi HE Đerdap, odnosno Direkcija za vodne puteve (Plovput).

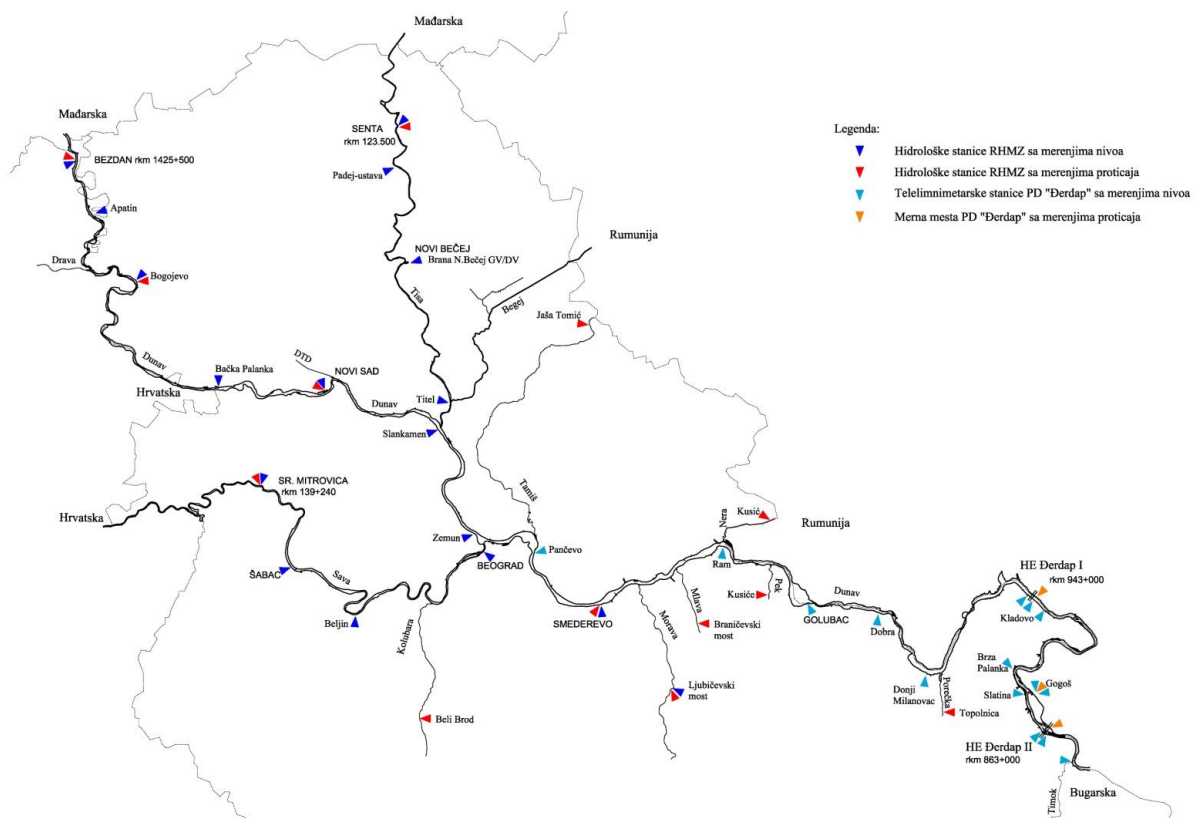
HE Đerdap organizuje periodična snimanja poprečnih profila unutar svojih akumulacija i pripadajućih (relevantnih) vodotoka, radi periodičnog redefinisavanja aktuelne morfologije i praćenja morfoloških promena akumulacija. Oblast modelisanja akumulacije HE Đerdap 1 je definisana na osnovu raspoloživih morfoloških podataka HE Đerdap, koji pokrivaju Dunav od brane (rkm 943) do Novog Sada (rkm 1254.15), Savu do Šapca (rkm 102.85), Tisu do brane u Novom Bečeju (rkm 62.35), Veliku Moravu do rkm 20.335, kao i zone ušća šest manjih pritoka Dunava i Save (Porečke, Pek, Nera, Mlava, Tamiš i Kolubara). Oblast modelisanja dela nizvodno od brane HE Đerdap 1, odnosno akumulacije HE Đerdap 2 i nizvodne deonice Dunava do ušća Timoka (rkm 845.8), je takođe definisana na osnovu batimetrijskih podataka HE Đerdap. Prosečno rastojanje snimanih profila HE Đerdap na Dunavu od ušća Timoka do Beograda (rkm 1169) je oko 1 km, dok je prosečno rastojanje snimanih profila na Dunavu uzvodno od Beograda, kao i na Savi, Tisi i Velikoj Moravi, oko 3-4 km.

Direkcija za vodne puteve (Plovput) sprovodi batimetrijska snimanja na Dunavu, Savi i Tisi uzvodno od akumulacije HE Đerdap 1, uključujući i uzvodne delove same akumulacije, prema metodologiji, dinamici i sa rastojanjima profila usklađenim sa potrebama praćenja uslova plovidbe. Oblasti dodatnih modela Dunava, Save i Tise uzvodno od akumulacije HE Đerdap 1 su definisane na osnovu odabranih profila Plovput-a, sa prosečnim rastojanjem od oko 1 km.

## 2 Protoci i nivoi vode

### 2.1 Sistematski monitoring

Sistematski monitoring podataka o protocima i nivoima vode na Dunavu i pritokama u Srbiji sprovode Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ) i PD Đerdap. Slika 1 prikazuje sve lokacije mernih stanica PD Đerdap (sa raspoloživim satnim vrednostima), kao i relevantne stanice RHMZ (sa raspoloživim dnevnim vrednostima). U obzir nisu uzimane stanice RHMZ na Dunavu nizvodno od Smedereva, gde su dnevne vrednosti pod snažnim uticajem varijabilnog rada HE Đerdap.



Slika 1. Stanice za monitoring protoka i nivoa vode

Figure 1. Stations for monitoring water discharges and elevations

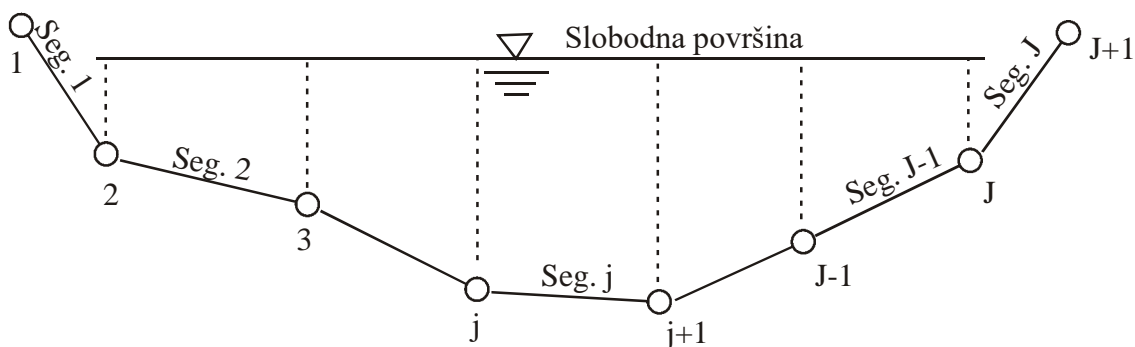
## 2.2 Unapredena modela

Modelisanje protoka i nivoa vode se zasniva na numeričkom rešavanju St. Venant-ovih jednačina za složeni sistem prirodnih vodotoka, koji uključuje glavni tok i pritoke, račvanja i spajanja tokova oko rečnih ada, itd. Jedan od ključnih elemenata je modelisanje veze poduznog nagiba linije energije  $S_f$  i protoka vode kroz poprečni presek vodene struje  $Q$ , izražene preko tzv. hidrauličke propusnosti poprečnog preseka korita  $K$ , što omogućava da se  $K$  definiše preko nekog od uobičajenih izraza za otpore trenja, kao što su Manning-ov ( $K_{Mann}$ ), Strickler-ov ( $K_{Str}$ ), ili Darcy-Weisbach-ov ( $K_{D-W}$ ). Jednačine (1) pokazuju da  $K$  kombinuje geometrijske karakteristike preseka (površinu  $A$  i hidraulički radijus  $R$ ) sa odgovarajućim koeficijentom trenja, kao što je Manning-ov  $n$ , Strickler-ov  $n_{str}$ , ili Darcy-Weisbach-ov  $C_\tau$ , odakle slede i međusobne veze  $n$  i  $n_{str}$  sa  $C_\tau$ .

$$Q = K\sqrt{S_f} \quad K_{Mann} = \frac{1}{n}AR^{2/3} \quad K_{Str} = n_{str}\frac{1}{n}AR^{2/3} \quad K_{D-W} = \sqrt{\frac{2}{C_\tau}}A\sqrt{gR} \quad n = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{\frac{2g}{C_\tau}}} \quad n_{str} = \frac{\sqrt{\frac{2g}{C_\tau}}}{R^{1/6}} \quad (1)$$

Složeni presek prirodnog vodotoka (slika 2) se može podeliti na  $J$  segmenata, tako da svakom pojedinačnom segmentu  $j$  odgovara elementarni protok  $Q_j$ , površina  $A_j$  i hidraulička propusnost  $K_j$ . Ovo omogućava da se  $K_j$  računa preko izabrane veze iz jednačina (1), a da pri tome odgovarajući koeficijent trenja varira od segmenta do segmenta, odnosno duž preseka.





Slika 2. Složeni poprečni presek podeljen na segmente

Figure 2. Compound cross section divided into segments

Jedna od osnovnih pretpostavki linijskih modela (da je nivo slobodne površine vode, a time i podužni nagib linije energije  $S_f$ , konstantan po preseku struje), nameće da se ukupni protok  $Q$ , površina  $A$  i hidraulička propusnost  $K$  preseka definišu jednačinama (2).

$$Q = \sum_{j=1}^J Q_j \quad A = \sum_{j=1}^J A_j \quad K = \sum_{j=1}^J K_j \quad (2)$$

Za segment  $j$  poprečnog preseka se može napisati standardan izraz za napon trenja  $\tau$  na dodiru sa čvrstom granicom (u kome je  $C_\tau$  koeficijent trenja,  $v$  prosečna brzina vode za segment i  $\rho$  gustina vode).

$$\tau = C_\tau \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{odakle sledi veza} \quad \sqrt{\frac{2}{C_\tau}} = \frac{v}{\sqrt{\tau/\rho}} \quad (3)$$

Bezdimenzionalni oblik rasporeda brzina duž srednje vertikale segmenta  $j$  se može predstaviti korišćenjem teorijske logaritamske zakonitosti za hrapav zid, gde je  $u(z)$  brzina u tački na vertikalnom rastojanju  $z$  od zida, a  $k$  apsolutna hrapavost zida:

$$\frac{u(z)}{\sqrt{\tau/\rho}} = 2.5 \ln \left( \frac{z}{k} \right) + 8.5 = \frac{1}{0.4} \ln \left( \frac{z}{k} \right) + 8.5 \quad (4)$$

Osrednjavanjem jednačine (4) po dubini vode  $h$  u srednjoj vertikali, dobija se bezdimenzionalni izraz za prosečnu brzinu  $v$  vode u vertikali (desna strana veze u jednačini (3)), što (uz pretpostavku da je to i prosečna brzina za ceo presek segmenta) definiše koeficijent trenja  $C_\tau$  (leva strana veze u jednačini (3)) u zavisnosti od srednje dubine  $h$  i hrapavosti  $k$  segmenta  $j$ :

$$C_\tau = C_\tau(h, k) \quad (5)$$

Pošto dubine vode u segmentima zavise od nivoa slobodne površine vode u preseku, jednačina (5) definiše zavisnost koeficijenta trenja od nivoa vode, ali i njegove promene duž preseka pri datom nivou (nametnute promenama dubine čak i kada se hrapavost duž preseka ne menja), dok se pri proračunima apsolutna hrapavost  $k$  zadaje kao parameter kalibracije modela.

Prethodno je, radi ilustracije, primenjeno na jedan segment preseka sa pretpostavljenom dubinom vode od  $h = 10 \text{ m}$  u srednjoj vertikali segmenta. Podaci o granulometrijskom sastavu sugerišu da je karakteristično zrno  $d_{90}$  mešavine sedimenta na dnu Dunava približne veličine od oko  $8 \text{ mm}$ . Uobičajena preporuka da je, za ravnu površinu pokrivenu mešavinom sedimenta, apsolutna hrapavost  $k$  tri puta veća od  $d_{90}$ , daje vrednost  $k \sim 2.4 \text{ cm}$ . Uz navedene vrednosti za  $h$  i  $k$  dobija se da je  $C_\tau = 0.0045$ , dok veza  $n$  i  $C_\tau$  iz jednačine (1), uz pretpostavku  $R \cong h$ , daje  $n = 0.022 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ , što sve spada u domen uobičajenih (očekivanih) vrednosti koeficijenata trenja.

Da korišćenje teorijskih rasporeda brzina, kao i iz njih izvedenih teorijskih zakonitosti za otpore trenja, zahteva pažljivu analizu konteksta primene, pokazuje i sledeći primer. Gessler i sar., 1999, su,

za potrebe 3-D modela, definisali granični uslov u blizini dna (gde je  $A_v$  kinematski koeficijent turbulentne viskoznosti,  $C_d$  koeficijent otpora - polovina  $C_\tau$ , a  $u_1$  brzina vode u blizini dna) kao:

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau}{\rho} = C_d u_1^2 \quad (6)$$

a pošto je za teorijski logaritamski raspored brzina korišćen pojednostavljeni oblik jednačine (4):

$$\frac{u(z)}{\sqrt{\tau/\rho}} = 2.5 \ln\left(\frac{z}{k}\right) = \frac{1}{0.4} \ln\left(\frac{z}{k}\right) \quad (7)$$

dobijen je i pojednostavljeni izraz za teorijski koeficijent otpora  $C_d$  (gde je  $z_1$  definisano kao polovina sloja prizidnog dela vodene struje):

$$\sqrt{\frac{1}{C_d}} = \frac{1}{0.4} \ln\left(\frac{z_1}{k}\right) \quad (8)$$

Očigledno je da jednačina (8) daje koeficijent otpora sračunat preko prizidne brzine vodene struje (uz pretpostavku da je  $u_1$  približno prosečna brzina za prizidni sloj struje), a ne preko prosečne brzine za ukupnu dubinu  $h$  od dna do slobodne površine vode, pa korišćenje ovog izraza u kontekstu 1-D modela može biti problematično. Jedan od pokušaja da se jednačina (8) koristi u kontekstu 1-D modela rezultirao je definisanjem kote  $z_1$  kao frakcije  $c_1$  dubine  $h$ , odnosno uvođenjem formulacije  $z_1 = c_1 h$  u jednačinu (8), tako da je preporučeni sledeći izraz za  $C_d$ :

$$C_d = \frac{(0.4)^2}{\left[\ln\left(\frac{c_1 h}{k}\right)\right]^2} \quad (9)$$

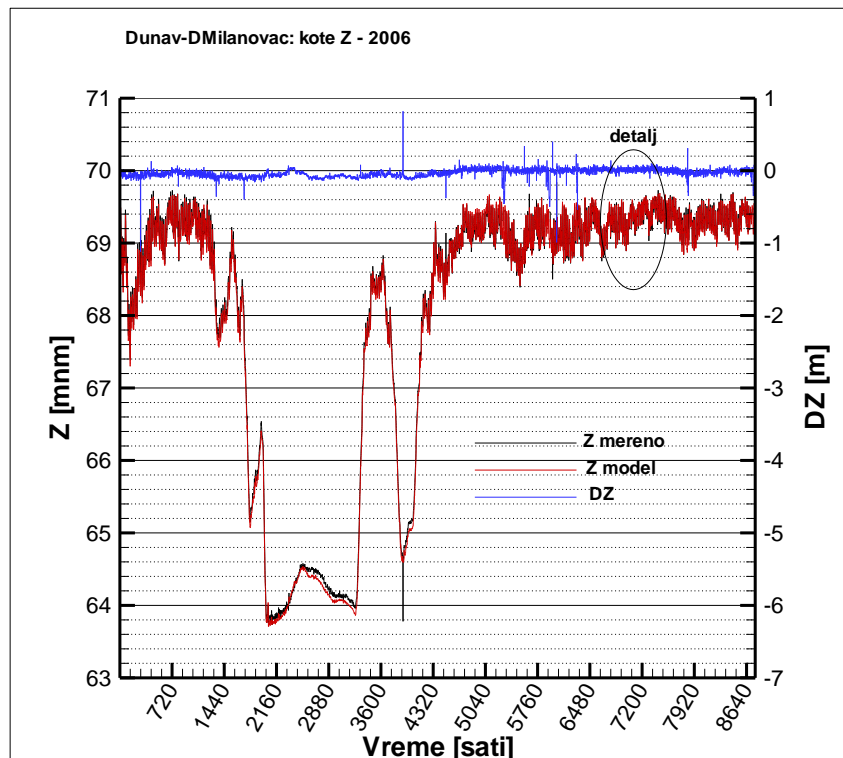
Uz jednačinu (9) preporučena je i veza Strickler-ovog koeficijenta trenja  $n_{str}$  (recipročna vrednost Manning-ovog  $n$ ) sa koeficijentom otpora  $C_d$ , koja je zapravo ista kao veza  $n_{str}$  i  $C_\tau$  (jednačine (1)), pošto je  $R \cong h$ , a  $C_d$  polovina od  $C_\tau$ :

$$n_{str} = \sqrt{\frac{g}{C_d}} h^{-1/6} \quad (10)$$

Pošto izraz (9) uvodi dva koeficijenta kalibracije, apsolutnu hrapavost  $k$  i frakciju dubine  $c_1$ , to je prevaziđeno preporukom da se za praktičnu upotrebu koristi fiksirana vrednost  $c_1=0.01$ . Ako se koristi preporučeno  $c_1=0.01$ , ranije procenjena apsolutna hrapavost  $k \sim 2.4 \text{ cm}$  i pretpostavljena dubina vode od  $h = 10 \text{ m}$  u srednjoj vertikali segmenta, iz jednačine (9) se dobija  $C_d \cong 0.08$  ( $C_\tau \cong 0.16$ ), a kada se sračunato  $C_d$  uvrsti u jednačinu (10), dobija se  $n_{str} \cong 7.5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  ( $n \cong 0.13 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ), što ne spada u domen uobičajenih (očekivanih) vrednosti koeficijentata trenja. Ako se pokuša sa ranije sračunatim  $C_\tau = 0.0045$ , što daje  $C_d = 0.00225$ , iz jednačine (9) se dobija  $k \cong 0.00002 \text{ m}$ , što čak dovodi u pitanje i uobičajenu pretpostavku da se dno reke ponaša kao hrapav zid.

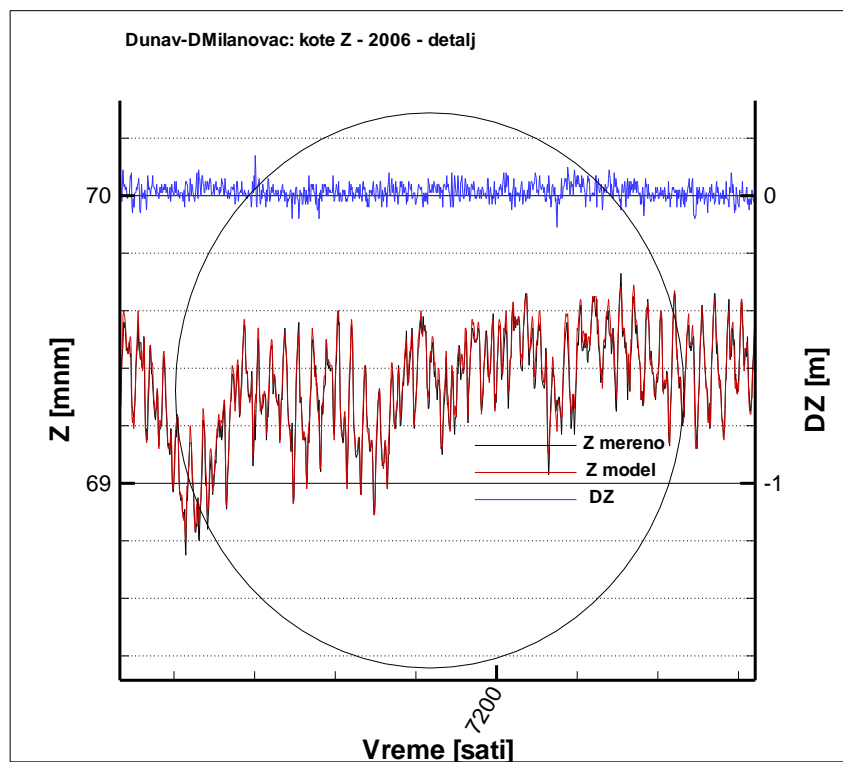
## 2.3 Primeri rezultata modelisanja

Kalibracija modela, sa jedinstvenim setom izabranih apsolutnih hrapavosti, je sprovedena za 2006. godinu, a verifikacija za period 2007.-2010. godine, a koeficijenti trenja  $C_\tau$ , računati po zavisnosti (5), za zadate vrednosti  $k$  variraju i po širini toka i sa promenom dubine. Primeri rezultata su prikazani na slikama 3 do 6, gde jedan podeok vremenskoj osi predstavlja mesec (kod kalibracije) ili godinu dana (kod verifikacije). Poređenje rezultata modelisanih i merenih nivoa ( $Z$ ) za stanicu Donji Milanovac (slike 3 i 4) pokazuje razlike (DZ) veličine do 10 cm tokom prolaska ekstremnog talasa (april-maj) 2006., odnosno razlike do 5 cm van tog perioda. Slične razlike se vide i na slikama 5 i 6 (merna stanica Zemun), osim nešto većih vrednosti (20 – 30 cm) u vreme oko pika ekstremnog talasa, verovatno uzrokovanih problematičnim modelskim tretiranjem reke Tamiš, gde je na ušću zadavan mereni hidrogram sa stanice Jaša Tomić (slika 1), mada je ta stanica (na kojoj se tokom ekstremnog talasa takođe pojavljuju ekstremne vrednosti proticaja) od ušća udaljena preko 100 km.



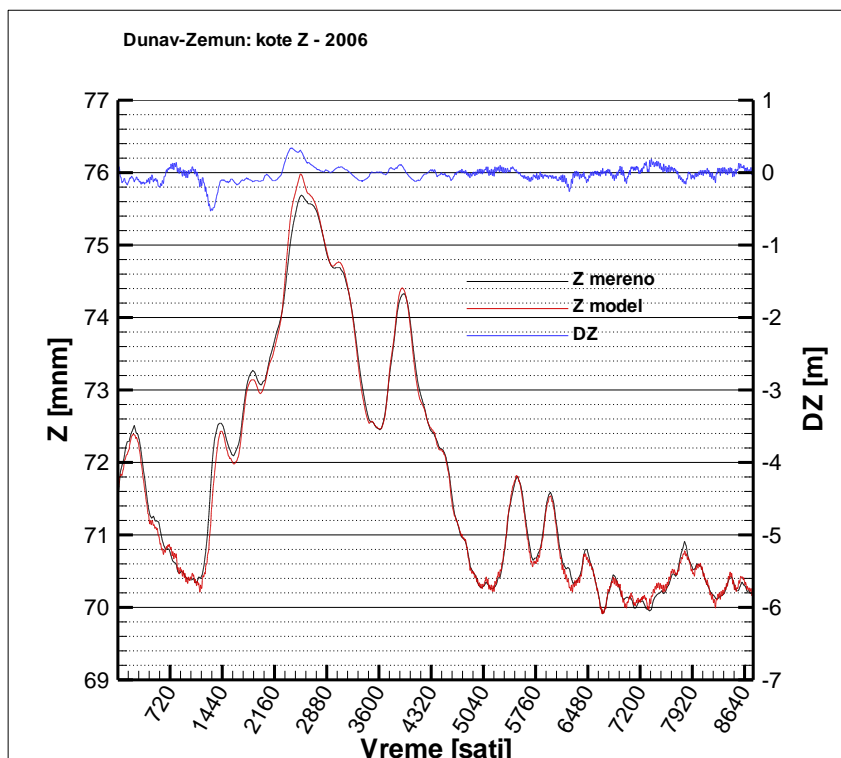
Slika 3. Mereni i modelisani nivoi slobodne površine vode – Dunav – D.Milanovac – 2006.

Figure 3. Measured and computed free-surface elevations – Danube – D.Milanovac - 2006



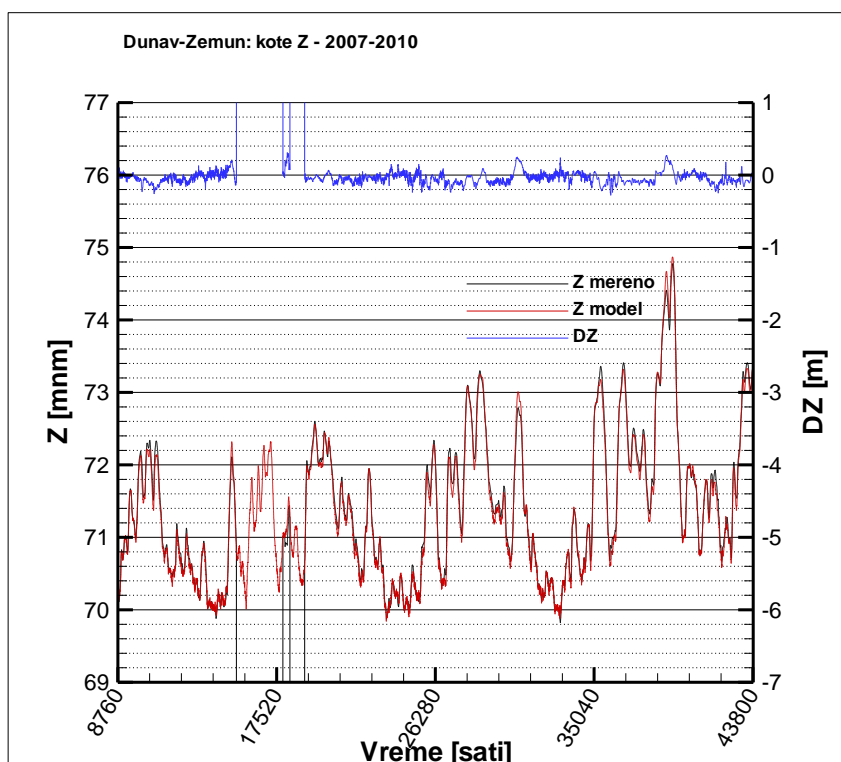
Slika 4. Mereni i modelisani nivoi slobodne površine vode – Dunav – D.Milanovac – 2006. - detalj

Figure 4. Measured and computed free-surface elevations – Danube – D.Milanovac – 2006 - detail



Slika 5. Mereni i modelisani nivoi slobodne površine vode – Dunav – Zemun – 2006.

Figure 5. Measured and computed free-surface elevations – Danube – Zemun – 2006



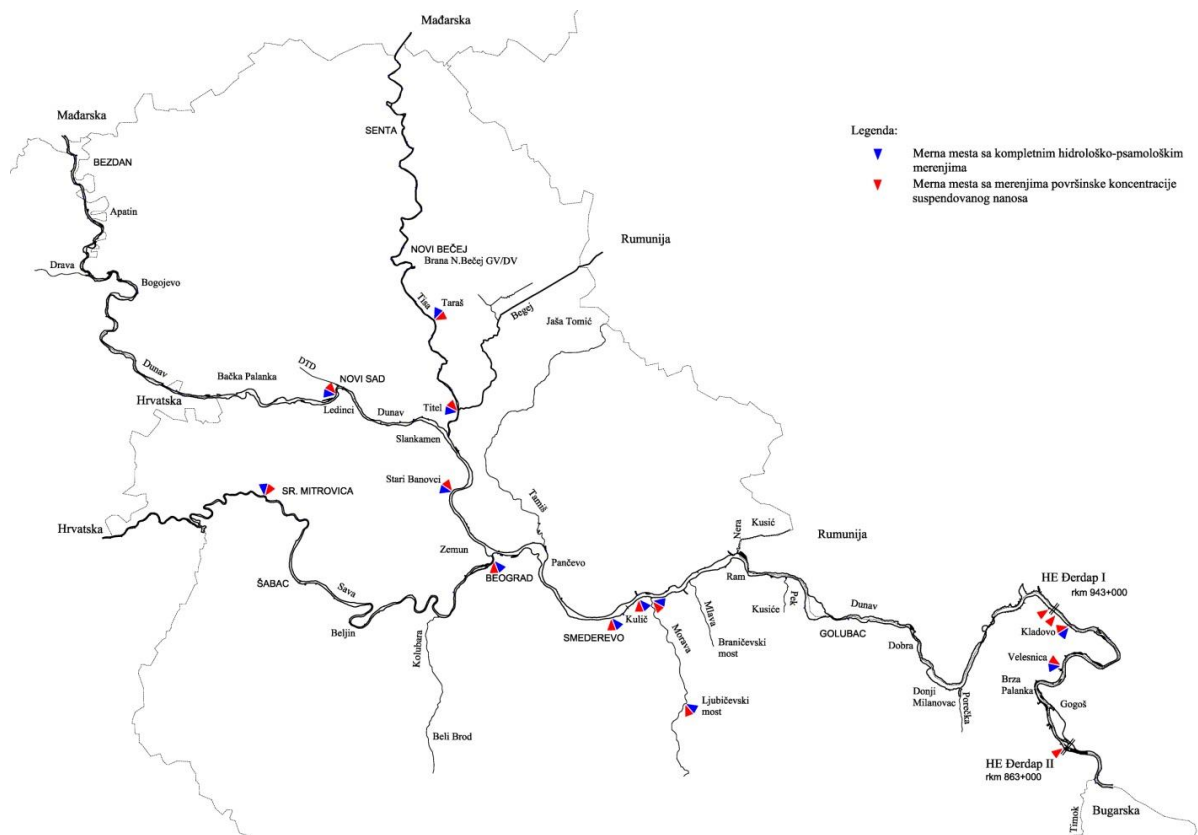
Slika 6. Mereni i modelisani nivoi slobodne površine vode – Dunav – Zemun – 2007.-2010.

Figure 6. Measured and computed free-surface elevations – Danube – Zemun – 2007-2010

### 3 Sediment i morfološke promene korita

#### 3.1 Sistematski monitoring

Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ) sprovodi ograničeni monitoring sedimenta, tako što nudi podatke o pronosu suspendovanog sedimenta na manjem broju izabranih stanica (uključujući i Dunav i pritoke u Srbiji), zasnovane na korelacijama sa protokom vode. PD Đerdap organizuje obuhvatni Program stalnog praćenja hidrauličko-hidroloških, psamoloških i morfoloških promena u akumulacijama HE Đerdap, koji je 1974. iniciran za akumulaciju HE Đerdap 1, a od 1985. godine proširen i na akumulaciju HE Đerdap 2. Jedan deo Programa čine ranije pomenuta periodična snimanja poprečnih profila i praćenja morfoloških promena korita, a drugi deo, koji sprovodi Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", čine periodična kompletna hidrološko-psamološka merenja, kao i dnevno uzimanje uzoraka i određivanje površinske koncentracije suspendovanog sedimenta na izabranim stanicama (slika 7). Kompletna hidrološko-psamološka merenja uključuju merenje brzina odnosno protoka vode, određivanje srednje profilne koncentracije i pronosa suspendovanog sedimenta, kao i određivanje granulometrijskog sastava sedimenta u suspenziji i na dnu. Dokumentacija kompletnih hidrološko-psamološka merenja za pojedinačno merenje u određenom mernom preseku sadrži podatke o koti slobodne površine vode i odgovarajućoj površini preseka (F), protoku (Q), srednjoj profilskoj koncentraciji suspendovanog sedimenta (Csr), površinskoj koncentraciji suspendovanog sedimenta (Cpov), kao i granulometrijske krive sedimenta u suspenziji i na dnu. Mereni protok i srednja profilna koncentracija suspendovanog sedimenta proizvode mereni pronos suspendovanog sedimenta (P).



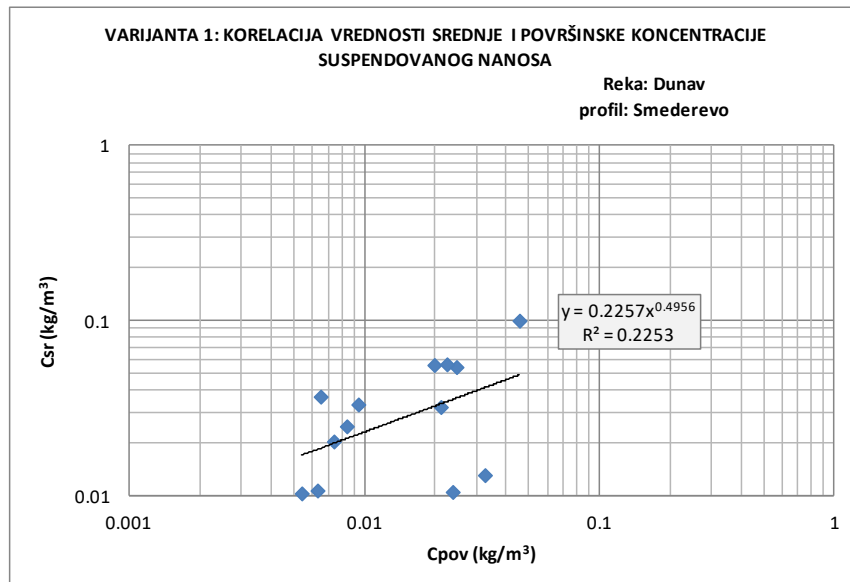
Slika 7. Stanice PD Đerdap za monitoring psamoloških parametara

Figure 7. Iron Gates stations for monitoring sediment parameters

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

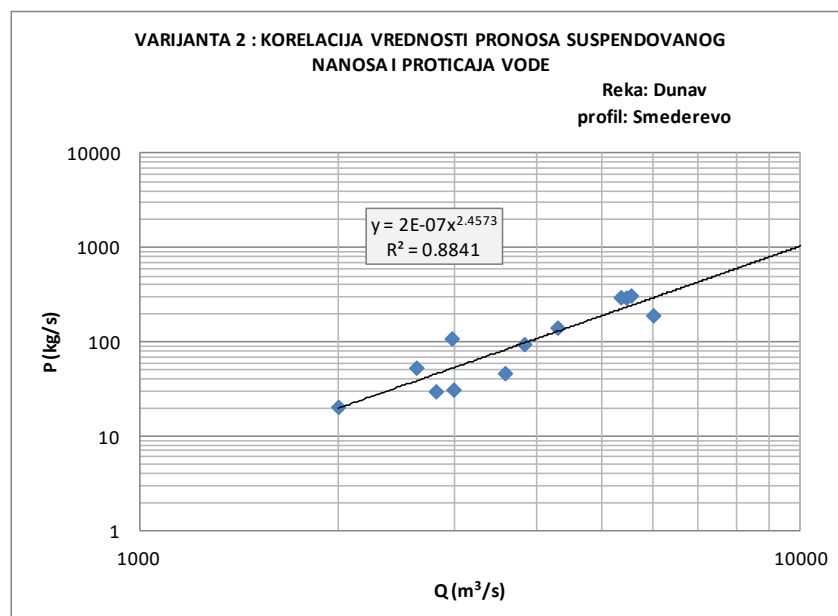
Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Preduslov za kontinualne simulacije transporta sedimenta i mofoloških promena korita su kontinualne vrednosti srednjih profilskih koncentracija sedimenta, koje se, na osnovu podataka kompletnih hidrološko-psamološka merenja, mogu odgovarajućim korelacijama odrediti na dva načina. Korelacije srednjih i površinskih koncentracije suspendovanog sedimenta (slika 8) su se pokazale kao nepovoljnije od korelacija pronosa suspendovanog sedimenta i protoka vode (slika 9). Slike 8 i 9 ukazuju i na ograničen broj merenja, što takođe utiče na kvalitet korelacija.



Slika 8. Korelacije srednje i površinske koncentracije suspendovanog sedimenta - Smederevo

Figure 8. Correlations between an average and surface suspended-sediment concentrations – Smederevo

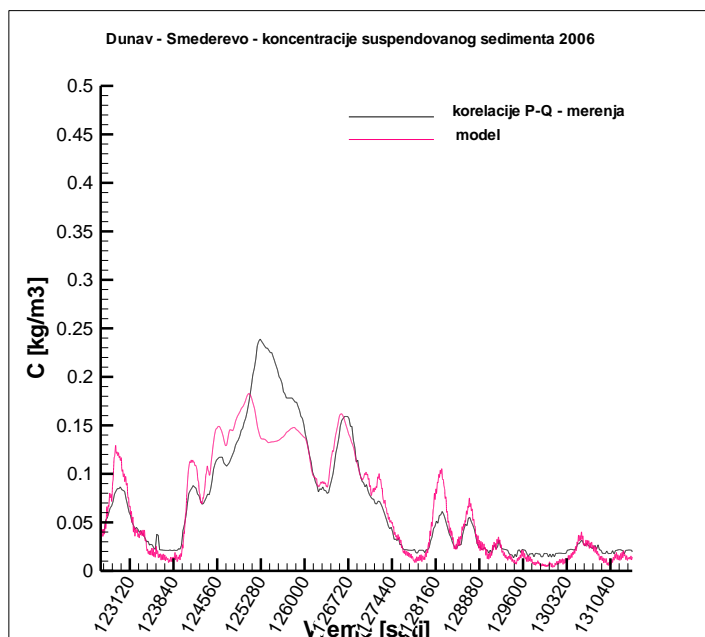


Slika 9. Korelacije pronosa suspendovanog sedimenta i protoka vode - Smederevo

Figure 9. Correlations between an suspended-sediment transport and water discharge – Smederevo

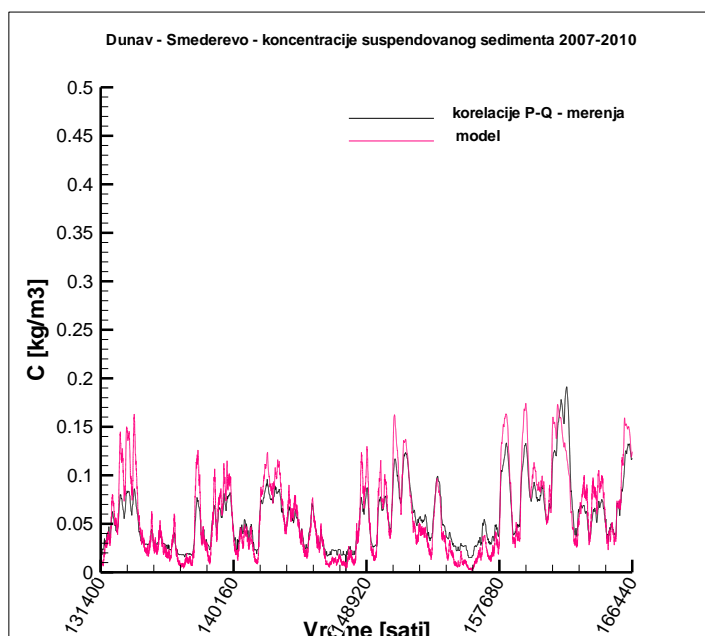
### 3.2 Primeri rezultata modelisanja

Kao primer rezultata kalibracije (2006. godina) i verifikacije (period 2007.-2010. godina) modela transporta sedimenta, prikazana su poređenja sračunatih i modelisanih koncentracija suspendovanog sedimenta za stanicu Smederevo (slike 10 i 11), izdvojena iz simulacija dugoročnog perioda od 1992. do 2010. godine.



Slika 10. Koncentracije suspendovanog sedimenta - model i podaci merenja – Smederevo 2006.

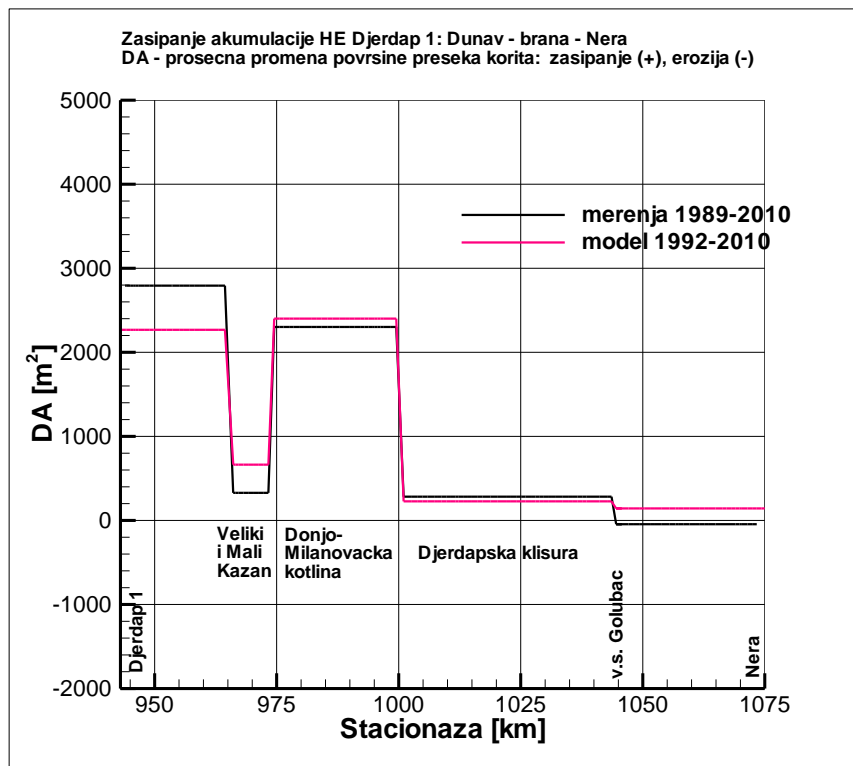
Figure 10. Suspended-sediment concentrations – model and data -- Smederevo 2006



Slika 11. Koncentracije suspendovanog sedimenta - model i podaci merenja – Smederevo 2007.-2010.

Figure 11. Suspended-sediment concentrations – model and data -- Smederevo 2007-2010

Kao primer rezultata modelisanja morfoloških promena korita od 1992. do 2010. godine, prikazano je poređenje merenih i modelisanih morfoloških promena najnižvodnijeg dela akumulacije HE Đerdap 1, gde je zasipanje najizraženije (slika 12).



Slika 12. Zasipanje akumulacije HE Đerdap 1 - model (1992.-2010.) i merenja

Figure 12. Iron Gate 1 Reservoir sedimentation - model (1992.-2010.) and data

## 4 Kvalitet vode i sedimenta

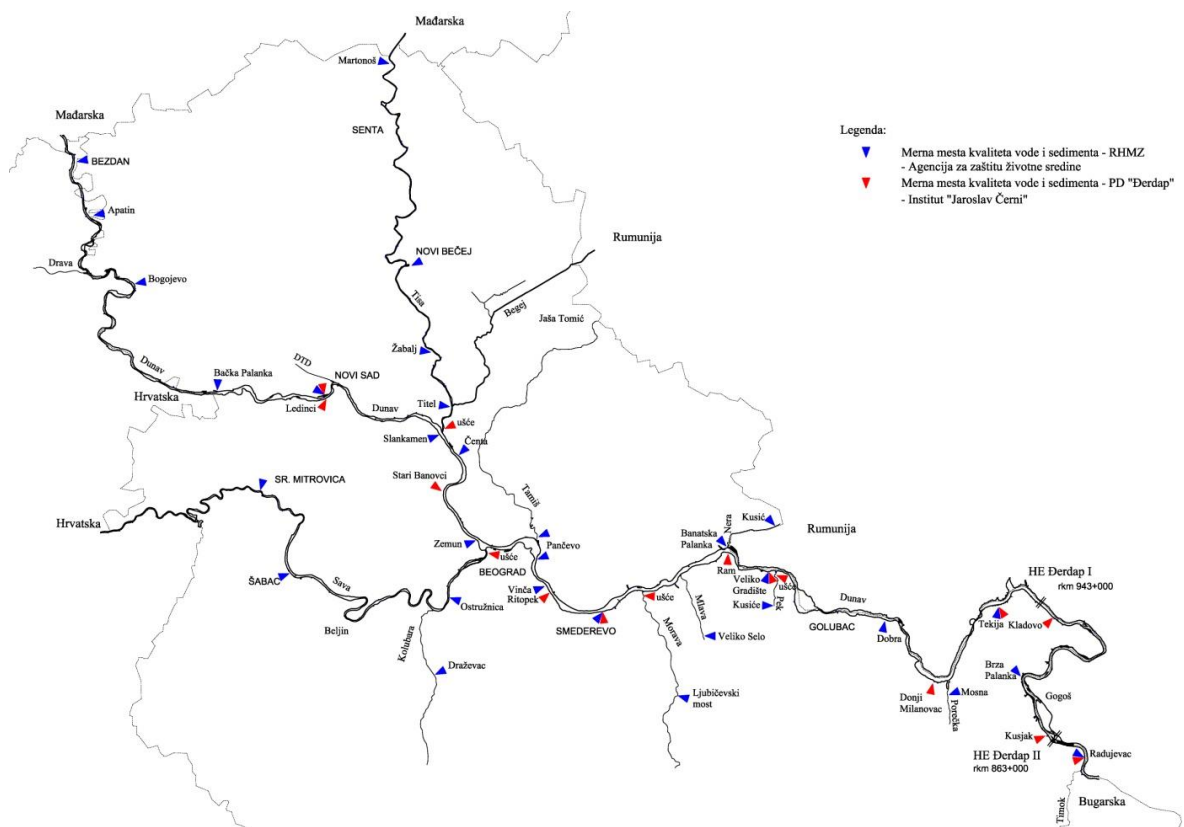
### 4.1 Sistematski monitoring

Sistematski monitoring kvaliteta vode i sedimenta na Dunavu i pritokama u Srbiji je započeo Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ), a zatim, po svom osnivanju, preuzela Agencija za zaštitu životne sredine. Paralelno sa tim, PD Đerdap organizuje sistematski monitoring kvaliteta vode i sedimenta u akumulacijama HE Đerdap 1 i 2, koji sprovodi Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. U oba slučaja, najraniji raspoloživi podaci datiraju iz 2001. godine, a podaci o kvalitetu sedimenta se odnose samo na sediment na dnu, ne i u suspenziji. Izveštaji o kvalitetu vode RHMZ i Agencije za zaštitu životne sredine sadrže informaciju o tome da li se radi o koncentracijama sastojaka u ukupnom uzorku vode i suspendovanih materija, ili o samo o koncentracijama sastojaka rastvorenih u vodi (što je u skladu sa aktuelnom regulativom EU). Izveštaji o kvalitetu vode PD Đerdap (Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“) ovu informaciju na sadrže. Slika 13 pokazuje lokacije svih stanica za monitoring kvaliteta vode i sedimenta u razmatranoj oblasti. Slike 14 i 15, na primeru koncentracija žive u vodi, ilustruju razilaženja rezultata monitoringa, koji na istoj lokaciji sprovode različite institucije, sugerišući potrebu za objašnjenjem razlika i poređenjem metodologije uzorkovanja i analiza uzoraka.



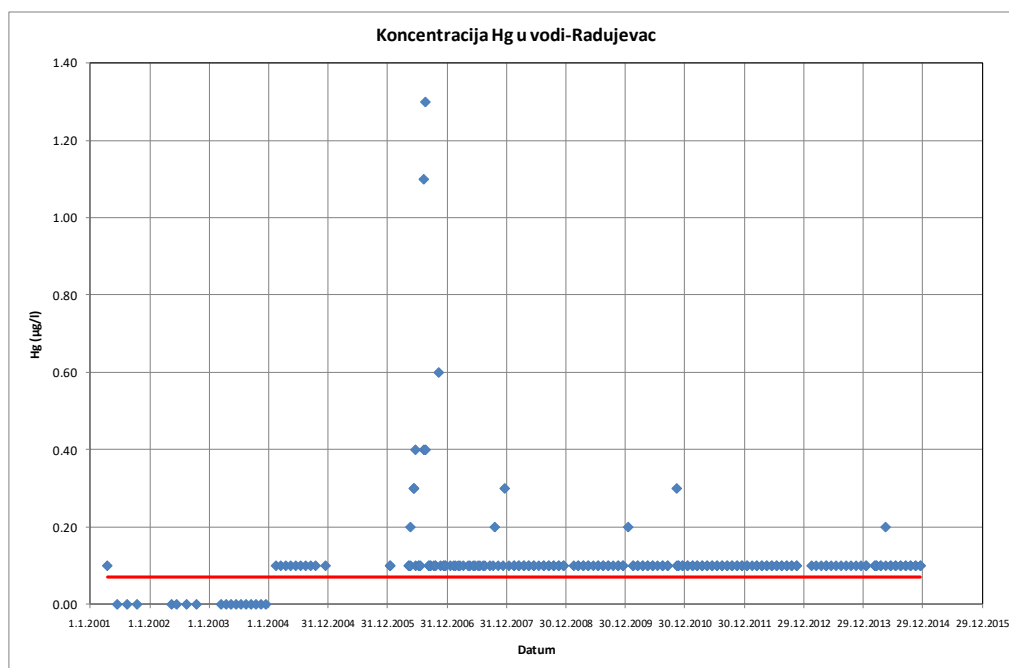
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



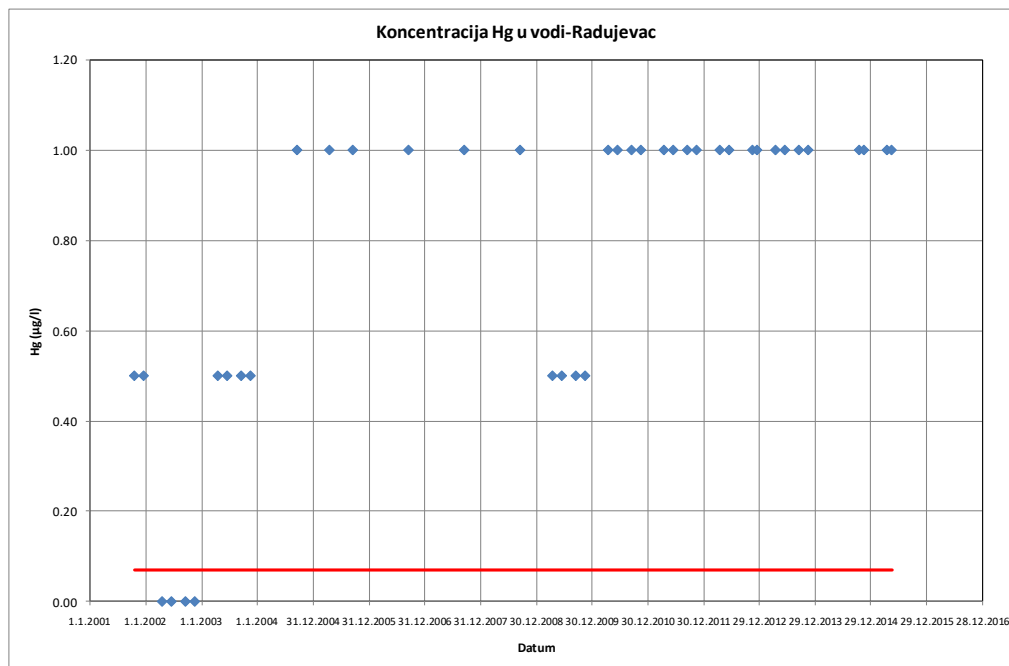
Slika 13. Stanice za monitoring kvaliteta vode i sedimenta

Figure 13. Stations for monitoring water and sediment quality



Slika 14. Agencija za zaštitu životne sredine - živa u vodi – Dunav, stanica Radujevac

Figure 14. Serbian Environmental Protection Agency - mercury in water – Danube, Radujevac station



Slika 15. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ - živa u vodi – Dunav, stanica Radujevac

Figure 15. Water Resources Institute „Jaroslav Černi“ - mercury in water – Danube, Radujevac station

## 4.2 Primeri rezultata modelisanja

Slike 16, 17 i 18 prikazuju primere modelisanih koncentracije cinka rastvorenog u vodi, cinka adsorbovanog na čestice suspendovanog sedimenta i cinka adsorbovanog na čestice sedimenta na dnu, za lokacije Stari Banovci i Zemun na Dunavu, za period tokom 2006. godine.

Monitoring na stanici Stari Banovci sprovodi Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, a na stanici Zemun Agencija za zaštitu životne sredine. Obe institucije sprovode isključivo monitoring kvaliteta vode i kvaliteta sedimenta na dnu. Ograničeni podaci o kvalitetu sedimenta u suspenziji su prikupljeni na Dunavu, na lokacijama Beograd (Energoprojekt – Hidroinženjering, 2012/13) i Beždan (Energoprojekt – Hidroinženjering, 2015/16a).

Raspoloživi rezultati merenih koncentracija cinka rastvorenog u vodi 2006. godine:

- Stari Banovci: - jedno merenje  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Zemun: - 4 merenja – prosek  $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Raspoloživi rezultati merenih koncentracija cinka adsorbovanog na čestice suspendovanog sedimenta:

- Beograd 2013. – prosek merenja  $\sim 150 \mu\text{g}/\text{kg}$
- Beždan 2015. –  $252 \mu\text{g}/\text{kg}$

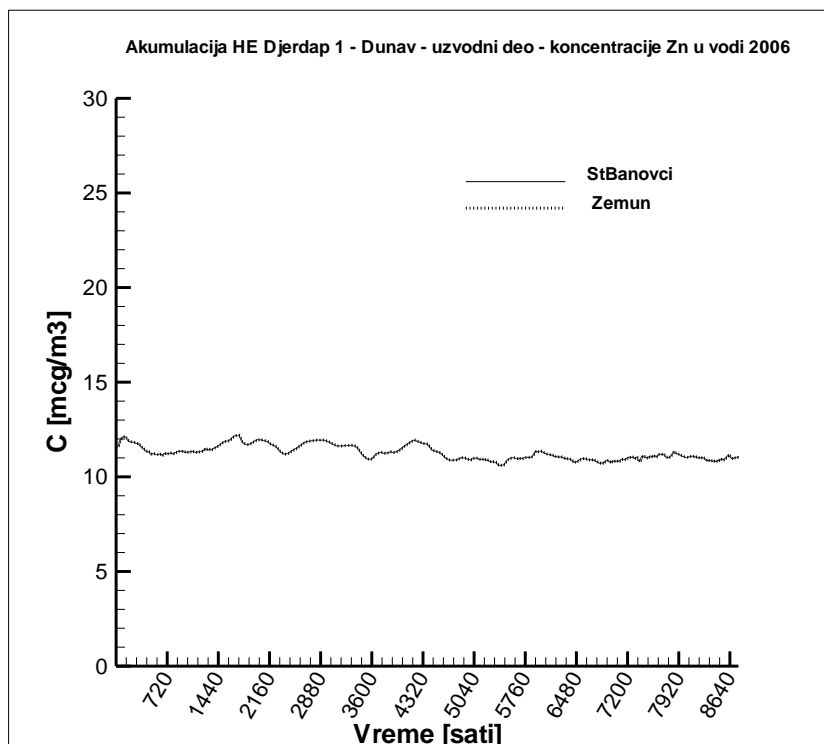
Raspoloživi rezultati merenih koncentracija cinka adsorbovanog na čestice sedimenta na dnu:

- Stari Banovci: - 2006. nema merenja, najbliže merenje 2007.  $199.5 \mu\text{g}/\text{kg}$
- Zemun – 2006. nema merenja, jedino merenje 2012.  $228 \mu\text{g}/\text{kg}$

Na osnovu ograničenog broja raspoloživih podataka monitoringa za simulirani period, može se jedino zaključiti da rezultati modelisanja (slike 15, 16 i 17) reprodukuju red veličine merenih vrednosti.

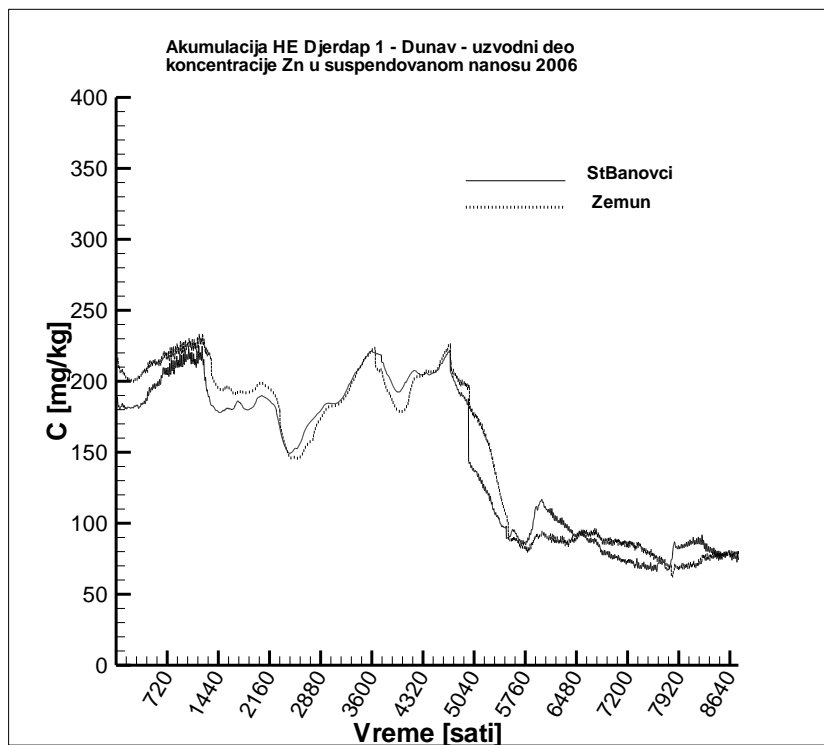
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



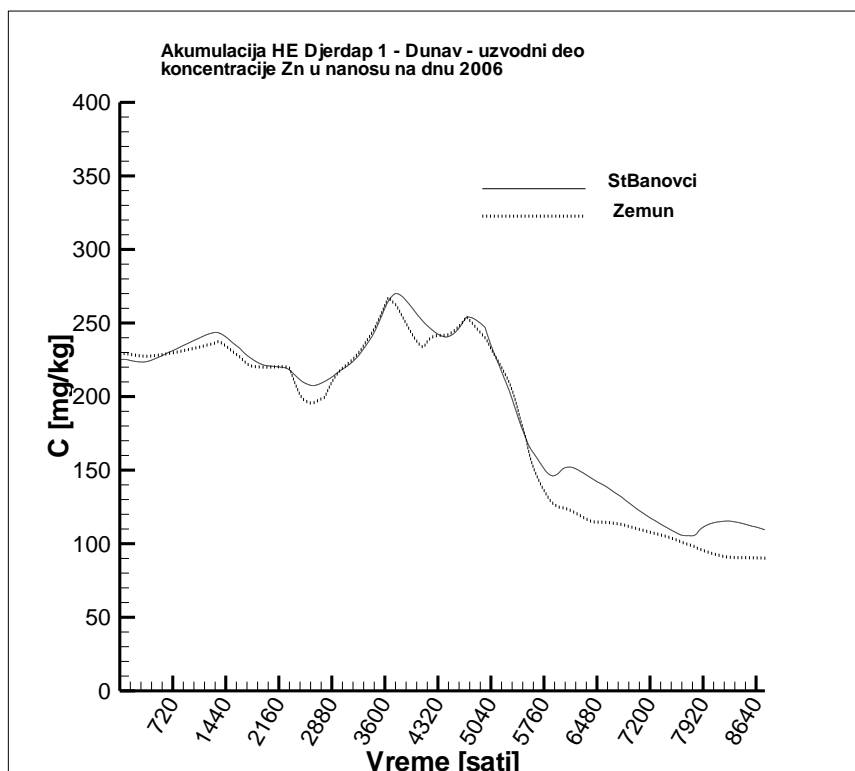
Slika 16. Modelisane koncentracije cinka rastvorenog u vodi – Dunav, stanice Stari Banovci i Zemun

Figure 16. Modelled concentrations of water-dissolved zinc – Danube, stations Stari Banovci i Zemun



Slika 17. Modelisane koncentracije cinka u suspendovanom sedimentu – Dunav, stanice Stari Banovci i Zemun

Figure 17. Modelled concentrations of suspended-sediment zinc – Danube, stations Stari Banovci i Zemun



Slika 18. Modelisane koncentracije cinka u sedimentu na dnu – Dunav, stanice Stari Banovci i Zemun

Figure 18. Modelled concentrations of bed-sediment zinc – Danube, stations Stari Banovci i Zemun

## 5 Zaključci

Prikazane procedure i podaci/rezultati monitoringa i modelisanja tečenja, sedimenta, morfodinamike i kvaliteta vode i sedimenta Dunava i njegovih pritoka u Srbiji sugerisu da ovako definisan kombinovani pristup monitoringa i modelisanja ima potencijal da, uz dalja unapređenja, postane standardan alat za podršku pri donošenju odluka u oblasti upravljanja vodama. Očigledna je potreba da se, uz dalja unapređenja modela, pažnja fokusira i na dalja unapređenja redovnog monitoringa, uključujući koncentracije suspendovanog sedimenta, kvalitet vode i sedimenta na dnu, (posebno) kvalitet sedimenta u suspenziji, itd. Dugoročni monitoring, numeričke simulacije i prognoze zasipanja akumulacije HE Đerdap 1, pokazuju da slojevi sedimenta deponovanog na dno imaju dvostruki negativni efekat (zarobljavaju zagađenje adsorbovano na čestice sedimenta i povećavaju nivoe vode, što ugrožava nasipe za zaštitu priobalja od poplava), tako da posledicama ovih negativnih efekata ubuduće treba posvetiti odgovarajuću pažnju.

## Zahvalnica

Studije “Uticaj zasipanja akumulacije na eksploataciju HE Đerdap 1 sa izradom dugoročne prognoze zasipanja”, “Verifikacija i poboljšanje rezultata simulaciono-prognozno hidrauličkog modela za zasipanje akumulacije HE Đerdap 1 korišćenjem podataka osmatranja i merenja iz perioda 2006-2010 godine”, “Degradacioni procesi u akumulacijama hidroelektrana Đerdap I i Đerdap II i bilansiranje zagađenja” i „Degradacioni procesi u akumulacijama hidroelektrana Đerdap 1 i 2 i bilansiranje zagađenja – dodatna istraživanja“ je finansiralo JP Elektroprivreda Srbije (EPS). U studijama

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

je za matematičko modelisanje korišćen program CHARIMA (Institut za hidraulička istraživanja Univerziteta Ajova, SAD, autor F.M.Holly).

## Literatura

1. Babić-Mladenović, M., Spasojević, M., and Damjanović, M., (2003), "Sedimentation Upstream from the Iron Gate Dam: Research Needs Expanding to the Danube Basin," From watershed slopes to coastal areas: sedimentation processes at different scales, ICCORES-UNESCO Workshop, Venice, December.
2. Energoprojekt – Hidroinženjering, (2015/16a), „Degradacioni procesi u akumulacijama hidroelektrana Đerdap 1 i 2 i bilansiranje zagađenja – dodatna istraživanja“, Beograd, Srbija.
3. Energoprojekt – Hidroinženjering, (2015/16b), “Verifikacija i poboljšanje rezultata simulaciono-prognoznog hidrauličkog modela za zasipanje akumulacije HE Đerdap 1 korišćenjem podataka osmatranja i merenja iz perioda 2006-2010 godine”, Energoprojekt – Hydroengineering, Beograd, Srbija.
4. Energoprojekt – Hidroinženjering, (2012/13), “Degradacioni procesi u akumulacijama hidroelektrana Đerdap I i Đerdap II i bilansiranje zagađenja” –II faza, Energoprojekt – Hydroengineering, Beograd, Srbija.
5. Energoprojekt – Hidroinženjering, (2009/11), “Uticaj zasipanja akumulacije na eksploataciju HE Đerdap 1 sa izradom dugoročne prognoze zasipanja”, Beograd, Srbija.
6. Gessler, D., Hall, B., Spasojevic, M., Holly, F.M., Pourtaheri, H., Raphelt, N.K., (1999), "Application of 3-Dimensional Mobile Bed, Hydrodynamics Model," Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 7, July.
7. Holly, F.M. Jr., Yang, J.C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S.H., and Einhellig, R., (1990), “CHARIMA, Numerical Simulation of Unsteady Water and Sediment Movement in Multiply Connected Networks of Mobile-Bed Channels”, Iowa Institute of Hydraulic Research, Report No. 343, July (Draft addenda attached March 1994).
8. Holly, F.M., Yang, J.C. and Spasojevic, M., (1985), "Numerical Simulation of Water and Sediment Movement in Multiply-Connected Networks of Mobile Bed Channels", IIHR Limited Distribution Report No.131, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, June.
9. Holly, F.M., Spasojevic, M. and Zhang, Z., (1987), "Simulation of Missouri River Bed Evolution Gavins Point Dam to Rulo", IIHR Report No.312, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, April.
10. Karim, M.F., Holly, F.M., Spasojevic, M. and Yang, J.C., (1987), "IALLUVIAL - Numerical Simulation of Mobile Bed Rivers, Part III – User’s Instructions", IIHR Report No.311, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA, April.
11. Spasojević, M., Bojović, M., Palmar, B., Nadeždić, M., and Tanasković, M., (2018), "Simultaneous collection of flow, sediment, and selected water-sediment-quality field data on the Danube stretch at Belgrade", 18<sup>th</sup> Conference SDHI & SDH, Niš, Serbia, October.

## **Modeliranje transporta zagađujuće materije u poroznoj sredini primenom Cellular Automata principa – preliminarni rezultati**

Miloš Milašinović<sup>1</sup>, Anja Randelović<sup>2</sup>, Nenad Jaćimović<sup>3</sup>, Dušan Prodanović<sup>4</sup>

APSTRAKT: Zaštita podzemnih voda od raličitih hazardnih situacija postaje sve veći problem sa povećanim stepenom urbanizacije. Stoga, često je potrebno analizirati različite, potencijalne, hazardne situacije. Pri tome često je nemoguće izolovati modeliranje procesa u podzemnoj vodi od drugih komponenti hidroškog ciklusa što dovodi do potreba za integralnim modeliranjem. Integralno modeliranje zahteva veliki broj pojednostavljenja kako bi se ubrzalo vreme proračuna i simulacija. Stoga se dosta radi na razvijanju netradicionalnih metoda. Cellular Automata predstavlja jednu od tih metoda. Podzemne vode predstavljaju jedan od podjednako značajnih prirodnih rezervoara vode, zbog čega se prikazuje primena Cellular Automata principa u modeliranju transporta zagađujuće materije pri neustaljenim uslovima u podzemnoj vodi. Cellular Automata predstavlja princip podele razmatranog domena na ćelije koje svoje stanje menjaju na osnovu unapred definisanih pravila interakcije sa susednim ćelijama. Rezultati pokazuju da se pomenuti princip može uspešno koristiti za simulacije neustaljenog strujanja u podzemnoj vodi izazvanog infiltracijom i za proračun transporta zagađujuće materije poredeći rezultate sa analitičkim rešenjem.

Ključne reči: Integralno modeliranje, Cellular Automata, transport zagađenja, interakcija površinska-podzemna voda

## **Modelling pollution transport in porous media using Cellular Automata approach – preliminary results**

ABSTRACT: Groundwater quality protection in many hazardous situations is becoming big problem with high urbanization. Many “what-if” analysis are required, but it’s almost impossible to isolate groundwater modelling from other hydrological processes. Hence, integrated modelling is necessary. This requires many simplifications in order to speed up long time calculations and simulations. Therefore, many non-traditional methods are being widely used. Cellular automata (CA) represents one of these methods. The paper presents the application of the CA approach in modelling of the contaminant transport in unsteady groundwater conditions. Cellular Automata approach uses cellular grid for domain discretization. Each cell changes its state according to predefined local interaction rules. This research compares the results obtained using a CA model modified for groundwater problems with benchmark analytical solution. Results obtained in this paper show that CA approach can be successfully used for simulations of unsteady groundwater conditions, caused by surface-groundwater interaction, and pollution transport.

Keywords: Integrated modelling; Cellular Automata; contaminant transport, surface-groundwater interaction

---

<sup>1</sup> Miloš Milašinović, mast. inž. građ., Građevinski fakultet Beograd, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Dr Anja Randelović, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Beograd, arandelovic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dr Nenad Jaćimović, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Beograd, njacimovic@grf.bg.ac.rs

<sup>4</sup> Dr Dušan Prodanović, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Beograd, dprodanovic@grf.bg.ac.rs

## 1 Introduction

Water quality in urban catchments is one of the crucial problems that need to be addressed to assure high quality of life in cities. Particularly vulnerable to quality deterioration is the groundwater, often used for water supply, especially if the aquifer lies near or beneath the city. This creates a problem with groundwater resources pollution protection. Contaminants affecting groundwater resources belong to a wide group of biological, chemical, inorganic and organic pollutants.

Urban stormwater runoff is being categorized as one of the major pollution sources to receiving waters, especially for containing significant amount of sediments and heavy metals (Deletic and Orr 2005; Djukić et al. 2016). Although build-up and wash-off mechanisms of pollution in highly urbanized areas have been subjects of numerous studies (Deletic, Maksimovic, and Ivetic 1997), interaction between groundwater and sewer systems should be further investigated. Old combined sewer systems (and even inadequately constructed separate ones) may leak underground. Sewer leakage combined with absence of a wastewater treatment system (Belgrade being such an extreme example), puts groundwater resources at a high risk of contamination. To assess various “*what if*” scenarios, particularly when there are water quality monitoring points, it is of utmost importance to develop a usable integrated model.

Due to the complexity of the commonly used physically based models, computation cost occurs as one of the main problems, especially in long-term simulations. Combination of several numerical models in order to solve physically based models for interactions in a chain of models can, often, create an unsolvable problem. Hence, simplified models, such as the Cellular Automata (CA) (Wolfram, 1998) based ones have been a topic for many researchers in the last two decades, especially since they can speed up the computation by exploiting the explicit nature of CA. Additionally, with the development of parallel computing, CA models became highly exploited methods in different areas (Bandini, Mauri and Serra, 2001), including the water cycle modelling.

CA found its application in different areas of research. Dottori and Todini (2010, 2011) developed flood inundation models (diffusion dominated problem) based on the CA approach. The authors employ the Manning’s equation for computation of interaction/discharge between computational cells, and therefore solving a two-dimensional problem as four one-dimensional problems. Ghimire et al., 2013 analysed Manning’s formula-based CA model proposed by Dottori & Todini, 2010 and found that exponential nature of Manning’s equation creates a time and computational expensive problem. In order to reduce this problem, they proposed a CA-based methodology with cell ranking to determine the direction of flow between cells. It should be noted that cell ranking also creates a somewhat computational time expensive problem. Hence, Guidolin et al., 2016 developed weighted cellular automata model for rapid flood inundation analysis. Guidolin et al. model calculates weights between cells based on water level differences in order to calculate discharge between them. However, Guidolin’s model lacks the ability to be used for inertial dominated problems.

Efficiency of the CA models combined with parallel computing are demonstrated in Gibson, Keedwell, & Savić, 2015. Ravazzani, Rametta, & Mancini, 2011 used CA for transient groundwater state modelling caused by constant pumping rate from a well, showing good results. Transient groundwater state is modelled using a simple Darcy’s law for intercellular discharge calculation, combined with a water balance equation for cell state updating.

In addition to water quantity, CA approach is used to model pollution (contaminant) and other transport processes in atmosphere, surface water and groundwater. However, CA based models for pollution transport have been mostly used in *steady state conditions*: air pollution in steady wind speed conditions (Guariso & Maniezzo, 1992, Marín et al., 2000, Lauret et al. 2016), river pollution transport (Rui et al., 2013), probabilistic two dimensional contaminant transport in groundwater (Palanichamy, Schüttrumpf, & Palani, 2008), etc.

Targeting computational time as the major problem in the integrated models, Ghimire et al. 2013, Guidolin et al. 2016 and Ravazzani et al. 2011 showed significant computational time reduction in hydrodynamic modelling by using CA approach. Hence, it would be very useful to develop CA

based model for contaminants transport simulation related to hydrodynamic CA models. To the best of author's knowledge, there has not yet been developed a cellular automata based model for pollution transport with hydrodynamic modelling in unsteady conditions. Therefore, this paper presents novel methodology based on cellular automata paradigm for pollution transport modelling along with hydrodynamic modelling, applied to the groundwater conditions.. The primary objective of this research is to analyse and compare the behaviour of the CA-based transport model for contaminant transport from point sources with 1D and 2D analytical solutions for point source contaminants transport.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Weighted Cellular Automata for Pollution Transport Modelling – CAPT

Although cellular automata approach was used for modelling water movement, either on surface or in porous media, there hasn't been developed cellular automata based model for pollution transport along with the hydrodynamic modelling. Several authors applied cellular automata paradigm for pollution transport modelling, such as (Palanichamy, Schüttrumpf and Palani, 2008) who developed probabilistic cellular automata for pollution transport modelling, but this approach was only applied to the steady hydrodynamic conditions. There were also other models applied in the field of modelling air pollution transport (Guariso and Maniezzo, 1992; Marín *et al.*, 2000; Lauret *et al.*, 2016). This paper presents novel methodology based on cellular automata paradigm for pollution transport modelling along with hydrodynamic modelling, applied to the groundwater conditions.

Cellular automata model CAPT considers pollution mass as cell state variable, instead of pollutant concentration (Milasinovic *et al.*, 2019). neighbourhood is set as Von Neumann's (Fig 1). Intercellular interaction rules are based on the weight system, where pollutant mass transferred between adjacent cells is calculated using intercellular weights. Weights depend on velocity between cells and pollutant mass difference between cells.

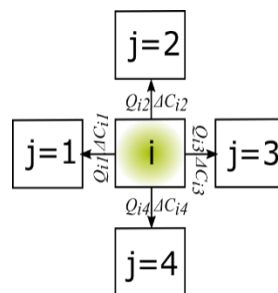


Figure 1. Cell local numeration

Slika 1. Konvencija za numeraciju ćelija

Contaminant transport in this methodology is being represented by using two transport mechanisms, advection and dispersion, with reasonable simplifications. Therefore, whole algorithm is divided in two parts, one for advection mechanism and the other for dispersion mechanism. Pseudo code which describes this methodology can be written as:

- a. Obtain cell state values, pollutant concentration  $C$  and pollutant mass  $m$
- b. Calculate intercellular pollutant mass exchange by advection
  - i. Calculate cellular weights in advection process on the basis of velocity field (c.i) and pollutant mass gradient (c.ii)
  - ii. Calculate advection forced intercellular pollutant mass exchange on basis of the obtained cellular weights
- c. Calculate intercellular pollutant mass exchange by dispersion



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- i. Calculate cellular weights in dispersion process
- ii. Calculate dispersion forced intercellular pollutant mass exchange on basis of the obtained cellular weights
- d. Calculate total intercellular mass exchange, advection + dispersion
- e. Update cell state, pollutant mass and concentration in cell
- f. If the simulation time reaches the limit stop the simulation, otherwise repeat steps a., b., c., d. and e.

Depending of the way in which contamination source is being assigned, whether in a way of fixed concentration or mass, first step a) in advection-dispersion transport mechanism can be different. If the contaminant source is being assigned as fixed concentration, first step a) is to convert this value in mass value. After that, cell states defined as pollutant concentration  $C$  also has to be converted into the mass values.

$$m_i^t = C_i^t \cdot H_i^t \cdot A_i \cdot n_i \quad (1)$$

$$m_j^t = C_j^t \cdot H_j^t \cdot A_j \cdot n_j \quad (2)$$

where  $m_i^t$  and  $m_j^t$  represent pollutant mass value in cells  $i$  and  $j$  ( $j=1,2,3,4$ ) at present time  $t$ , respectively.  $C_i^t$  and  $C_j^t$  represent pollutant concentration value in cells  $i$  and  $j$  at present time  $t$ .  $H_i^t$  and  $H_j^t$  represent water depth in cells  $i$  and  $j$ , respectively.  $A_i$  and  $A_j$  are cell areas.  $n_i$  and  $n_j$  are cell porosity values.

Following equations represent advection transport process step b.i. in pseudo code.

$$\Delta m_{ij}^{adv,*} = \frac{v_{ij}^t}{n} \cdot \frac{|m_i^t - m_j^t|}{\Delta s} \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\Delta m_{ij}^{adv,pot} = \max(0; \Delta m_{ij}^{adv,*}) \quad (4)$$

$$\Delta m_{min}^{adv} = \min(\Delta m_{ij}^{adv,pot}) \quad (5)$$

$$w_j^{adv} = \frac{\Delta m_{ij}^{adv,pot}}{\sum_{j=1}^4 \Delta m_{ij}^{adv,pot} + \Delta m_{min}^{adv}} \quad (6)$$

where  $\Delta m_{ij}^{adv,*}$  represent potential pollutant mass exchanged in intercellular interaction by the advection process (can be either greater or lower than 0).  $V_{ij}^t$  represent Darcy's velocity at time  $t$ ,  $n$  is porosity.  $\Delta s$  is spatial resolution (spatial discretization step) and  $\Delta t$  is time step.  $\Delta m_{ij}^{adv,pot}$  is potential pollutant mass that leaves the central cell  $i$  and enters the adjacent cell  $j$ .  $\Delta m_{min}^{adv}$  is minimum pollutant mass that leaves central cell  $i$  during one time step.  $w_j^{adv}$  represent cellular weight of the adjacent cell  $j$  in pollutant mass delivering from central cell  $i$ .

Step b.ii. in above described pseudo code is represented by the following set of equations.

$$\Delta m_{iM}^{adv,pot} = \frac{v_{iM}^t}{n} \cdot \frac{|m_i^t - m_M^t|}{\Delta s} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta m_{tot}^{adv} = \min\left(m_i^t; \frac{\Delta m_{iM}^{adv,pot}}{w_M^{adv}}\right) \quad (8)$$

$$\Delta m_{ij}^{adv} = w_j^{adv} \cdot \Delta m_{tot}^{adv} \quad (9)$$

where  $\Delta m_{iM}^{adv,pot}$  represents potential pollutant mass delivered from central cell  $i$  to the max weighted cell ( $M$  is the index of the max weighted adjacent cell with the weight  $w_M^{adv}$ ).  $\Delta m_{tot}^{adv}$  is total pollutant

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

mass delivered from the central cell in one time step.  $\Delta m_{ij}^{adv}$  is the amount of the contaminant (mass) delivered from central cell to each adjacent cell.

Second part of the pseudo code, which refers to the dispersion process, is described by similar conceived set of equations as advection process. Step c. i. of the above mentioned pseudo code is represented with the following equations:

$$D_j = \alpha_l \cdot \frac{|v_{ij}^t|}{n} + D_{mol} \quad (10)$$

$$\Delta m_{ij}^{disp*} = D_j \cdot \frac{m_i^t - m_j^t}{\Delta s^2} \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$\Delta m_{ij}^{disp,pot} = \max(0; \Delta m_{ij}^{disp*}) \quad (12)$$

$$\Delta m_{min}^{disp} = \min(\Delta m_{ij}^{disp,pot}) \quad (13)$$

$$w_j^{disp} = \frac{\Delta m_{ij}^{disp,pot}}{\sum_{j=1}^4 \Delta m_{ij}^{disp,pot} + \Delta m_{min}^{disp}} \quad (14)$$

where  $D_j [L^2/T]$  represent hydrodynamic dispersion coefficient.  $\alpha_l [L]$  represent longitudinal dispersion while the term  $\alpha_l / v_{ij}^t / n$  represent dispersion coefficient and  $D_{mol}$  represents molecular diffusion (Bear, 1972).  $n$  represents cell porosity, while the term  $nv_{ij}^t$  represents real velocity of the groundwater.  $\Delta m_{ij}^{disp*}$  represents potential pollutant mass exchange between central cell  $i$  and the adjacent cell  $j$  (it can be either greater or lower than zero; positive value when leaves the central cell).  $\Delta m_{ij}^{disp,pot}$  represents only the potential pollutant mass that leaves the central cell towards the adjacent cell. Pollutant mass entering the central cell from the adjacent cell is considered as an external input to the central cell, which will be explained in some of the following equations.  $\Delta m_{min}^{disp}$  represents the minimum pollutant mass that leaves the central cell to some of the adjacent cells.  $w_j^{disp}$  represents cellular weight of the adjacent cell  $j$  ( $j=1,2,3,4$ ) in the pollutant mass delivering from the central cell.

Step c. ii. of the pollutant transport pseudo code is explained through the following equations:

$$\Delta m_{iM}^{disp,pot} = D_M \cdot \frac{m_i^t - m_M^t}{\Delta s^2} \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$\Delta m_{tot}^{disp} = \min\left(m_i^t; \frac{\Delta m_{iM}^{disp,pot}}{w_M^{disp}}\right) \quad (16)$$

$$\Delta m_{ij}^{disp} = w_j^{disp} \cdot \Delta m_{tot}^{disp} \quad (17)$$

where  $\Delta m_{iM}^{disp,pot}$  represents potential pollutant mass delivered from central cell  $i$  to the max weighted cell ( $M$  is the index of the max weighted adjacent cell with the weight  $w_M^{disp}$ ).  $\Delta m_{tot}^{disp}$  is total pollutant mass delivered from the central cell in one time step.  $\Delta m_{ij}^{disp}$  is the amount of the contaminant (mass) delivered from central cell to each adjacent cell by the dispersion process.

When all above operations are done, steps d. and e. of the pollutant transport pseudo code are conducted by applying next set of the equations:

$$m_i^{t+\Delta t} = m_i^t - \sum_{j=1}^4 (\Delta m_{ij}^{adv} + \Delta m_{ij}^{disp}) + \Delta m_{inp} + \Delta m_{out} \quad (18)$$

$$C_i^{t+\Delta t} = \frac{m_i^{t+\Delta t}}{H_i^{t+\Delta t} \cdot A_i \cdot n} \quad (19)$$

where  $m_i^{t+\Delta t}$  represent pollutant mass in the central cell  $i$  at the next time ( $t+\Delta t$ ).  $m_i^t$  represents current pollutant mass in the cell.  $\Delta m_{inp}$  represents external pollutant mass input to the central cell (e. g. from some other cells) and  $\Delta m_{out}$  represents external output of the pollutant mass from the cell (e. g. pollutant mass extracted from the cell by pumping rate).  $C_i^{t+\Delta t}$  represents pollutant concentration at next time.

Considering the explicit nature of MACCA-GW, WCAGW and CAPT models, time step limit has to be determined in order to provide numerical stability. Time step limit can be determined by using the eq. (20).

$$\Delta t \leq \min \left( \frac{\Delta s^2 \cdot S_y}{4 \cdot T}; \frac{\Delta s}{v_{ij}^{\max}}; \frac{\Delta s^2}{2D_j}; \frac{2D_j}{(v_{ij}^{\max})^2} \right) \quad (20)$$

All of the values figuring in eq. (20) were explained in previous part of the text.

## 2.2 Analytical solutions

The CA based pollution transport model, CAPT, is compared to two analytical solutions for transport problems: (1) two-dimensional analytical solution for point source contaminants transport in a semi-infinite homogeneous porous medium (Bear, 1972) (eq (22)) and (2) one-dimensional transport equation with continuous constant pollution source (Ogata and Banks 1961) (eq.(22)).

$$C(x, y, t) = \frac{M/h}{4\pi t \sqrt{D_x \cdot D_y}} \exp \left( -\frac{(x-x_0-v_x \cdot t)^2}{4D_x \cdot t} - \frac{(y-y_0-v_y \cdot t)^2}{4D_y \cdot t} \right) \quad (21)$$

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \cdot \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x-x_0-v_x \cdot t}{2\sqrt{D_x \cdot t}} \right) + e^{\frac{v_x \cdot (x-x_0)}{D_x}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x-x_0+v_x \cdot t}{2\sqrt{D_x \cdot t}} \right) \right] \quad (22)$$

Eq. (22) shows contaminant concentration at the point with coordinates  $(x,y)$  at time  $t$ , when mass over depth  $M/h$  of the contaminant was injected instantly at  $t=t_0$  at the point  $(x_0,y_0)$ . This analytical solution considers steady hydrodynamic conditions, represented by two velocity components  $v_x$  and  $v_y$  in directions  $x$  and  $y$ , respectively.  $D_x$  and  $D_y$  are hydrodynamic dispersion coefficients in  $x$  and  $y$  direction, respectively.

Eq. (22) shoes contaminant concentration in 1D problem, at the point with coordinates  $(x,y)$  at time  $t$ , when constant pollution concentration  $C_0$  is given at the pollution source with coordinates  $(x_0,y_0)$ .

## 2.3 Model assessment methodology

For the assessment of the CA transport modelling, normalised root mean square error *NRMSE* is calculated (eq. (23)) and TotalMass (eq. (23)). Normalised discrepancy distribution (eq. (25)) is used for comparison between 2D analytical solution and CAPT model. Spatial distributions of pollutant concentrations at the end of the simulation are compared.

$$NRMSE_{spatial} = \frac{1}{X_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{cell}} (X_{CA,i} - X_{Analytical,i})^2}{N_{cell}}} \cdot 100 \quad (23)$$

$$TotalMass^t = \sum_{i=1}^{N_{CA}} C_i^t \cdot H_i^t \cdot n \cdot A_i = \sum_{i=1}^{N_{CA}} m_i^t \quad (23)$$

$$NDD_j^t = \frac{|X_{CA,j}^t - X_{analytical,j}^t|}{X_0} \cdot 100 \quad (j = 1, \dots, N_{CA}) \quad (24)$$

$X_{CA,i}$  represents pollutant concentration  $C$  obtained by CA-based models,  $X_{Analytical,i}$  represents pollutant concentration  $C$  obtained by analytical model.  $N_{CA}$  is the number of cells used for domain spatial discretization and  $N_{\Delta t}$  is number of time steps. Eq. (24) is also used for total pollutant mass discrepancy assessment. In that case,  $X_{CA,i}$  represents total pollutant mass in the aquifer at specific time obtained by CA-based models and  $X_{Analytical,i}$  represents total pollutant mass in the aquifer at specific time obtained by analytical solution. Total pollutant mass in the aquifer at specific time is calculated by eq. (23), which uses cellular pollutant mass obtained by eq. (1).

## 3 Results and discussion

### 3.1 Test Cases 1 and 2: Comparison with 1D and 2D analytical solution for point source contaminants transport

**Numerical test case 1, POINT-1D**, represents a comparison between 1D CA solution and 1D analytical solution (Ogata and Banks, 1961) for continuous, constant source. This test is conducted on a domain with the following characteristics: length  $L=500$  m, spatial resolution  $\Delta x=10$  m, temporal resolution  $\Delta t=4$  h, seepage velocity in  $x$  direction  $v=10^{-6}$  m/s, longitudinal dispersivity  $\alpha_L=1000$  m and solute concentration at the source  $C(0,t)=C_0=5$  mg/l. Water levels doesn't have any significance in 1D analytical solution (eq. (22)), but uniform head field (15 m) is applied in order to calculate pollutant mass which is necessary in CAPT model.

**Numerical test case 2, POINT-2D**, compares 2D CA model and 2D analytical solution in eq.(21) (Bear, 1972). The domain has the following characteristics: dimensions  $500 \times 500$  m, with spatial resolution set at  $10 \times 10$  m, time step  $\Delta t=4$  h, hydrodynamic dispersion in longitudinal direction  $D_x=3 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, hydrodynamic dispersion in transversal direction  $D_y=3 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s and without seepage velocity, so that dispersion is the only transport mechanism considered. The plume point source is presented with an initial pollutant mass released into the aquifer. The amount of the pollutant mass is  $M_0=7.5 \cdot 10^6$  mg, and it is released over the 15 m of water depth,  $h=15$  m. Thus, the initial pollutant concentration at the source equals to  $C_0=50$  mg/l. Same as 1D analytical solution, 2D solution doesn't require head field. Uniform (15 m) head field is applied in this situation in order to calculate pollutant mass in CAPT model. Dispersion parameters are selected in order to prevent pollution from reaching the boundaries of the domain. In that case semi-infinite domain assumption used for analytical solution deriving can be partially applied in CA model.

When CA-based pollution transport model CAPT is compared with one-dimensional and two-dimensional analytical solution, relatively good consistency is achieved, especially in one-dimensional case where total mass discrepancy (eq. (24)) is less than 1%, 0.7% to be more precise. Fig. 3 shows a comparison of the pollutant transport model results across the domain at simulation half-time (fig. 3a) and at the end of the simulation (fig. 3b). When two-dimensional problem is considered, figure 4 shows pollutant concentration spatial distribution at the end of the simulation for CAPT model (fig. 4a), analytical solution (fig. 4b) and normalised discrepancy between these two solutions calculated by eq. 43 (fig. 4c). Total mass discrepancy (eqs. (24)) between CAPT model and analytical solution is bigger, with 1% approximately, but this discrepancy can be caused by inability to create adequate test case for Cellular Automata modelling which will consider all of the assumptions used when analytical solution was derived.

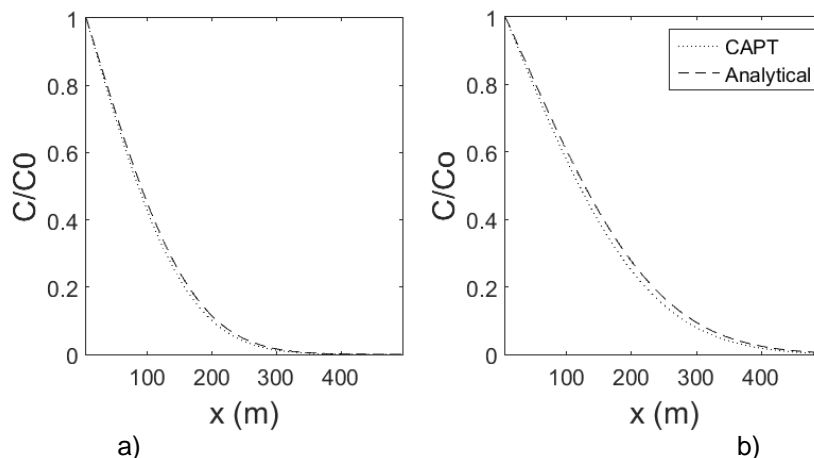


Figure 3. Comparison of the 1D transport results: a) After 500 time steps; b) After 1000 time steps

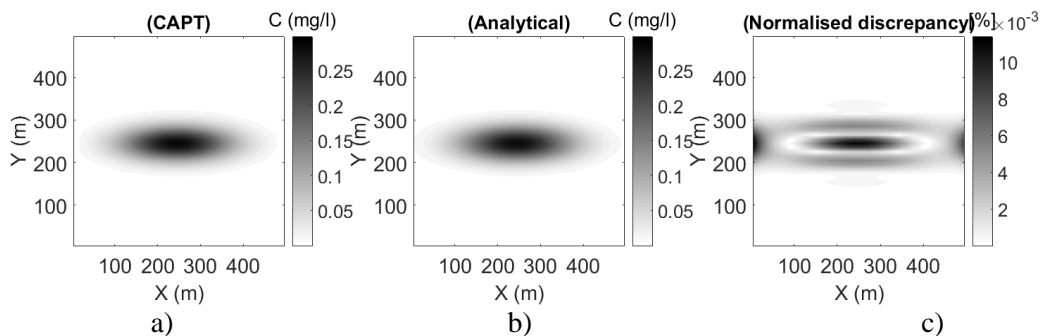


Figure 4. Comparison of the results for 2D test; spatial distribution of the pollution concentration at the end of the simulation (1000 time steps): a) Cellular Automata; b) Analytical solution; c) Normalised discrepancy distribution (Discrepancy is normalised to initial value of the pollutant concentration at the source by eq. (24))

## 4 Conclusions

This paper presents a novel approach in modelling groundwater pollution transport by cellular automata based model CAPT, for groundwater problems. This modelling tool is compared with analytical solutions for one-dimensional (Ogata and Banks, 1961) and two-dimensional (Bear, 1972) problems, showing excellent results: *NRMSE* for total mass is in the order of 1%, both for 1D and 2D tests.

Based on the results analysis and previous specific conclusions, general conclusion can be derived. Simplified method for solving transport problems in groundwater, based on significant equations complexity reduction, shows high usage potential, without significant sacrifice of the accuracy, when compared to standard methods. Future research will include CA-based models for groundwater and pollution transport testing against numerical models and field data.

## Acknowledgement

The authors are grateful to the Serbian Ministry of Education, Science and Technological Development for its financial support, project No. TR37010.

### References

1. Bandini, S., Mauri, G. and Serra, R. (2001) 'Cellular automata: From a theoretical parallel computational model to its application to complex systems', *Parallel Computing*, 27(5), pp. 539–553. doi: 10.1016/S0167-8191(00)00076-4.
2. Barbé, D. E., Cruise, J. F. and Mo, X. (1996) 'Modeling the Buildup and Washoff of Pollutants on Urban Watersheds', *Journal of the American Water Resources Association*, 32(3), pp. 511–519. doi: 10.1111/j.1752-1688.1996.tb04049.x.
3. Bear, J. (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, New York.
4. Deletic, A., Maksimovic, [Cbreve]edo and Ivetic, M. (1997) 'Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces', *Journal of Hydraulic Research*, 35(1), pp. 99–118. doi: 10.1080/00221689709498646.
5. Deletic, A. and Orr, D. W. (2005) 'Pollution Buildup on Road Surfaces', *Journal of Environmental Engineering*, 131(1), pp. 49–59. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:1(49).
6. Djukić, A. *et al.* (2016) 'Further insight into the mechanism of heavy metals partitioning in stormwater runoff', *Journal of Environmental Management*, 168, pp. 104–110. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.035.
7. Dottori, F. and Todini, E. (2010) 'A 2D Flood Inundation Model Based on Cellular Automata Approach', *XVIII International Conference on Water Resources*, (2), pp. 1–8.
8. Duong, T. T. T. and Lee, B. K. (2011) 'Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics', *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 92(3), pp. 554–562. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.09.010.
9. Ghimire, B. *et al.* (2013) 'Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach', *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), p. 676. doi: 10.2166/hydro.2012.245.
10. Gibson, M. J., Keedwell, E. C. and Savić, D. A. (2015) 'An investigation of the efficient implementation of cellular automata on multi-core CPU and GPU hardware', *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 77, pp. 11–25. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.10.011.
11. Guariso, G. and Maniezzo, V. (1992) 'Air quality simulation through cellular automata', *Environmental Software*, 7(3), pp. 131–141. doi: 10.1016/0266-9838(92)90010-2.
12. Guidolin, M. *et al.* (2016) 'A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis', *Environmental Modelling and Software*, 84, pp. 378–394. doi: 10.1016/j.envsoft.2016.07.008.
13. Lauret, P. *et al.* (2016) 'Atmospheric dispersion modeling using Artificial Neural Network based cellular automata', *Environmental Modelling and Software*, 85, pp. 56–69. doi: 10.1016/j.envsoft.2016.08.001.
14. Marín, M. *et al.* (2000) 'Cellular automata simulation of dispersion of pollutants', *Computational Materials Science*, 18(2), pp. 132–140. doi: 10.1016/S0927-0256(00)00097-5.
15. Milasinovic, M. *et al.* (2019) 'Cellular Automata Approach for 2D Pollution Transport Modelling in Urban Groundwater', In: Mannina G. (eds) *New Trends in Urban Drainage Modelling. UDM 2018. Green Energy and Technology*. Springer, Cham, pp. 765–770. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1\\_132](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_132).
16. Ogata, A. and Banks, R. B. (1961) 'A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media', *Geological Survey (U.S.); Professional paper*, pp. A1–A7. Available at: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp411A>.
17. Palanichamy, J., Schüttrumpf, H. and Palani, S. (2008) 'A probabilistic cellular automaton for two dimensional contaminant transport simulation in ground water', *Water Science and Technology*, 58(11), pp. 2083–2092. doi: 10.2166/wst.2008.824.
18. Ravazzani, G., Rametta, D. and Mancini, M. (2011) 'Macroscopic cellular automata for groundwater modelling: A first approach', *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, 26(5), pp. 634–643. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.11.011.
19. Revitt, D. M. *et al.* (2014) 'The sources, impact and management of car park runoff pollution: A review', *Journal of Environmental Management*, 146, pp. 552–567. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.05.041.
20. Rui, X. P. *et al.* (2013) 'Simulation of point source pollution diffusion using a velocity field-cellular automata coupled method', *Information Technology Journal*, pp. 5424–5431. doi: 10.3923/itj.2013.5424.5431.
21. Wolfram, S. (1998) 'Cellular automata as models of complexity', *Nonlinear Physics for Beginners: Fractals, Chaos, Solitons, Pattern Formation, Cellular Automata, Complex Systems*, 311(5985), p. 197. doi: 10.1038/311419a0.

## **Analiza transporta nanosa u kanalima Dunav – Tisa – Dunav**

Vesna Đukić<sup>1</sup>, Ranka Erić<sup>2</sup>

**APSTRAKT:** U kanalima Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav javlja se problem intenzivnog taloženja nanosa. U radu su analizirane mogućnosti stvaranja povoljnijih hidrauličkih uslova za transport nanosa izmenom režima tečenja u kanalima. Formiran je model transporta nanosa kalibracijom i verifikacijom programskog paketa HEC-RAS. Primenom ovog modela analiziran je uticaj različitih proticaja na eroziju, transport i taloženje nanosa u kanalima, na primeru deonice kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela. Analiza uticaja maksimalnih proticaja u kanalima na režim nanosa dobija poseban značaj pri analizama mogućnosti za izgradnju malih hidroelektrana na Hidrosistemu, imajući u vidu da se u cilju efikasnijeg korišćenja hidroenergetskog potencijala predlaže povećano i produženo trajanje protoka koji se zahvata iz Dunava. Dobljeni rezultati ukazuju da se najveće količine nanosa talože na mestima spojeva kanala pri svim hidrauličkim uslovima u kanalu. Takođe, i do erozije dolazi na istim mestima povećane transportne sposobnosti toka pri svim hidrauličkim uslovima. Međutim, količine i akumuliranog i erodiranog materijala biće veće pri većim proticajima u kanalu. U uslovima maksimalnog proticaja  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  u kanalu, količine i erodiranog i akumuliranog zemljišta bile bi oko 8.6 puta veće u odnosu na količine erodiranog, odnosno akumuliranog materijala pri proticaju  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ . Može se zaključiti da izmena hidrauličkog režima tečenja ne bi dovela do povoljnijih uslova za transport nanosa.

**Ključne reči:** Hidrosistem Dunav- Tisa – Dunav, hidraulički režim tečenja, erozija, transport i taloženje nanosa

## **Analysis of the sediment transport in the channels of the Danube - Tisa - Danube**

**ABSTRACT:** There is a big problem of intensive sedimentation in the Danube – Tisa – Danube channels. The subject of this paper is an analysis of the possibility of creating more favourable hydraulic conditions for the sediment transport by changing the flow regime in the channels. The sediment transport model was formed by calibration and verification of the HEC - RAS software package. The influence of different flows on erosion and sedimentation processes has been analysed on the example of the canal extending from the Serbian Miletić sluice to the Savin village. The analysis of the influence of maximum flow rates in channels on sediment regime is of particular importance in the analysis of the possibilities for the construction of small hydropower plants in the Hydrosystem. The obtained results indicate that the maximum amount of sediments is deposited at the connections of several channels. It was obtained that sediments would always be deposited at the same locations for different flow values. Erosion will occur at the locations of increased flow transport capacity which will be the same for different flow values. However, the amounts of deposited and eroded sediments will be higher at higher flows. The total amounts of eroded and deposited soil at the flow of  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  would be about 8.6 times higher than at the flow of  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ . It can be concluded that the change in the hydraulic flow regime would not lead to more favourable conditions of sediment transport.

**Keywords:** Hydrosystem Danube – Tisa – Danube, hydraulic flow regime, erosion, sedimentation

---

<sup>1</sup> Prof. dr Vesna Đukić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu Šumarski fakultet, [vesna.djukic@sfb.bg.ac.rs](mailto:vesna.djukic@sfb.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Master. inž. građ. Ranka Erić, asistent, Univerzitet u Beogradu Šumarski fakultet, [ranka.eric@sfb.bg.ac.rs](mailto:ranka.eric@sfb.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Višenamenski Hidrosistem Dunav – Tisa – Dunav (HS DTD) prostire se na teritoriji Bačke i Banata i predstavlja jedan od najvećih i najsloženijih vodoprivrednih objekata ove vrste i kod nas, i u svetu. Sastoji se od razgranate mreže kanala, dužine od 930 km i velikog broja složenih hidrotehničkih objekata (24 ustave, 16 prevodnica, 6 crpnih stanica i 5 sigurnosnih ustava). Višenamenski karakter ovog sistema ogleda se u njegovom korišćenju za odvodnjavanje suvišnih voda, navodnjavanje poljoprivrednih površina, snabdevanje vodom naselja i industrije, zaštitu od štetnog dejstva voda i poboljšanje uslova za odbranu od poplava, plovidbu i u rekreativne svrhe.

Velike probleme u funkcionisanju ovog Hidrosistema sa stanovišta obezbeđenja dovoljne propusne moći prave velike količine akumuliranog nanosa duž mreže kanala HS DTD. Problemi intenzivnog istaložavanja nanosa javljaju se na većem broju lokacija, na kojima je karakterističan pad transportne sposobnosti toka. Problemi usled taloženja nanosa podjednako su izraženi i u bačkom i u banatskom delu Hidrosistema. U banatskom delu HS DTD ovi problemi posebno su izraženi na lokalitetima ušća ili ukrštanja vodotoka sa kanalom Novi Bečej – Banatska Palanka. U bačkom delu Hidrosistema velike količine nanosa se talože u zonama spojeva kanala sa Dunavom, kod Bezdana i Bogojeva, u zoni spoja kanala sa Tisom, kod Bečeja, i na spojevima kanala unutar mreže Hidrosistema. U zonama spojeva kanala sa rekama dolazi do intenzivnog taloženja nanosa zbog naglih promena hidrauličkog režima tečenja u kanalima u odnosu na režim tečenja u rekama. Jedina mera, koja se sprovodi u cilju smanjenja količina nanosa u kanalima je periodično bagerovanje istaloženih naslaga nanosa na lokacijama na kojima se talože velike količine nanosa.

Predmet ovog rada je analiza mogućnosti da se smanji taloženje nanosa u kanalima i obezbede povoljniji hidraulički uslovi za transport nanosa izmenom dosadašnjeg hidrauličkog režima rada ustava. Hidraulički režim kretanja vode u kanalima Hidrosistema je definisan radom sistema ustava prema utvrđenom "Pravilniku o održavanju vodnog režima" [8]. Kako je nedovoljna transportna sposobnost toka za nanos posledica malih brzina tečenja u kanalima i veoma malih podužnih padova dna kanala, u radu je analiziran uticaj različitih proticaja u kanalima na transport i taloženje nanosa, na primeru jedne deonice kanala u bačkom delu HS DTD, od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela (slika1).

Potrebno je istaći i da se potreba za ovakvim istraživanjem nameće i pri analizama mogućnosti za izgradnju malih hidroelektrana na Hidrosistemu DTD. Naime, u cilju efikasnog korišćenja hidroenergetskog potencijala HS DTD, u radu [7] je predložen tzv. "forsiran" rad HS DTD, odnosno povećano i produženo trajanje tranzitnog protoka vode koja se zahvata iz Dunava, kod Bezdana i Bogojeva. U tom smislu, u ovom radu je analizirano i kako bi se "forsiran" rad HS DTD odrazio na režim kretanja nanosa u kanalima.

## 2 Metodologija rada

Analiza erozije, transporta i taloženja nanosa unutar kanala HS DTD zasniva se na "spregnutim" hidrauličkim proračunima tečenja vode i pronosa nanosa. Hidraulički proračuni su urađeni primenom modela transporta nanosa, koji je formiran kalibracijom i verifikacijom programskog paketa HEC – RAS. Proces formiranja modela primenom programskog paketa HEC - RAS sastoji se iz nekoliko faza: 1. Kalibracija i verifikacija modela ustaljenog tečenja vode; 2. Uspostavljanje modela za kvazi - ustaljeno tečenje vode; 3. Kalibracija i verifikacija modela transporta nanosa.

Cilj kalibracije hidrauličkog dela modela bio je da se, pri proračunu linija nivoa, odrede optimalne vrednosti parametara modela (u ovom slučaju vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti), koje omogućavaju najbolje slaganje modeliranih i osmotrenih nivoa vode u karakterističnim preseccima kanala (nizvodno od ustave Srpski Miletić i na mestima spojeva kanala) za jednu vrednost proticaja. Hidraulički proračuni su rađeni pomoću parametarskih krivih proticaja za analiziranu deonicu kanala i krivih propusne moći za ustavu Srpski Miletić, prema [8]. Pri proračunima linija nivoa pretpostavljeno je da kote nivoa vode nizvodno od ustave Srpski Miletić i na



mestima spojeva kanala (Odžaci, Kosančić i Savino Selo) (slika 1) odgovaraju kotama nivoa vode koje su definisane u [8]. Ovako definisane kote nivoa vode u modelu predstavljaju "osmotrene nivoe". Verifikacija modela ustaljenog kretanja vode podrazumeva proveru da li se za dobijene vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti, u toku kalibracije modela, mogu dobiti odgovarajući nivoi vode u karakterističnim presecima i za druge vrednosti proticaja. Za definisane vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti u toku kalibracije i verifikacije modela, primenom modela neustaljenog tečenja vode urađene su simulacije kretanja vode u toku 2013. godine u cilju provere da li se primenom modela može realno opisati kretanje vode u dužem vremenskom periodu.

U toku kalibracije i verifikacije modela za transport nanosa definisana je odgovarajuća jednačina za proračun transporta nanosa, u skladu sa hidrauličkim karakteristikama toka i karakteristikama nanosa. Takođe, u ovoj fazi su definisane i vrednosti konceptualnih parametara u jednačini za proračun transporta nanosa sa ciljem da simulirani dnevni pronosi nanosa na nizvodnom kraju deonice, kod Savinog Sela, odgovaraju njihovim izmerenim vrednostima.

Poređenjem geodetski snimljenih poprečnih profila u dva vremenska preseka (2008. i 2014. godine) na mestima spojeva kanala (Odžaci, Kosančić i Savino Selo) i, uzimajući u obzir i izmerene količine bagerovanog nanosa na ovim lokalitetima [6], dobijen je uvid o količinama akumuliranog nanosa na ovim lokalitetima u periodu od 2008. do 2014. godine. Dodatni kriterijum pri kalibraciji i verifikaciji modela transporta nanosa bio je da definisane vrednosti parametara modela omogućće realnu simulaciju količina akumuliranog nanosa na mestima spojeva kanala u periodu između dva poslednja geodetska snimanja kanala.

Utjecaji sadašnjeg hidrauličkog režima u kanalima na eroziju, transport i taloženje nanosa, analizirani su za period od 2008. do 2014. godine. Zatim su analizirani utjecaji nekoliko ustaljenih vrednosti proticaja (Tabela 1) na procese deformacije kanala, pod pretpostavkom njihovog produženog trajanja u periodu od godinu dana. Pri tome, najpre je urađena analiza promena hidrodinamičkih parametara (brzine tečenja, hidrauličkog radijusa, pada linije energije, tangencijalnih napona i Frudovog broja) duž kanala za pomenute ustaljene vrednosti proticaja. Hidraulički proračuni linija nivoa predstavljaju osnovu pri analizi hidrodinamičkih karakteristika toka. Analizom hidrodinamičkih parametara dobijaju se značajne informacije o karakteristikama transporta nanosa i objašnjavaju uzročno – posledične veze između većine parametara od kojih zavisi transport nanosa u kanalima.

Za različite ustaljene vrednosti proticaja u kanalu od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela, proračunati su parametri bilansa nanosa: dnevni pronosi nanosa, godišnji pronosi nanosa, godišnje količine taloženja nanosa i godišnje količine erodiranog materijala. Takođe su definisana i kritična područja na kojima dolazi do erozije, odnosno do taloženja nanosa pri različitim proticajima u kanalu. "Forsiran" rad HS DTD analiziran je pod pretpostavkom da u kanalu ustaljeno teče proticaj  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  u toku godinu dana.

Efikasnost modela pri kalibraciji i verifikaciji može se odrediti kvalitativno, na osnovu vizuelnih (grafičkih) tehnika i kvantitativno (na osnovu statističkih kriterijuma). Statistički kriterijum, koji je u ovom radu korišćen, je koeficijent korelacije [4]. Koeficijent korelacije,  $R^2$ , je mera zajedničkog variranja dve ili više promenljivih i stepena njihove povezanosti. Pokazuje da li postoji povezanost između promenljivih, kao i kvalitet ove povezanosti. Vrednost ovog parametra je pozitivna ako je porast mera jedne promenljive praćen porastom mera druge. Negativna povezanost postoji ako je porast mera jedne promenljive praćen opadanjem mera druge. Optimalna vrednost je 1.0.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad 0.0 \leq R^2 \leq 1.0 \quad (1)$$

gde je:  $P_i$  - osmotrena vrednost dobijena u  $i$  - toj simulaciji;  $O_i$  - osmotrena vrednost u trenutku  $i$ ;  $\bar{O}$  - prosečna osmotrena vrednost i  $N$  - broj osmatranja.

## 2.1 HEC RAS model

Programski paket HEC RAS (verzija HEC RAS 4.1) [9] koristi se za proračun ustaljenog i neustaljenog tečenja u jednom pravcu, kao i proračun transporta nanosa u mreži rečnih tokova ili kanala nepravilne geometrije poprečnih preseska, sa velikim brojem različitih spoljašnjih i unutrašnjih graničnih uslova.

Proračun linije nivoa slobodne površine unutar kanala urađen je primenom osnovne jednačine održanja energije (2).

$$Z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Delta E \quad (2)$$

gde je:  $Z_1, Z_2$ - visinske kote dna kanala (m);  $h_1, h_2$  – dubine vode u poprečnim preseccima (m);  $v_1, v_2$  – prosečne brzine kretanja vode u poprečnim preseccima ( $\text{ms}^{-1}$ );  $\alpha_1, \alpha_2$  - Koriolisovi koeficijenti ili koeficijenti kinetičke energije ( $\alpha_1, \alpha_2=1.1$ , kod strujanja u otvorenim tokovima) ( - ); i  $\Delta E$  – gubici energije (m).

Pri proračunu deformacije dna kanala, pretpostavlja se da je strujanje linijsko i kvazi - ustaljeno, kao i da se uticaji sekundarnih strujanja zanemaruju. S obzirom da se hidraulički procesi odvijaju znatno brže od morfoloških, pretpostavka o kvazi - ustaljenom strujanju je prihvatljiva. Ova pretpostavka podrazumeva aproksimaciju hidrograma oticaja histogramom, tako da se linija nivoa računa za nekoliko proticaja određenog trajanja, što znatno pojednostavljuje proračune. Promena površine poprečnog preseka određuje se numeričkim rešavanjem Exnerove jednačine kontinuiteta za nanos:

$$(1 - \lambda_0) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial Q_u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

gde je:  $x$  – odstojanje duž toka (m);  $t$  – vreme (s);  $A_d$  – površina korita između linije dna u poprečnom preseku i proizvoljne referentne ravni ispod linije dna ( $\text{m}^2$ );  $Q_u$  – zapreminski pronos ukupnog nanosa (vučenog i suspendovanog) ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\lambda_0$  – poroznost nanosa na rečnom dnu (-).

Pri proračunu pronosa nanosa primenom programskog paketa HEC RAS mogu se koristiti različite jednačine [9], a u ovom radu je primenjena jednačina: Laursen – Copeland – a [3]. Ova jednačina je primenjena, jer se pomoću nje može opisati transport sitnih čestica peska, praha i gline, koje dominiraju na dnu kanala HS DTD. Jednačina Laursen – Copeland – a je primenljiva za zrna nanosa, čija se srednja veličina prečnika zrna ( $d_m$ ) nalazi u rasponu od  $d_m = 0.08 - 29$  mm, pri brzinama kretanja vode od  $0.02$  do  $3 \text{ ms}^{-1}$  i za nagibe linije energije manje od  $2.5 \%$ . Primenom jednačine Laursen – Copeland–a određuje se koncentracija nanosa u toku na sledeći način:

$$C_m = 0.01 \cdot \gamma \cdot \left( \frac{d_s}{h_{sr}} \right)^{\frac{7}{6}} \left( \frac{\tau' - \tau_C}{\tau_C} \right) f \left( \frac{u_*'}{\varpi} \right) \quad (4)$$

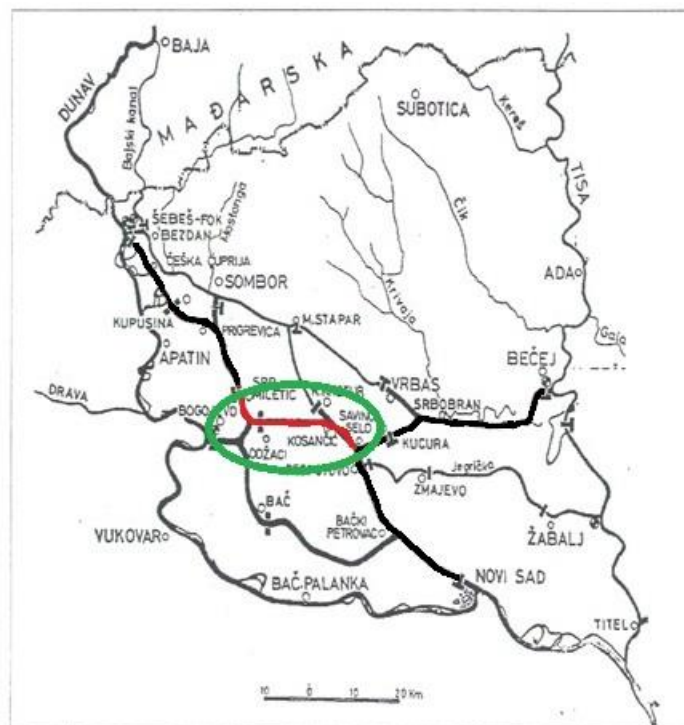
gde je:  $C_m$  - koncentracija nanosa u toku ( $\text{mg l}^{-1}$ );  $d_s$  – prečnik prosečnog zrna nanosa (m);  $h_{sr}$  – hidraulička dubina vode (m);  $\tau'_0$  – tangencijalni napon na dnu kanala (Pa);  $\tau_C$  – kritična vrednost tangencijalnog napona (Pa) i  $f \left( \frac{u_*'}{\varpi} \right)$  – funkcija koja zavisi od odnosa između smičuće brzine i brzine taloženja [3]. Osnovni parametar u ovoj jednačini, koji se kalibriše, je kritični tangencijalni napon.

S obzirom na značajan udeo glinovitih i prašinstih čestica nanosa, u proračunima je primenom jednačine Krone – a [2] i Partheniades - a [5] opisan uticaj kohezije na transport čestica nanosa.

## 3 Analizirano područje

Hidrosistem Dunav – Tisa – Dunav čini razgranata mreža kanala koji povezuju tokove reka Dunava i Tise kroz Vojvodinu. Deonica kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela nalazi se u bačkom delu HS DTD (slika 1). U bačkom delu HS DTD, od spojeva sa Dunavom kod Bezdana i Bogojeva, glavni magistralni kanali se pružaju preko srednje Bačke u pravcu jugoistoka, do spojeva sa Tisom kod Bečeja i Žablja, i ponovnog spoja sa Dunavom kod Novog Sada. Generalni pravac pružanja magistralnih kanala podudara se sa opštim padom terena, a kanal Bogojevo – Bečej predstavlja okosnicu bačkog dela HS DTD.

Analizirana deonica kanala (slika 1) obuhvata deo kanala Sombor – Odžaci od ustave Srpski Miletić do Odžaka i deo kanala Bogojevo – Bečej od Odžaka do Savinog Sela.



Slika 1. Prikaz kanala u bačkom delu HS DTD i deonice od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela.

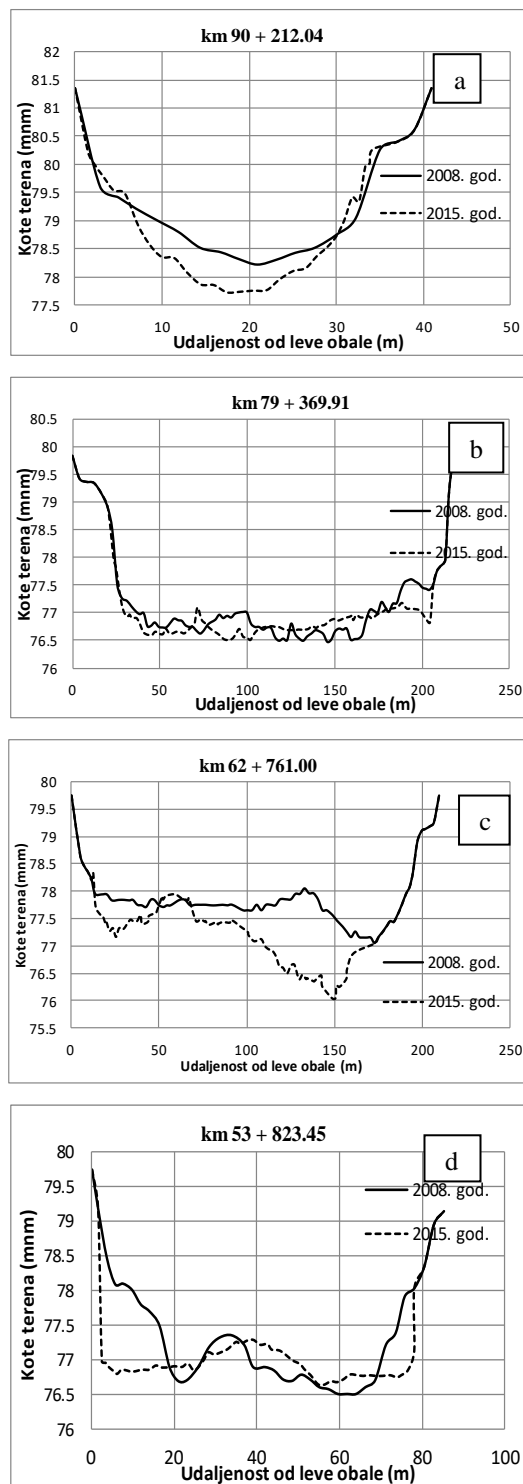
Figure 1. The HS DTD channels in the Backa and the channel section from the Serbian Miletic sluice to the Savin village.

## 4 Materijal

Osnovni ulazni podaci potrebni za proračun transporta nanosa dobijeni su na osnovu terenskih istraživanja. Terenskim radovima obuhvaćena su geodetska snimanja poprečnih profila kanala, hidrometrijska merenja (nivoi vode, proticaji i koncentracije suspendovanog nanosa) i analize granulometrijskog sastava nanosa sa dna kanala i iz toka vode.

Na slici 2 prikazani su uporedni karakteristični poprečni profili iz 2008. i 2014. godine za lokalitete kod ustave Srpski Miletić i spojeva kanala u mestima: Odžaci, Kosančić i Savino Selo.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2. Prikaz uporednih poprečnih profila iz 2008. i 2014. godine kod ustave Srpski Miletić (a), i spojeva kanala kod Odžaka (b), Kosančića (c) i Savinog Sela (d).

Figure 2. Display of the cross - section profiles in 2008 and 2014 in the vicinity of the Serbian Miletic sluice (a), and in the area of channel connections in Odžaci (b), Kosančić (c) and Savin village (d).

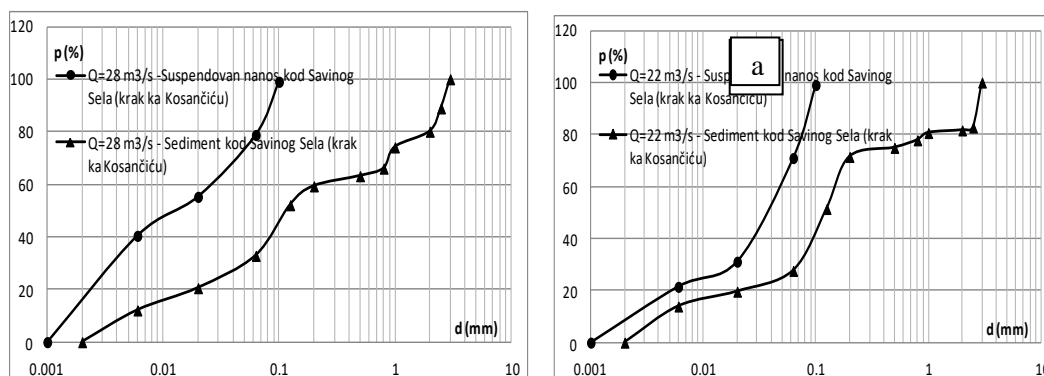
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Poređenjem profila iz 2008. i 2014. godine može se primetiti da je većina profila iz 2014. godine produbljena u odnosu na profile iz 2008. godine, što znači da su u ovom periodu bagerovane veće količine nanosa nego što su se taložile.

Granulometrijski sastav suspendovanog nanosa i nanosa sa dna kanala, pri različitim vrednostima proticaja, prikazani su na slici 3.

Hidrometrijska merenja i zahvatanja uzoraka nanosa sa dna kanala i nanosa u pokretu urađena su kod Savinog Sela za nekoliko karakterističnih vrednosti proticaja. Podaci o izmerenim proticajima vode,  $Q$  ( $m^3/s$ ), i srednjoj koncentraciji nanosa,  $C$  ( $mg/l$ ), prikazani su u tabeli 1. U ovoj tabeli su prikazane i registrovane kote nivoa vode,  $K_n$  (mnm), nizvodno od ustave Srpski Miletić i na mestima spojeva kanala (Odžaci, Kosančić i Savino Selo), kao i izračunate vrednosti pronosa suspendovanog nanosa kod Savinog Sela,  $P$  (t/dan).



Slika 3. Granulometrijski sastav vučenog i suspendovanog nanosa kod Savinog Sela pri proticajima:  $Q = 28 m^3/s$  (a) i  $Q = 22 m^3/s$  (b).

Figure 3. The grain - size distribution curve of the bed load and suspended sediments at the Savin Village at the flows:  $Q = 28 m^3/s$  (a) and  $Q = 22 m^3/s$  (b).

Tabela 1. Rezultati merenja hidrometrijskih parametara za deonicu od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela.

Table 1. Results of the measurement of the hydrometric parameters for the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin village.

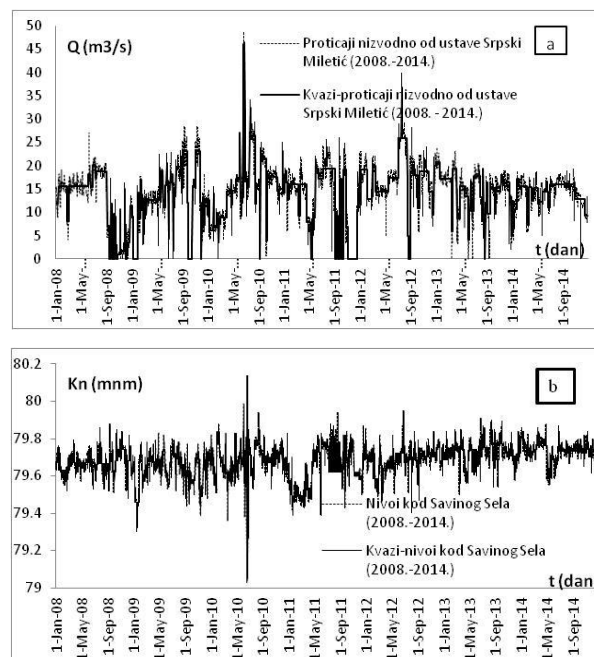
datum		3.08.	10.08.	17.08.
Q ( $m^3/s$ )		60	28.5	22
C (mg/l)		106	20	12
P (t/dan)		550	49,25	22,81
$K_n$ (mnm)	ustava "Srpski Miletić" (km 84 + 862.4)	80,8	79,94	79,94
	Odžaci (km 79 + 437.00)	80,65	79,86	79,88
	Kosančić (km 62 + 760.66)	80,31	79,67	79,77
	Savino Selo (km 53+ 823.45)	80,14	79,59	79,72

## 5 Priprema i obrada ulaznih podataka

Osnovni ulazni podaci potrebni za proračun linija nivoa i analizu hidrodinamičkih parametara toka su podaci o geometrijskim karakteristikama kanala, podaci o proticajima, režimu tečenja i graničnim uslovima. Ulazni podaci potrebni za proračun transporta nanosa obuhvataju: definisan granulometrijski sastav nanosa na dnu kanala za određeni broj poprečnih profila, definisanu jednačinu za proračun transporta nanosa i vrednosti koeficijenata i eksponenata u njoj i, definisan granični uslov. U okviru ulaznih podataka za nanos definišu se i podaci o fizičkim karakteristikama nanosa, kao što su: relativna gustina nanosa i faktor oblika zrna.

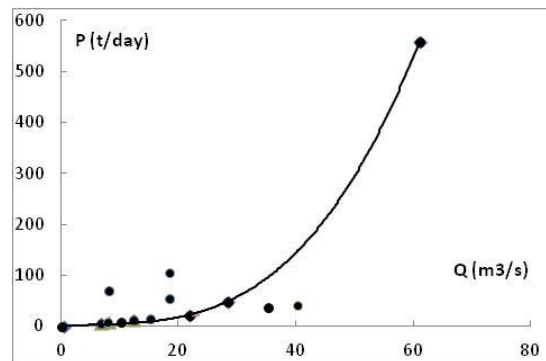
Na osnovu situacionog prikaza kanala i geometrijskih karakteristika poprečnih profila, u programskom paketu HEC - RAS definisani su: osovina toka kanala, geometrijske karakteristike poprečnih preseka, razmaci između poprečnih preseka, vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti za glavno korito i za inundacije, koeficijenti kontrakcije i ekspanzije. Geometrijske karakteristike analizirane deonice definisane su poprečnim presecima, koji se nalaze na prosečnom rastojanju od oko 100 m. Granični uslovi su definisani samo na nizvodnom kraju kanala, jer se u kanalima uspostavlja miran režim tečenja. Pri proračunu linije nivoa za ustaljeno tečenje, granični uslov na nizvodnom kraju kanala je definisan u vidu poznatog nivoa vode u kanalu kod Savinog Sela, dok je na uzvodnom kraju zadat protok (Tabela 1).

Pri analizi neustaljenog kretanja vode kao i u modelu kvazi - ustaljenog strujanja, uzvodni granični uslov su osrednjene vrednosti protoka određenog trajanja, tzv. kvazi – protoci, definisani kod ustave Srpski Miletić, za period od 2008. do 2014. godine (slika 4a). Pri proračunu transporta nanosa uzvodni granični uslov je i kriva koncentracije nanosa kod ustave Srpski Miletić (slika 5). Nizvodni granični uslov su nivoi određenog trajanja, tzv. kvazi – nivoi koji odgovaraju usvojenim vrednostima kvazi – protoka (slika 4b).



Slika 4. Promene proticaja i kvazi – proticaja kod ustave Srpski Miletić u periodu od 2008. do 2014. god. (a) i promene nivoa i kvazi - nivoa kod Savinog Sela u periodu 2008 - 2014. god. (b).

Figure 4. Changes of flows and quasi - flows at the Serbian Miletić sluice in the period of 2008 to 2014 (a) and changes of the levels and quasi - levels at the Savin Village in the period of 2008 to 2014 (b).



Slika 5. Kriva koncentracije nanosa za deonicu kanala od ustave Srpski Miletic do Savinog Sela.

Figure 5. The suspended –sediment rating curve from the Serbian Miletic sluice to the Savin village.

Na osnovu izmerenih vrednosti prosečnih koncentracija nanosa u toku (C) kod ustave Srpski Miletic, dobijenih za različite proticaje u kanalu, i izračunatih vrednosti pronosa nanosa (P) primenom elementarne relacije:  $P = CQ$ , dobijena je kriva koncentracije suspendovanog nanosa, prikazana na slici 5.

Iako je logično očekivati da se pri većim proticajima javljaju i veće koncentracije nanosa u toku, ipak tačan oblik krive koncentracije nanosa veoma je teško precizno definisati. U opštem slučaju, koncentracije nanosa u toku zavise od velikog broja međusobno povezanih fizičkih i hidrauličkih karakteristika reke i sliva kome ona pripada, tako da se često dešava da jednoj vrednosti proticaja odgovaraju različite vrednosti koncentracija nanosa u toku i različite vrednosti pronosa. Takođe, treba imati u vidu da je kriva koncentracije suspendovanog nanosa, prikazana na slici 5, dobijena na osnovu ograničenog broja merenja izvršenih samo u toku leta i da bi se mnogo pouzdaniji rezultati mogli dobiti ukoliko bi se raspolagalo kontinualnim merenjima pronosa nanosa. Kontinualna merenja mogla bi da pruže informacije i o sezonskim promenama pronosa nanosa u mreži, do kojih nesumnjivo dolazi prvenstveno, usled sezonskih varijacija pronosa nanosa na Dunavu, kao i usled sezonskih varijacija pronosa nanosa koji se stvaraju u kanalima. Imajući u vidu da se u toku proleća i jeseni često Dunavom transportuju veće količine nanosa nego u toku leta, može se očekivati da su realne veličine pronosa nanosa veće od izmerenih vrednosti. Kada je reč o transportu nanosa, odstupanja u dobijenoj veličini pronosa nanosa od 20 - 50 % smatraju se sasvim prihvatljivim, imajući u vidu veliki broj neizvesnosti. Ipak, dobijeni rezultati su veoma važni, jer omogućavaju sagledavanje dinamike transporta nanosa i relativnog odnosa između pronosa, erozije i taloženja u različitim delovima kanalske mreže i pri različitim proticajima.

Napominje se da se kod nas sva merenja pronosa nanosa odnose na suspendovani nanos, dok se merenja pronosa vučenog nanosa ne vrše. U aluvijalnim vodotocima dominira suspendovani nanos, dok vučeni nanos obično zauzima oko 5 – 10 % u odnosu na suspendovani nanos. Na osnovu pronosa suspendovanog nanosa ( $P_{sn}$ ) procenjen je pronos ukupnog nanosa ( $P_{un}$ ), pretpostavljajući da zauzima 10 % suspendovanog nanosa.

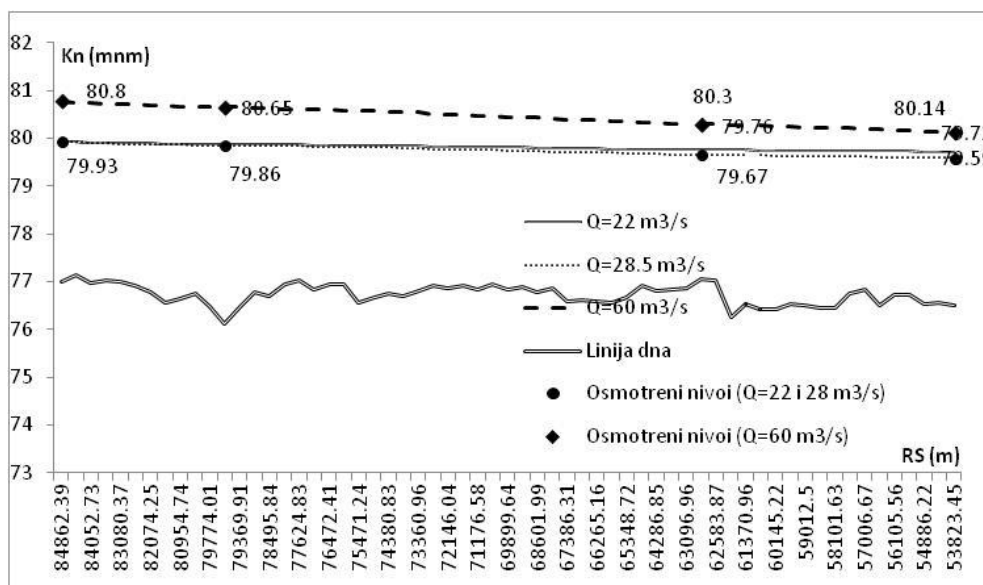
## 6 Razvoj modela transporta nanosa

### 6.1 Kalibracija i verifikacija hidrauličkog dela modela

Kalibracija linije nivoa za deonicu od ustave Srpski Miletic do Savinog Sela urađena je za protok  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$  kod ustave Srpski Miletic i poznat nivo vode kod Savinog Sela, koji iznosi 79.72 mm i predstavlja nizvodni granični uslov (tabela 1). Verifikacija modela urađena je za protoke  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , pri čemu su nivoi vode kod Savinog Sela, bili na kotama 80.14 mm i 79.59 mm (tabela 1). Vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti određene su sa ciljem da se kod ustave

Srpski Miletić i na mestima spojeva kanala (Odžaci i Kosančić) uspostave nivoi vode prikazani u tabeli 1. Kalibracijom modela je dobijeno, a verifikacijom modela je potvrđeno da za vrednost Manningovog koeficijenta rapavosti  $n = 0.017 \text{ m}^{-1/3}$ , simulirani nivoi kod ustave Srpski Miletić, Odžaka i Kosančića, u najvećoj meri, odgovaraju "osmotrenim nivoima". Rezultati dobijeni kalibracijom i verifikacijom modela su prikazani na slici 6.

Za dobijenu vrednost Manningovog koeficijenta rapavosti  $n = 0.017 \text{ m}^{-1/3}$  urađene su simulacije linije nivoa za neustaljeno tečenje, u toku 2013. godine. Na slici 7 prikazani su osmotreni i simulirani nivoi vode za profile kod ustave Srpski Miletić i na spojevima kanala u Odžacima i Kosančiću u toku 2013. god., kao i korelacione zavisnosti između osmotrenih i simuliranih nivoa vode. Može se primetiti veoma dobro slaganje između simuliranih i osmotrenih nivoa vode, kod sva tri profila, jer je dobijena vrednost koeficijenta korelacije  $R = 0.99$ .



Slika 6. Simulirane linije nivoa za deonicu od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela i "osmotreni" nivoi kod ustave Srpski Miletić, Odžaka i Kosančića pri proticajima:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 6. Simulated water surface profiles for the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin Village and the "registered" water levels at the Serbian Miletic sluice, Odzaci and Kosančić at the flows:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

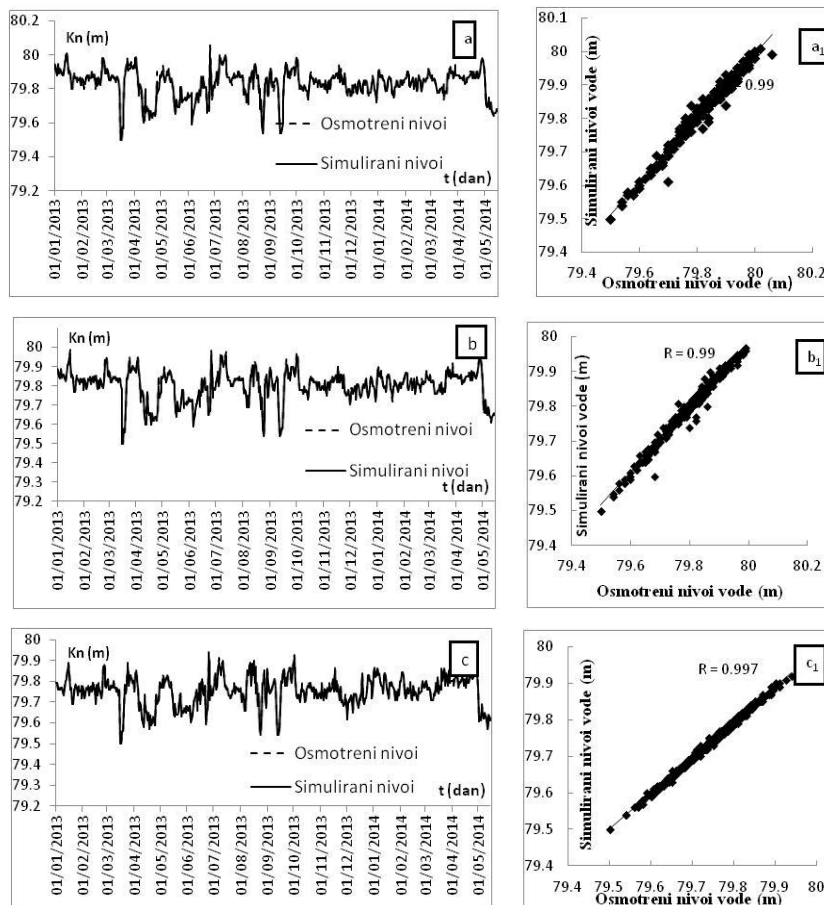
## 6.2 Kalibracija i verifikacija psamološkog dela modela transporta nanosa

Kalibracija psamološkog dela modela urađena je najpre za protok  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok je verifikacija modela urađena za protoke:  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ , sa ciljem da simulirane vrednosti pronosa nanosa odgovaraju njihovim izmerenim vrednostima kod Savinog Sela (tabela 1 i slika 5). Nakon toga, verifikacija psamološkog dela modela podrazumevala je proveru da li se, za definisanu vrednost kritičnog tangencijalnog napona,  $\tau_c$ , u jednačini Laursen - Copeland - a, na realan način mogu opisati promene dnevnih pronosa nanosa kod Savinog Sela, u periodu od 2008. do 2014. godine. Pri tome, pretpostavljeno je da vrednosti pronosa nanosa dobijene na osnovu krive koncentracije nanosa (slika 5) predstavljaju izmerene vrednosti pronosa nanosa kod Savinog Sela, sa kojima su upoređene vrednosti pronosa nanosa dobijene primenom modela. U toku kalibracije i verifikacije modela, za usvojenu kritičnu vrednost tangencijalnog napona,  $\tau_c = 0.0063 \text{ Pa}$ , dobijeno je dobro slaganje između izmerenih i simuliranih pronosa nanosa kod Savinog Sela. Rezultati kalibracije i verifikacije psamološkog dela modela za tri karakteristične vrednosti proticajaja prikazani su u Tabeli 2.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na slici 8 su prikazane izmerene i simulirane vrednosti pronosa nanosa u periodu od 2008. do 2014. godine, kod Savinog Sela. Dobijena vrednost koeficijenta korelacije između izmerenih i simuliranih vrednosti je  $R^2 = 0.7$ .



Slika 7. Simulirani i "osmotreni" nivoi vode kod ustave Srpski Miletić (a), Odžaka (b) i Kosančića (c) u toku 2013. godine i korelacione zavisnosti između osmotrenih i simuliranih nivoa vode ( $a_1$ ,  $b_1$  i  $c_1$ ).

Figure 7. Simulated and "registered" water levels at the Serbian Miletić sluice (a), Odzaci (b) and Kosancic (c) in the course of the year of 2013 and the correlation between the "registered" and the simulated water levels ( $a_1$ ,  $b_1$  and  $c_1$ ).

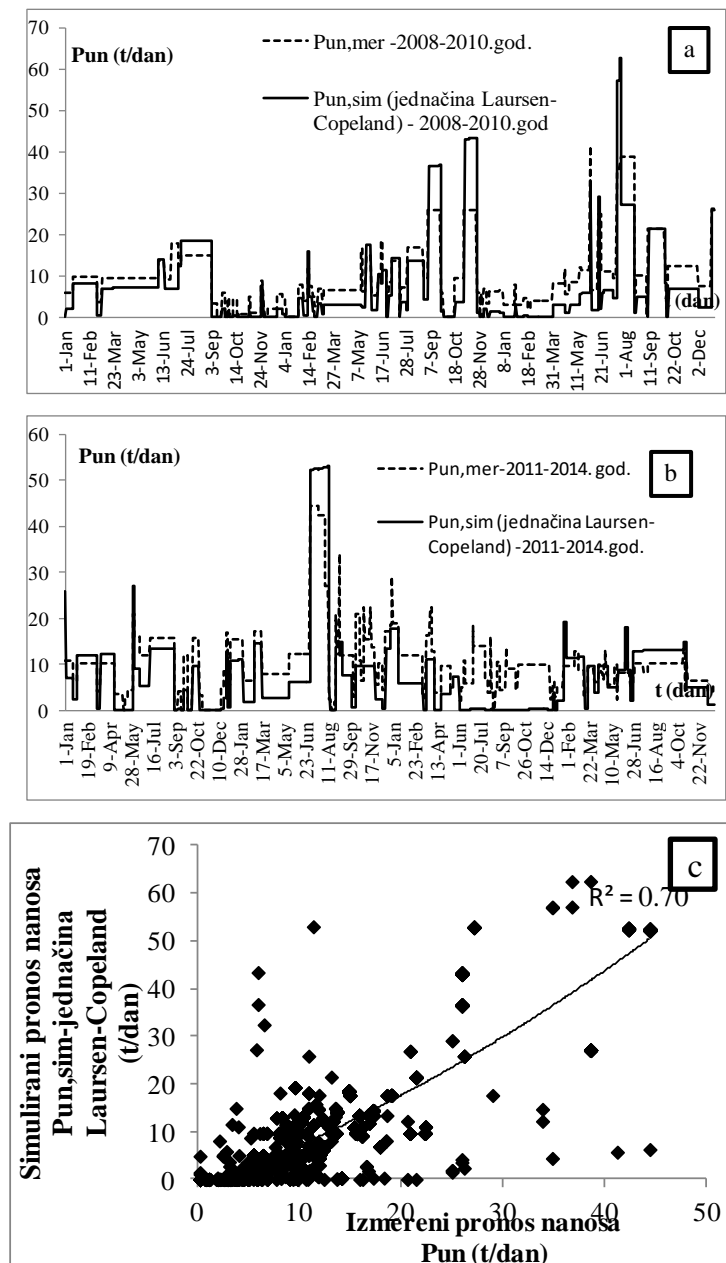
Tabela 2. Rezultati kalibracije (Kal.) i verifikacije (Ver.) psamološkog dela modela.

Table 2. Results of the calibration and validation of the sedimentation model.

Datum snimanja	Q (m <sup>3</sup> /s)	Stacionaža km (m)	Konceptualni parametar u jednačini Laursen – Copeland-a: $\tau_c = 0.0063$ Pa	
			P <sub>un,mer</sub> (t/dan)	P <sub>un,sim</sub> (t/dan)
17.08.2016	22 (Kal.)	Savino Selo (km 53+ 823.45)	24,8	24,7
12.08.2016	28.5 (Ver.)	Savino Selo (km 53+ 823.45)	53,5	57,2
3.08.2016.	61.02 (Ver.)	Savino Selo (km 53+ 823.45)	576,4	573,5

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Simulacije transporta nanosa u periodu od 2008. do 2014. godine omogućavaju da se izračunaju elementi bilansa nanosa (pronosi nanosa po profilima u toku razmatranog perioda, kao i količine nanosa koje se talože ili odnose sa određenih delova kanala). U tabeli 3 i na slici 9 upoređene su količine akumuliranog nanosa dobijene analizom podataka o bagerovanju nanosa ("osmotrene količine") i simulirane količine akumuliranog nanosa kod ustave Srpski Miletić i kod spojeva kanala, što je predstavljalo sastavni deo verifikacije modela transporta nanosa. Dobijeno je dobro slaganje između "osmotrenih" i simuliranih količina nanosa.



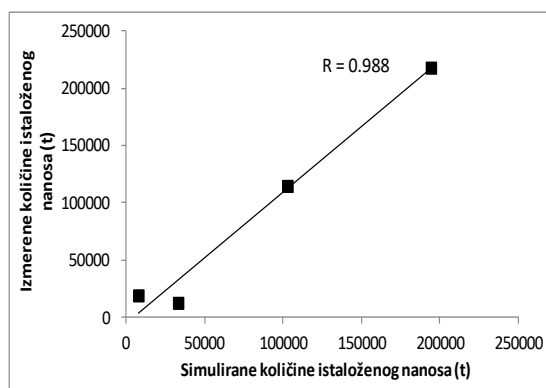
Slika 8. Promene "osmotrenih" i simuliranih pronosa nanosa kod Savinog Sela u periodu 2008 - 2010. godine (a), u periodu 2011.-2014. god. (b) i korelacija između njih (c).

Figure 8. "Registered" and simulated sediment discharge values at the Savin village in the period 2008 - 2010 (a), in the period 2011-2014 (b) and the correlation between the registered and the simulated values (c).

Tabela 3. Količine akumuliranog nanosa dobijene na osnovu podataka o bagerovanju nanosa -  $m_r$  (t) i simulirane količine-  $m_s$  (t) primenom modela i jednačine Laursen – Copeland – a za period od 2008. do 2014. godine

Table 3. Quantities of the accumulated sediments obtained based on the data of sediment dredging -  $m_r$  (t) and the simulated quantities -  $m_s$  (t), obtained by application of the model and the equation of Laursen - Copeland for the period from the year of 2008 to 2014

Stacionaža (km)	$m_r$ (t)	$m_s$ (t)
Kod ustave Srpski Miletić (km 82+074 – 82+568)	18923.4	7737.3
Odžaci (km 79+369.9 – 79+774.01)	114666.3	102892
Kosančić (km 62+588.87 – 63+681.97)	218093.5	194429.8
Savino Selo (km 53+823.45 – 54+ 886)	12389.9	33103.2



Slika 9. Poređenje simuliranih i "osmotrenih" količina akumuliranog nanosa.

Figure 9. Comparison between the simulated and the "registered" amounts of the deposited sediments.

## 7 Rezultati i diskusija

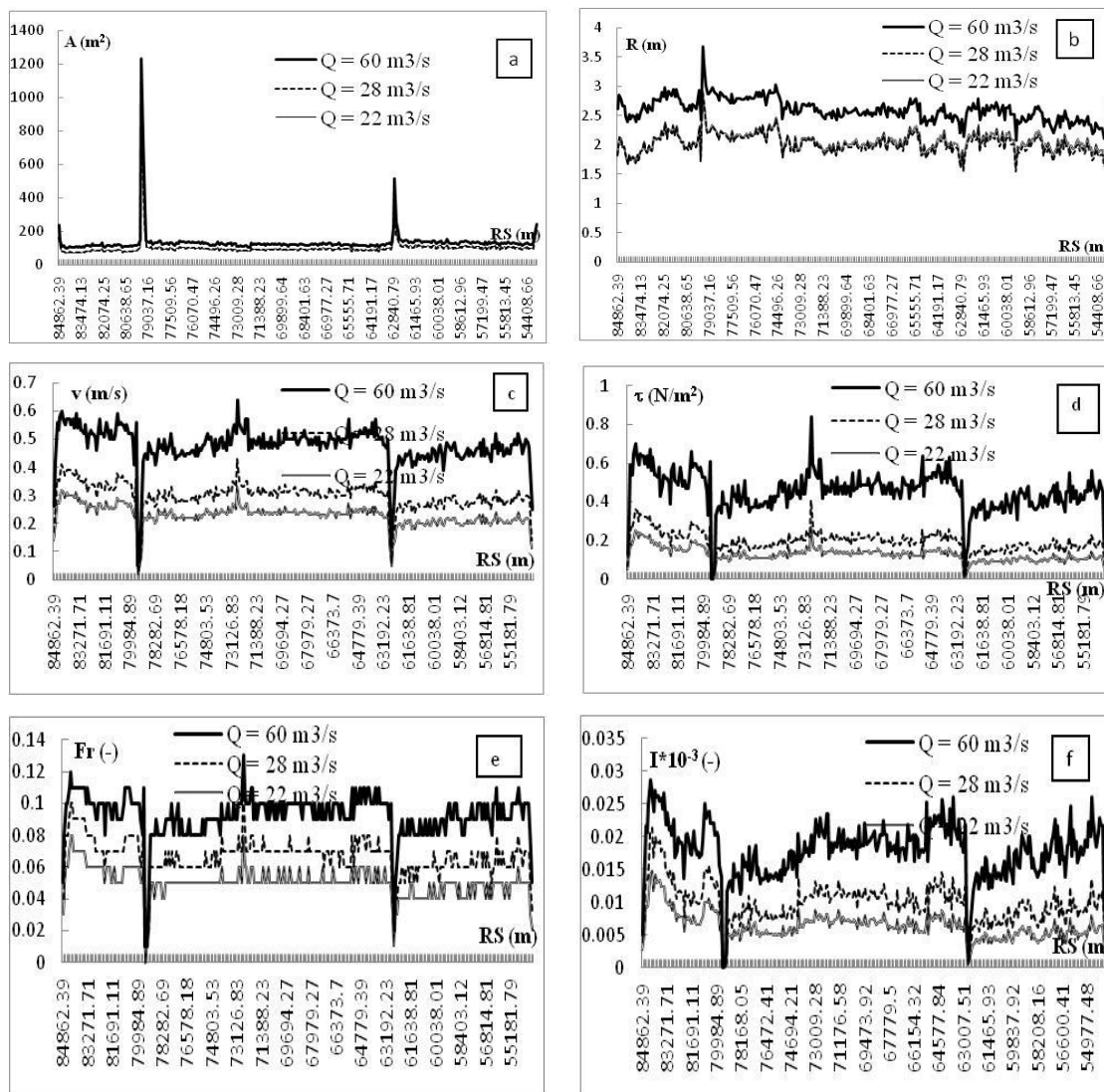
Promene značajnih hidrodinamičkih parametara sa stanovišta transporta nanosa (promene površina poprečnih preseka toka,  $A$  ( $m^2$ ), hidrauličkog radijusa,  $R$  (m), brzine tečenja,  $v$  ( $ms^{-1}$ ), nagiba linije energije,  $I$  (-), tangencijalnih napona,  $\tau$  (Pa), i Frudovog broja,  $Fr$  (-), duž deonice kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela prikazane su, za tri karakteristične vrednosti proticaja (tabela 1), na slici 10.

Može se primetiti da se vrednosti svih hidrodinamičkih parametara povećavaju sa povećanjem proticaja. Usled velikih površina poprečnih preseka strujanja i malih nagiba terena, kod spojeva kanala u mestima Odžaci i Kosančić dolazi do naglog pada brzina, nagiba linija energije, tangencijalnih napona, kao i vrednosti Frudovog broja. Nagli pad brzina i tangencijalnih napona utiče i na smanjenje transportne sposobnosti toka na mestima spojeva kanala, tako da se kod mesta Odžaci i Kosančić talože najveće količine nanosa na deonici od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela.

Simulacije dnevnih pronosa nanosa duž deonice kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela za tri karakteristične vrednosti proticaja (Tabela 1) prikazane su na slici 11.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



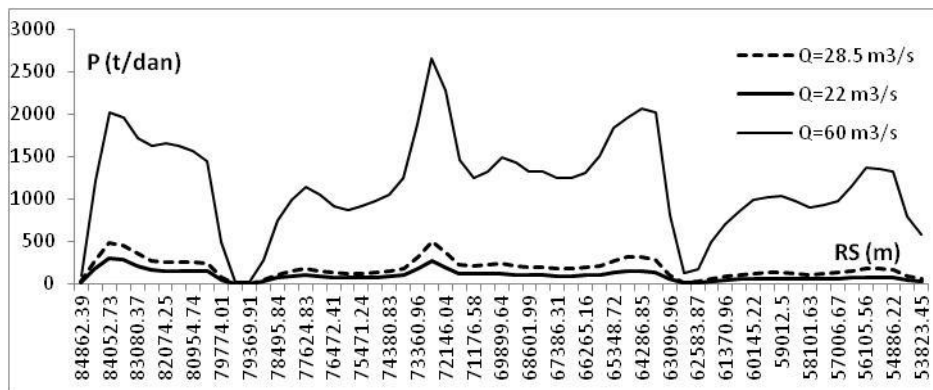
Slika 10. Promene površine poprečnih preseka strujanja (a), hidrauličkog radijusa (b), brzine strujanja vode (c), tangencijalnog napona (d), Frudovog broja (e) i nagiba linije energije (f) duž kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela pri proticajima:  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 10. Changes of the flow area (a), the hydraulic radius (b), the flow velocity (c), the shear stresses (d), the Froude number (e) and the energy grade line slope (f) along the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin village at the flows:  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Dnevni pronos nanosa je najveći pri proticaju od  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ , a najmanji pri proticaju od  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ . Maksimalne vrednosti pronosa nanosa javljaju se na mestima gde su i brzine i tangencijalni naponi najveći (kao i vrednosti Frudovog broja i nagiba linije energije). Na mestima spojeva kanala vrednosti pronosa nanosa naglo se smanjuju i dolazi do taloženja nanosa. Na slikama 12 i 13 prikazani su ukupni godišnji pronosi nanosa u periodu od 2008. do 2014. godine duž deonice od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela.

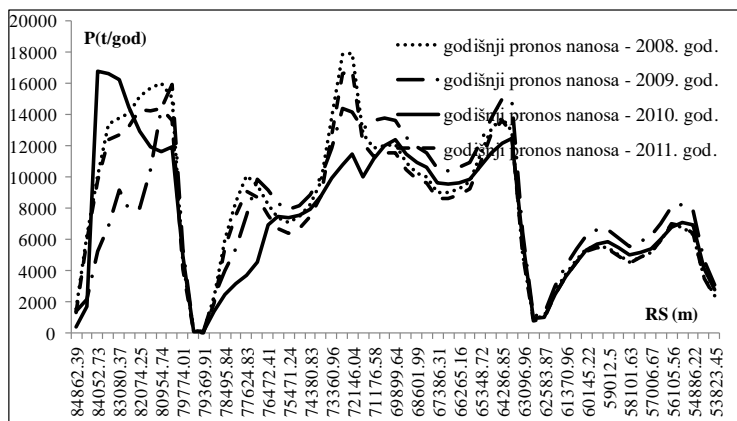
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



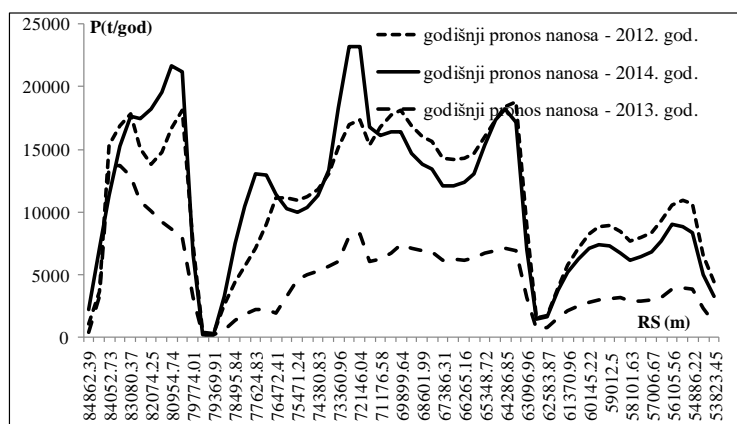
Slika 11. Promene dnevnog pronosa nanosa duž deonice od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela, pri proticajima:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figure 11. Daily values of sediment discharge along the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin village at the flows:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Slika 12. Promene godišnjeg pronosa nanosa duž deonice od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela u periodu od 2008. do 2011. godine.

Figure 12. Changes of the yearly values of the sediment discharge along the section from the Serbian Miletic sluice to the Savin village in the period 2008 to 2011.

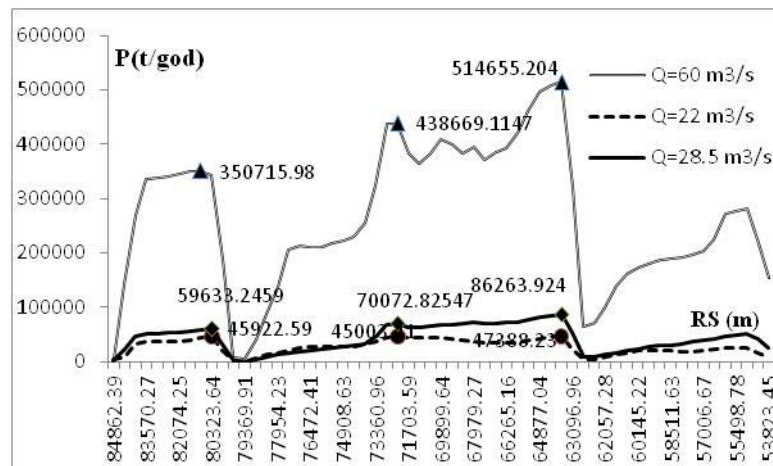


Slika 13. Promene godišnjeg pronosa nanosa duž deonice od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela u periodu od 2012. do 2014. godine.

Figure 13. Changes of the yearly values of the sediment discharge along the section from the Serbian Miletic sluice to the Savin village in the period 2012 to 2014.

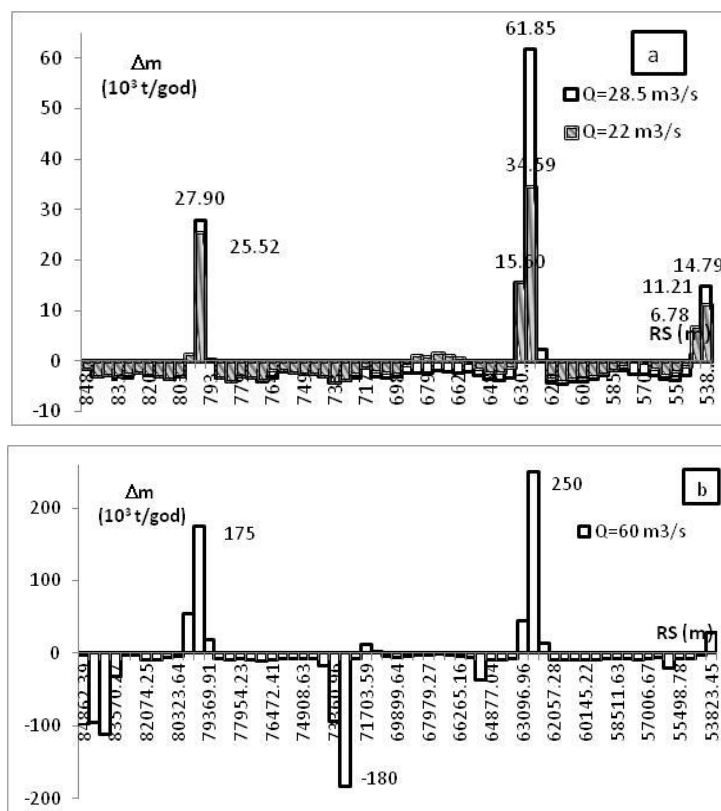
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 14. Simulacije godišnjeg pronosa nanosa za tri ustaljene vrednosti protoka:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  duž kanala od ustave Srpski Miletic do Savinog Sela.

Figure 14. Simulation of the yearly values of the sediment discharge for the three steady flow values:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  along the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin village.



Slika 15. Godišnje promene mase nanosa po dnu kanala od ustave Srpski Miletic do Savinog Sela pri proticajima:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 28 \text{ m}^3/\text{s}$  (a) i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  (b).

Figure 15. Annual sediment mass bed change along the channel from the Serbian Miletic sluice to the Savin village at the flows:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $Q = 28 \text{ m}^3/\text{s}$  (a) and at the flow:  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  (b).

Simulacije godišnjeg pronosa nanosa za tri ustaljene vrednosti protoka:  $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q = 28.5 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ , prikazane su na slici 14.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

U slučaju sve tri vrednosti proticaja godišnji pronos nanosa je najveći uzvodno od račve Kosančić, a najmanji je kod račvi Odžaci, Kosančić i Savino Selo. Na slici 15 prikazane su godišnje promene mase nanosa po dnu kanala,  $\Delta m$  ( $10^3$  t/god), za pomenute tri vrednosti proticaja:  $Q = 22$  m<sup>3</sup>/s,  $Q = 28.5$  m<sup>3</sup>/s i  $Q = 60$  m<sup>3</sup>/s.

Na osnovu slike 15 vidi se da se, u slučaju sva tri analizirana proticaja, i erozija i taloženje nanosa dešavaju na istim lokacijama, samo što se, sa povećanjem proticaja i ove vrednosti povećavaju. U uslovima "forsiranog" rada HS DTD, kada bi kroz analiziranu deonicu kanala tekao ustaljeni proticaj  $Q = 60$  m<sup>3</sup>/s u periodu od godinu dana, ukupna količina erodiranog materijala duž cele deonice bila bi oko 6.1 puta veća u odnosu na količinu erodiranog materijala pri proticaju  $Q = 28.5$  m<sup>3</sup>/s i oko 8.6 puta veća od količine razorenog materijala pri proticaju  $Q = 22$  m<sup>3</sup>/s. Količina akumuliranog materijala duž cele deonice kanala pri ustaljenom proticaju  $Q = 60$  m<sup>3</sup>/s u toku godinu dana bila bi 6.2 puta veća od količine akumuliranog materijala pri proticaju  $Q = 28.5$  m<sup>3</sup>/s i 8.6 puta je veća od količine akumuliranog materijala pri proticaju  $Q = 22$  m<sup>3</sup>/s.

Potrebno je napomenuti i da verodostojnost dobijenih rezultata, u velikoj meri, zavisi od kvaliteta ulaznih podataka vezanih za nanos. Jedna od pretpostavki koja je uvedena pri formiranju modela je da se kriva koncentracije nanosa može dobiti na osnovu određenog broja diskretnih merenja koncentracije nanosa pri diskretnim vrednostima proticaja. Pored toga, merenja koncentracija nanosa u toku i analize granulometrijskog sastava nanosa urađene su u toku letnjeg perioda, kada je realno očekivati manji pronos nanosa, nego u toku proleća i jeseni. Sigurno je da iz Dunava u kanale ulaze veće količine nanosa u toku proleća, kada dolazi do otapanja snega u višim planinskim predelima, kao i za vreme jakih kiša u toku jeseni i proleća. U cilju dobijanja pouzdanijih rezultata o režimu transporta nanosa u kanalima HS DTD, neophodna su kontinualna merenja pronosa nanosa u dužem vremenskom periodu. Pored toga, simulacije dirigovanog režima proticaja u kanalima, koji se uspostavlja pomoću sistema ustava, ponekad dovode do nestabilnosti numeričkog modela usled mogućih velikih varijacija proticaja.

## 8 Zaključak

Problemi intenzivnog istaložavanja nanosa na većem broju lokacija duž kanala Hidrosistema DTD prisutni su od samog početka eksploatacije kanala. Iako se ovi procesi ne mogu u potpunosti sprečiti, primenom odgovarajućih mera moguće ih je umanjiti. U ovom radu je, na primeru kanala od ustave Srpski Miletić do Savinog Sela, analizirana mogućnost izmene hidrauličkog režima tečenja u cilju stvaranja povoljnijih hidrauličkih uslova za transport nanosa.

Primenom modela transporta nanosa, dobijenog kalibracijom i verifikacijom programskog paketa HEC – RAS, dobijeno je da se na analiziranoj deonici kanala najveće količine nanosa talože na mestima spojeva kanala kod Odžaka, Kosančića i Savinog Sela, jer tu dolazi do naglog pada transportne sposobnosti toka. Takođe, erozija će se javljati na mestima povećane transportne sposobnosti toka. Pri tome, zone taloženja, odnosno erozije su uvek iste, bez obzira na veličinu proticaja u kanalu. Međutim, količine i akumuliranog i erodiranog materijala biće veće pri većim proticajima. U uslovima "forsiranog" rada HS DTD, kada bi kroz ovu deonicu tekao ustaljeni proticaj  $Q = 60$  m<sup>3</sup>/s u dužem vremenskom periodu, ukupne godišnje količine i razorenog i akumuliranog materijala bile bi oko 6.1 puta veće u odnosu na količine razorenog i akumuliranog materijala pri proticaju  $Q = 28.5$  m<sup>3</sup>/s i oko 8.6 puta veće od količina razorenog i akumuliranog materijala pri proticaju  $Q = 22$  m<sup>3</sup>/s. Na taj način, pri "forsiranom" radu HS DTD procesi erozije i taloženja nanosa bili bi intenzivirani i mogli bi da dovedu do značajne nestabilnosti kanala.

Dobijene rezultate treba shvatiti kao uopštene, ali značajne, pokazatelje dinamike taloženja i erozije u kanalima pri različitim hidrauličkim uslovima u njima. U cilju dobijanja pouzdanijih rezultata neophodna su kontinualna merenja u dužem vremenskom periodu, koja bi omogućila dobijanje pouzdanijih krivih koncentracija nanosa.

## Zahvalnica

Autori rada duguju veliku zahvalnost stručnjacima JVP „Vode Vojvodine“ koji su obezbedili i organizovali terenska istraživanja na osnovu kojih su dobijeni podaci potrebni za proračun transporta nanosa primenom modela.

## Literatura

1. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (2001) *Studija o mogućnostima smanjenja unošenja nanosa iz reka u kanale Hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav*, odgovorni obrađivač: Sava Petković, Beograd.
2. Krone, R. B. (1962) *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final Report*, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley.
3. Laursen E.L. (1958) The Total Sediment Load of Streams, *Hydraulics Div. Jour. ASCE* 84 (1): paper 1530, 36p.
4. Legates, D. R. and McCabe Jr., G. J.(1999) Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resour. Res.*, 35 (1): 233–241.
5. Partheniades, E. (1965) Erosion and deposition of cohesive soils, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 91 (1): 105 –139.
6. Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet (2016) *Studija transporta nanosa u kanalima bačkog dela HS DTD u uslovima povećanog i produženog trajanja tranzitnog protoka vode iz Dunava*, odgovorni obrađivač: dr Vesna Đukić, Beograd.
7. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka (2011) *Studija hidroenergetskih parametara hidrosistema Dunav – Tisa – Dunav i reke Tise*, Novi Sad.
8. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih nauka (2007) *Pravilnik o održavanju vodnog režima na Hidrosistemu Dunav – Tisa – Dunav*, Novi Sad.
9. U.S. Army Corps of Engineers (2010) HEC RAS River Analysis System, *Hydraulic Reference Manual, version. 4.1*. Hydraulic Engineering Centre, USA.



## Примена модела размене количине кретања за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока

Дејана Ђорђевић<sup>1</sup>, Марија Ивковић<sup>2</sup>, Иван Стојнић<sup>3</sup>

**АПСТРАКТ:** У свету се већ двадесет пет година разматрају могућности за побољшање процене криве протока у случајевима када се вода излије из главног корита на плавне површине. Разлог за то је чињеница да су испитивања у лабораторијским условима показала да се при високом степену потопљености плавних површина ( $> 0,3$ ) применом класичног приступа, заснованог на подели корита за велику воду на хидраулички хомогене сегменте и примени Манингове једначине, вредности протока прецењују за више од 60%. Математички модели који су током овог периода развијани и/или унапређивани првенствено су проверавани на основу мерења у лабораторијским каналима у условима устаљеног једноликог и неједноликог течења. Циљ овог рада је да се размотри могућност примене једног од тих модела за процену криве протока у кориту за велику воду природног водотока. Реч је о моделу линијског течења заснованом на размени количине кретања између главног корита и плавних површина. Осим размене количине кретања турбулентном дифузијом, овај модел узима у обзир и размену количине кретања услед непризматичности корита, што је једна од битних одлика корита природних водотока. Као пример ће послужити попречни пресек хидролошке станице Словац на реци Колубари, за коју постоје доступни подаци осматрања у домену великих вода. Вредности протока које се добијају за највише забележене водостаје применом класичног приступа (методе хидраулички хомогених сегмената) и методе размене количине кретања упоредиће се са званичним вредностима РХМЗ Србије.

Кључне речи: крива протока, корито за велику воду, модел линијског течења, метода размене количине кретања, река

## Application of the exchangedischarge model for the estimation of the rating curve in the compound channel – a case study

**ABSTRACT:** The hydraulic engineering community has been making continuous efforts to improve the procedure for estimation of a stage discharge curve in a compound channel over the last twenty five years. The reason for this is the fact that tests in laboratory conditions have shown that the classical approach based on the divided channel method, which uses Manning's equation, overestimates the discharge by more than 60% for high floodplain submergence ratios ( $> 0.3$ ). Mathematical models that were developed and/or improved during this period were primarily tested using uniform or non-uniform flow data from laboratory flumes. This paper aims at applying one of these models in estimating the stage discharge curve under the flood conditions at one gauging station. More precisely, this will be the exchange discharge model, which is a 1D flow model. Apart from the momentum exchange due to turbulent diffusion, this model also considers the momentum exchange due to mass transfer between the main channel and floodplains, as rivers and streams have non-prismatic channels. The Slovak gauging station on the Kolubara River will be used for the case study, since there are floods observation data for this station available. The discharge values obtained for the highest recorded water levels using the classical approach (divided channel method) and the exchange discharge method will be compared with the official records of the Republic hydrometeorological service of Serbia.

Keywords: rating curve, compound channel, 1D flow model, exchange discharge model, river

<sup>1</sup> Доц. др Дејана Ђорђевић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, dejana@grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Марија Ивковић, Републички хидрометеоролошки завод, marija.ivkovic@hidmet.gov.rs

<sup>3</sup> Иван Стојнић, IST Lisbon, Portugal, EPFL, Lausanne, Switzerland, istojnic@gmail.com

## 1 Увод

Течење у домену великих вода, које се изливају из основног корита, је изузетно сложено и као такво тешко га је описати једноставним математичким моделима применљивим у инжењерској пракси. У овом раду приказана је примена једног од модела линијског течења у кориту за велику воду за прорачун криве протока у природним водотоцима, који је детаљно проверен коришћењем података лабораторијских мерења. Резултати досадашњих лабораторијских истраживања указују да одступања вредности протока израчунатих коришћењем традиционалних метода од измерених протока могу бити значајна. Анализе спроведене у раду [2] показују да су вредности протока процењене коришћењем методе јединственог пресека мање, а вредности израчунате по методи хидраулички хомогених сегмената веће од измерених. Применом методе размене количине кретања између главног корита и плавних површина (МРКК) за прорачун криве протока у кориту за велику воду (КВВ), коју су крајем 1990их предложили Бузмар и Зек [1], добијају се вредности које су најприближније измереним вредностима како у призматичним [2], тако и у непризматичним каналима [3].

Стога се у раду разматра се могућност примене ове методе за одређивање криве протока у домену великих вода у природним коритима која су по правилу непризматична и имају попречне пресеке неправилног облика. За овакву анализу погодни су они попречни пресеци водотока у којима постоје одговарајућа хидрометријска мерења, а то су најчешће профили хидролошких станица. Један од таквих профила је профил хидролошке станице Словац на реци Колубари. Ова хидролошка станица изабрана је зато што за њу постоји довољан број мерења у домену водостаја који прелазе границе основног корита. Подаци са ове водомерне станице послужили су за подешавање параметара модела и проверу квалитета МРККа, а потом и за дефинисање криве протока у домену великих вода. Овако дефинисана крива протока употребљена је за одређивање хидрограма поплавног таласа из маја 2014. године и његово поређење са званичним хидрограмом добијеним коришћењем званичне криве протока Републичког хидрометеоролошког завода Србије ради сагледавања неизвесности која се јавља у процесу трансформације водостаја у проток у екстремним хидролошким ситуацијама.

У наставку се прво даје кратак приказ МРККа са посебним освртом на чланове којима се описује размена количине кретања између главног корита (ГК) и плавних површина (ПП) услед непризматичности корита, тзв. „геометријска” размена. Након тога се наводе основне карактеристике КВВ реке Колубаре на потезу хидролошке станице Словац и изабрани подаци хидрометријских мерења из домена великих вода. Потом следе процена вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине, анализа осетљивост модела на промену вредности параметара и улазних величина и приказ методе за подешавање вредности параметара математичког модела. На крају се пореде хидрограми директног отицаја поплавног таласа из 2014. године и даје коментар о могућности примене МРККа за процену криве протока у КВВ природних водотока.

## 2 Математички модел

У овом раду користи се модел линијског течења који су предложили Бузмар и Зек [1]. Моделирање течења у КВВ заснива се на подели попречног пресека вертикалним равнима на ГК (сегмент 2) и две ПП (сегменти 1 и 3, слика 2) и на претпоставци да је ниво воде у попречном пресеку хоризонталан. Једначине се исписују за сваки део сложеног попречног пресека, што значи да једначине одржања масе садрже члан којим се обухвата размена масе између суседних сегмената КВВ, а једначине одржања количине кретања, додатне чланове који описују размену количине кретања између ових делова попречног пресека. Дефинисање криве протока у КВВ за сада се још увек заснива на претпоставци да је течење устаљено, тако да се једначине одржања количине кретања погодним трансформацијама преводе у једначине одржања енергије, којих има укупно три (за сваки сегмент сложеног попречног пресека):

$$I_e \equiv -\frac{\partial}{\partial x} \left( Z + \frac{U^2}{2g} \right) = I_{tr,i} + \underbrace{\frac{q_{ul,i}(U_i - u_{b,i})}{gA_i}}_{I_{rkk,i}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

где је  $x$  независно променљива – просторна координата у смеру главног тока,  $I_e$  је нагиб линије енергије који је јединствен за цео попречни пресек,  $Z$  је ката нивоа у попречном пресеку,  $U$  је средња профилска брзина,  $U_i$  је средња брзина у сегменту  $i$ ,  $A_i$  је површина сегмента  $i$ ,  $q_{ul,i}$  је бочни доток у сегмент  $i$ ,  $u_{b,i}$  је компонента брзине суседног сегмента у правцу главног тока којом се остварује унос количине кретања у сегмент  $i$ ,  $I_{tr,i}$  је нагиб линије енергије услед трења за сегмент  $i$ , а  $I_{rkk,i}$  нагиб линије енергије услед размене количине кретања такође за сегмент  $i$ . Бузмар и Зек однос ове две компоненте нагиба линије означавају са  $\chi_i$  ( $= I_{rkk,i} / I_{tr,i}$ ), па се може скраћено написати да је нагиб линије енергије  $I_e = I_{tr,i} (1 + \chi_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Бочни доток у сегмент  $i$  потиче од турбулентне дифузије ( $q_{ul}^t$ ), која је последица разлике брзина у ГК и на ПП, и од размене масе због непризматичности корита, или тзв. „геометријске” размене ( $q_{ul}^g$ ). Бочни доток и бочно истицање  $q_{ul}^t$  су симетрични и описују се моделом мешања у хоризонталној равни [1 и 2]:

$$q_{gpp}^t = q_{ppg}^t = |\bar{v}^t| (H - h_{pp}) = \psi^t |U_{gk} - U_{pp}| (H - h_{pp}) \quad (2)$$

где доњи индекси показују да ли је реч о дотоку из главног корита на плавну површину „gpp” или о дотоку са плавне површине у главно корито „ppg”. Апсолутна вредност временски осредњене флукуације брзине уравни пресека  $|\bar{v}^t|$  сразмерна је апсолутној вредности разлике средњих брзина суседних сегмената  $|U_{gk} - U_{pp}|$ , а коефицијент пропорционалности  $\psi^t$  је параметар модела МРКК. Дубине воде у ГК и на ПП означене су, редом, са  $H$  и  $h_{pp}$ .

Смер бочног дотока, који је последица „геометријске” размене зависи од тога да ли се ПП шири ( $q_{gpp}^g$ ) или сужава ( $q_{ppg}^g$ ; за објашњење обе величине видети слику 5 из [3]). Увођењем параметра  $\kappa$ , који показује смер кретања воде у односу на орт нормале на границу ГК [3], бочни дотоци, односно истицања могу се скраћено написати на следећи начин:

$$q_{ppg}^g = \psi^g \kappa_{ppg} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2} \quad \text{и} \quad q_{gpp}^g = \psi^g \kappa_{gpp} \frac{dK_{pp}}{dx} I_{tr,pp}^{1/2} \quad (3)$$

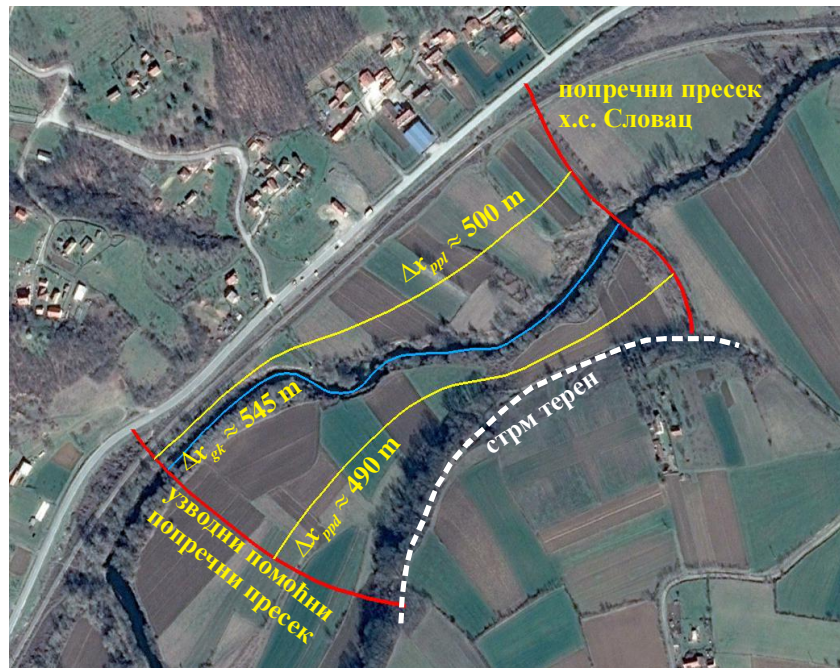
где доњи индекси, имају исто значење као у случају бочног дотока услед турбулентне дифузије, а одговарајући параметри  $\kappa$  дефинишу се у зависности од промене проточности ПП ( $K_{pp}$ ):

$$\kappa_{ppg} = \begin{cases} 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ -1, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad \wedge \quad \kappa_{gpp} = \begin{cases} 1, & \frac{dK_{pp}}{dx} > 0 \\ 0, & \frac{dK_{pp}}{dx} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Када је  $\kappa = 1$ , вода истиче из ГК на ПП, јер се смер кретања воде поклапа са смером орта спољне нормале, а када је  $\kappa = -1$  вода са ПП дотиче у ГК, тј. смер кретања воде је супротан од смера орта спољне нормале.

### 3 Хидролошка станица Словац на реци Колубари

Река Колубара је последња велика десна притока реке Саве и настаје спајањем река Обнице и Јабланице непосредно узводно од Ваљева. Хидролошка станица Словац налази се 88 km узводно од ушћа у реку Саву (слика 1). У овом пресеку се од 1955. године прати облик речног корита и мери проток. Средњи вишегодишњи проток у овом пресеку износи  $9,47 \text{ m}^3/\text{s}$  [4].



Слика 1. Долина реке Колубаре у близини х.с. Словац (април 2014. године) са назначеним поперчним пресецима и растојањима између делова корита за велику воду

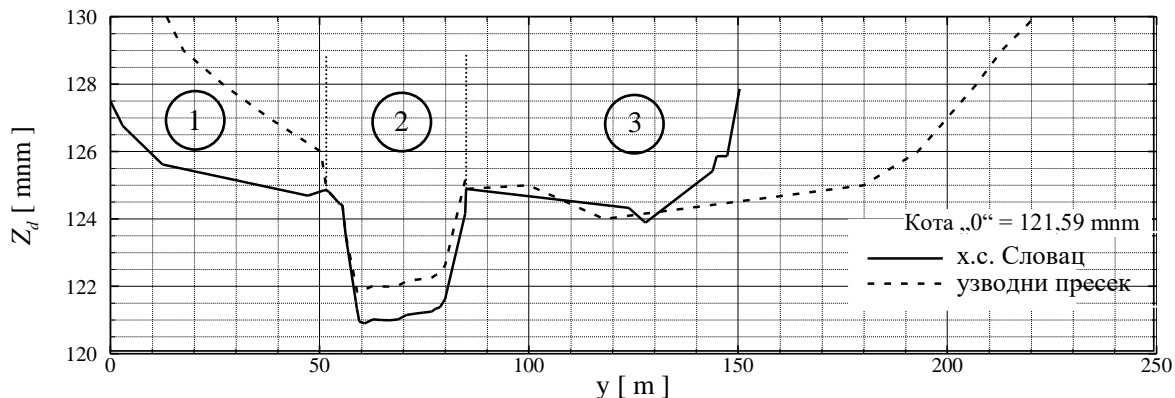
Figure 1. Kolubara River valley in the vicinity of the Slovak gauging station (April 2014) with the indicated cross-sections and distances between different parts of the compound channel

Од расположивих података мерења водостаја и протока у пресеку х.с. Словац, из периода од 1955. до 2017. године, изабрани су они подаци чије су вредности у домену великих вода. За одређивање криве протока изабране су вредности четири највиша водостаја и њима одговарајућих протока (табела 1). Мерења из маја 1979., априла 1985. и децембра 1999. године послужила су за подешавање вредности параметара модела, а мерење из јуна 1985. године за проверу модела. Пошто се промене облика основног корита редовно прате, водило се рачуна да се за сваку од ове три године користе одговарајући подаци.

Табела 1. Четири највиша водостаја измерена у поперчном пресеку х.с. Словац

Table 1. Four highest water stages recorded at Slovak gauging station

датум	$H$	$Q_{mer}$
	[ cm ]	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
13. мај 1979.	342	201
18. април 1985.	387	222
13. јун 1985.	380	220
29. децембар 1999.	340	208



Слика 2. Попречни пресек хидролошке станице Словац снимљен 1979. године и узводни попречни пресек читан са сателитских снимка из 2002. године (Google Earth), удаљен 544 m

Figure 2. Cross-section of the Slovak gauging station surveyed in 1979 and the cross-section taken from Google Earth images of the year 2002; the cross-section is located 544 m upstream of the gauging station

На слици 2 приказан је попречни пресек хидролошке станице Словац за 1979. годину заједно са пресеком који се налази око 545 m узводно и који је коришћен за утврђивање промене проточности плавних површина дуж анализираних деонице реке Колубаре. Податак о промени проточности ПП неопходан је за утврђивање износа „геометријске” размене између ГК и ПП. У недостатку геодетских мерења, геометрија плавних површина у узводном попречном пресеку одређена је коришћењем сателитских података из 2002. године (Google Earth), док је облик основног корита задржан као у пресеку хидролошке станице. Процењено је да је нагиб дна износио око 0,25%. Као што се са слике 1 може видети, КВВ реке Колубаре је на разматраном потезу изразито непризматично – лева ПП се у смеру тока проширује, а десна ПП се сужава, што пружа могућност да се испита успешност МРКК у одређивању криве протока у непризматичним коритима. За одређивање „геометријске” размене између ГК и ПП потребна су растојања између два попречна пресека дуж леве и десне ПП. Ова растојања дата су на слици 1.

#### 4 Процена вредности Манинговог коефицијента отпора

Врста и степен развоја вегетације значајно утичу на вредност Манинговог коефицијента отпора [5]. Вредности протока које су коришћене за подешавање вредности параметара модела и његово тестирање измерене су у различитим периодима године, тако да је приликом процене вредности Манинговог коефицијента отпора узет у обзир и различит степен развоја вегетације. Вредности су процењене засебно за главно корито и плавне површине на основу фотографија снимљених током обиласка терена и фотографија у близини анализираних профила доступних на интернету. Фотографије са слике 3 и силазак на реку омогућили су да се стекне увид у састав речног дна и обала, као и то да се сагледају врста и густина вегетације која расте на косинама обала ГК и на плавним површинама у јесењем периоду.

Вредности Манинговог коефицијента отпора за сва четири мерења одређене су применом поступка који је предложен у Правилнику за избор коефицијента отпора у каналима [5]. Овај поступак подразумева да се прво изабере вредност Манинговог коефицијента рапавости за право призматично корито без вегетације на обалама сачињено од природних материјала – земље, стене или шљунка. Потом се процењују утицаји: 1) непризматичности корита, 2) величине и облика



Слика 3. Корито реке Колубаре код хидролошке станице Словац (лево) и у близини узводног попречног пресека (десно)

Figure 3. Kolubara River channel near Slovak gauging station (left) and near the upstream cross-section (right)

Табела 2. Оквирне вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине у зависности од годишњег доба изражене у  $m^{-1/3}s$

Table 2. Seasonal values of the Manning's coefficient for the main channel and floodplains (in  $m^{-1/3}s$ )

корак бр.	опис	главно корито		плавне површине	
		пролеће/лето	јесен/зима	пролеће/лето	јесен/зима
1.	избор основне вредности Манинговог коефицијента отпора	0,024	0,024	0,020	0,020
2.	додатак услед наносних облика на дну	0,005-0,01	0,005-0,01	0,005-0,01	0,005-0,01
3.	додатак услед присуства вегетације	0,025-0,050	0,01-0,025	0,025-0,050	0,01-0,025
Збирно:		0,054-0,084	0,039-0,059	0,050-0,080	0,035-0,055

корита, 3) постојања препрека у току, 4) вегетације и 5) степена меандрирања. Процењене њихове вредности додају се основној вредности за право, призматично корито без вегетације на обалама. С обзиром на то да је утицај непризматичности у моделу већ обухваћен оним члановима у једначини којима се описују размена масе и количине кретања, додатак на основну вредност Манинговог коефицијента отпора услед непризматичности корита није узет у обзир. Додаци услед препрека и меандрирања такође нису узети у обзир, јер на разматраном потезу нема препрека, а закривљеност корита није изражена. Оквирне вредности осталих компонента коефицијента отпора на потезу х.с. Словац приказане су у табели 2.

## 5 Анализа осетљивости на промену вредности параметара

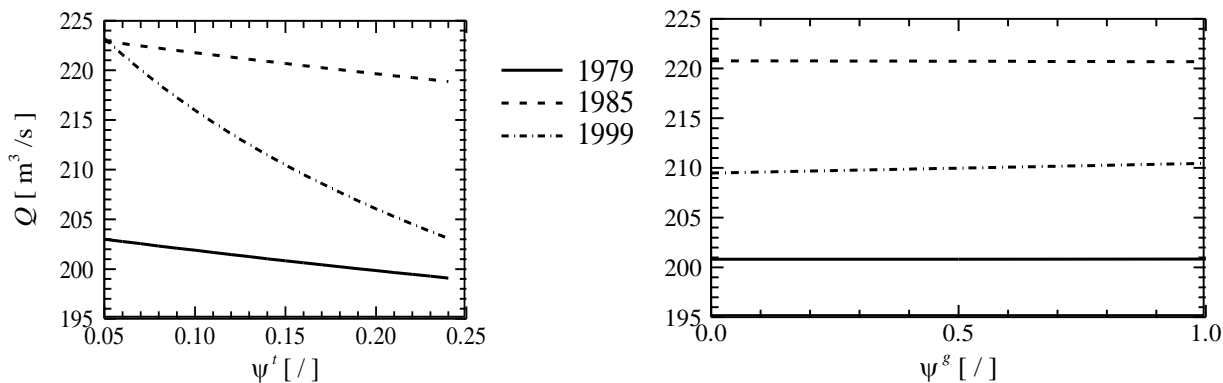
Мале промене вредности параметара модела могу изазвати велике промене вредности протока. Ако се изузме Манингов коефицијент, који је улазни податак за све моделе линијског течења, МРКК има два параметра –  $\psi^f$  и  $\psi^g$ . Уобичајени распон вредности ова два параметра у досадашњим истраживањима био је између 0,05 до 0,24 за  $\psi^f$  и 0,0 до 1,0 за  $\psi^g$  [1, 2 и 3]. Анализа осетљивости модела најпре је спроведена са вредностима Манинговог коефицијента отпора из табеле 3.

Посматрањем вредности протока добијених варирањем параметра  $\psi^f$ , при фиксној вредности параметра  $\psi^g = 1$ , уочено је да се она смањује када се вредност параметра  $\psi^f$  повећава. Градијент

Табела 3. Вредности Манинговог коефицијента отпора за главно корито и плавне површине коришћене у анализи осетљивости

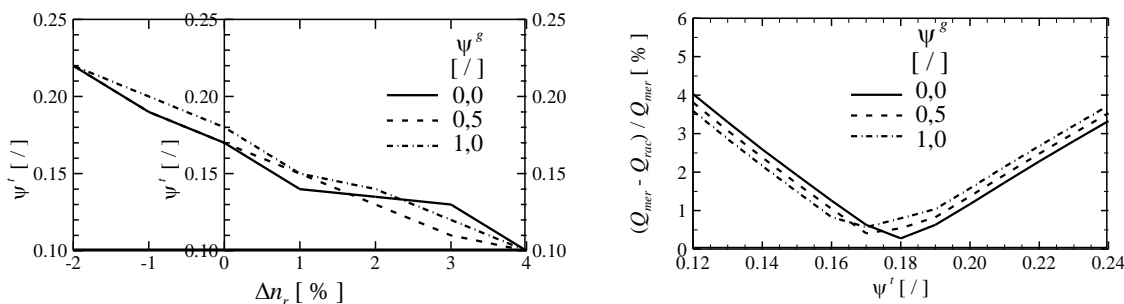
Table 3. Values of the Manning's coefficient for the main channel and floodplains used in sensitivity analysis

година	$n_{gk} [m^{-1/3} s]$	$n_{pp} [m^{-1/3} s]$
1979.	0,055	0,065
1985.	0,060	0,070
1999.	0,048	0,058



Слика 4. Анализа осетљивости модела на промену вредности параметра  $\psi^1$ , при  $\psi^2 = 1$  (лево) и на промену вредности параметра  $\psi^2$ , при  $\psi^1 = 0,15$  (десно) – профил х.с. Словац

Figure 4. Model sensitivity to  $\psi^1$  parameter changes when  $\psi^2 = 1$  (left) and to  $\psi^2$  parameter changes when  $\psi^1 = 0,15$  (right) – Slovak gauging station



Слика 5. Промена оптималне вредности параметра  $\psi^1$  у зависности од одступања Манинговог коефицијента отпора од претпостављене оптималне вредности (лево); промена вредности критеријумске функције у зависности од промене параметра  $\psi^1$  ( $\psi^2 = \{0,0; 0,5; 1,0\}$ ) (десно)

Figure 5. Variations of the optimal  $\psi^1$  parameter value with the percentage difference in the Manning coefficient value from its optimum (left); variations in the objective function with  $\psi^1$  parameter values when ( $\psi^2 = \{0.0; 0.5; 1.0\}$ ) (right)

смањења није исти за све поплавне таласе. За таласе из 1979., 1985. и 1999. године релативне разлике протока које одговарају вредностима  $\psi^1 = 0,05$  и  $\psi^1 = 0,25$  износе редом 1,92, 1,76 и 9,05% (слика 4, лево). За разлику од параметра  $\psi^1$ , промена вредности параметра  $\psi^2$  не изазива значајније промене вредности протока (проток се незнатно повећава, слика 4, десно), што значи да модел није осетљив на промену вредности овог параметра.

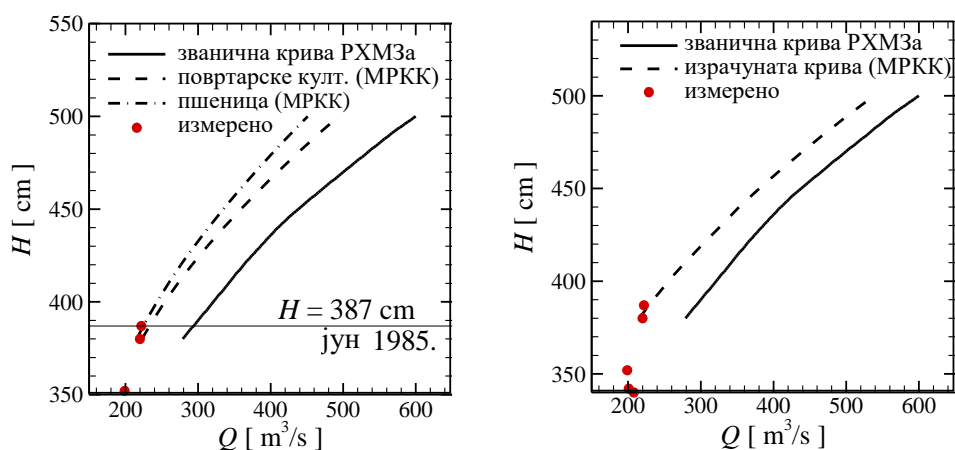
У наредном кораку је анализирано у којој мери промена вредности Манинговог коефицијента отпора ( $\Delta n_r$ ) утиче на оптималне вредности параметара  $\psi^1$  и  $\psi^2$ . Као критеријумска функција у процесу оптимизације коришћен је збир апсолутних вредности релативне грешке између осмотрених и израчунатих вредности протока. Вредности параметара  $\psi^1$  и  $\psi^2$  за које ова функција има минималну вредност сматраће се оптималним сетом

параметара. Резултати ове анализе приказани су на слици 5. Уочава се да параметар  $\psi^s$  нема значајнији утицај на крактер промене вредности параметра  $\psi^t$  при варирању вредности Манинговог коефицијента отпора (слика 5, лево). Са повећањем вредности Манинговог коефицијента смањује се оптимална вредност параметра  $\psi^t$ . Критеријумска функција опада до  $\psi^t = 0,17$  за  $\psi^s = 0$  и  $\psi^s = 0,5$  или до  $\psi^t = 0,18$  ако је  $\psi^s = 1$  (слика 5, десно). Минималну вредност функција има за вредности параметара  $\psi^t = 0,18$  и  $\psi^s = 1$  и она износи 0,279. Ове вредности параметара усвојене су као оптималне и коришћене су у даљој анализи.

## 6 Провера модела

Модел је проверен коришћењем података из јуна 1985. године када је при водостају од 387 cm измерен проток од 222 m<sup>3</sup>/s. За прорачун протока потребно је знати која је пољопривредна култура расла на плавним површинама у том периоду, зато што густина и висина засада утиче на брзину воде преко плавних површина. Претпоставиће се да су на плавним површинама били заступљени поврће или млад кукуруз, ливаде и пшеница. Имајући уз то у виду и степен обраслости корита, усвојене су следеће вредности Манинговог коефицијента отпора:  $n_{gk} = 0,060 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  за главно корито,  $n_{pp} = 0,065 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  на ПП за поврће и млад кукуруз и  $n_{pp} = 0,080 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  за ливаду или зрелу пшеницу.

Криве протока, добијене под претпоставком да се на плавним површинама налазе различите културе, све више се удаљавају једна од друге са порастом водостаја. При водостају од 380 cm одступање износи 3,26% док при водостају од 500 cm оно износи 8,58%. За измерени водостај од 387 cm проток у случају да се на плавним површинама налазе повртарске културе износи око 227 m<sup>3</sup>/s, што је за 2,45% већа вредност од измерене, док би у случају да постоје ливаде или пшеница та вредност била приближно 221 m<sup>3</sup>/s, што је за 0,56% нижа вредност од измерене (слика 6 лево). Одступање протока са званичне криве протока РХМЗа при овом водостају значајно превазилази грешку мерења и износи 32%. С обзиром на то да су одступања израчунатих од измерених протока унутар граница грешке мерења, закључује се да могуће културе на плавним површинама у овом случају немају значајнији утицај на процену протока у КВВ. На слици 6 десно дат је упоредни приказ званичне криве протока РХМЗа, измерених протока из табеле 1 и криве израчунате по методи размене количине кретања. Као што се види, званична крива протока даје веће вредности протока са скоро једнаком разликом у целом дијапазону разматраних вредности водостаја. Разлика просечно износи 59 m<sup>3</sup>/s.



Слика 6. Криве протока за случај присуства различитих култура на плавним површинама 1985. године (лево); званична крива протока РХМЗа и крива добијена применом МРКК за 1985. годину (десно)

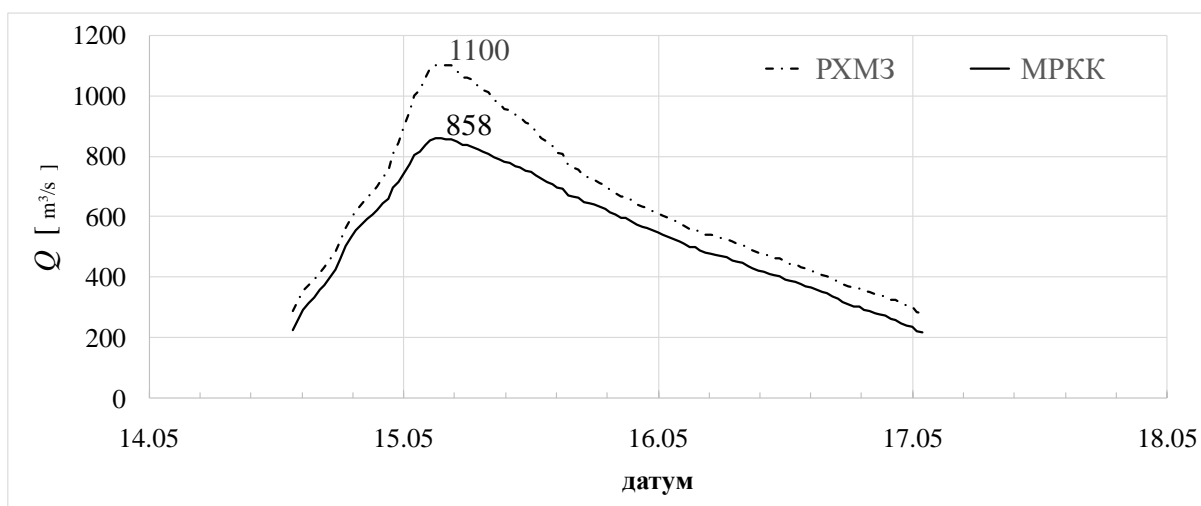
Figure 6. Rating curves for different crops on floodplain in 1985 (left); official rating curve of RHMS and the one calculated using EDM for 1985 (right)



## 7 Хидрограм директног отицаја поплавног таласа из 2014. годину

У мају 2014. године на сливу реке Колубаре догодила се катастрофална поплава која је проузроковала огромну штету односећи велики број људских жртава. Због обимног изливања Колубаре тешко је било проценити који се део запремине падавина трансформисало у отицај. С обзиром на то да се профил хидролошке станице Словац налази у сужењу којим се завршава ваљевска долина, кроз њега би требало да прође целокупна запремина отеке воде са узводног дела слива.

Као улазни подаци за одређивање криве протока за 2014. годину коришћени су подаци снимања речног корита у профилу х.с. Словац РХМЗа, док су подаци о узводном пресеку изван основног корита добијени читавањем снимка са Google Eartha из 2014. године. Основно корито је, као и у претходном случају, пресликовано из пресека х.с. Словац водећи рачуна о нагибу речног дна. Усвојене су следеће вредности Манинговог коефицијента отпора:  $0,048 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  за ГК и  $0,058 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  за ПП. Хидрограм таласа из маја 2014. године одређен је коришћењем криве протока РХМЗа и криве протока одређене коришћењем МРККа. Вршни протоци ова два хидрограма разликује се за  $242 \text{ m}^3/\text{s}$  (слика 7) или 22%. Према званичној процени, запремина поплавног таласа износила је  $137 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , док се применом МРККа добија да она износи око  $116 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Ова разлика од  $21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  даје неизвесност у процени од 15%.



Слика 7. Хидрограми поплавног таласа из маја 2014. године добијени коришћењем званичне криве протока из РХМЗа и криве израчунате коришћењем МРКК

Figure 7. Flow hydrographs of the May 2014 flood reconstructed using the official rating curve of the HMS of the Republic of Serbia and the EDM

## 8 Закључак

У овом раду размотрена је могућност примене једне од савремених метода за процену криве протока у кориту за велику воду на једном водотоку. Реч је о методи размене количине кретања између главног корита и плавних површина која омогућава да се на основу забележених трагова великих водаи података о врсти вегетације на плавним површинама на релативно једноставан начин процени проток у кориту за велику воду, јер користи податке о геометрији корита и Манинговом коефицијенту отпора.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Метода је претходно успешно проверена коришћењем резултата лабораторијских огледа, а поређење са подацима осматрања са х.с. Словац потврдила су њену применљивост за процену криве протока и у природним коритима. Ово истраживање показало је да:

1. Оптимална вредност параметра  $\psi'$  од којег зависи размена количине кретања турбулентном дифузијом зависи од процене вредности Манинговог коефицијента отпора услед вегетације. Са повећањем отпора на плавним површинама (услед присуства вегетације) смањује се оптимална вредност овог параметра, што је у складу са закључцима до којих се дошло поређењем са лабораторијским мерењима.
2. Утицај непризматичности корита на процену вредности протока у кориту за велику воду у профилу х.с. Словац занемарљив је у односу на утицај турбулентне дифузије, па би удео овог члана у укупној размени количине кретања требало додатно испитати на још неким примерима.
3. Применом МРКК одступања од измерених вредности не прелазе 5%, док званична крива РХМ3а систематски прецењује вредности протока – транслаторно је померена за око  $59 \text{ m}^3/\text{s}$  у односу на МРКК криву.
4. Чињеница да се запремине поплавног таласа из маја 2014. године добијене применом различитих метода разликују за приближно 15%, а врхови поплавног таласа за 22%, указује на то да би и код нас у наредном периоду требало посветити пажњу изучавању и анализи метода за процену кривих протока у домену великих вода.

## Литература

1. Bousmar, D. and Zech, Y. (1999): Momentum transfer for practical flow computation in compound channels, J. Hydr. Eng., ASCE, 125(7), 696-706
2. Đorđević, D., Stojnić, I., Muhić, F., (2015): Prikaz modela linijskog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovanog na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, Vodoprivreda, Vol. 47, No.273-275, p. 79-91
3. Đorđević, D., Stojnić, I., Rosić, N., (2017): Proračun linije nivoa u neprizmatičnom koritu za veliku vodu primenom metode razmene količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina (primer korita jednostavne geometrije), Vodoprivreda, Vol. 49, No. 288-290, p. 349-361
4. Водопривредна основа републике Србије [http://www.srbijavode.rs/Data/Files/vodoprivredna\\_osnova\\_republike\\_srbije.pdf](http://www.srbijavode.rs/Data/Files/vodoprivredna_osnova_republike_srbije.pdf)
5. Fasken B. G. (1963) Guide for selecting roughness coefficient “n” values for channels, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebraska, 1963

## **Komparativna analiza primene vodostana i sinhronih regulatora turbina u cilju zaštite hidroelektrana pri prelaznim režimima**

Aleksandar Petković<sup>1</sup>, Ivan Božić<sup>2</sup>, Jovan Ilić<sup>3</sup>

APSTRAKT: Višedecenijska upotreba dostupnih nomograma, grafičkih metoda i verižnih jednačina, pa zatim uprošćenih numeričkih modela postrojenja vodili su, najčešće, ka usvajanju vodostana kao proverene i najprimenjivnije mere zaštite derivacionih hidroelektrana sa reakcijskim turbinama. Izbor vodostana kao mere zaštite ovakvih postrojenja nije obavezno i najprikladnije rešenje sa stanovišta sveukupnih tehno-ekonomskih pokazatelja. Primena dobro poznatih mera zaštite postrojenja na bazi sinhronih regulatora, nije bila dovoljno zastupljena, jer su potrebne analize zahtevale složene matematičke modele postrojenja i zahtevne numeričke simulacije. U radu je, na osnovu detaljne komparativne tehno-ekonomske analize jedne novoprojektovane hidroelektrane, prikazano preimućstvo rešenja sa sinhronim regulatorima nad rešenjem sa vodostanom, ispunjavajući iste kriterijume u pogledu bezbednosti postrojenja.

Ključne reči: prelazni režimi hidroelektrana, vodostani, sinhroni regulatori turbina

## **Comparative analysis of surge tank and synchronous pressure regulating valves with the aim of protecting hydropower plants in transient regimes**

ABSTRACT: Over decades, application of available nomograms, graphical methods and inter-chained equations as well as simplified numerical models, have been leading to the adoption of surge tanks as prevailing protective measures. Implementation of the surge tanks, for diversion hydropower plants (HPPs) with reactive turbines, has been predominantly justified as being a protective measure which is well-understood, proven and mostly applied in the long-term practice. From the techno-economic standpoint, application of surge tanks is not necessarily the most appropriate choice. Application of other well-known measures such as synchronous pressure regulating valves (PRVs), has not been used often mainly due to complex mathematical models requirement and comprehensive numerical simulations. According to comparative techno-economic analysis of implementation of PRVs vs. surge tank on a newly-designed HPP, economic and functional advantages of PRVs over surge tank are presented in the paper.

Key words: hydropower plants transient regimes, surge tanks, synchronous pressure regulating valves

---

<sup>1</sup> mr Aleksandar Petković, dipl. inž. maš., Hidromaškonsalting, Beograd, [azpetkovicbgd@gmail.com](mailto:azpetkovicbgd@gmail.com)

<sup>2</sup> dr Ivan Božić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, [ibozić@mas.bg.ac.rs](mailto:ibozić@mas.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Jovan Ilić, istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, [jovan.z.ilic@gmail.com](mailto:jovan.z.ilic@gmail.com)

## 1 Uvod

Za potrebe zaštite hidroelektrana (HE) pri prelaznim režimima mogu se primeniti konstruktivne i režimske mere. U konstruktivne mere se svrstavaju: razni tipovi vodostana, karakteristike derivacionog sistema (profil trase), površina protočnog preseka po deonicama, sinhroni ispusti i balastiranje rotirajućih sklopova agregata, dok su režimske mere: višebrzinski zakoni manevrisanja sprovodnog aparata turbina, ograničenja radnog protoka HE prema radnim nivoima gornje vode (GV), vremenski pomeraji između manevara pojedinačnih turbina višeagregatnih HE i dr. Navedene mere mogu se primeniti pojedinačno ili u nekoj kombinaciji („paket“ mera zaštite) u cilju zadovoljenja bezbednosnih, ekonomskih i funkcionalnih zahteva postrojenja. Izbor mera zaštite bitno se razlikuje pri analizama za novoprojektovane HE i postojeće HE.

Kod novoprojektovanih HE postoji relativno velika sloboda u koncipiranju i izboru „paketa“ mera zaštite i uglavnom je taj izbor predodređen tehničkim parametrima (projektni, izvođački i eksploatacioni uslovi) i ekonomskim pokazateljima (investicioni troškovi, eksploatacioni prihodi po osnovu posebnih funkcija HE u okolnom EES i sl.).

Postojeće HE su manje fleksibilne kada je u pitanju izbor mera zaštite, jer je uglavnom već sve definisano, pa se intervencije kroz korektivne mere zaštite svode na redefinisane mere režimske prirode. Kod postojećih HE, konstruktivne mere zaštite (rekonstrukcija ili dogradnja pojedinih hidrotehničkih organa/objekata ili ugradnja dodatne regulacione hidromašinske opreme) nisu poželjne ili prihvatljive, bilo iz investicionih bilo iz izvođačkih razloga.

S obzirom da izbor mera zaštite nije jednoznačan, neophodno je, u fazi projektovanja, adekvatno i detaljno tehno-ekonomski analizirati i oceniti sva moguća rešenja zasnovana na raspoloživim normativima i smernicama [1-5], kao i na dosadašnjim pozitivnim iskustvima iz hidroenergetske prakse. U tu svrhu od naročitog značaja su: nivo profesionalnog pristupa projektnog tima (prethodno iskustvo, kadrovski kapacitet, stručna provenijencija, metodološki pristup, raspoloživi alati za sprovođenje analiza, profesionalni afiniteti kao rezultat odnosa projektantske konzervativnosti i liberalnosti itd.) i nivo tehničke kontrole.

Vodostani i sinhroni regulatori pritiska turbina (sinhroni ispusti) predstavljaju mere zaštite hidroenergetskih postrojenja, koje se široko primenjuju kako u velikoj, tako i u maloj hidroenergetici. U nastavku rada je, najpre, dat uopšten osvrt na primenu vodostana i sinhronih ispusta kao mera zaštite, a zatim su na primeru novoprojektovanog malog hidroenergetskog postrojenja prikazane mogućnosti njihove primene, uz komparativnu analizu rezultata.

## 2 Vodostani i sinhroni ispusti kao mere zaštite hidroelektrana pri prelaznim režimima

Osnovni preduslov za primenu vodostana u cilju zaštite postrojenja pri prelaznim režimima je da se u plansko-projektnim etapama izvrše odgovarajuće analize i simulacije radnih procesa, kako bi se merodavno odlučivalo o njihovim konstruktivnim karakteristikama, hidrauličkom dejstvu na celokupno postrojenje i pripadajućim investicijama. Analize podrazumevaju razmatranje različitih tipova vodostana u cilju određivanja hidrauličkih i investicionih prednosti koje se mogu ostvariti prelaskom sa proste konstrukcije (cilindrični vodostan) na neku složeniju (komorni; sa prigušivačem; sa spojnom cevi – kratkom ili dugačkom; sa prelivom – spoljašnjim ili unutrašnjim; sa uvođenjem spoljašnjeg međudotoka; diferencijalni – paralelni ili redno-paralelni; pneumatski; polu-pneumatski; jednosmernog dejstva (kod pumpnih postrojenja)) i pod kojim uslovima ih je svrsishodno primenjivati.

U zavisnosti od vrste prelaznih režima vodostani uvek dejstvuju unoseći svoju prenosnu funkciju u ostatak sistema i ostvarujući uticaj na sve procese oscilatorne prirode. Vodostani uzrokuju oscilacije vodnih masa (*wmo*), kao pratećeg niskofrekventnog oscilatornog procesa pri svakom od osnovnih prelaznih procesa - ispadi agregata sa mreže i startovi agregata (*wh*), proces regulisane

promene snage pri radu agregata na mreži (*tgov*), regulacija protoka HE po dotoku, odnosno regulacija kote gornje vode (*lgov*). Imaju uticaj i na tzv. hidrauličke oscilacije (*hosc*). Vodostani imaju za cilj da snize hidrauličku inercijalnost visokopritisnog dela derivacionog sistema, jer relaksacija *wh* proističe usled efekta refleksije, refrakcije i propagacije talasa poremećaja pritiska i protoka na mestu spoja vodostana, derivacionog tunela i cevovoda;

Sinhroni regulatori turbina, tzv. sinhroni ispusti (SI) se aktiviraju samo pri prelaznim režimima ispada agregata sa mreže. U odnosu na ulogu vodostana, SI nemaju za cilj da izmene hidrauličku inercijalnost derivacionog sistema, već da realizuju ulogu dopunskog evakuacionog organa na nizvodnom kraju derivacionog sistema.

Prethodno navedene mere zaštite (vodostani i SI) nisu zamenske jedna drugoj i njihovo direktno upoređivanje nema utemeljenost. Pored slučajeva hidroenergetskih postrojenja na kojima su ove dve mere zaštite primenjene kao samostalne, brojni su i primeri HE na kojima su obe mere primenjene zajedno, kao mere koje se međusobno dopunjuju. Međutim, u praksi i dalje figurišu prevaziđeni kriterijumi zasnovani samo na pokazateljima hidrauličke inercijalnosti derivacionog sistema, koji nude smernice da li i kada treba primenjivati jednu od mera.

Kako bi se ukazale posebnosti implementacije SI u hidroenergetskim postrojenjima, u nastavku rada će se istaći njihovi najznačajniji aspekti primene: veza sa pripadajućim turbinama, nizstrujni razmeštaj SI i hidrauličke karakteristike.

Veza SI sa pripadajućim turbinama može biti realizovana kao *neposredna* (jedan SI na jednu turbinu, tzv. agregatno izvođenje) ili *posredna* (jedan SI za sve turbine, tzv. stanično izvođenje). U zavisnosti od vrste veze, zavisice i definisanje potrebnog zakona manevrisanja SI. Kada se realizuje neposredna veza sa turbinom, tada se hod SI na otvaranje definiše najčešće kao hod komplementaran hodu SA na zatvaranje (potpuno uparivanje, odnosno ukrštanje), bez obzira da li se radi o linearnom ili višebrzinskom zakonu. U opciji posredne veze, hod otvaranja SI se definiše parametarski, u odnosu na vrednost radnog protoka HE pre ispada agregata sa mreže. U ovom slučaju se, osim *vrste* i *prečnika* ventila SI, precizno određuju i eventualna *ograničenja stepena otvorenosti*, kako se ne bi dogodilo da se zbirni protok turbine i SI drastično poveća i generiše invazioni negativni *wh* talas, odnosno nepovoljna anvelopa minimalnih napora koja bi mogla ugroziti trasu derivacionog sistema.

*Razmeštaj* SI može biti „in-line“ (oticanje dalje u cevni razvod ili sifon turbine) ili „end-line“ (potopljeno isticanje u donju vadu ili slobodno isticanje u atmosferu). Od ovoga zavisi i *vrsta ventila* koja se može primeniti (*igličasti*, *cevasti*, *klipno-psrtenasti*, *Howell-Bunger*, *konusno-pokretni* i dr.), kao i njegova protočna i kavitaciona karakteristika.

*Hidrauličke karakteristike* ventila SI i pripadajućih turbina potrebno je precizno poznavati i modelirati, kako bi se analize mogle sprovoditi merodavno. Naime, reaktivne turbine raznih tipova (Fransis, Kaplan) i brzohodosti imaju značajno različite protočne karakteristike  $Q_{11}=f(a_{SA,reb}, n_{11})$ , pa sa prolaznim porastom brzine obrtanja pri ispadu agregata sa mreže pokazuju različita ponašanja u pogledu protoka. Ovo utiče na zahteve za matematičko modeliranje turbina i SI u okviru numeričkih modela celokupnih postrojenja.

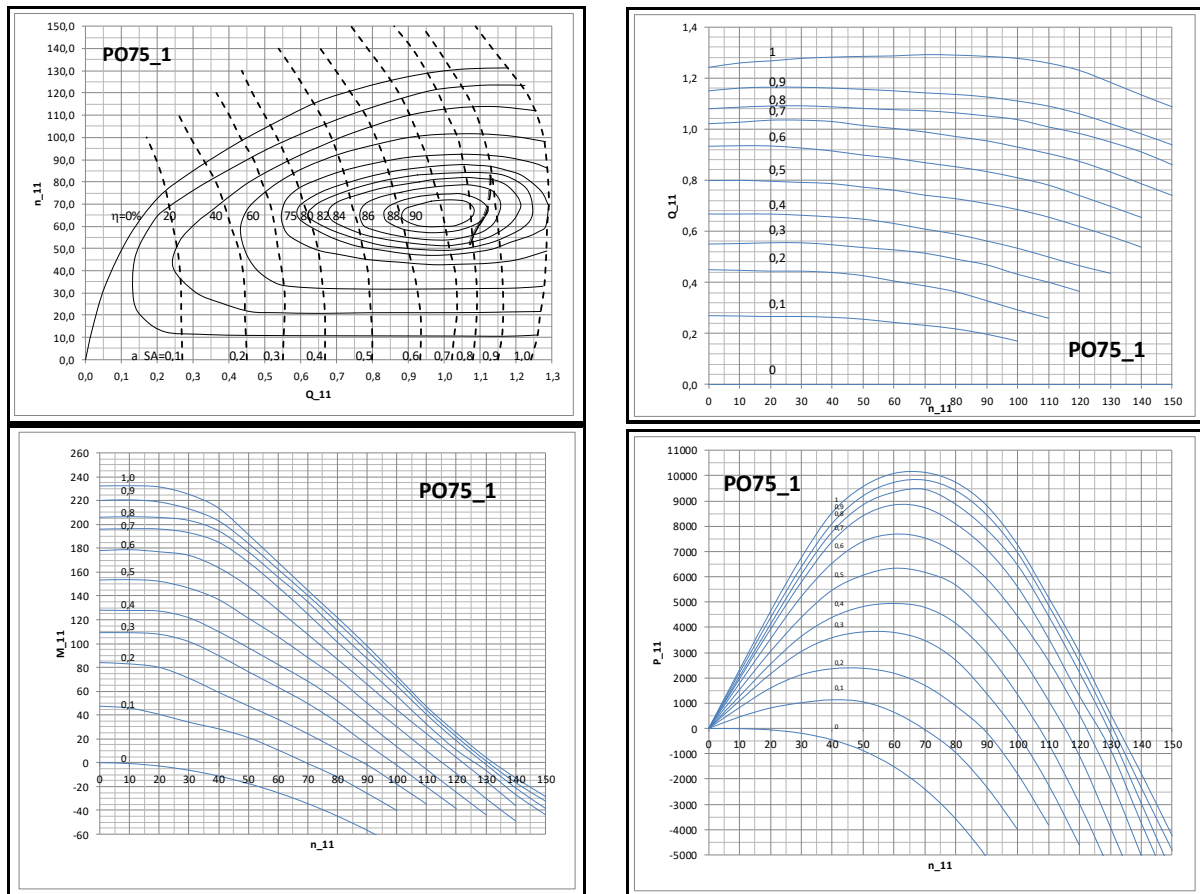
Postoje razne tehnike za sprovođenje analiza prelaznih režima postrojenja, od uprošćenih do naprednih, pa su i proističuće mogućnosti za donošenje adekvatnih rešenja različite. HE postrojenja zaštićena samo vodostanima je moguće modelirati i uprošćenim i naprednim tehnikama, dok je HE postrojenja zaštićena sinhronim ispuštima moguće modelirati samo naprednim tehnikama. U nastavku rada je, na primeru analiza prelaznih radnih režima jedne male hidroelektrane (MHE), demonstrirana primena naprednih metodoloških pristupa.

### 3 Uporedna analiza primene vodostana i sinhronih regulatora na primeru MHE Medoš

MHE Medoš je novoprojektovano postrojenje koje se nalazi se u opštini Zvornik, RS. Postrojenje obuhvata pregradu sa taložnikom i pratećom hidromašinskom opremom (HMO), derivacioni sistem, mašinsku zgradu sa pripadajućom proizvodnom opremom i odvodnu vadu.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Derivacija je ukupne dužine 1680 m. Obuhvata tunel (dužine 1560 m, unutrašnjeg prečnika 2,5 m, sa AB-oblogom) i cevovod (dužine 120 m, prečnika 2,1 m, sa čeličnom oblogom, slobodnopoloženi), kao i cevni razvod unutar mašinske zgrade. Bruto pad za režim rada pri instalisanom protoku MHE iznosi 53,13 m. Pokazatelji instalisanosti MHE su sledeći: protok  $3 \times 3,83 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), snaga  $3 \times 1,64 \text{ MW}$  (paritet turbinska). Proizvodni agregati su identični, opremljeni Fransis turbinama klase RO75/211. Sinhrona brzina obrtanja iznosi  $750 \text{ min}^{-1}$ . Modelske karakteristike turbine (kompletan prvi kvadrant – sa zonom turbiniranja, linijom pobeга i kočionom zonom) u  $Q_{11}$ ,  $n_{11}$  koordinatama prikazane su na Slici 1.



Slika 1. Modelske karakteristike turbine. Univerzalna-, protočna- i energetska- (u formi momenta i snage) karakteristika

## 3.1 Geneza projektnih rešenja zaštite tokom različitih etapa projektovanja

U inicijalnoj projektnoj etapi [11] nisu vršene proračunske analize prelaznih režima i adekvatnih mera zaštite, već je bez detaljnijih razmatranja, bila predviđena mera izgradnje vodostana (cilindrični vodostan, neprelivni, sa spojnom cevi; jezgro – prečnik 5,5 m (prečnik prema kriterijumu Thome 4,85 m), kota dna 261 mm, kota krune 275 mm, neto visine 14 m; spojna cev – prečnik 2 m, dužina 2 m; kota ose tunela na mestu spoja sa vodostanom 257,5 mm). Mere zaštite koje se tiču intervencija na opremi proizvodnih agregata, kakve su sinhroni ispusti na turbinama, zamajci i višebrzinski zakoni manevrisanja nisu bile razmatrane. Iako je predmetna derivacija relativno kratka, a postrojenje srednjepadno, uz vodostan je dodatno bila predviđena i vodostanska zatvaračnica (leptirasti zatvarač DN2200/PN4 sa dizalicom i pripadajućom opremom). Predviđena bezbednost postrojenja bi se ostvarila uz investicionu i eksploatacionu neekonomičnost i upitnu funkcionalnost (izlaganje postrojenja problemu oscilacija vodnih masa, potrebna prateća oprema vodostana – oprema za grejanje

u zimskim uslovima i oprema za merenje radnog nivoa, izgradnja suštinski nepotrebne vodostanske zatvaračnice sa pripadajućom opremom i dr.).

U sledećoj projektnoj etapi [12] je problematici prelaznih režima i analizi prikladnijih mera zaštite (bezbednost, uz ekonomičnost i funkcionalnost) pristupljeno u skladu sa smernicama iz predmetnih projektnih normativa [1, 2], uvažavajući sledeće uspostavljene kriterijume prihvatljivosti ponašanja postrojenja pri prelaznim režimima:

- maksimalni prolazni pritisak u spirali turbina  $H_{sp,max}$ , na predturbinskim zatvaračima i nizvodnoj deonici cevovoda 65 mVS – odnosno da oprema bude u klasi PN6,
- maksimalna prolazna brzina obrtanja agregata  $n_{max}$  u vrednosti +50% sinhronne brzine – odnosno 1125 min<sup>-1</sup>,
- mogućnost brzog startovanja agregata na mrežu, bilo kao simultani (SMS), bilo kao sekvencijalni (SQS) start, u ukupnom trajanju od max. 1 min.

Pre sprovođenja detaljnih analiza, urađena je provera tehničkog rešenja iz prethodne projektne faze. Analiza je pokazala da prvopredviđeni vodostan nema zadovoljavajuće ponašanje ni pri jednostavnim slučajevima oscilacija vodnih masa i da bi trebalo da bude značajno redefinisano (VOD100 i VOD<sub>GeP2014</sub> u Tab. 1.), uz bitno povećanje potrebnih investicija. Takođe, izvršene su i analize hidroudara (*wh*), oscilacija vodnih masa (*wmo*, prosti (*ISPAD* i *START<sub>SMS</sub>*) i kombinovani (*START<sub>SQS</sub>*, *QRS<sub>SMS</sub>* i *QSD<sub>SMS</sub>*) slučajevi), kao i regulacije kote GV (*Igov*). Na osnovu dobijenih rezultata, mere zaštite su bitno redefinisane, te se umesto rešenja na bazi izgradnje vodostana ma kog tipa i karakteristika, pristupilo rešenju sa sinhronim ispuštima turbina (DN400, igličasti ventil, na spirali svake od turbina), uz primenu zamajaca (prstenasti disk, spoljašnjeg prečnika 1,6 m) i dvobrzinskog zakona zatvaranja SA pri ispadu agregata sa mreže. Pored toga, kao mera je primenjena i blaga izmena profila trase derivacionog sistema, iz razloga uslovljenih kriterijumom brzog startovanja agregata na mrežu.

Upravo su sprovedene aktivnosti i urađeni proračuni imali za posledicu detaljno i sistematsko komparativno tehno-ekonomsko analiziranje primene vodostana i sinhronih ispusta kao mera zaštite postrojenja pri prelaznim režimima. U ovom radu izvršene su post-festum analize za razne referentne opcije ugradnje vodostana: po tipu (cilindrični, neprelivni, sa spojnom cevi; cilindrični sa prigušivačem, neprelivni; cilindrični sa prigušivačem, prelivni, sa prihvatno-povratnom komorom) i prema karakteristikama.

### 3.2 Rezultati

U Tab. 3 je prikazan zbirni pregled najvažnijih rezultata za analizirane mere zaštite (razne opcije vodostana i opcija sa ugradnjom sinhronih ispusta).

Tabela 1. Karakteristike jezgra i stojeće cevi za analizirane opcije vodostana.

opcija	tip	$D_{VOD}$ [m]	$D_{SP}$ [m]	$L_{SP}$ [m]	$z_{VOD}^{dno}$ [mnm]	$z_{VOD}^{kruna}$ [mnm]	$H_{VOD}$ [m]	$W_{VOD}$ [m <sup>3</sup> ]
(VOD <sub>GeP2014</sub> )	cilindrični, sa stojećom cevi, neprelivni	5,5	2,0	2,0	(261,00)	(261,00)	(14,0)	(330)
VOD100					246,30	279,50	33,2	790
VOD101		10,0	2,0	2,0	252,80	271,50	18,7	1470
VOD200	cilindrični, sa prigušivačem, neprelivni	5,5	/	/	252,90	271,20	18,3	430
VOD201		10,0	/	/	258,40	266,60	8,2	645
VOD300	cilindrični, sa prigušivačem i prelivom	5,5	/	/	252,90	269,00	16,1	380
VOD301		10,0	/	/	258,40	265,00	6,6	520

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 2. Karakteristike prigušivača i preliva za analizirane opcije vodostana.

opcija	tip	$D_{orf}$ [m]	$\zeta_{orf, ref v_{orf}}^{uic / istic}$ [/]	$\zeta_{orf, ref v_{TUN}}^{uic / istic}$ [/]	$z_{preliv}$ [mm]	$L_{preliv}$ [m]	$W_{prel.komora}$ [m <sup>3</sup> ]
(VOD <sub>GeP2014</sub> ) VOD100 VOD101	cilindrični, sa stojećom cevi, neprelivni	/	/	/	/	/	/
VOD200 VOD201		1,1	2,337 / 1,870 2,421 / 1,890	62,35 / 49,89 64,59 / 50,43	/	/	/
VOD300 VOD301			1,1	2,337 / 1,870 2,421 / 1,890	62,35 / 49,89 64,59 / 50,43	268,00 258,40	5,0

Tabela 3. Zbirni pregled najvažnijih rezultata za analizirane opcije zaštite.

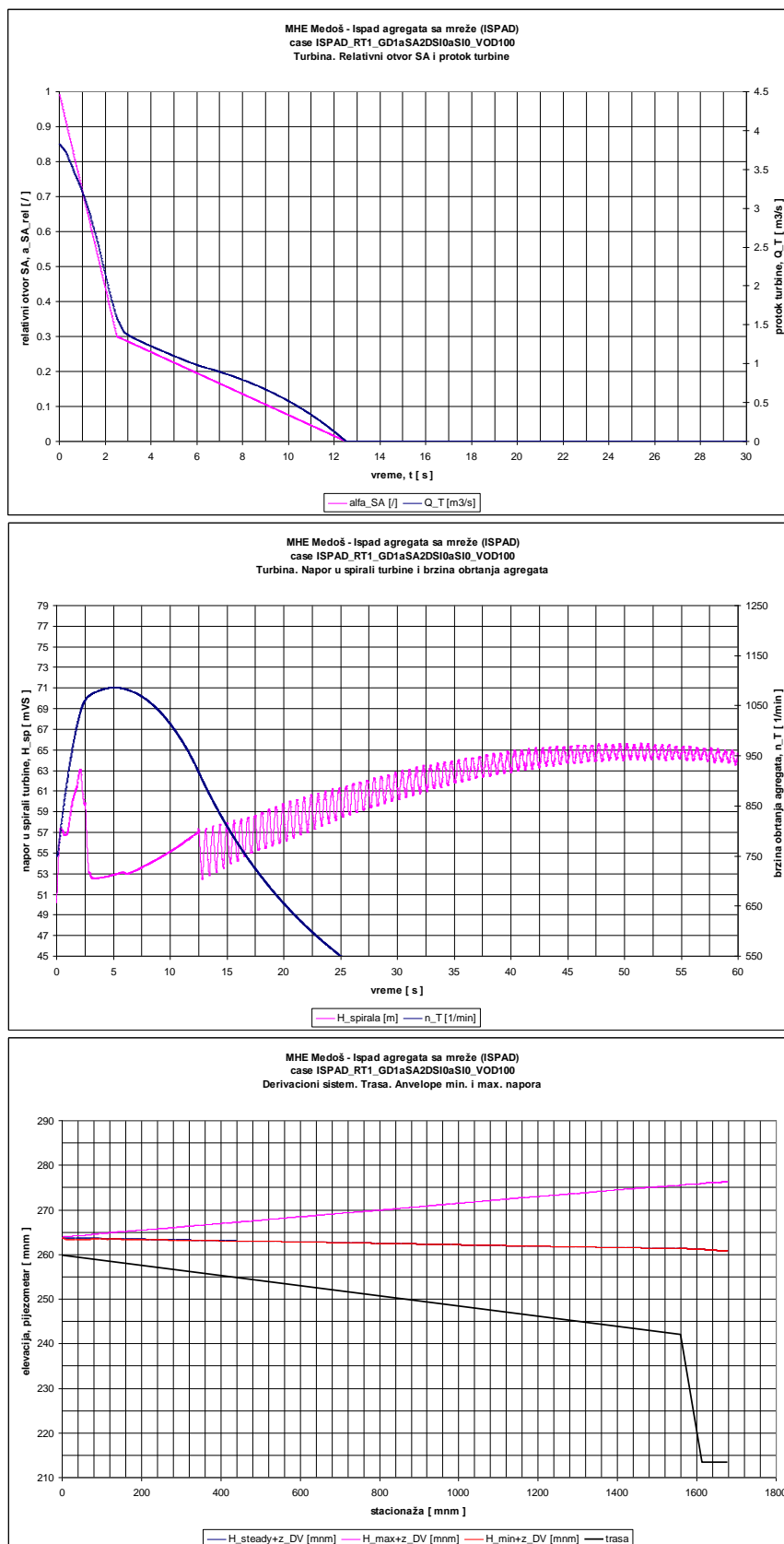
opcija	kriterijumi prihvatljivosti		$\pi_{TUN, nizv}^{max}$ [mm]	$z_{VOD}^{max}$ [mm]	$z_{VOD}^{min}$ [mm]	$V_{prel}$ [m <sup>3</sup> ]	napomena
	$H_{sp, max}$ [mVS]	$n_{max}$ [min <sup>-1</sup> ]					
VOD100	63 (6,2 bar)	1086 (+44,8% $n_{sinh}$ )	275,6	278,69	247,06	/	$H_{sp, max}$ posledica $wmo (z_{VOD}^{max})$ , a ne $wh$
VOD101	60,3 (5,9 bar)	1084 (+44,5% $n_{sinh}$ )	269,6	270,79	253,56	/	
VOD200	64,3 (6,3 bar)	1116 (+48,8% $n_{sinh}$ )	275,3	270,41	253,71	/	$H_{sp, max}$ posledica $wh$
VOD201	62,8 (6,2 bar)	1115 (+48,7% $n_{sinh}$ )	273,4	265,68	259,18	/	
VOD300	64,3 (6,3 bar)	1116 (+48,8% $n_{sinh}$ )	275,3	269,00	254,17	66	$H_{sp, max}$ posledica $wh$
VOD301	62,8 (6,2 bar)	1115 (+48,7% $n_{sinh}$ )	273,4	264,49	259,44	207	
VOD0 (SI <sub>norm</sub> )	64,2 (6,3 bar)	1119 (+49,2% $n_{sinh}$ )	276,8	/	/	/	/
VOD0 (SI <sub>hav</sub> )	76,9 (7,5 bar)	1213 (+61,8% $n_{sinh}$ )	286,9	/	/	/	/

Dijagramski prikazi rezultata simulacija prelaznih procesa su prikazani, u nastavku rada, samo za opcije vodostana VOD0 (sinhroni ispust bez vodostana), VOD100 i VOD300 i to kako za normalno ponašanje (ispravan rad svih SI), tako i za havarijsko ponašanje (hipotetičko neotvaranje SI na jednom od agregata) zaštitne opreme.

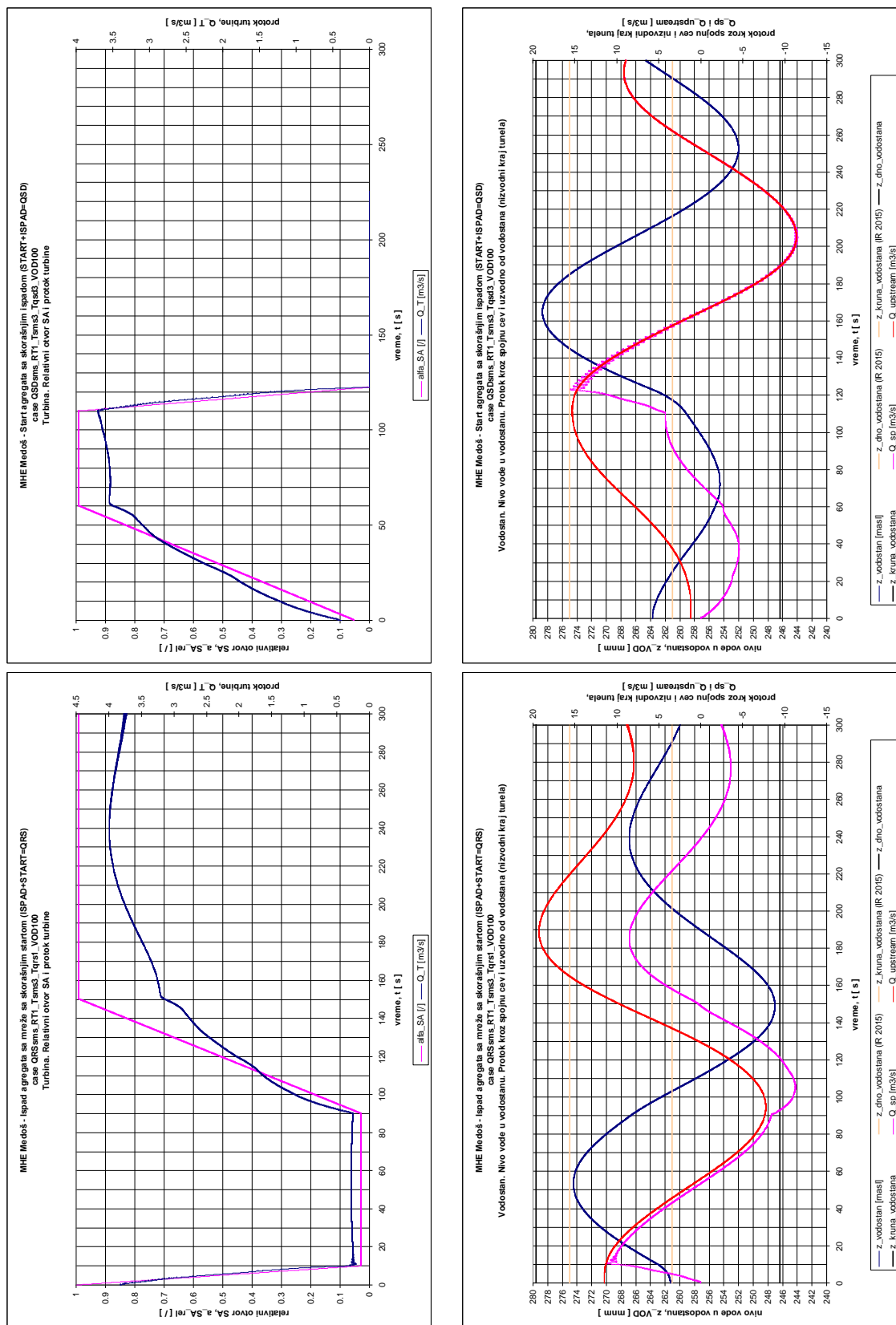


# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



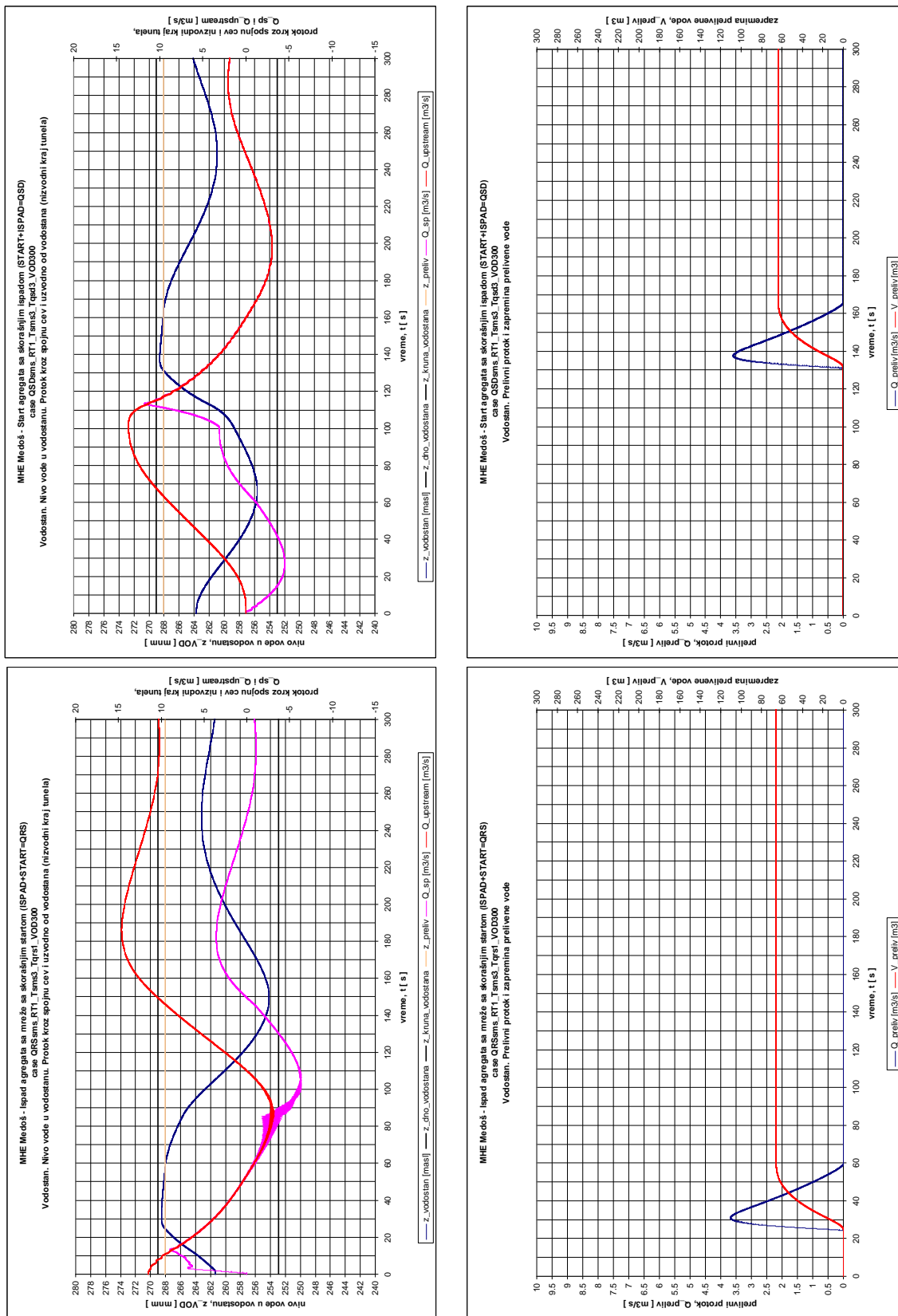
Slika 2. Opcija VOD100:  $wh$  pri ispadu svih agregata sa mreže, ponašanje turbina i anvelope napora



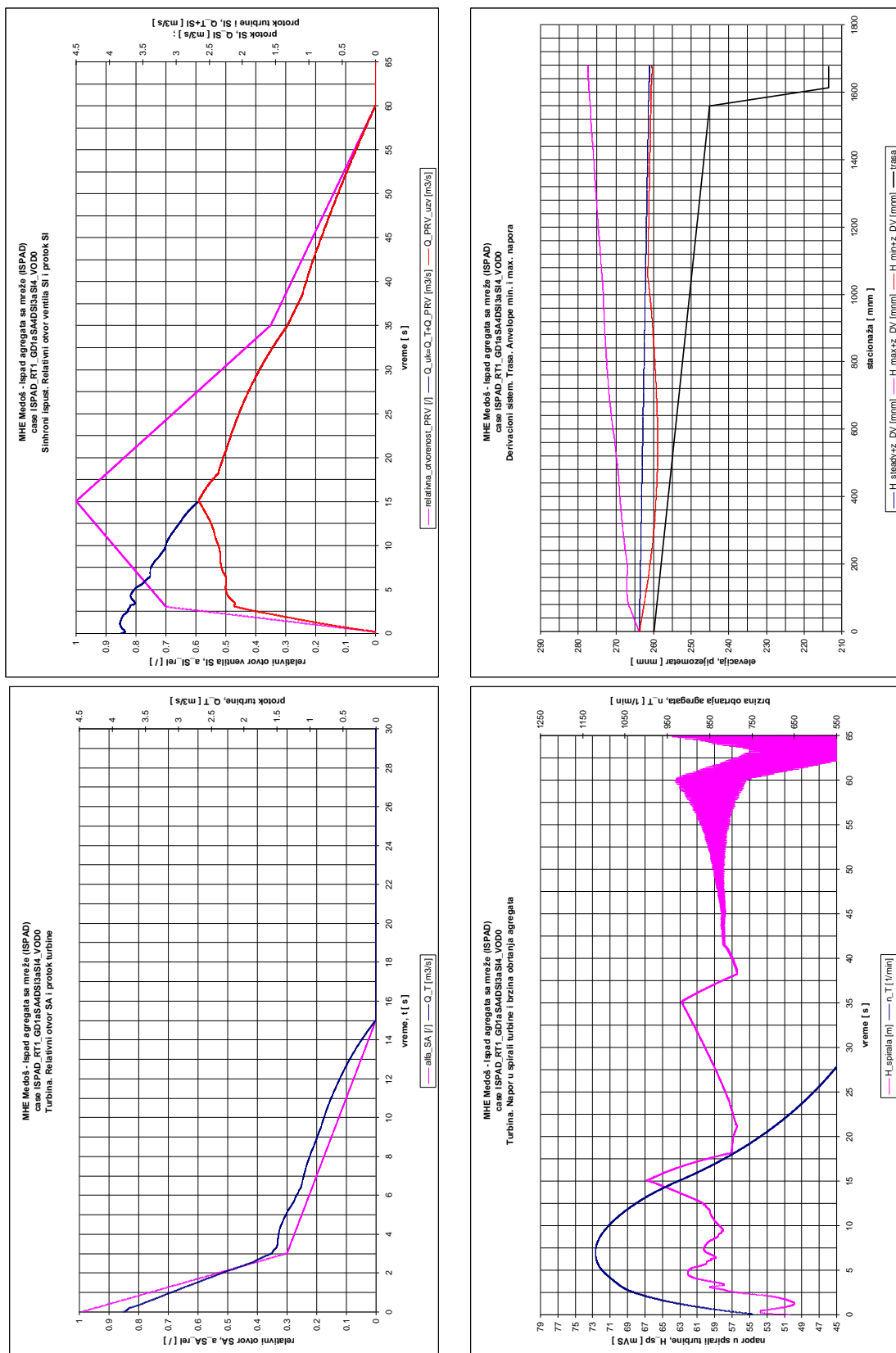
Slika 3. Opcija VOD100: *wmo* pri ispadu svih agregata, sa skorajšnjim naknadnim simultanim startom (QRS<sub>SMS</sub>) i pri simultanom startu agregata sa skorajšnjim naknadnim ispadom (QSD<sub>SMS</sub>); ponašanje turbine i vodostana

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

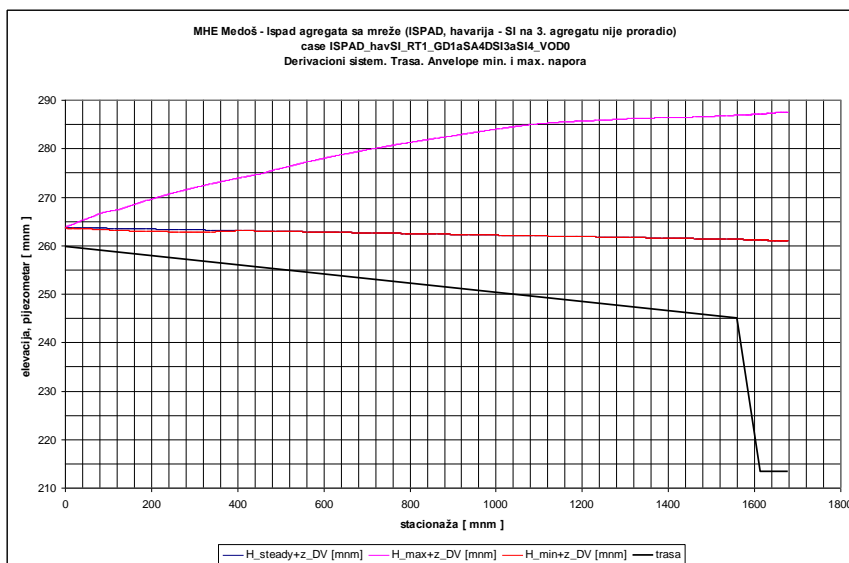
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



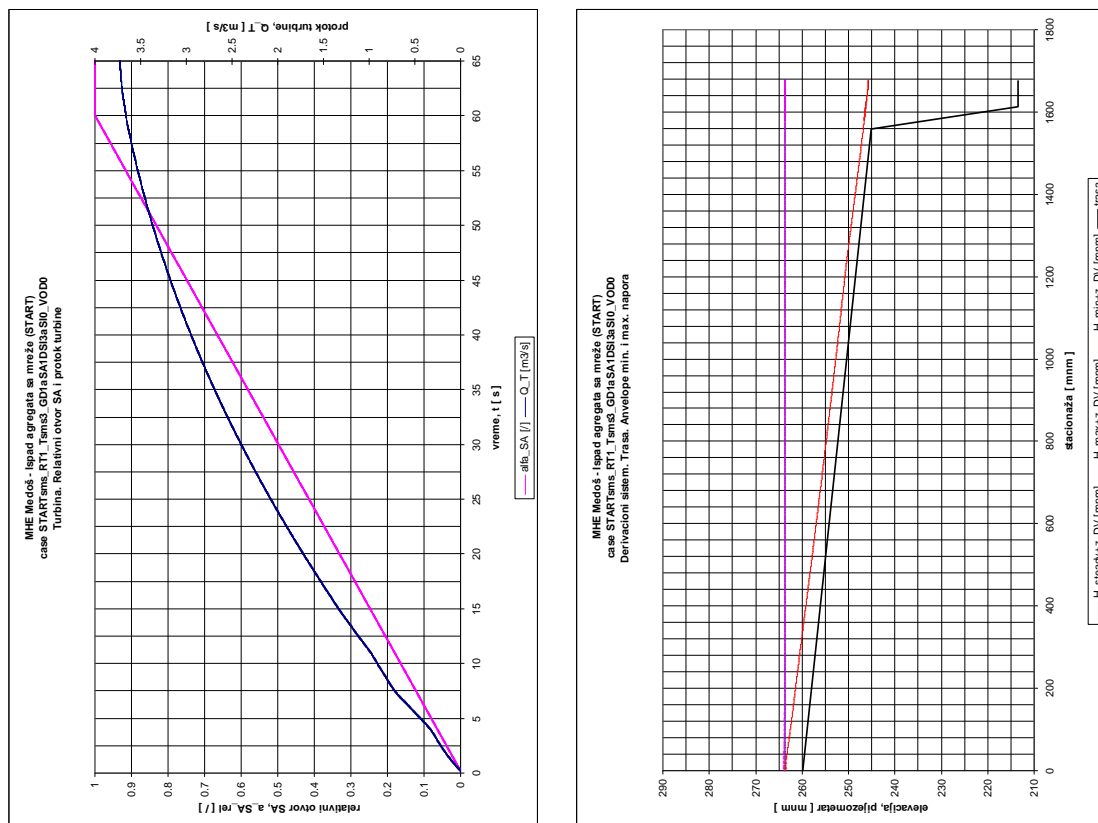
Slika 4. Opcija VOD300: wmo pri ispadu svih agregata, sa skorašnjim naknadnim simultanim startom (QRS<sub>SM</sub>) i pri simultanom startu agregata sa skorašnjim naknadnim ispadom (QSD<sub>SM</sub>) i ponašanje vodostana



Slika 5. Opcija VOD0 ( $SI_{norm}$ ) uz normalno ponašanje SI: *wh* pri ispadu svih agregata sa mreže, ponašanje turbina i SI i anvelope napora



Slika 6. Opcija VOD0 ( $SI_{hav}$ ) uz havarijsko ponašanje SI:  $wh$  pri ispadu svih agregata sa mreže i anvelope napora



Slika 7. Opcija VOD0:  $wh$  pri simultanom startu svih agregata, ponašanje turbina i anvelope napora

### 3.3 Diskusija rezultata

Sve analizirane mere zaštite zadovoljavaju postavljene kriterijume prihvatljivosti (Tab. 3) ponašanja postrojenja pri prelaznim režimima, uz napomenu da izuzetni eksploatacioni slučajevi (neaktiviranje SI na jednom od agregata) ne podležu kriterijumima prihvatljivosti postavljenim za normalne eksploatacione slučajeve.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Najekonomičnija i najfunkcionalnija mera zaštite je, kako pokazuju nalazi, ugradnja sinhronih ispusta i opravdano je primenjena kao finalno usvojeno rešenje zaštite za MHE Medoš.

Razlog zašto se pojavljuju relativno velike potrebne zapremine vodostana u opcijama cilindričnih vodostana sa stojećom cevi (bez prigušivača i preliva) je u relativno malom hidrauličkom otporu koji poseduje derivacioni tunel predmetnog postrojenja (usled njegove relativno male dužine), t.j.  $m_{TUN} = \lambda_{TUN} L_{TUN} / D_{TUN} = 7,9$ . Iz toga se može i sagledati efekt kojim analizirani prigušivač ( $\zeta_{orf, ref}^{utic/istic} \approx (50 \div 65)$ , uvećanje (6÷8) puta) doprinosi prigušenju inicijalne izlišne kinetičke energije vodne mase tunela, što je i jedini uzročnik procesa *wmo*.

Tabela 4. Zbirni pregled procenjenih vrednosti investicija za analizirane opcije zaštite.

opcija	$W_{VOD}$ [m <sup>3</sup> ]	$W_{prel.komora}$ [m <sup>3</sup> ]	$W_{uk}$ [m <sup>3</sup> ]	$W_{iskop}$ [m <sup>3</sup> ]	$W_{AB}$ [m <sup>3</sup> ]	$C_{radovi}$ [EUR]	$C_{dod.oprema}$ [EUR]	$C_{uk}$ [EUR]
VOD100	790	/	790	800	255	79.000	3.000	82.000 (Δ=+43.000)
VOD101	1470	/	1470	1500	280	90.000	3.000	93.000 (Δ=+54.000)
VOD200	430	/	430	650	170	55.000	3.000	58.000 (Δ=+19.000)
VOD201	645	/	645	1000	150	50.000	3.000	53.000 (Δ=+14.000)
VOD300	380	70	450	650	160	49.000	3.000	52.000 (Δ=+13.000)
VOD301	520	220	740	1000	170	52.000	3.000	55.000 (Δ=+16.000)
VOD0 (SI)	/	/	/	/	/	/	/	39.000 (Δ=0, ref. opcija)

## 4 Zaključak

Vodostani i sinhroni ispusti su mere zaštite postrojenja pri prelaznim režimima koje se široko koriste u savremenoj velikoj i maloj hidroenergetici. U praksi se sreću i kao samostalno i kao zajednički primenjene mere zaštite.

Vodostani i sinhroni ispusti su tehno-ekonomski dosta različiti, a sveukupna uloga i ciljevi njihove primene bitno drugačiji, pa nije celishodno njihovo direktno upoređivanje.

Postojeći kriterijumi za odlučivanje o primeni vodostana i sinhronih ispusta, bazirani jedino na pokazatelju inercijalnosti derivacionog sistema, su prevaziđeni i nedovoljno precizni, pa i diskutabilni. Odabiru najprikladnijih mera zaštite treba pristupati u svakom pojedinačnom slučaju, na osnovu rezultata odgovarajućih detaljnih analiza, vodeći računa o funkcijama, ulozi i značaju svake konkretne HE i kriterijumima prihvatljivosti ponašanja postrojenja pri prelaznim režimima. U radu je, na osnovu detaljne komparativne tehno-ekonomske analize jedne novoprojektovane male hidroelektrane, prikazana prednost zaštitne mere sa sinhronim ispustima u odnosu na rešenje sa vodostanom, ispunjavajući iste kriterijume u pogledu bezbednosti postrojenja.

### Zahvalnica

Autori iskazuju zahvalnost na podršci Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kao i firmi „ES-Energy systems“ iz Beograda na saglasnosti za publikovanje podataka o predmetnom postrojenju MHE Medoš.

### Nomenklatura

$a_{SA,rel}$ [/]	relativni otvor lopatica sprovodnog aparata
$V$ [m <sup>3</sup> ]	zapremina fluida
$\zeta$ [/]	koeficijent lokalnog gubitka
$z$ [mm]	kota
$lgov$	regulisanje nivoa ( <i>level governing</i> )
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	brzina obrtanja
$n_{11}$ [min <sup>-1</sup> ]	jedinična brzina obrtanja
$orf$	prigušivač ( <i>orifice</i> )
$\pi$ [m]	pijezometarska kota
$SMS$	simultani ( <i>simultaneous</i> )
$SQS$	sekvencijalni ( <i>sequential</i> )
$sp$	spojna cev ( <i>stand pipe</i> )
$tgov$	regulacija turbine ( <i>turbine governing</i> )
$H$ [m]	napor, visina
$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	protok
$Q_{11}$ [m <sup>3</sup> /s]	jedinični protok
$QRS$	skorašnji naknadni start ( <i>quick re-start</i> )
$QSD$	skorašnji naknadni ispad ( <i>quick shut-down</i> )
$W$ [m <sup>3</sup> ]	konstruktivna zapremina
$WMO$	oscilacije vodenih masa ( <i>water mass oscillations</i> )
$WH$	hidraulički udar ( <i>water hammer</i> )

### Literatura

1. Energoprojekt-Hidroinženjering (1988) *Sadržaj i komentar sadržaja projekata hidroelektrana manjih od 10 MW*.
2. ZEP / Energoprojekt-Energodata (1988) *Preporuke za proračune i ispitivanja prelaznih procesa u hidroelektranama*.
3. ASME (1996) *The Guide to Hydropower Mechanical Design (Chapter 12)*, HCI Publications, Kansas City.
4. ASCE (1989) *Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments (Volume 2 - Waterways)*, ASCE, New York.
5. Pejovic et al. (1987) *Guidelines to Hydraulic Transient Analysis*, Gower Technical Press, Hants.
6. Đorđević B. (1989) *Korišćenje vodnih snaga. Objekti hidroelektrana*, Naučna knjiga, Beograd.
7. Кривченко Г. И. (1989) *Расчёты на микрокалькуляторах переходных процессов в гидроэлектростанциях*, Энергоатомиздат, Москва.
8. Chaudhry M. H. (1979) *Applied hydraulic transients*, Van Nostrand Reinhold, New York.
9. Муравьев О. А. (1986) Развитие математических методов исследования переходных процессов в уравнительных резервуарах ГЭС, *Гидротехническое строительство*, 1986 (VIII): 31-34.
10. Пивоваров В. А. (1973) *Проектирование и расчёт систем регулирования гидротурбин*, Машиностроение, Ленинград.
11. ES-Energy Systems (2014) *Idejno Rešenje MHE Medoš*, Beograd.
12. ES-Energy Systems (2015) *Idejni Projekat sa Studijom opravdanosti*, Beograd.

## Прорачун силовитог течења у тунелу са хоризонталном кружном кривином

Милена Лучић<sup>1</sup>, Радомир Капор<sup>2</sup>, Љубодраг Савић<sup>3</sup>

АПСТРАКТ: У раду се разматра бурно течење са слободном површином у тунелу са хоризонталном кривином додатног евакуационог објекта бране Бочац, при чему су критички сагледани резултати прорачуна линије нивоа. Током пројектовања, локални губици на кривини процењени су на основу губитака за течење под притиском и интуиције пројектаната. Сада су ови губици упоређени са губицима одређеним на основу опсежних истраживања, спроведених у оквиру докторске дисертације. Показало се да су „стварни“ губици нешто мањи од песимистичке процене пројектанта и да су коефицијенти превртања и загушења млаза у оквиру допуштених, па се може очекивати да је пропусна моћ тунела довољна да прихвати рачунски проток.

Кључне речи: струјање са слободном површином, евакуациони објекат, тунел, загушење

## Computation of the supercritical flow in a tunnel with a horizontal bend

ABSTRACT: This paper deals with a free surface supercritical flow in the tunnel with horizontal bend of the additional spillway of Bocac dam, where the results of the flow profile computation are critically considered. At the design stage, a curvature local loss was estimated based on the pressure-flow loss and designer's intuition. Here, this loss is compared with the losses determined on the basis of the extensive research, conducted within the doctoral dissertation. The "real" losses were shown to be somewhat lower than the pessimistic estimation of the designer, and the coefficient of overturning and choking of the flow are within the limits allowed. So, it can be expected that the tunnel capacity is sufficient to accommodate the design flow.

Keywords: open channel flow, spillway, tunnel, choking flow

---

<sup>1</sup> Др Милена Лучић, водећи инжењер, Енергопројект Хидроинжењеринг, [milenakolarevic@yahoo.com](mailto:milenakolarevic@yahoo.com)

<sup>2</sup> Др Радомир Капор, професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, [rkapor@grf.bg.ac.rs](mailto:rkapor@grf.bg.ac.rs)

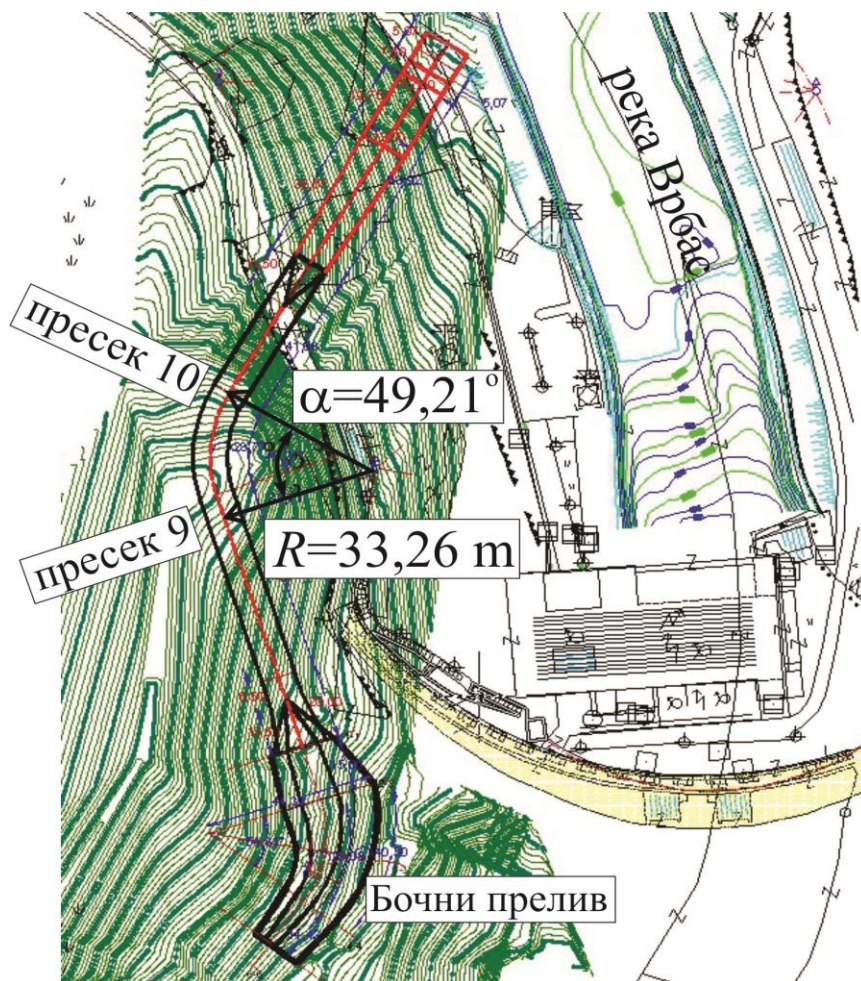
<sup>3</sup> Др Љубодраг Савић, професор, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, [ljsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljsavic@grf.bg.ac.rs)



## 1 Увод

Изградња додатног евакуационог објекта на брани ХЕ „Бочац“ на Врбасу изискивала је пројектовање тунела пречника  $D = 9 \text{ m}$  (Слика 1, Институт Јарослав Черни 2008), при чему у тунелу влада течење са слободном површином у силовитом режиму. Као што се на слици види, положај преливног дела у односу на положај корита доње воде намеће кривину у основи трасе тунела. При силовитом режиму течења, пројектанти се нерадо одлучују за тунеле са кривином у основи, јер се ту јављају поремећаји струјања који могу довести до настанка хеликоидног струјања и чак до загушења попречног пресека уз прелазак на струјање под притиском (слика 2). Режим загушења се у сваком случају мора избећи (Коларевић 2015).

За прорачун линије нивоа у тунелу коришћен је линијски модел, применом једначине одржања енергије. Локални губитак енергије се јавља дуж поменуте кружне кривине у основи тунела. Такође, значајни локални губици енергије могу се очекивати на прелазу између трапезног пресека на низводном крају сабирног канала и кружног пресека на узводном крају тунела. У време када је објекат пројектован (Институт Јарослав Черни 2008) нису постојали одговарајући изрази за одређивање ових локалних губитака енергије, па су исти процењени. По објављивању докторске дисертације (Коларевић 2015) било је могуће да се провери процена губитка при силовитом течењу у хоризонталној кривини, као и његов утицај на линију нивоа. Поред овог локалног губитка, проверена је и могућност загушења тока у кривини.

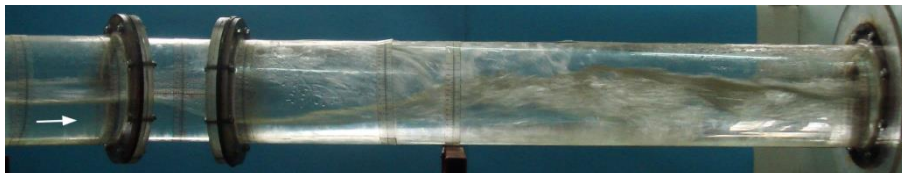


Слика 1. Диспозиција додатног евакуационог објекта на ХЕ „Бочац“

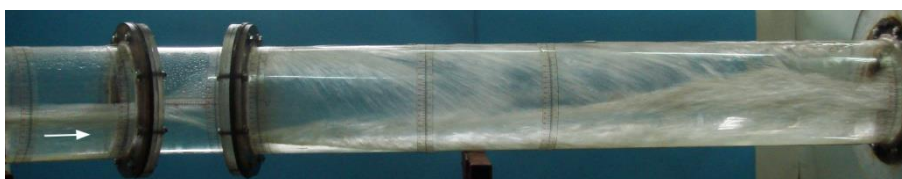
Figure 1. Layout of the of the additional spillway of Bocac dam



а) Течење без окретања млаза,  $C_H < 0,95$



б) Прелазно течење са делимичним окретања млаза,  $0,95 < C_H < 1,05$



в) Хеликоидно течење без загушења,  $C_H > 1,05, C_Z < 1,0$



г) Хеликоидно течење са загушењем тока,  $C_Z > 1,0$

Слика 2 – Типови струјања при бурном течењу у кривини тунела

Figure 2 –Types of supercritical flow in closed-conduit bend: (a) stratified flow, (б) transition flow, (в) helical flow without choking, (г) choking flow

## 2 Резултати прорачуна

Линија нивоа се рачуна применом једначине одржања енергије између пресека  $i-1$  и  $i$  (слика 3):

$$E_{i-1} = E_i + \Delta E_{i,i-1} \quad (1)$$

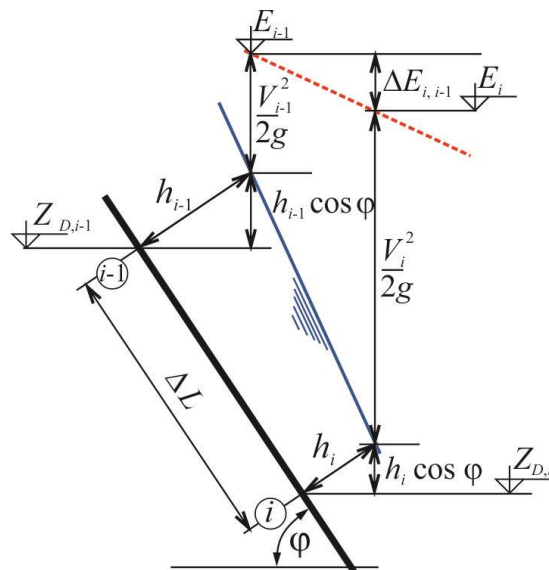
односно:

$$Z_{D,i} + h_i \cos \varphi + \frac{V_i^2}{2g} = E_{i-1} - \frac{\Delta L}{2} \left( \frac{Q^2}{K_{i-1}^2} + \frac{Q^2}{K_i^2} \right) - \Delta E_{Lok} \quad (2)$$

где се губитак на трење апроксимира Шези-Манинговом једначином, са модулом протицаја,

$$K = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}}, \text{ где је } n \text{ Манингов коефицијент храпавости. Локални губитак } \Delta E_{Lok} = \xi_{Lok} \frac{V_{i-1}^2}{2g},$$

изражен је преко коефицијент локалног губитка на деоници,  $\xi_{Lok}$ .



Слика 3. Шема за прорачун линије нивоа између пресека  $i$  и  $i-1$ .

Figure 3. Computational scheme for flow profile determination between sections  $i$  and  $i-1$ .

Пошто је течење у тунелу силовито (бурно), гранични услов је дефинисан на узводном крају, као критична дубина на низводном крају прелазнице из сабирног канала. Дуж целог тунела усвојена је јединствена вредност Манинговог коефицијента храпавости од  $n = 0.015 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ . Утицај губитака на трење на положај линије нивоа је мали у односу на утицај локалних губитака, с обзиром на малу дужину тунела, па није испитивана осетљивост прорачуна на промену вредности Манинговог коефицијента. Вредности коефицијената локалних губитака енергије на прелазу између трапезног и кружног пресека на узводном крају тунела, као и дуж кружне кривине у хоризонталној равни, нису се могли наћи у литератури у време израде пројекта. Због тога су сви прорачуни урађени у три варијанте:

- Локални губици су занемарени;
- Вредности коефицијената локалних губитака су „реално процењени“;
- Вредности коефицијената локалних губитака су „разумно прецењени“.

На овај начин се може проценити „осетљивост“ линије нивоа на промену вредности локалних губитака.

Са трапезног пресека прелази се на кружни попречни пресек тунела преко витоперне површи, тако да је дно дефинисано комбинацијом параболичне кривине и праве деонице. За овако обликовану прелазну деоницу, на основу искуства са сличних прелазница, процењено је да је „реална вредност“  $\zeta_{Lok} = 0.15$ , а „разумно прецењена“ вредност  $\zeta_{Lok} = 0.40$ . Губитак се остварује дуж целе деонице, а рачуна се са брзинском висином на узводном пресеку.

Коефицијент локалног губитка на кривини у силовитом режиму могао се само грубо проценити и то на основу образаца који се примењују за струјање под притиском. Овде је примењен једноставан образац USA Corps of Engineers (1977):

$$\xi_{kriv} = \frac{2\alpha}{\pi^2} \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{D}\right) + \alpha}, \quad (3)$$

где је скретни угао,  $\alpha$ , изражен у радијанима.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

„Реална вредност“ локалног губитка на кривини,  $\xi_{kriv} = 0.08$ , добијена је на основу једначине (3), а процењено је да „разумно прецењена“ вредност не би могла бити већа од  $\xi_{kriv} = 0.15$ . И овде се губитак остварује дуж целе кривине, а рачуна се са брзинском висином на узводном пресеку.

Неизвесност у погледу локалних губитака при силовитом течењу у тунелу могла се отклонити само хидрауличким моделским испитивањима, која и поред упорног инсистирања пројектанта нису извршена. Ипак, неизвесност се сада може смањити, с обзиром да су у међувремену, у Институту за хидротехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду, урађена опсежна моделска истраживања течења у кривини затворених проводника са слободном површином, како би се овај феномен боље проучио и омогућило безбедно пројектовање оваквих решења тунела прелива и темељних испуста (Коларевић 2015, Коларевић et al. 2015a, Коларевић et al. 2014). На основу ових истраживања, добијене су и емпиријске зависности за процену локалног губитка енергије у кривини:

$$\xi_{kriv} = a \sin^b \alpha, \quad (4)$$

где су емпиријски коефицијенти  $a$  и  $b$  функције закривљености кривине:

$$a = 0,32 - \frac{0,045}{\left(\frac{D}{R}\right)}, \quad (5)$$

$$b = 0,37 + \frac{0,040}{\left(\frac{D}{R}\right)}, \quad (6)$$

где су  $D$ , пречник тунела,  $R$ , полупречник кривине мерено до осе тунела и  $\alpha$ , скретни угао кривине (слика 1).

Аутори препоручују да се овако добијена вредност коефицијента локалног губитка на кривини помножи коефицијентом сигурности од  $\sigma = 1,1$  (Коларевић 2015, Коларевић et al. 2015a).

У табели 1 приказани су резултати прорачуна линије нивоа у тунелу, у пресецима на почетку и на крају кривине (пресеци 9 и 10 на слици 1), при рачунском протоку од  $548 \text{ m}^3/\text{s}$ . Разматрано је пет вредности коефицијента локалног губитка у кривини: „без губитака“, са „реално процењеним губицима“, са „разумно прецењеним губицима“, као и са губицима добијеним на основу описаног истраживања (Коларевић et al.), односно на основу препорука добијених на основу ових истраживања (Коларевић et al.  $\times \sigma = 1,1$ ). Такође су приказани и показатељи карактера течења у кривини, о чему ће бити речи касније.

Табела 1. Резултати прорачуна линије нивоа

Table 1. Flow profile computation results

Процена губитка	$\xi_{kriv}$	$h_9$	$V_9$	$Fr_9$	$h_{10}$	$V_{10}$	$C_H \times \sigma$	$C_Z \times \sigma$
	-	m	m/s	-	m	m/s	-	-
Без губитака	0.000	5.17	14.49	2.24	5.16	14.54	1.04	0.67
Реално процењени	0.080	5.30	14.05	2.14	5.52	13.41	1.03	0.68
Разумно прецењени	0.150	5.46	13.59	2.02	5.96	12.27	1.01	0.69
Коларевић et al.	0.133	5.46	13.59	2.02	5.88	12.45	1.01	0.69
Коларевић et al. $\times \sigma$	0.146	5.46	13.59	2.02	5.94	12.31	1.01	0.69

Из табеле се види да са порастом локалних губитака расте дубина у пресеку 10 иза кривине, а тиме и опасност од загушења, што се морало и очекивати. Оно што је за пројектанта било мање очекивано је да је коефицијент губитка процењен описаним поступком (према резултатима напред наведених истраживања) веома близак такозваним „разумно процењеним губицима“. Другим речима, аутори су стигли до саме границе своје песимистичке процене, што значи да би се неки смелији пројектант могао наћи и са горње стране границе.

### 3 Процена могућности превртања млаза и могућности загушења

На основу резултата прорачуна линије нивоа могло би се закључити да до загушења тока у пресеку иза кривине неће доћи, пошто је дубина воде у тунелу сса 6 m, при чему је испуњеност попречног пресека водом сса 70% (пречник тунела је  $D = 9$  m). Ово би у условима праволинијског струјања било довољно да се обезбеди простор за дебљање млаза услед увученог ваздуха (USBR 1987). Међутим, с обзиром да се у кривини и иза ње јавља изразито просторно струјање, у коме не важе претпоставке линијског модела, резултат прорачуна линије нивоа могао би се узети само као најгрубља претпоставка. На основу истраживања спроведених у лабораторији за хидротехнику Грађевинског факултета у Београду добијени су услови при којима долази до различитих типова течења у кривини тунела са слободном површином (слика 2), па се може проценити када ће доћи до „превртања млаза“, тј. до хеликоидног струјања, а када постоји опасност од загушења попречног пресека.

Према (Коларевић 2015b), емпиријски показатељ „превртања“ млаза (показатељ настанка хеликоидног струјања),  $C_H$ , добија се као:

$$C_H = \frac{1}{H_1} Fr_0 \left( \frac{h_o}{D} \right)^{H_2}, \quad (7)$$

где је  $Fr_0 = V_0 \sqrt{g A_0 / B_0}$ , Фрудов број тока испред кривине (пресек 9),  $V_0$ ,  $h_o$ ,  $A_0$  и  $B_0$ , брзина, дубина, површина тока и ширина воденог огледала у пресеку испред кривине, а  $H_1$  и  $H_2$ , емпиријски коефицијенти, који се за скретне углове веће од  $45^\circ$ , рачунају као:

$$H_1 = 0,7 + 0,1 \frac{R}{D} \quad \text{и} \quad (8)$$

$$H_2 = 1,25 + 0,05 \frac{R}{D}. \quad (9)$$

Према истраживањима Коларевић et al. (2015b), хеликоидно струјање настаје када је показатељ „превртања“ млаза,  $C_H > 1,05$ , док се за  $0,95 < C_H < 1,05$  успоставља прелазно струјање са делимичним превртањем млаза (слика 2). Како се може видети из табеле 1, у свим разматраним случајевима јавља се струјање у прелазном режиму, на граници хеликоидног тока (слика 4), чак и када се употреби фактор сигурности од  $\sigma = 1,1$ .

Показатељ „загушења“ млаза (Коларевић 2015, Коларевић et al. 2015b),  $C_Z$ , добија се према:

$$C_Z = \frac{1}{Z_1} Fr_0 \left( \frac{h_o}{D} \right)^{Z_2}, \quad (10)$$

где су  $Z_1$  и  $Z_2$ , емпиријски коефицијенти:

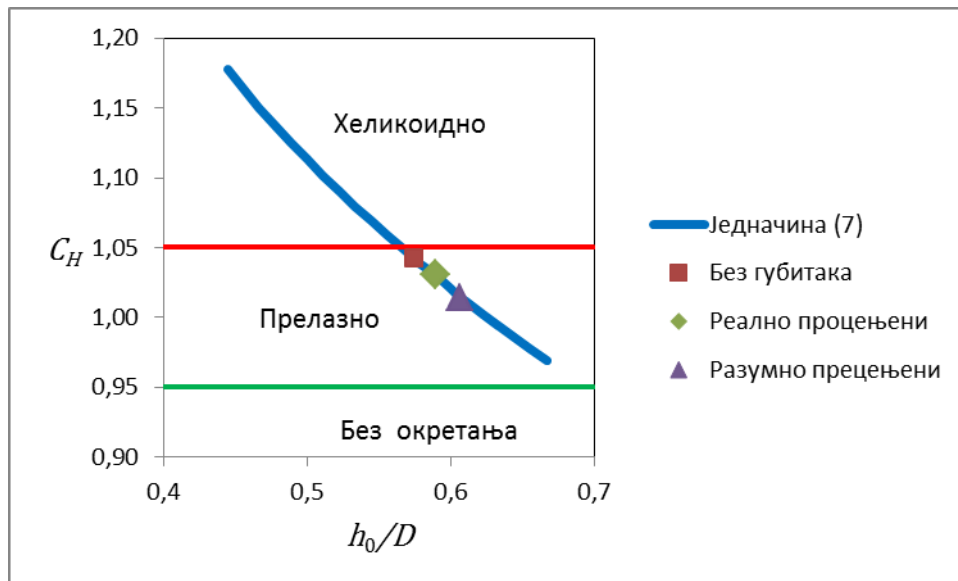
$$Z_1 = 0,55 \left( \frac{R}{D} \right)^{0,4} (\sin \alpha)^{-0,22} \quad \text{и} \quad (11)$$

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$Z_2 = 0,85 \left( \frac{D}{R} \right)^{0,005} + 0,6(\cos \alpha)^{1,6} + 1,22, \quad (12)$$

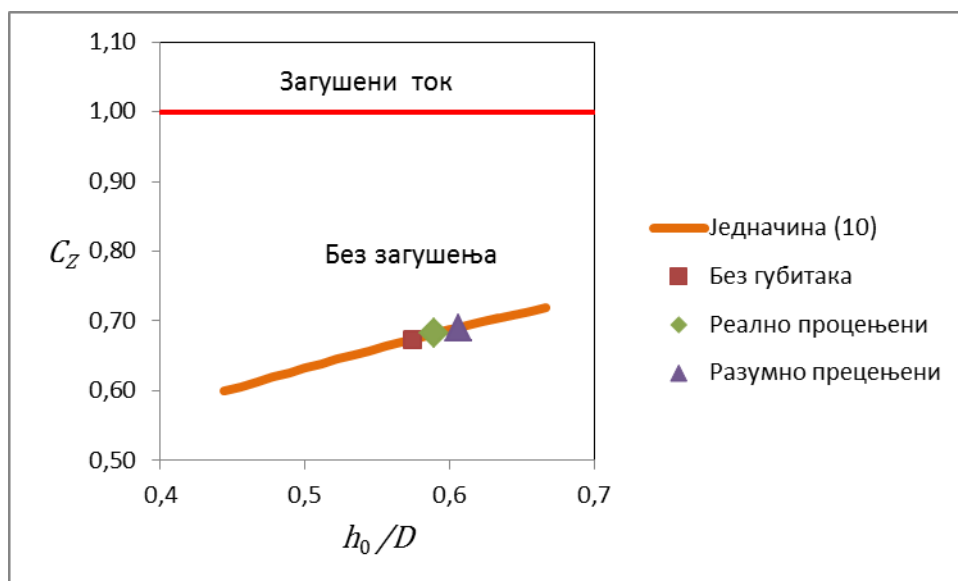
где је  $\alpha$  скретни угао.

Према Коларевић et al. (2015b), загушење настаје када је емпиријски показатељ „загушења“ млаза,  $C_Z > 1,0$  (слика 2). На основу резултата из табеле 1, у свим разматраним случајевима јавља се струјање без загушења (слика 5), чак и када се употреби фактор сигурности од  $\sigma = 1,1$ .



Слика 4. Емпиријски показатељ „превртања“ млаза,  $C_H$ , са границама типова течења.

Figure 4. Empirical „overturning“ coefficient,  $C_H$ , with limits between the diferent types of flow.



Слика 5. Емпиријски показатељ „загушења“ тока,  $C_Z$ , са границом загушења.

Figure 5. Empirical „choking“ coefficient,  $C_Z$ , with choking flow limit.

Имајући у виду резултате прорачуна линије нивоа и приказане вредности коефицијената превртања и загушења, могло би се закључити да се пропусна моћ тунела допунског евакуационог објекта бране Бочац не доводи у питање. Ипак, остаје да се каже нешто и о локалном губитку на прелазници између трапезног и кружног попречног пресека, на узводном крају тунела. Аутори (пројектанти) се надају да исти није слабије прецењен од губитка на кривини, као и да ће се у скорије време урадити истражевања која би могла то и да потврде (или демантују). Наравно, мора се имати на уму да овакав поремећај узводно од кривине доприноси и развоју поремећаја у самој кривини, па исто важи и за локалне губитке енергије. Ово значи да, премда је веома корисно познавати локалне поремећаје (односно вредности локалних губитака) појединачно, за коначну оцену неопходно је сагледати течење у објекту као целини. Поред решавања проблема проузрокованих очекиваним појавама (као што је увлачење ваздуха, хеликоидно струјање у кривини итд.), на моделу се могу открити и отклонити, или ублажити и неповољне појаве, које се пре испитивања нису очекивале. Другим речима, за претходне фазе пројекта може послужити исправно процењен податак добијен из литературе, али се за коначно решење увек препоручује израда физичког модела, поготову ако се ради о важном, а уједно нестандартном објекту.

Такође, у будућности би требало посветити пажњу проблему увлачења ваздуха у ток, јер је се при силовитом течењу јавља значајна аерација. Да би се избегао ефекат размере, неопходно је користити физички модел великих димензије, што би захтевало скупа моделска истраживања. Савремени нумерички модели за сада још увек нису довољно поуздани, поготову у погледу течења двофазног флуида (Коларевић 2015, Зиндовић 2017). Зато би решење требало тражити у комбиновању физичког и нумеричког моделирања, уз коришћење искуства и инжењерске интуиције.

## 4 Закључци

На основу изложених разматрања о пројектовању евакуационог објекта са хоризонталном кривином у тунелу, може се закључити:

- Очекује се да је пропусна моћ тунела додатног евакуационог објекта бране Бочац довољна да прихвати рачунски проток.
- За одређивање локалног коефицијента губитка енергије за течење у кривини тунела са слободном површином при силовитом режиму, не треба користити изразе за течење под притиском.
- Коришћење емпиријских образаца, добијених из наменски спроведених истраживања, могу значајно поправити квалитет пројектовања евакуационог објекта, поготову у раној фази пројектовања.
- Ипак, за коначно пројектно решење треба користити физички модел целог евакуационог објекта. Ту се поред очекиваних појава (увлачење ваздуха, струјање у кривини итд.), могу открити и феномени који се пре испитивања нису могли очекивати.
- Да би се избегао ефекат размере, физички модели захтевају велике димензије, па су истраживања скупа. Са друге стране, нумерички модели за сада још увек нису довољно поуздани у погледу течења двофазног флуида. Решење је у компромису између ова два приступа, уз коришћење инжењерске интуиције.

## Захвалница

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 и ТР 37010.

## Литература

1. Институт за водопривреду Јарослав Черни (2008) *Пројекат за извођење, Допунски сигурносни евакуатор великих вода на ХЕ „Бочац“*, Књига 4, Главни пројекат – прорачуни и анализе.
2. Зиндовић, Б. (2017) *Струјање у степанастом брзотоку са постепеним смањењем ширине корита*, докторска дисертација
3. Kolarevic, M., Savic, Lj., Kapor, R., Mladenovic, N. (2014) *Supercritical flow in circular conduit bends*, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 53 (1), pp 93-100.
4. Коларевић, М. (2015) *Бурно течење у кривинама евакуационих објеката*, докторска дисертација.
5. Коларевић, М., Савић, Ј., Капор, Р., Младеновић, Н. (2015а) *Губитак енергије при хеликоидном течењу у затвореном проводнику са кривином*, *17-то Саветовање СДХИ и СДХ – Вршац*, Србија, стр. 244-253.
6. Коларевић, М., Савић, Ј., Капор, Р., Младеновић, Н. (2015б) *Бурно течење у хоризонталној кривини затвореног проводника*, *17-то Саветовање СДХИ и СДХ – Вршац*, Србија, стр. 230-243.
7. USBR, (1987) *Design of Small Dams*, A Water Resources Technical Publication.
8. US Army Corps of Engineers (1977) *Hydraulic design criteria*, Vicksburg, MS.



## **Hidraulička analiza propusne moći kolektora ispod flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“**

Nevena Anđelić<sup>1</sup>, Marko Ivetić<sup>2</sup>

APSTRAKT: Eksploataciono polje rude bakra “Veliki Krivelj” nalazi se u slivu Kriveljske reke, na oko 4 km od Bora. Od početka eksploatacije, za deponovanje flotacijske jalovine koristi se prostor dobijen pregrađivanjem rečne doline peščanim branama, uzvodnom branom „1“ i nizvodnom branom „2“, dok se kasnije proširenjem jalovišta nizvodno, izgradnjom brane 3, dobija još jedno polje – “Polje 2”. Trenutno, Kriveljska reka protiče ispod „Polja 1“ i „Polja 2“, kroz tunel, koji zaobilazi “Polje 1”, i kolektor, koji ide dolinom Kriveljske reke, ispod “Polja 2”. Postojeći tunel i kolektor projektovani su i izvedeni sa prečnikom od 3,0m, ali tokom eksploatacije kolektora, došlo je do pucanja kolektora u zoni nizvodne brane “3“. Na oštećenom delu kolektora, izvedena je sanacija, betoniranjem unutrašnjeg prstena i smanjenjem unutrašnjeg prečnika na 2,2m. U okviru ovog rada urađena je detaljna hidraulička analiza efekata izvršene sanacije, tj. analiza propusne moći postojećeg kolektora i tunela u odnosu na propusnu moć projektovanog kolektora i tunela (pre izvršene sanacije). Posebna pažnja posvećena je kritičkoj analizi planiranih radova na daljem proširenju flotacijskog jalovišta otvaranjem “Polja 0” i ograničenja koja postavlja propusna moć kolektora.

Ključne reči: rudnik bakra “Veliki Krivelj”, flotacijsko jalovište, projektni kriterijumi za maksimalni proticaj

## **Hydraulic analysis of the flow capacity of diversion collector under the flotation tailings “Veliki Krivelj”**

ABSTRACT: Copper ore mining site “Veliki Krivelj” is in the River Krivelj basin, located about 4km from Bor municipality. From the beginning of operation, the area designated for mine flotation tailing, “Polje 1” sector, was obtained by damming the river valley by sand dams, “1”, upstream, and “2”, downstream, with diversion of the River Krivelj through the tunnel. Later, the tailings was expanded downstream by construction of dam “3”. Between dams, “2” and “3”, sector “Polje 2” was created. At present, River Krivelj flows around “Polje 1”, through a tunnel and, under “Polje 2”, along the River Krivelj valley, through a collector. Both, tunnel and collector, were designed and built with the internal diameter of 3,0 m. During the operation of the mine tailing, and gradual increase of dams, there was a breakdown of collector in the area under the downstream dam „3“. Broken part was mended and the diameter was reduced from 3,0 m to 2,2 m. In this paper, a detailed hydraulic analysis of the effects of rehabilitation is done, i.e., the flow capacity of the existing collector and tunnel has been compared with the flow capacity of the designed collector and tunnel (before rehabilitation). Special attention is paid to the critical analysis of the planned activities on the further extension of the flotation tailings by opening “Polje 0”, upstream along the River Krivelj, and the limitations imposed by the reduced flow capacity of the rehabilitated collector.

Keywords: Copper ore site “Veliki Krivelj”, flotation mine tailings, design criteria for river diversion

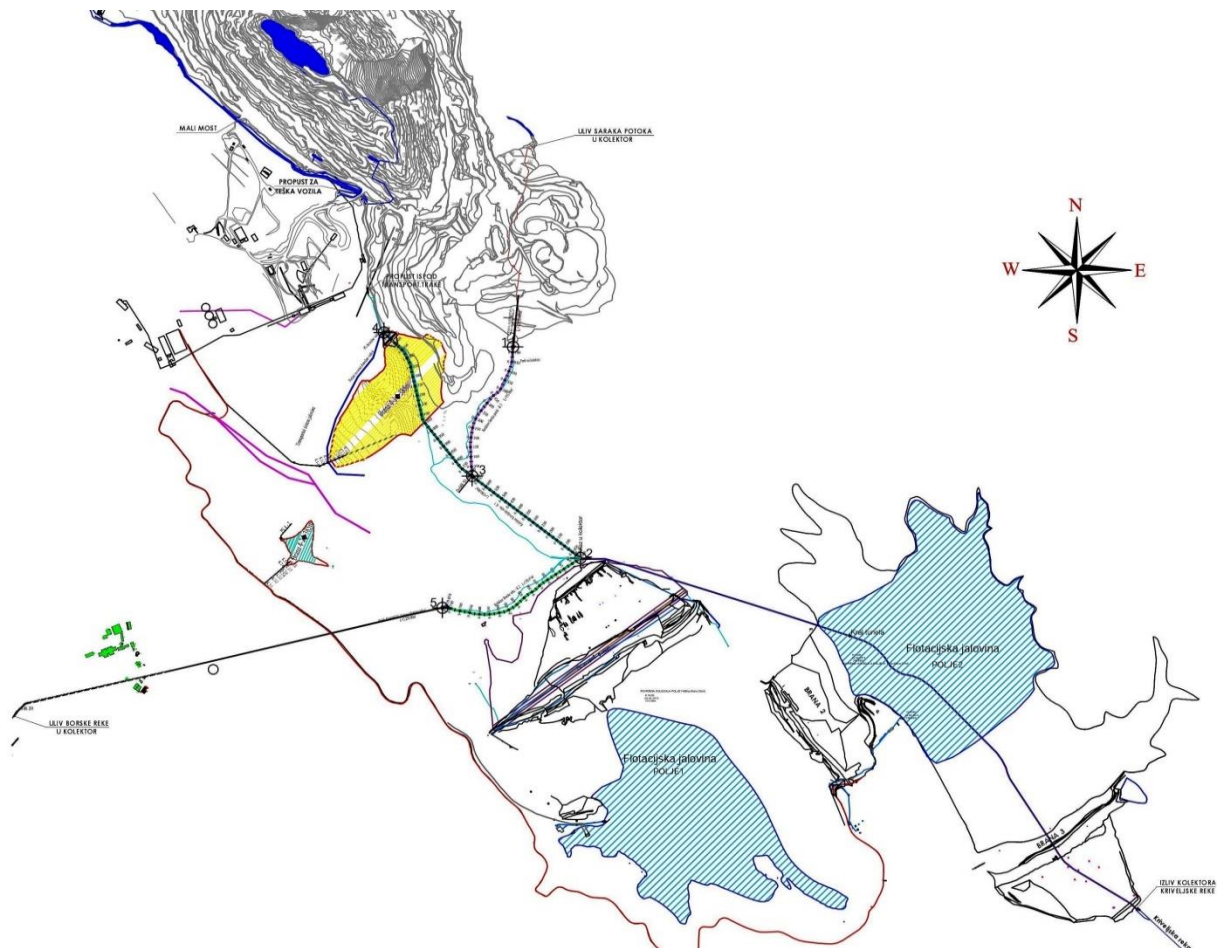
<sup>1</sup> Nevena Anđelić, mast.inž.grad., Energoprojekt-Entel, nevena.neki92@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr Marko Ivetić, dipl.grad.inž., Građevinski fakultet-Univerzitet u Beogradu, marko.v.ivetic@gmail.com

## 1 Uvod

Eksploataciono polje rude bakra “Veliki Krivelj” nalazi se u slivu Kriveljske reke, na oko 4 km od Bora. Razvojnim konceptom RTB Bor predviđeno je proširenje površinskog kopa Veliki Krivelj do kapaciteta od 10,6 miliona tona rude bakra godišnje. Za potrebe povećanja kapaciteta prerade rude bakra neophodno je obezbediti dodatni prostor za deponovanje flotacijske jalovine.

Od početka eksploatacije 1982. godine, za deponovanje flotacijske jalovine koristi se prostor dobijen pregrađivanjem doline Kriveljske reke. Na početku eksploatacije zauzet je prostor bliže flotaciji Veliki Krivelj – polje 1, koje je nastalo pregrađivanjem doline Kriveljske reke dvema pešćanim branama, uzvodnom branom 1 i nizvodnom branom 2 (Slika 1). Kriveljska reka je bezbedno sprovedena kroz tunel, unutrašnjeg prečnika, 3,0 m, i vraćena u prirodno korito nizvodno od brane 2. Za pravljenje uzvodne brane 1, napravljene su dve inicijalne brane, 1 i 1A, od slabije propusnog materijala i visoke oko 10 metara. Polje 2 je nastalo nizvodnim proširenjem jalovišta izgradnjom još jedne pešćane brane – brane 3. Ispod polja 2, Kriveljska reka je sprovedena kolektorom istog prečnika, napravljenim u otvorenom iskopu od izlaza iz tunela, napravljenog u prvoj fazi rečnom dolinom Kriveljske reke, sve do preseka nizvodno od brane 3.



Slika 1 – Jalovište “Veliki Krivelj” – Osnova celog sistema

Figure 1 – Flotation mine tailings “Veliki Krivelj” - System layout

Zbog teške ekonomske situacije, i hronično nedovoljnog ulaganja u aktivnosti koje ne donose direktno prihod, pa samim tim i nedovoljne brige o flotacijskim jalovištima, raspoloživi prostor za odlaganje flotacijske jalovine je u periodu izrade ove analize bio veoma mali. Kako se planira značajno povećana prerada u kriveljskoj flotaciji, jasno je da će vrlo brzo doći do iskorišćenja

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

raspoložive slobodne zapremine polja 1 i do njegovog zapunjavanja. Kao i nekoliko puta do sada, pribeglo se nadvišenju brane 1 i brane 2, da bi se "kupilo vreme", ali je jedino tehnički prihvatljivo rešenje, proširenje flotacijskog jalovišta uzvodno uz Kriveljsku reku i izgradnja tzv. Nultog polja.

Kriveljska reka trenutno teče ispod polja 1 i 2, kroz tunel koji zaobilazi polje 1, i kolektor, ispod polja 2, ukupne dužine 3475 m. Iako se činilo da nema nikakve razlike između tunela i kolektora, izuzev manjih troškova izgradnje kolektora, ispostavilo se da to nije tako. Naime, na delu na kom je zacevljenje urađeno kao tunel, betonska obloga ima glavnu ulogu da smanji hidrauličke otpore, dok na delu kolektora ispod polja 2, potrebno je da betonska konstrukcija kolektora primi i opterećenje od flotacijske jalovine i od brane. Desilo se da procena opterećenja kolektora nije bila adekvatna pa je relativno brzo, po početku eksploatacije kolektora i postepenog povećanja opterećenja usled deponovanja flotacijske jalovine, došlo do pucanja kolektora u zoni nizvodne brane 3. Na oštećenom delu kolektora, efikasno je izvedena "sanacija", betoniranjem unutrašnjeg prstena i smanjenjem unutrašnjeg prečnika na 2,2m, i to na dužini od 1257m. Nizvodno od saniranog dela kolektora, ispod brane 3, u ukupnoj dužini od 200m, prečnik kolektora je ostao nepromenjen (3,0m), kao i uzvodno od saniranog dela, u dužini od 2018m. Nažalost, projekat sanacije nije uzeo u obzir uticaj smanjenog prečnika na propusnu moć tunelsko-kolektorske derivacije Kriveljske reke.

Krajem devedestih godina prošlog veka, urađena je studija unapređenja bezbednosti jalovišta Veliki Krivelj koja je posebno analizirala propusnu moć derivacije Kriveljske reke u zoni flotacijskog jalovišta. Predložena je izgradnja tunela većeg prečnika prečnika (4,5 m), po novoj trasi, umesto kolektora ispod polja 2. Iako su bila obezbeđena sredstva, rešenje, nažalost, nije realizovano.

## 1.1 Predmet analize

Da bi se formiralo „Nulto polje“ za odlaganje flotacijske jalovine, potrebno je izgraditi kolektor (ili tunel, koji bi, na osnovu iskustva sa kolektorom ispod polja 2, možda bio bolje rešenje) uzvodno od postojećeg tunela Kriveljske reke. Dužina nove deonice kolektora koji je potrebno izgraditi je 1580m. Takođe, u sklopu izgradnje ovog kolektora, treba povezati i kolektore Saraka potoka (755,0m) i Borske reke (770,9m), koji se ulivaju u Kriveljsku reku uzvodno od brane 1, ispod planiranog polja nula.

Karakteristične visinske kote koje su uzete u obzir su:

- Kota na ulazu u postojeći kolektor - 278,2 mnv,
- Kota dna na izlazu iz sistema, tj. kota ispusta – 246,0 mnv,
- Kota dna na ulazu u novi kolektor ispod „Nultog polja“ – 293,5 mnv,
- Kota krune inicijalne brane koja bi bila izgrađena od nepropusnog materijala – 301,4 mnv,
- Kota dna transportne trake, uzvodno od nove brane, tj kota vrha propusta ispod trake – 301,67

mnv.

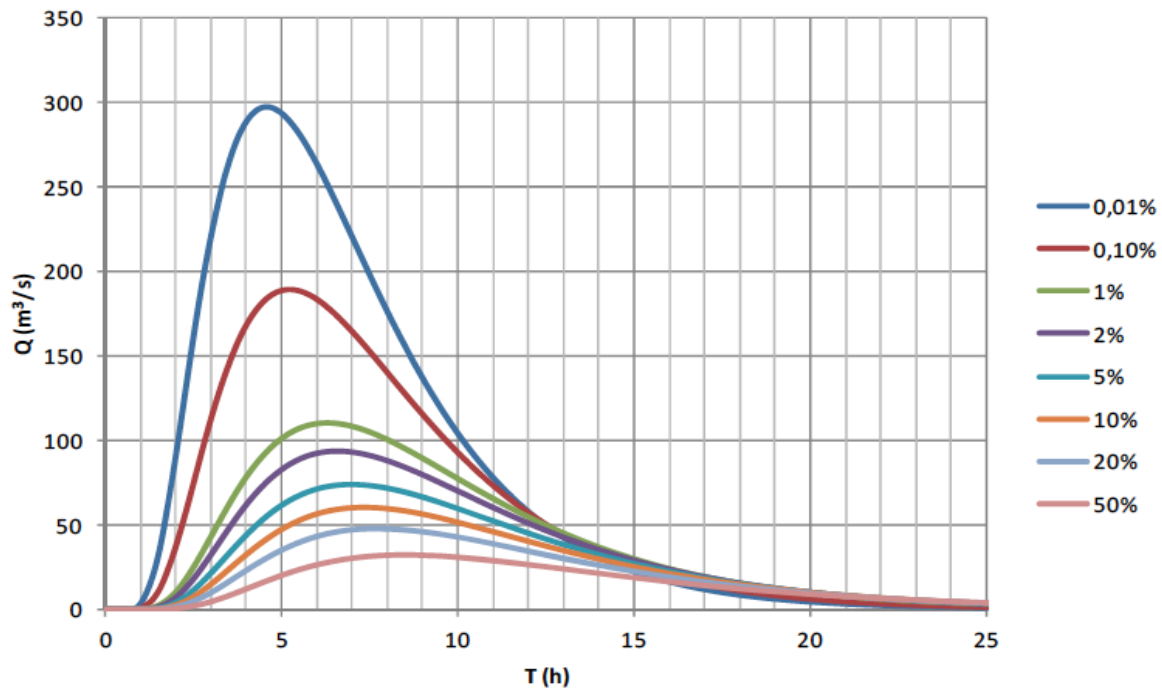
Na Slici 1 dat je prikaz celog sistema derivacije Kriveljske reke, Saraka potoka, Borske reke, kao i svih brana i flotacijskog jalovišta. Pored svih pomenutih elemenata, na Slici 1 može videti se i lokacija površinskog kopa u odnosu na sistem. Pomeranjem brane 4-1 uzvodno, znatno je smanjen prostor između ulaza u kolektor i površinskog kopa, a pored opasnosti od plavljenja kopa usled nedovoljne popusne moći derivacije Kriveljske reke, postoji opasnost i od plavljenja transportne trake, koja je takođe naznačena na slici. Brana 4-1, sa visinskom kotom vrha brane od 385 mnv, ograničava „Nulto polje“ za odlaganje flotacijske jalovine sa uzvodne strane, a brana 1, sa nizvodne. Brana 1 i brana 2, ograničavaju polje 1, a brane 2 i 3, polje 2.

S obzirom na to da ne postoje praktično nikakva merenja ni padavina na slivu Kriveljske reke, ni proticaja Kriveljske reke, iako je derivacija u funkciji oko 35 godina, a i da efekti sanacije kolektora nikada nisu detaljno analizirani, nije jednostavno definisati merodavne proticaje za dimenzionisanje kolektora/tunela ispod polja "0". Za potrebe projekta proširenja jalovišta, kao i zbog "zaštite eksploatacionih polja Veliki Krivelj i Cerovo i naselja Veliki Krivelj od površinskih voda" urađene su hidrološke analize (IJČ, 2015) i dobijeni su, kao merodavni, hidrogrami prikazani na Slici 2.

Za Projektanta (i Investitora) se postavilo pitanje, da li da zadrži prvobitno projektovani unutrašnji prečnik kolektora (3,0 m) i ispod "Polja 0", ili da usvoji prečnik, koji je rezultat sanacije (2,2 m), ili neku vrednost između te dve.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2 – Merodavni hidrogrami za dimenzionisanje kolektora prema postojećim hidrološkim analizama (2015, J. Černi)

Figure 2 – Design hydrographs for the River Kriveljska collector, based on the existing hydrologic analyses (2015, IJC)

Da bi se došlo do odgovora neophodno je uraditi analizu propusne moći postojećeg (saniranog) kolektora i tunela, kao i propusnu moć projektovanog kolektora i tunela, pre izvršene sanacije, da bi se, na osnovu toga dala ocena efekata dosadašnjih intervencija na sanaciji ispod „Polja 2“ i brane 3A. Posle toga, potrebno je uraditi procenu uticaja prečnika kolektora ispod „Nultog polja“ na propusnu moć celog sistema i na osnovu toga dati predlog o prečniku novog dela kolektora. Kao osnovni kriterijum se nameće da se ne sme narušiti postojeće stanje, odnosno, da se propusna moć postojećeg kolektora ne sme smanjiti izgradnjom produžetka kolektora.

Takođe, treba voditi računa da je inicijalna brana na ulazu u postojeći kolektor visoka oko 10m. Ova brana je izgrađena od slabo propusnog materijala i ne sme se dozvoliti njeno prelivanje. Prelivanje inicijalne brane moglo bi dovesti do rušenja cele brane čija projektovana visina je skoro 100 m. Uzvodno od ulaza u predviđeni produžetak kolektora preko korita reke prelazi transportna traka za transport rude. Ispod transportne trake, Kriveljska reka prolazi kroz propust. Neophodno je da ova traka konstantno bude u funkciji, i ne sme se dozvoliti njeno plavljenje jer bi u tom slučaju došlo do zaustavljanja rada rudnika.

Za potrebe komunikacije sa Projektantom i Investitorom, a u želji da se pomogne u donošenju najpre je uradjena preliminarna hidraulička analiza sa pojednostavljenim jednačinama i svodjenjem na bezdimenzionalne veličine (Ivetić, 2016). Naknadne numeričke simulacije tečenja vode u sistemu kolektora za sprovođenje Kriveljske reke, Saraka potoka i Borske reke ispod jalovišta, za koje je korišćen programski paket Storm Water Management Model (SWMM), u velikoj meri su potvrdile rezultate preliminarne analize. Svi podaci o konfiguraciji terena, kao i merodavni proticaji za proveru funkcionisanja postojećeg i proširenog kolektora preuzeti su iz raspoložive dokumentacije. Propusna moć kolektora analizira se preko poređenja simulacija za različite varijante, različite prečnike kolektora ispod „Nultog polja“ sa propusnom moći postojećeg kolektora u sada postojećem stanju – nakon izvršene sanacije dela kolektora.

## 2 Hidraulička analiza

### 2.1 Preliminarna analiza propusne moći kolektora Kriveljske reke ispod jalovišta Veliki Krivelj

#### 2.1.1 Oznake

- $D_1$  - Prečnik kolektora prema originalnom projektu, 3,0 m,
- $D_2$  - Prečnik saniranog kolektora,
- $A_i$  - Površina poprečnog preseka kolektora za prečnik  $D_i$ ,  $i = 1, 2$ , prečnik  $D_i$ ,  $i = 1, 2$ ,
- $R_i$  - Hidraulički radijus deonice kolektora na kojoj je prečnik  $D_i$ ,  $i = 1, 2$ ,
- $n$  - Manningov koeficijent hrapavosti obloge kolektora, pretpostavljen isti na celoj dužini kolektora,
- $Q_{max}$  - Referentni proticaj, pod uslovom da je ceo kolektor izveden prema originalnom projektu, sa prečnikom,  $D_1 = 3,0$  m,
- $Q$  - Proticaj koji se ostvaruje kroz kolektor,
- $q = Q/Q_{max}$  - Bezdimenzionalni proticaj,
- $L_0$  - Ukupna dužina kolektora,
- $\Delta H_0$  - Raspoloživa energija, razlika pijezometarskih kota uzvodno od ulazne gradjevine i na izlazu iz kolektora.

Okvirnom analizom razmatra se propusna moć punog kolektora, za različite kombinacije prečnika kolektora, bilo da se radi o saniranom delu, sa smanjenim prečnikom, ili da se namerno bira manji prečnik, sa obrazloženjem koji daje Projektant.

Polazi se od Šezi-Manningove jednačine za jednu deonicu konstantnog poprečnog preseka:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} I_e \quad (1)$$

i uslova da je ukupni gubitak energije jednak zbiru gubitaka energije na deonicama sa različitim prečnicima:

$$\Delta H_0 = I_{e,1} * L_1 + I_{e,2} * L_2 \quad (2)$$

Uvodi se,  $Q_{max}$ , kao proticaj koji odgovara kolektoru pune dužine,  $L_0$ , konstantnog prečnika,  $D_1$ , da bi se došlo da izraza za  $H_0$ :

$$\left(\frac{Q_{max}n}{A_1 R_1^{\frac{2}{3}}}\right)^2 = \frac{\Delta H_0}{L_0} \quad (3)$$

Jednačina (2) može se napisati kao:

$$\left(\frac{Q_{max}n}{A_1 R_1^{\frac{2}{3}}}\right)^2 L_0 = \left(\frac{Qn}{A_1 R_1^{\frac{2}{3}}}\right)^2 L_1 = \left(\frac{Q_{max}n}{A_1 R_1^{\frac{2}{3}}}\right)^2 L_2 \quad (4)$$

Deljenjem cele jednačine članom na levoj strani jednakosti, i uvođenjem bezdimenzionalnog proticaja  $q = Q/Q_{max}$ , dobija se sledeći izraz:

$$1 = q^2 \frac{L_1}{L_0} + q^2 \left(\frac{A_1 R_1^{\frac{2}{3}}}{A_2 R_2^{\frac{2}{3}}}\right)^2 \frac{L_2}{L_0} \quad (5)$$

odnosno,

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$1 = q^2 \frac{L_1}{L_0} + q^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{16/3} \frac{L_2}{L_0} \quad (6)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{\frac{L_1}{L_0} + \left(\frac{D_1}{D_0}\right)^{16/3} \frac{L_2}{L_0}}} \quad (7)$$

Prethodni izraz dobijen je uz pretpostavku jednakosti Manningovog koeficijenta hrapavosti za kolektore različitog prečnika. Ako se pretpostavi približna jednakost Darsi – Vajzbahovog koeficijenta  $\lambda$ , dobio bi se sledeći izraz:

$$q = \sqrt{\frac{1}{\frac{L_1}{L_0} + \left(\frac{D_1}{D_0}\right)^5 \frac{L_2}{L_0}}} \quad (8)$$

Navedeni izrazi, (7) i (8), omogućavaju analizu različitih varijanti izbora prečnika kolektora, i direktno daju koliko taj izbor utiče na propusnu moć derivacije Kriveljske reke. Izrazi se ne razlikuju mnogo, međutim, prednost se daje izrazu (7), koji se zasniva na jednakosti Manningovog koeficijenta hrapavosti, koji je u direktnoj vezi sa apsolutnom hrapavosti obloge kolektora, što je logična pretpostavka za poredjenje dva betonska kolektora, različitog prečnika, a iste tehnologije izrade. Izraz (8) se zasniva na jednakosti koeficijenta trenja  $\lambda$ , odnosno, jednakosti apsolutne hrapavosti.

### 2.1.2 Analiza propusne moći kolektora

Postojeći kolektor je saniran na dužini od 1257m, a prema rečima Projektanta, unutrašnji prečnik kolektora na toj deonici iznosi 2,2m. Na deonici nizvodno od toga (ispod brane 3), na dužini od 200m, ostao je unutrašnji prečnik od 3,0m, kao i na deonici uzvodno od sanirane, na dužini od 2018,0m. Kota dna na ulazu u postojeći kolektor je 278,2mnv, a kota dna na izlazu je 246,0 mnv. Za okvirnu analizu propusne moći kolektora, usvaja se razlika  $\Delta H_0=35, 0m$ , za koju bi kolektor radio pod pritiskom, Manningov koeficijent hrapavosti,  $n = 0.015m^{-1/3}s$  i ukupna dužina kolektora,  $L=3475m$ .

Da bi se ilustrovalo, koliko je propusna moć smanjena dosadašnjim sanacijama kolektora, sračunata je vrednost proticaja za kolektor prečnika 3,0 m. Za  $\Delta H_0=35 m$ , dobijeno je  $Q_{max}=39,0 m^3/s$ . Za sadašnje stanje saniranog kolektora, za  $L_1/L_0=0, 638$ , i  $L_2/L_0=0, 362$ , dobija se rešenje jednačine (7),  $q=0, 629$ , a odgovarajući proticaj,  $Q = 0,629 * 39,0 = 24,5m^3/s$ .

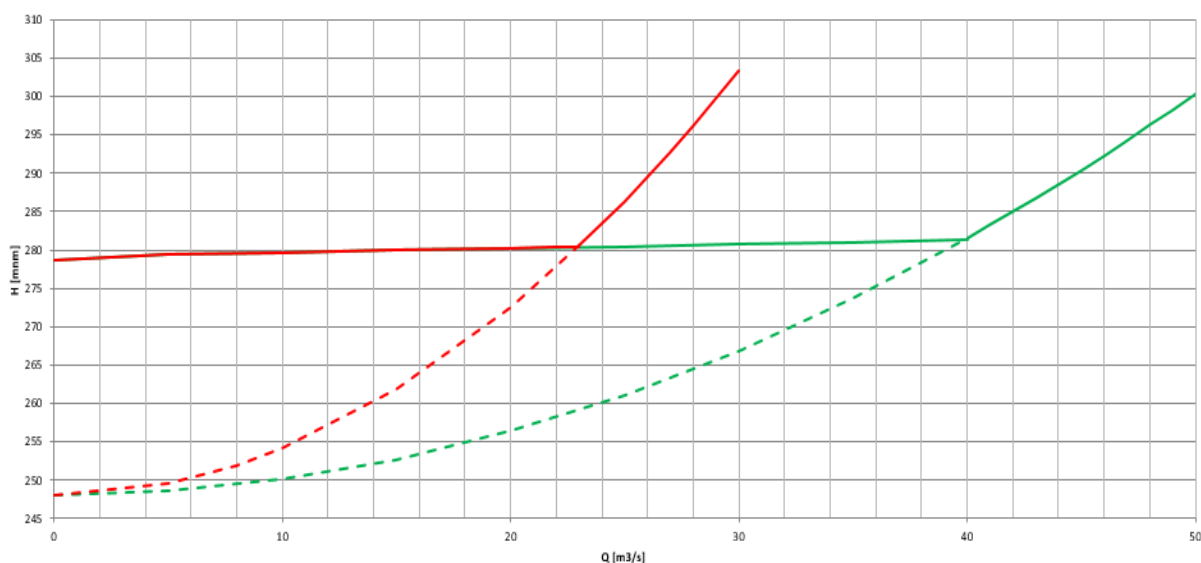
Maksimalni proticaj, odnosno, propusna moć, projektovane derivacije Kriveljske reke je bila oko,  $40 m^3/s$ , a nakon “sanacije” oštećenja kolektora ispod najnižvodnije brane (brana 3) i dela “Polja 2”, ona je smanjena na oko,  $25 m^3/s$ . Poredjenjem sa dijagramima na Slici 2, vidi se je procenjeni maksimalni proticaj Kriveljske reke sa petogodišnjim povratnim periodom,  $50 m^3/s$ , dok je za dvogodišnji povratni period, oko  $30 m^3/s$ . Po svojoj funkciji, derivacija Kriveljske reke je evakuacioni organ za flotacijsko jalovište “Veliki Krivelj”, kao i za brane koje ograničavaju jalovište. Brane, 1A (uzvodna) i 3 (nizvodna), su preko 100 m visine i napravljene su većim delom od peska. Ukoliko derivacija nema dovoljan kapacitet da bezbedno sprovede velike vode nizvodno od jalovišta, postoji velika opasnost od plavljenja površinskog kopa, prekida izvoženja rude iz kopa usled plavljenja transportne trake, kao i od rušenja brane 1A, usled kvašenja nizvodne kosine iznad inicijalne brane.

Pitanje: Koji od hidrograma sa Slike 2 je merodavan za dimenzionisanje derivacije Kriveljske reke, ostavlja se bez odgovora u ovom radu, iako je jasno da to ne može biti ni jedan od dva pomenuta u prethodnom paragrafu.

## 2.2 Hidraulička analiza u SWMM okruženju

### 2.2.1 Postojeće stanje

Propusna moć derivacije Kriveljske reke analizirana je u dva slučaja, za projektovani prečnik kolektora od 3,0 m i slučaj kolektora nakon izvršene sanacije na delu kolektora ispod brane 3 i dela "Polja 2". U programskom paketu SWMM analizirano je ustaljeno tečenje, a na Slici 3, dati su dijagrami zavisnosti nivoa vode u čvoru uzvodno od ulaza u tunnel od proticaja Kriveljske reke, odnosno, krive proticaja za oba slučaja, projektovano stanje, prečnik 3,0 m (zeleno linija), i "saniranog" kolektora sa smanjenjem prečnika (crvena linija). Pri istim proticajima u reci, nivoi vode u čvoru ispred ulaza u tunnel značajno se razlikuju kada dodje do tečenja pod pritiskom. Nakon dolaska pod pritisak, zavisnost nivoa od proticaja postaje kvadratna parabola sa temenom na piježometarskoj koti u izlaznom preseku kolektora ispod barane 3, na oko 248 mnv.



Slika 3 – Dijagram zavisnosti nivoa vode u najuzvodnijem čvoru kolektora od proticaja u reci Krivelj

Figure 3 – Stage – discharge relationship at the most upstream section of the River Krivelj derivation

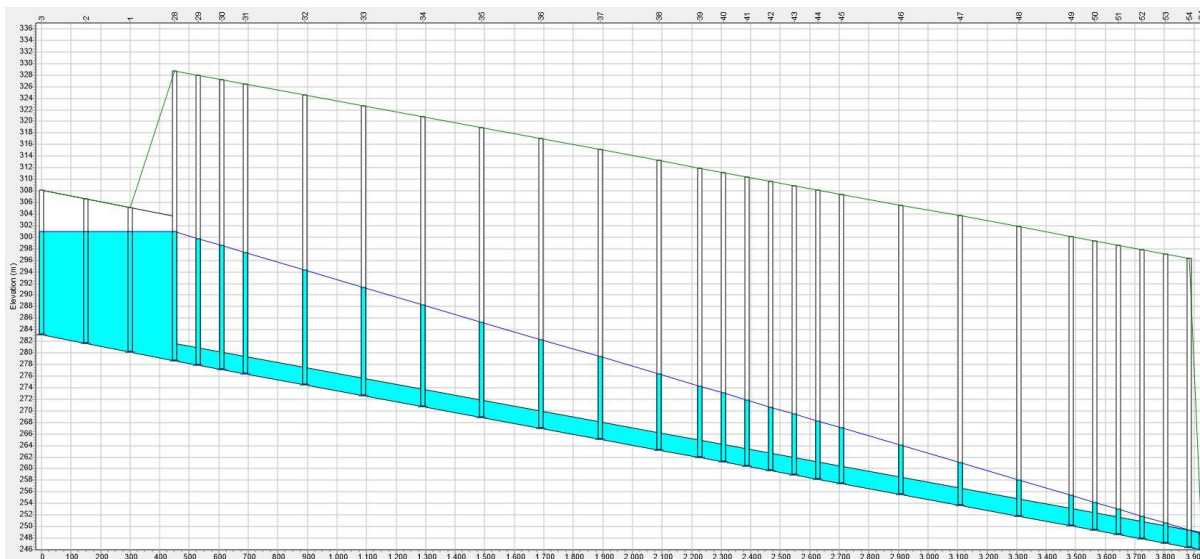
Drugim rečima, postoji razlika u kapacitetu sistema, odnosno maksimalnom proticaju koji prolazi kroz sistem, pa je tako maksimalni proticaj sistema koji je bio izgrađen po projektu, 40 m<sup>3</sup>/s, dok je nakon izvršene sanacije, pao na oko 25 m<sup>3</sup>/s. Dakle, nakon smanjenja prečnika na delu kolektora koji je bilo potrebno sanirati, došlo je do smanjenja propusne moći kolektora za oko 39%.

Pored krive proticaja, obrazloženje uzroka smanjenja proticaja posle sanacije kolektora postaje očigledno poređenjem podužnih profila kolektora i tunela na kojima se vide piježometarske linije u određenom trenutku. Podužni profili su dati na Slici 4 i Slici 5, u trenutku u kom je na ulazu u kolektor nivo vode jednak koti vrha inicijalne brane, koja se iz bezbednosnih razloga ne sme preliti, jer bi to moglo dovesti do rušenja cele brane. Na podužnom profilu kolektora nakon izvršene sanacije obeležen je deo kolektora na kom je prečnik kolektora smanjen. Kao što se vidi, nakon izvršene sanacije, dolazi do značajnog porasta nagiba piježometarske linije na saniranom delu kolektora. Smanjenje prečnika na tom delu dovelo je do smanjenja propusne moći, a posledica ovoga je upravo povećanje nivoa (uspor), neophodno da bi se savladala deonica sa smanjenim kapacitetom. Takođe, na podužnom profilu se može videti da se na krajnjem delu kolektora, neposredno pre ispusta, koji je nakon sanacije ostao nepromenjen, ni u trenutku maksimalnog proticaja u sistemu ne dolazi do tečenja u punom profilu.

Ako se posmatra hidrogram sa povratnim periodom od 100 godina, maksimalni proticaj je 110 m<sup>3</sup>/s, dok je zapremina hidrograma velike vode, oko 3 miliona kubika. Za projektovano stanje, kada je prečnik celog kolektora bio 3m i kapacitet je bio 40 m<sup>3</sup>/s, bilo je moguće evakuisati 2,16 miliona

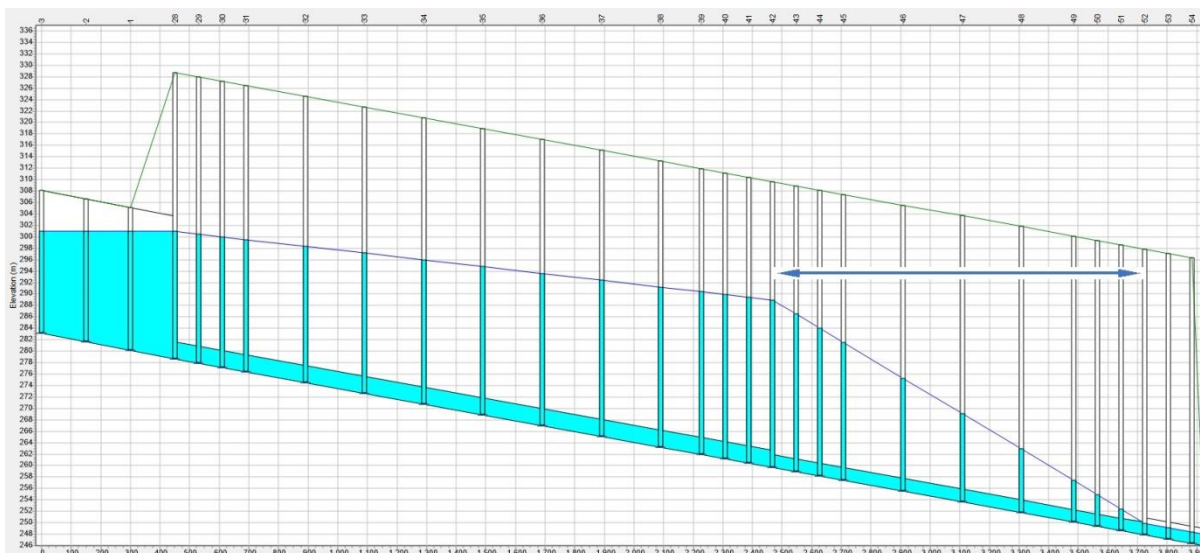
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

kubika. Kako je postojao retenzioni prostor, oko 1,4 miliona kubika, nije bilo opasnosti da se voda prelije u površinski kop. Za „sanirani“ kolektor, kapacitet se smanjio na 25 m<sup>3</sup>/s, pa je kroz kolektor bilo moguće evakuisati 1,3 miliona kubika, a preostala količina vode je nešto veća od količine koja se može smestiti u retenzioni prostor, tako da se može reći da je situacija, koliko toliko, bila pod kontrolom.



Slika 4 – Podužni profil derivacije Kriveljske reke za stanje pre izvršene sanacije, u trenutku u kom je nivo vode jednak koti vrha inicijalne brane

Figure 4 – Longitudinal profile of the diverted Kriveljska River for the condition before collector rehabilitation, when the upstream water level reach the top of initial dam.



Slika 5 – Podužni profil postojeće derivacije Kriveljske reke, u trenutku u kom je nivo vode jednak koti vrha inicijalne brane

Figure 5 – Longitudinal profile of the diverted River Kriveljska, when the upstream water level reach the top of initial dam.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Posmatrano na drugi način, uzimanjem u obzir postojećeg retenzionog prostora, tunel i kolektor prečnika 3,0 m, imali su kapacitet koji je odgovarao hidrogramu sa povratnim periodom od 200 godina, a sanacijom, kapacitet je smanjen na hidrogram od 50 godina. Formiranjem "Polja 0", praktično se ukida retenzioni prostor uzvodno od jalovišta.

## 2.3 Novi kolektor

Kao nastavak trenutno postojećeg kolektora ispod polja 1 i 2, planirana je izgradnja kolektora ispod „Nultog polja“ u dužini od oko 1600 m. I pored nejasnoća (i neusaglašenih stavova) oko kriterijuma za projektovanje derivacija, Projektant je veoma brzo doneo odluku da ispod „Nultog polja“ predvidi kolektor čiji je prečnik 2,2 m, pravdajući svoju odluku da je to jeftinije rešenje, ne uzimajući u obzir direktnu vezu prečnika i maksimalnog proticaja, odnosno, kapaciteta derivacije Kriveljske reke. Nedopustivo je da se, nakon smanjenja propusne moći izvršenom sanacijom na sistemu, dodatno smanjuje maksimalni protok koji može proći kroz kolektor.

I ova dva slučaja analizirana su u programskom paketu SWMM, ali je uradjena i pojednostavljena analiza, čiji rezultati će se dati na početku. Konfiguracija analiziranog sistema je, postojeće stanje (nakon izvršene sanacije) + dva moguća prečnika kolektora ispod „Nultog polja“, 2,2 m, odnosno, 3,0 m (Slika 6). Preliminarna analiza je urađena uz pretpostavku da se u celom sistemu ostvaruje tečenje u punom profilu, odnosno, tečenje pod pritiskom. U proceni uticaja sanacije kolektora ispod brane 3, ta pretpostavka je bila opravdana. Međutim, zbog priključaka kolektora Borske reke i Saraka potoka na mestu spoja kolektora ispod "Polja 0" i postojećeg tunela prečnika 3,0 m, može doći do vakuuma i uvlačenja vazduha i uspostavljanja tečenja sa slobodnom površinom. Zbog navedenog, preliminarna analiza ne daje potpuno realne rezultate, pa će se rezultati proveriti korišćenjem programskog paketa SWMM.

### 2.3.1 Analiza uticaja izabranog prečnika kolektora Kriveljske reke u Nultom polju na propusnu moć celog kolektora

Preliminarna analiza uradjena je i produžetak kolektora ispod Nultog polja. Prema preliminarnom izveštaju, dužina kolektora ispod Nultog polja iznosi 1630 m, a kota dna na (novom) ulazu iznosi, 293,50 mnv. U ovom slučaju, merodavna visinska razlika između ulaza i izlaza, iznosi,  $\Delta H_0=50,0$  m, a ukupna dužina kolektora,  $L=5105$  m. Za navedene podatke, jednačina (1) daje (novi) referentni proticaj

$$Q = 38,5 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Proticaj koji bi se ostvario, kada bi uzvodna deonica bila istog prečnika kao što je izveden postojeći kolektor, 3,0 m, dobijen je rešavanjem jednačine (7), za  $L_1/L_0=0,754$ , i  $L_2/L_0=0,246$ . Rešenje je  $q = 0.70$ , a odgovarajući proticaj

$$Q = 0,70 * 38,5 = 27,0 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Za slučaj da se produžetak kolektora ispod "Nultog polja" izvede sa prečnikom 2,2 m, kao što predlaže Projektant, i za  $L_1/L_0=0,435$  i  $L_2/L_0=0,565$ , dobija se  $q = 0.54$ , a odgovarajući proticaj

$$Q = 0,54 * 38,5 = 20,8 \text{ m}^3/\text{s}.$$

### 2.3.2 Zaključak preliminarne analize

Procenjena propusna moć saniranog kolektora ispod polja 1 i polja 2, iznosi,  $24,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , što je oko 63% u odnosu na situaciju pre sanacije. Ukoliko bi se kolektor u Nultom polju izveo sa unutrašnjim prečnikom 2,2 m, procenjena propusna moć bi bila,  $20,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , što je smanjenje u odnosu na postojeće stanje.

Za očekivati je da će stvarni proticaj kroz kolektor biti još manji, jer će se teško ostvariti tečenje pod pritiskom u deonici ispod Nultog polja. To bi zahtevalo da nagib linije energije bude veći

od nagiba kolektora, odnosno, da pritisak na mestu spoja sa Borskom rekam bude manji od atmosferskog. Propusna moć bi verovatno bila oko  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ , koliko je procenio Projektant u Preliminarnom izveštaju, dok analize urađene uz pomoć programa SWMM, date u daljem tekstu, ukazuju na to da bi maksimalni proticaj mogao biti oko,  $17 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Ukoliko bi se kolektor u Nultom polju izveo sa unutrašnjim prečnikom, 3,0 m, procenjena propusna moć iznosi,  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ , što je povećanje i u odnosu na postojeće stanje, a skoro dva puta više od rešenja koje predlaže Projektant.

Nakon ovoga, jasno je da nema nikakvog opravdanja ispod "Polja 0" usvajati manji prečnik kolektora od 3,0 m i svesno povećavati rizik od plavljenja površinskog kopa i transportne trake, kao i rizik od rušenja uzvodne brane.

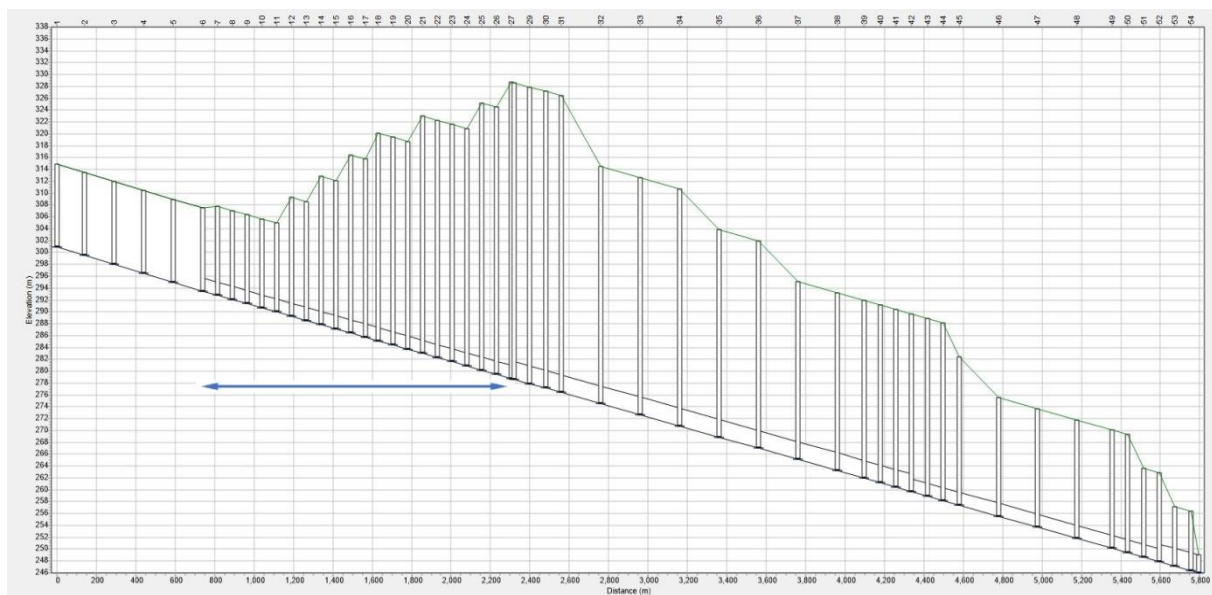
### 3 Analiza uspora uzvodno od kolektora u funkciji prečnika kolektora

U okviru analize prikazuju se poređenje stanja u sistemu za dva slučaja prečnika novog dela kolektora. Izbor prečnika novog dela kolektora se vrši na osnovu zadatih kriterijuma i potrebno je odrediti koji je prečnik povoljniji između dva predložena rešenja - da se deo kolektora nastavi sa istim prečnikom kao i postojeći kolektor (3,0m) ili da prečnik kolektora ispod "Nultog polja" bude isti kao na delu kolektora koji je saniran (2,2m).

Ako se postojeći kolektor posmatra u trenutno postojećem stanju, potrebno je utvrditi koji će prečnik novog dela kolektora davati bolje rezultate tj. kapacitet mreže koji ne ugrožava postojeći kapacitet i postojeće stanje mreže. Kapacitet derivacije Kriveljske reke, pre izgradnje kolektora ispod „Nultog polja“, procenjen je na  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ .

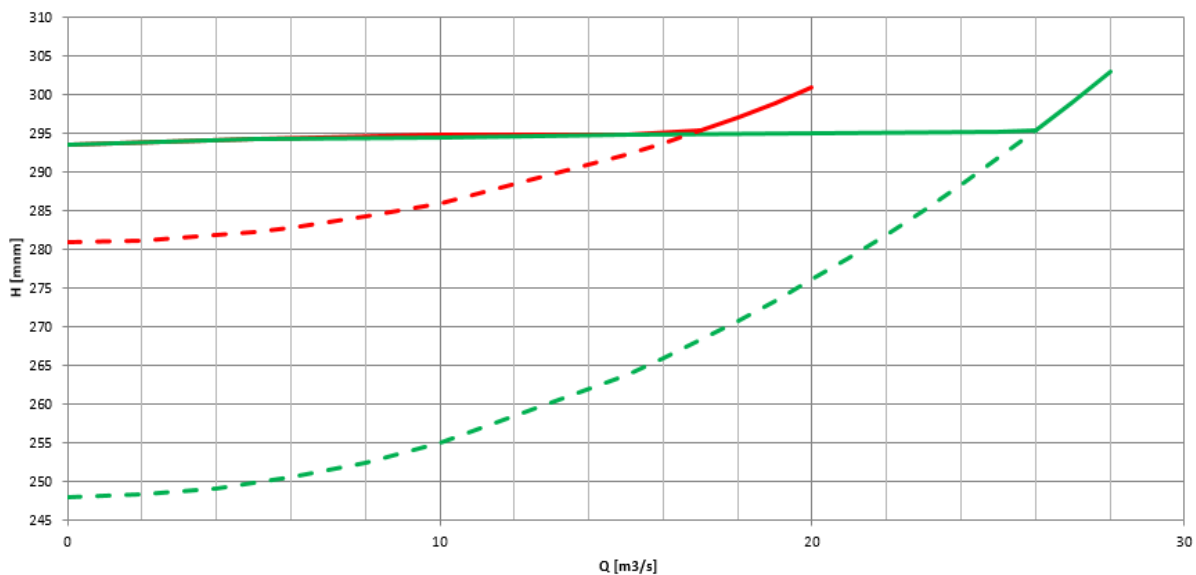
Kota do koje je dozvoljeno da raste nivo vode jeste kota transportne trake, koja se nalazi na 301mnnv. Ukoliko naiđe talas koji prevazilazi ovaj nivo, količina vode koja bi potopila transportnu traku, onespobila bi rad trake i prelila bi se u kop.

Na Slici 6 prikazan je podužni profil sistema sa naznačenim novim delom kolektora ispod „nultog polja“. Za označeni deo kolektora je potrebno naći najbolje rešenje u pogledu prečnika kolektora. Nizvodno od ovog dela kolektora je postojeći kolektor ispod polja 1 i 2, dok je uzvodno zadat otvoreni tok Kriveljske reke.



Slika 6 – Podužni profil celog sistema sa naznačenim delom kolektora ispod „Nultog polja“

Figure 6 –Longitudinal profile of the whole system with indicated sector under „Nulto polje“



Slika 7 – Dijagram zavisnosti nivoa vode u najuzvodnijem čvoru kolektora od zadatog proticaja u reci Krivelj

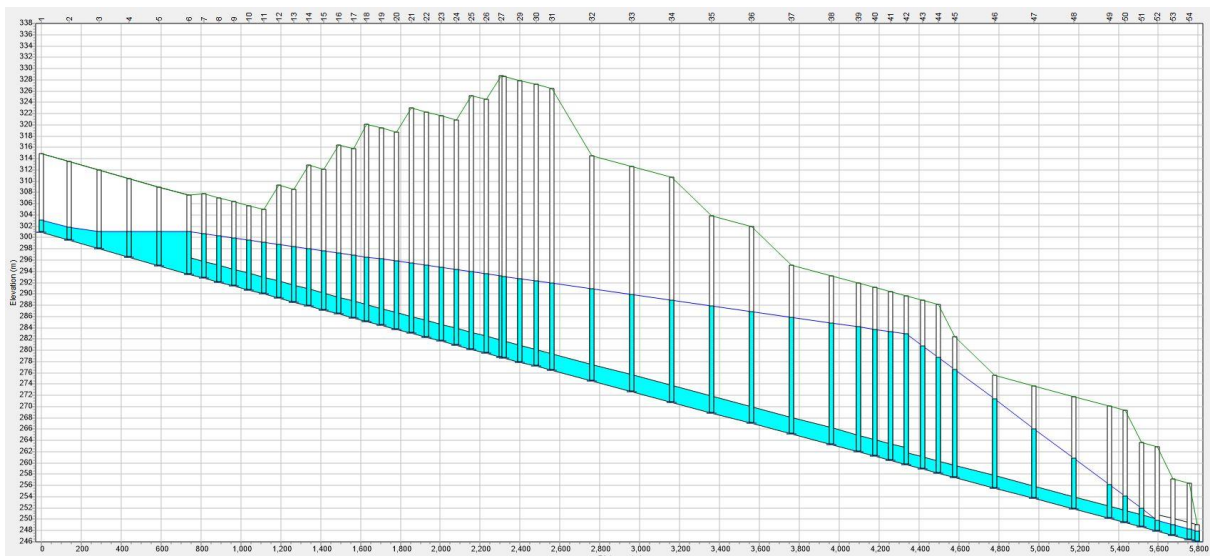
Figure 7 - Diagram of water level in the most upstream chamber dependance in the Krivelj river flow

Kod analize uspora uzvodno od kolektora u funkciji prečnika, do rezultata se dolazi primenom simulacije na zadanom modelu za različite ustaljene proticaje u reci. Dijagram zavisnosti nivoa vode u najuzvodnijem čvoru zatvorenog kolektora od proticaja u Kriveljskoj reci prikazan je na Slici 7. I ovde su vidljive različite krive proticaja za tečenje sa slobodnom površinom i za tečenje pod pritiskom. Za razliku od Slike 3, kvadratne parabole za dva analizirana slučaja nemaju teme na istoj visini. Za slučaj kada je prečnik kolektora ispod „Polja 0”, jednak 2,2 m, teme parabole je na koti 281 mnv, jer se u postojećem tunelu (prečnika 3,0 m), ostvaruje tečenje sa slobodnom površinom.

Maksimalni protok koji prolazi kroz sistem sa većim prečnikom ispod „Nultog polja“ je 27 m<sup>3</sup>/s dok se u drugom slučaju on smanjuje za oko 33 % i iznosi 17 m<sup>3</sup>/s. Deo novog kolektora manjeg prečnika dodatno umanjuje postojeći kapacitet sistema, pa se protok koji može proći kroz sistem smanjuje za 28%. Ako bi prihvatilo da je jedan od osnovnih uslova pri projektovanju novog dela kolektora taj da se postojeći kapacitet sistema ne smanjuje, može se zaključiti da kolektor manjeg prečnika ovaj uslov ne ispunjava.

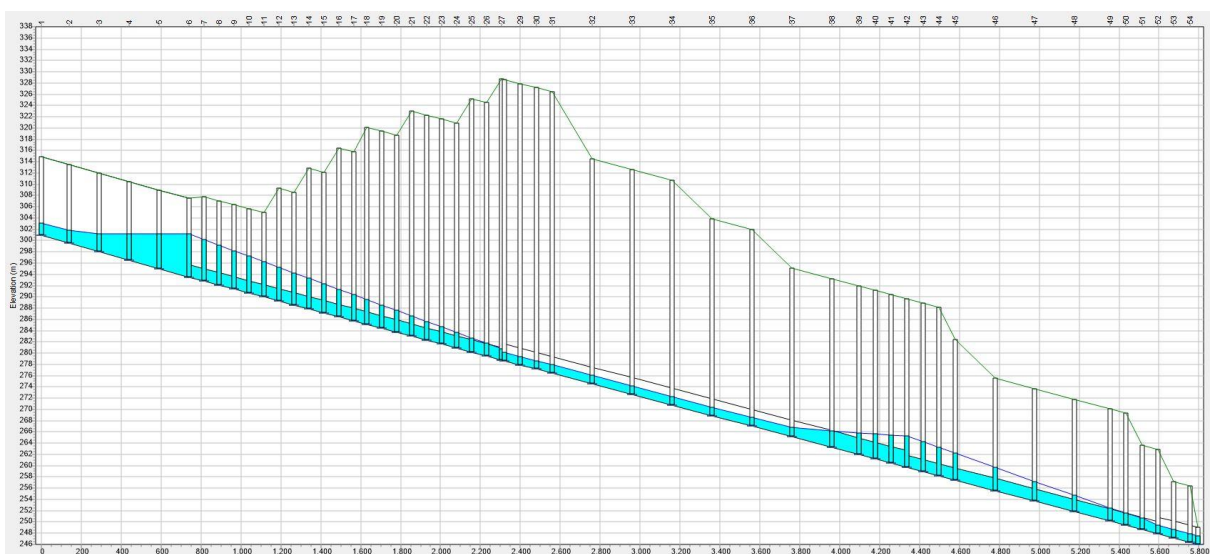
Poduzni profili, prikazani na Slici 8 (za kolektor prečnika 3,0 m) i Slici 9 (za kolektor prečnika 2,2 m), prikazuju stanje u celom sistemu u trenutku dostizanja maksimalnog dozvoljenog nivoa uzvodno od ulaza u kolektor ispod „Polja 0”, koji odgovara koti transportne trake, 301,5 mnv. Ukoliko se kolektor ispod „Nultog polja“ izvede sa većim prečnikom, u celom sistemu dolazi do tečenja u punom profilu, izuzev dela kolektora nizvodno od saniranog dela kolektora, na dužini od 200 m. Samim tim, mogući kapacitet sistema je dostignut i nema opasnosti zbog zarobljenog vazduha u sistemu, kao u slučaju sistema sa manjim prečnikom kolektora ispod „Polja 0”.

U slučaju manjeg prečnika novog dela kolektora nije iskorišćen maksimalni kapacitet sistema. U prvom delu kolektora dolazi do tečenja pod pritiskom. Međutim, na prelazu sa manjeg prečnika na novom delu kolektora na veći prečnik postojećeg kolektora, dolazi do prelaska iz tečenja pod pritiskom u tečenje sa slobodnom površinom.



Slika 8 – Podužni profil sistema u trenutku kada nivo vode u najuzvodnijem čvoru dostiže kotu transportne trake za slučaj novog dela kolektora prečnika 3,0m

Figure 8 – Longitudinal section at the moment when water elevation in the most upstream node is the same like conveyor elevation for collector diameter 3,0m



Slika 9 – Podužni profil sistema u trenutku kada nivo vode u najuzvodnijem čvoru dostiže kotu transportne trake za slučaj prečnika kolektora ispod „Polja 0“ od 2,2m.

Figure 9 – Longitudinal section at the moment when water elevation in the most upstream node is the same like conveyor elevation for collector under „Polje 0“ diameter 2,2m

## 4 Merenje proticaja

Kao veliki problem javlja se nedovoljno informacija o proticaju Kriveljske reke i ne postojanje kontinualnog merenja proticaja u sistemu. Odredjivanje proticaja je moguće ostvariti merenjem jedne dubine (nivoa), ukoliko se ostvari jednoznačna veza između dubine i proticaja vode. U hidrauličkim analizama neustaljenog tečenja derivacije Kriveljske reke, uočeno je da ovakva veza nije postignuta, zbog velikog histerezisa koji izaziva promena režima tečenja, prelazak tečenja sa slobodnom

površinom pod pritisak i obrnuto. Ulazna građevina u kolektor treba da bude takva da se obezbedi tečenje pod pritiskom u kolektoru, odnosno iskorišćenje maksimalnog kapaciteta kolektora, bez uvlačenja vazduha i bez pojave zarobljenog vazduha.

Najbolji način za uspostavljanje jednoznačne veze je izgradnja širokog praga, ili suženja, na delu otvorenog toka, najbolje, uzvodno od naselja Veliki Krivelj. Široki prag je relativno kratka deonica kanala na kojoj se ostvaruje tečenje sa minimumom energije a dovoljno dugačka da bude zadovoljena pretpostavka o hidrostatičkoj raspodeli pritiska barem na jednom delu. Na pragu se ostvaruje jednoznačna veza proticaja i dubine i on predstavlja kontrolni presek sve dok se na njemu javlja kritična dubina. Kada nizvodni nivo poraste toliko da dubina na prgu počne da se menja, tečenje na pragu je „potopljeno“. Za dalje povećanje nizvodnog nivoa ne važi jednoznačna veza proticaja i dubine u mernom preseku.

Proširenje jalovišta Veliki Krivelj na uzvodnoj strani („Nultog polje“) je jedinstvena prilika da se u sklopu planiranih radova napravi i stabilni objekat za merenje protoka i da se konačno predje sa hipotetičkih podataka na realne, koji bi povećali pouzdanost sa kojom se radi projektno – tehnička dokumentacija

## 5 Zaključak

U okviru izrade Tehničkog rudarskog projekta Proširenja flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj, otvaranjem „Nultog polja“, u rečnoj dolini Kriveljske reke, uzvodno od postojeće brane, 1A, i „Polja 1“, jedna od ključnih aktivnosti je hidraulička analiza evakuacije velikih voda Kriveljske reke i njenih pritoka, Borske reke i Saraka potoka, kroz novi kolektor, dužine oko 1600m, koji treba povezati na postojeći kolektor.

Iako je flotacijsko jalovište Veliki Krivelj u eksploataciji preko 35 godina i ispod njega, kroz kolektor dužine 3570m, prolazi Kriveljska reka, ne postoje nikakva merenja proticaja na osnovu kojih bi se mogli odrediti merodavni proticaji za dimenzionisanje, odnosno, proveriti validnost usvojenih merodavnih proticaja. Nažalost, nema ni merenja padavina na slivu Kriveljske reke.

Nekoliko godina posle izgradnje betonskog kolektora, unutrašnjeg prečnika 3,0m, došlo je do havarije, do deformacija i pucanja kolektora ispod brane 3. „Sanacijom“, kojom su sprečene dalje deformacije i pucanje kolektora, smanjen je unutrašnji prečnik kolektora, sa 3,0m, na 2,2m, na dužini od oko 1200m. To je navelo Projektanta proširenja flotacijskog jalovišta da, u cilju smanjenja troškova, predloži da i novi kolektor, ispod „Nultog polja“, ima iste dimenzije, 2,2 m. Zbog ne postojanja objektivne procene hidrauličkih efekata „sanacije“, prvi korak u hidrauličkoj analizi je bio da se to utvrdi. Rezultati su pokazali da, iako se „sanacija“ smatra velikim uspehom, ona je trajno smanjila propusnu moć kolektora i to, sa 40 m<sup>3</sup>/s, na 25 m<sup>3</sup>/s, odnosno, na oko 61%. Zahvaljujući retenzionom prostoru koji je postojao ispred „Polja 1“, kroz projektovanu derivaciju Kriveljske reke (tunel + kolektor, prečnik 3,0 m), bilo je moguće bezbedno evakuisati hidrogram povratnog perioda oko 200 godina, a izvršenom sanacijom i smanjenjem prečnika na delu kolektora na 2,2 m, kapacitet je smanjen na hidrogram povratnog perioda od 50 godina.

U nedostatku jasno definisanih kriterijuma za dimenzionisanje derivacija vodotoka u zoni jalovišta, autori ovog rada su prihvatili da je osnovni (minimalni) kriterijum za usvajanje dimenzija novog kolektora ispod „Polja 0“, da se ne pogorša postojeće stanje. Prostor u kom je traženo rešenje nalazi se između prečnika 3,0 m, i 2,2 m.

Na osnovu rezultata preliminarnih analiza i sprovedenih proračuna korišćenjem programskog paketa SWMM, ne dvosmisleno je utvrđeno da prečnik kolektora od 2,2 m, dalje smanjuje propusnu moć, na 17 m<sup>3</sup>/s, a da za usvojeni prečnik od 3,0 m, dolazi i do povećanja propusne moći u odnosu na postojeće stanje. Na žalost, kada se uspostavi „Polje 0“, retenzioni prostor ispred ulaza u kolektor praktično neće postojati. Kolektor koji ima prečnik 3m može da evakuše 1,5 miliona kubika, dok kolektor, prečnika 2,2 m, može da evakuše oko 0,8 miliona kubika.

Jedan od važnijih zaključaka je i da odsustvo kontinualnog merenja proticaja (i padavina) predstavlja veliki problem. Zbog specifičnosti tečenja kroz kolektor, koje može biti sa slobodnom

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

površinom i pod pritiskom, zavisnost nivoa na ulazu u kolektor i proticaja ("kriva proticaja", na Slici 6) nije jednoznačna, pa se predlaže uspostavljanje stalnog mernog mesta sa minimumom specifične energije, uzvodno od naselja Veliki Krivelj, dovoljno daleko da ne bude pod uticajem uspora koji izaziva tečenje pod pritiskom u kolektoru.

## Literatura

1. Ivetić M. (1996) Računska hidraulika, Tečenje u cevima, Građevinski fakultet, Beograd.
2. Ivetić M. (2000) Računska hidraulika, Otvoreni tokovi, Građevinski fakultet, Beograd.
3. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2015) Studija zaštite eksploatacionih polja Veliki Krivelj i Cerovo i naselja Veliki Krivelj od površinskih voda i obezbeđivanje potrebnih količina tehničke vode za rudnik bakra Cerovo.
4. Ivetić M. (2016) Preliminarna analiza propusne moći kolektora jalovišta Veliki Krivelj. IHVEI GF.
5. Kapor R., (2011) Hidraulika, Građevinski fakultet, Beograd.
6. Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.1
7. Mijić A., (2006) Primena programskog paketa SWMM za modeliranje oticaja sa urbanih slivova
8. Vasilčić Ž., (2015) Materijal sa uputstvima za korišćenje softverskog paketa SWMM

## Меродавни хидродинамички утицаји на бочне зидове слапишта

Бојан Миловановић<sup>1</sup>, Владан Кузмановић<sup>2</sup>, Љубодраг Савић<sup>3</sup>, Предраг Војт<sup>4</sup>,  
Будо Зиндовић<sup>5</sup>

САЖЕТАК: У раду се приказују меродавни хидродинамички утицаји на зидове слапишта, добијени на основу мерења притисака у изабраним тачкама на физичком моделу. Ово је прво објављено истраживање у коме се предлажу изрази за процену утицаја на зидове слапишта. За различите протоке, димензије степеника степенастог брзотока и потољности хидрауличног скока, извршена су мерења на великом броју мерних места, тако да је добијена поуздана расподела хидродинамичког оптерећења, а тиме и поуздана процена утицаја.

Кључне речи: слапиште, хидродинамичко оптерећење, пулзације притисака

## Hydrodynamic loads on the wall of stilling basin

ABSTRACT: This paper analyzes the hydrodynamic loads acting on the wall of a stilling basin, based on the pressure measurements at the selected points of a scale model. This is the first published research where expressions for assessing the load on the wall have been proposed. For different flow discharges, step heights and hydraulic jump submergence, the hydrodynamic pressures were measured at a large number of points, providing the reliable distribution of hydrodynamic loads.

Keywords: stilling basin, hydrodynamic load, pressures fluctuations

---

<sup>1</sup> Бојан Миловановић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [bojanmil@mts.rs](mailto:bojanmil@mts.rs)

<sup>2</sup> Проф. др Владан Кузмановић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [vladak@grf.bg.ac.rs](mailto:vladak@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Проф. др Љубодраг Савић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [ljdsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljdsavic@grf.bg.ac.rs)

<sup>4</sup> Предраг Војт, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Пиносава-Београд, [predrag.vojt@jcerni.co.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.co.rs)

<sup>5</sup> Будо Зиндовић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs](mailto:bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs)

## 1 Увод

Најчешће коришћен тип умиривача енергије код брана са степенастим брзотоком је умирујући базен (слапиште). У њему се јавља вртложни ваљак хидрауличког скока у коме долази до великог расипања кинетичке енергије тока. Последица овако снажног вртложног кретања је појава флукуација (пулзација) притисака, које представљају значајна оптерећења на бочне зидове базена.

Неопходно је обезбедити да се зидови слапишта могу супротставити флукуационим оптерећењима, због чега се ови утицаји морају узети у обзир при конструктивном обликовању и димензионисању.

У раду се анализирају хидродинамичка оптерећења која делују на бочне зидове базена за различите протоке, дубине доње воде, димензије степеника и степене сужења степенастог брзотока којим вода долази у слапиште.

## 2 Димензиона анализа

Утицаји који се јављају у умирујућем базену зависе од великог броја величина. На основу спроведене димензионе анализе [3], добија се веза утицаја (сила или моменат) од релевантних бездимензионих величина:

$$Y' = f\left(\frac{h_C}{h_1}, \theta, \Omega_{II}, Fr_1\right), \quad (1)$$

односно уз увођење релативне "храпавости" брзотока,  $\chi_p$ :

$$Y' = f(\chi_p, \theta, \Omega_{II}, Fr_1). \quad (2)$$

У једначини (2) први, други и четврти члан описују течење на брзотоку, односно представљају узводне услове, а трећи члан описује доњу воду односно низводни услов. На основу тога следи да се утицаји (силе и моменти) на конструктивне елементе умирујућег базена, могу анализирати помоћу патраметара: "храпавости" брзотока,  $\chi_p$ , угла сужења брзотока,  $\theta$ , Фрудовог броја,  $Fr_1$  и потопљености хидрауличког скока,  $\Omega_{II}$ .

## 3 Опис физичког модела

За испитивање хидродинамичких притисака у умирујућем базену коришћен је физички модел (слика 1) детаљно описан у [3].

## 4 Мерења на физичком моделу

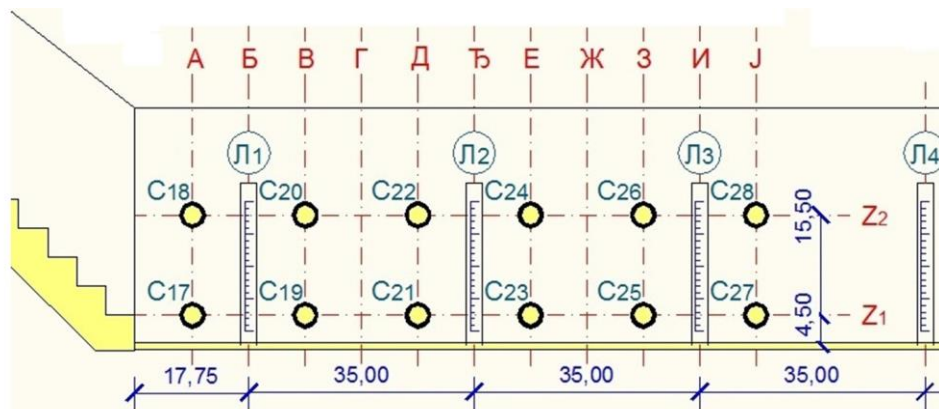
Програм испитивања на моделу обухватио је мерења и анализу карактеристичних величина ради што бољег сагледавања сложених услова течења. Притисци на моделу мерени су на узводном делу десног зида умирујућег базена у дужини од 105 cm. За потребе ових мерења формирано је 12 мерних места (слика 2) [2].





Слика 1. Физички модел за испитивање хидродинамичких притисака

Figure 1. Physical model for hydrodynamic pressures studying



Слика 2. Мерна места на физичком моделу

Figure 2. Measuring points on physical model

Притисци су мерени за сваку геометријску диспозицију, 4 различита степена сужења брзотока (ознака 0,1,2 и 3), са мањим и већим степеницима (ознака  $M$  и  $V$ ), три различита протока  $Q_1 = 20$  l/s,  $Q_2 = 40$  l/s и  $Q_3 = 60$  l/s (ознака 20, 40 и 60) и различитим дубинама доње воде (ознака је дубина доње воде у cm), односно различитим потољеностима хидрауличког скока.

За мерење притиска коришћене су сонде за притисак произвођача „DRUCK“, са тачношћу од  $\pm 0,1$  %. Предходним анализама које су спроведене на резултатима узорковања утврђено је оптимално трајање мерења од 120 секунди, и учесталост узорковања од 200 Hz. За синхрону аквизицију података коришћени су аквизициони уређаји „HBM Quantumx“.

## 5 Теоријске основе за процену хидродинамичког оптерећења

Тренутна вредност притиска,  $p$ , у некој тачки може се приказати као збир средње вредности притиска,  $\bar{p}$ , и вредности флукуационог одступања,  $p'$ :

$$p = \bar{p} + p' \quad (3)$$

Просечна вредност притиска  $\bar{p}$  дефинише се као:

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt, \quad (4)$$

где је Т укупно време посматрања.

За димензионисања зидова умирујућег базена, потребно је одредити екстремне утицаје у уклештењу, екстремну смичућу силу (по дужном метру):

$$H_i = \int_0^{h_i} p_i(z) \cdot dz = \int_0^{h_i} \bar{p}_i(z) \cdot dz + \int_0^{h_i} p'_i(z) \cdot dz = \bar{H}_i + H'_i \quad (5)$$

и екстремни моменат (по дужном метру):

$$M_i = \int_0^{h_i} p_i(z) \cdot z \cdot dz = \int_0^{h_i} \bar{p}_i(z) \cdot z \cdot dz + \int_0^{h_i} p'_i(z) \cdot z \cdot dz = \bar{M}_i + M'_i \quad (6)$$

који се јављају у било ком од његових попречних пресека  $i$  ( $h_i$  је висина зида). Утицаји су раздвојени на утицаје, услед средњег притиска  $\bar{H}_i$  и  $\bar{M}_i$ , и услед флукуација притиска  $H'_i$  и  $M'_i$ . Како флукуационо оптерећење карактерише неједновремена појава екстремних утицаја, то је захтевало посматрање одговарајућих утицаја у уклештењу, за све попречне пресеке са мерним сондама, при сваком узорковању притисака. На тај начин су добијени низови података смичућих сила  $H'_{i,j}$  и момената у уклештењу  $M'_{i,j}$  по попречним пресецима  $i$  у тренутку узорковања  $j$ .

Сортирањем добијених низова вредности смичућих сила  $H_{i,j}$  и момената у уклештењу  $M_{i,j}$ , за сваки од посматраних попречних пресека  $i$ , одређене су граничне вредности  $H'_{i,max}$  и  $M'_{i,max}$ , које су веће од 99,9 % чланова низа, што значи да ће овако добијени екстремни утицај бити надмашен само током 0,1 % времена. За димензионисање зида базена узимају се утицаји добијени у најоптерећенијем пресеку.

## 6 Резултати мерења

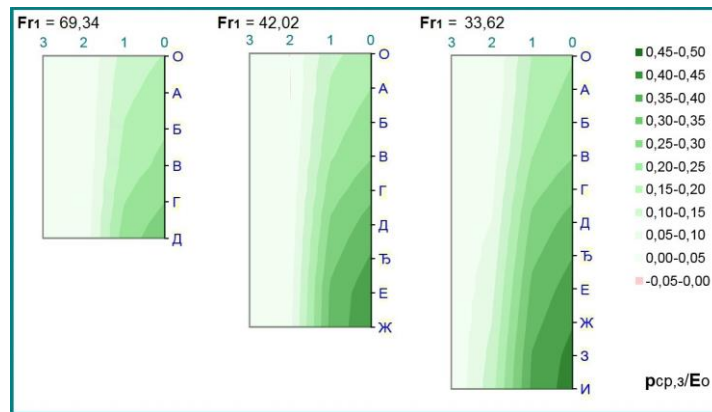
Мерењима су регистровани средњи притисци и флукуације притисака на зиду слапишта, за различите степене сужења и висине степеника на брзотоку, усвојене протоке (Фрудове бројеве) и нивое доње воде (потопљености хидрауличног скока). Измерене вредности су статистички обрађене и приказане као бездимензиони однос измереног притиска (висина воденог стуба), и релативе енергетске коте (у односу на дно базена) на улазу у умирујући базен.

Да би се стекао утисак о прерасподели притисака при варијацији параметара одређених димензионом анализом, изабрани су добијени дијаграми при промени једног од параметара, док су остали држани константним.

Варирањем протока, односно Фрудовог броја на улазу у умирујући базен, уочава се да је потребна већа дубина доње воде како би се потопљеност хидрауличног скока одржавала константном. Последица тога је већа дужина умирујућег базена.

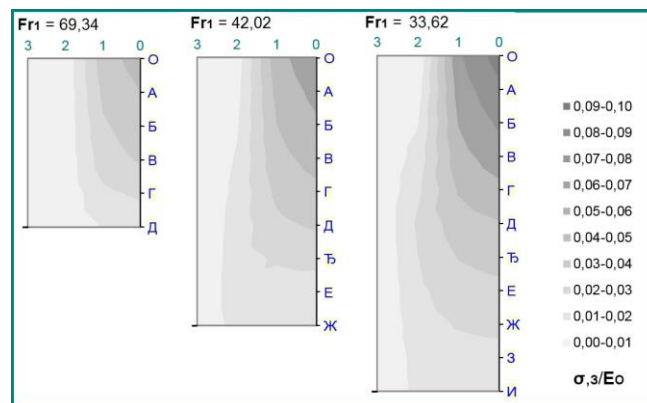
Пресек зида базена који је максимално оптерећен средњим притиском се налази на излазу из базена (слика 3). Прерасподела средњих притисака услед промене протока (Фрудовог броја  $Fr_l$ ) је слабо изражена.

Флукуациони притисци у базену су знатно мањи од средњих притисака, а њихове максималне вредности се јављају на различитим местима. Максималне вредности флукуационих притисака на зиду измерене су у близини суженог пресека и износиле су око 20%, максималних средњих притисака на крају умирујућег базена (слика 4).



Слика 3. Промена средњих притисака на зиду базена при промени протока (Фрудовог броја)

Figure 3. Change of average pressures on the wall of stilling basin when changing the flow discharges ( $Fr_1$ )

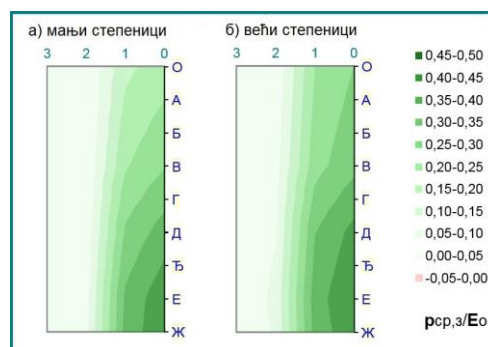


Слика 4. Промена пулзација на зиду базена при промени протока (Фрудовог броја)

Figure 4. Change of pulsations on the wall of stilling basin when changing the flow discharges ( $Fr_1$ )

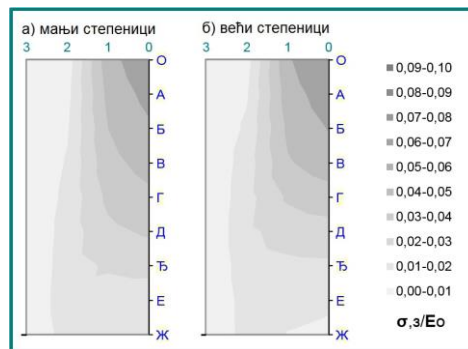
Варирањем висине степеника на брзотоку, смањена је енергија којом вода улази у умирујући базен. Такође извршено је веће преусмерење правца тока. Ток је мирнији па су средњи притисци повећани а флукуациони смањени код већих, у односу на мање степенике.

Средњи притисци на зид, са повећањем степеника на брзотоку, брже расту дуж умирујућег базена (слика 5) док је код флукуационих притисака забележен благи пораст испред суженог пресека (слика б).



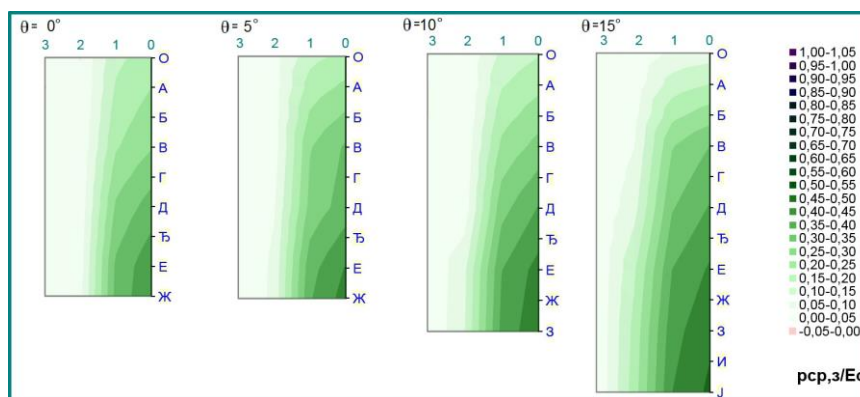
Слика 5. Промена средњих притисака на зид базена при промени величине степеника

Figure 5. Change of average pressures on the wall of stilling basin when changing the step heights



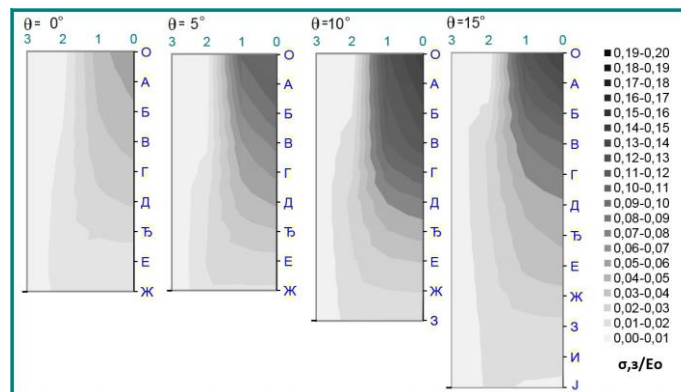
Слика 6. Промена пулзација на зид базена при промени величине степеника

Figure 6. Change of pulsations on the wall of stilling basin when changing the step heights



Слика 7. Промена средњих притисака на зид базена при промени степена сужења брзотока

Figure 7. Change of average pressures on the wall of stilling basin when changing the narrowing of spillway



Слика 8. Промена пулзација на зид базена при промени степена сужења брзотока

Figure 8. Change of pulsations on the wall of stilling basin when changing the narrowing of spillway

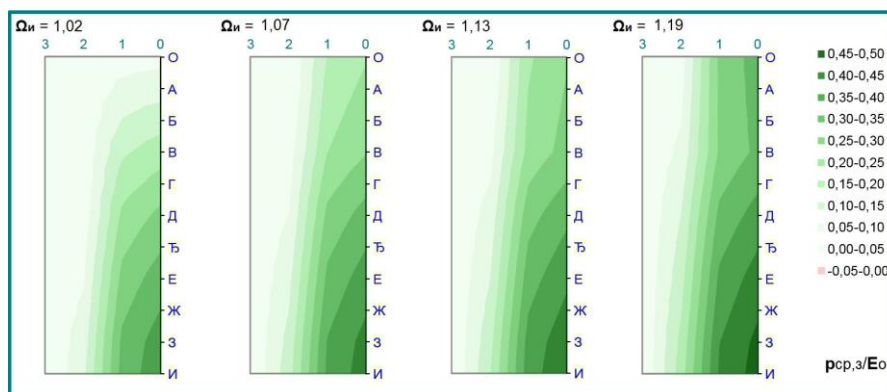
При промени степена сужења брзотока, сужава се и умирујући базен. Услед тога долази до значајних промена течења унутар базена, при чему расподела средњих притисака зависи од положаја суженог пресека и мења се углавном са узводне стране, док низводно ови притисци униформно расту пратећи линију нивоа (слика 7).

Пулзације на зиду умирујућег базена уочљиво расту са повећањем степена сужења брзотока, тако да се на узводном делу умирујућег базена оне по интензитету могу изједначити са средњим притисцима (слике 7 и 8). Превелико сужење брзотока би могло да има за последицу и појаву подпритисака на самом почетку умирујућег базена.

Потопљеност хидрауличког скока је једини низводни параметар који утиче на оптерећења у умирујућем базену. Он значајно утиче како на средње притиске, тако и на

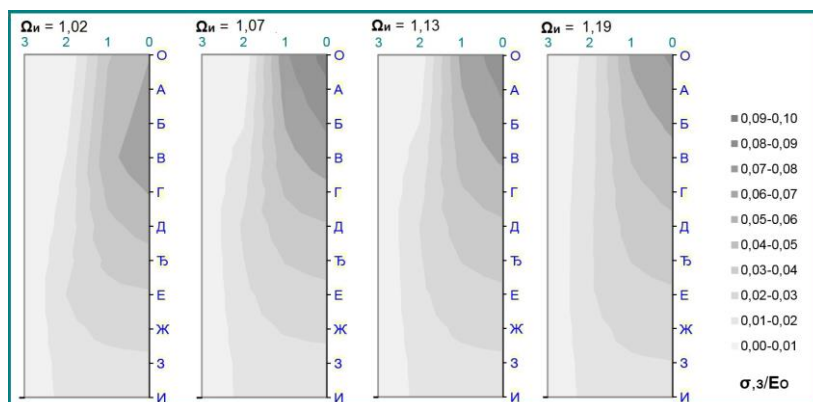
пулзације, првенствено на део низводно од суженог пресека, који је и доминантан део умирујућег базена.

Средњи притисци на зид умирујућег базена, расту са порастом потопљености хидрауличког скока, што је последица повећања дубине доње воде (слика 9). Пресек са максималним пулзацијама прати сужени пресек, без веће промене њихове величине (слика 10).



Слика 9. Промена средњих притисака на зид базена при промени потопљености скока

Figure 9. Change of average pressures on the wall of stilling basin when changing the jump submergence



Слика 10. Промена пулзација на зид базена при промени потопљености скока

Figure 10. Change of pulsations on the wall of stilling basin when changing the jump submergence

## 7 Меродавни утицаји

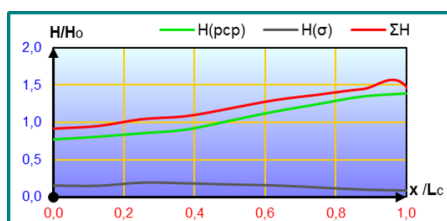
При димензионисању зидова умирујућег базена, меродавни су хоризонтална сила, и моменат (по дужном метру) у уклештењу зида за најоптерећеније попречне пресеке [2].

Да би се проценили ови утицаји посматране су функције хоризонталне силе и момента сила као бездимензионе величине у односу на одговарајуће утицаје када је базен напуњен доњом водом (слике 11 и 12):

$$H' = \frac{H}{H_0} = \frac{2 \cdot H}{h_{дв}^2 \cdot \gamma_w}, \quad (7)$$

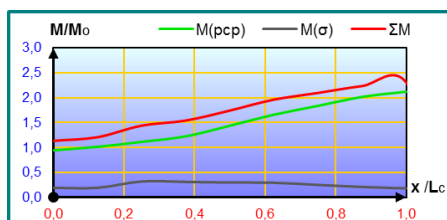
$$M' = \frac{M}{M_0} = \frac{6 \cdot M}{h_{дв}^3 \cdot \gamma_w}, \quad (8)$$

где је  $h_{дв}$  дубина воде у слапишту које је напуњено доњом водом.



Слика 11. Промена хоризонталне силе у уклештењу зида дуж умирујућег базена

Figure 11. Change of horizontal force at the bottom of wall along of stilling basin



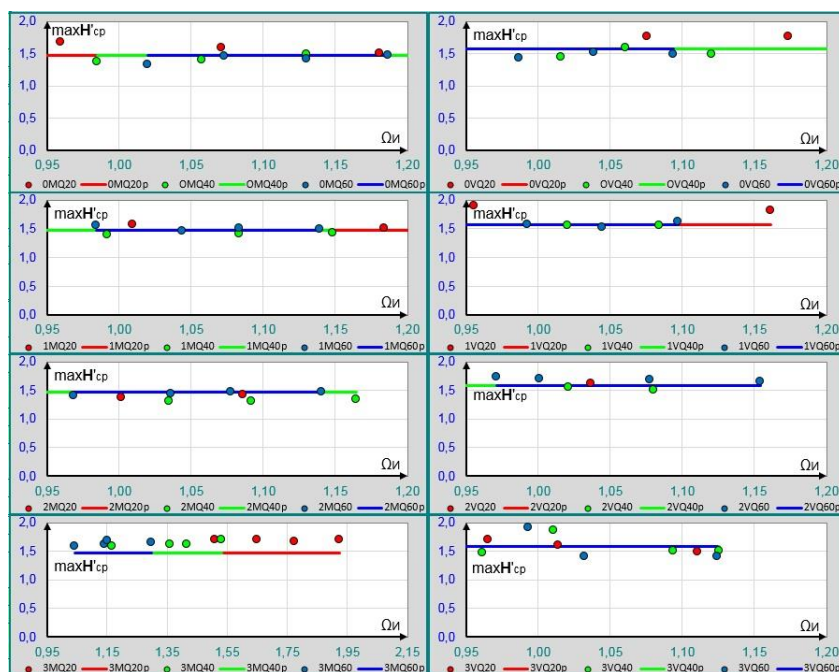
Слика 12. Промена момента у клештењу зида дуж умирујућег базена

Figure 12. Change of moment at the bottom of wall along of stilling basin

У свим посматраним експериментима, максимални утицаји од средњих притисака су се налазили на крају умирујућег базена, а од пулзација у суженом пресеку. Вредности максималних хоризонталних сила у уклештењу зида (слике 13 и 14), су износиле:

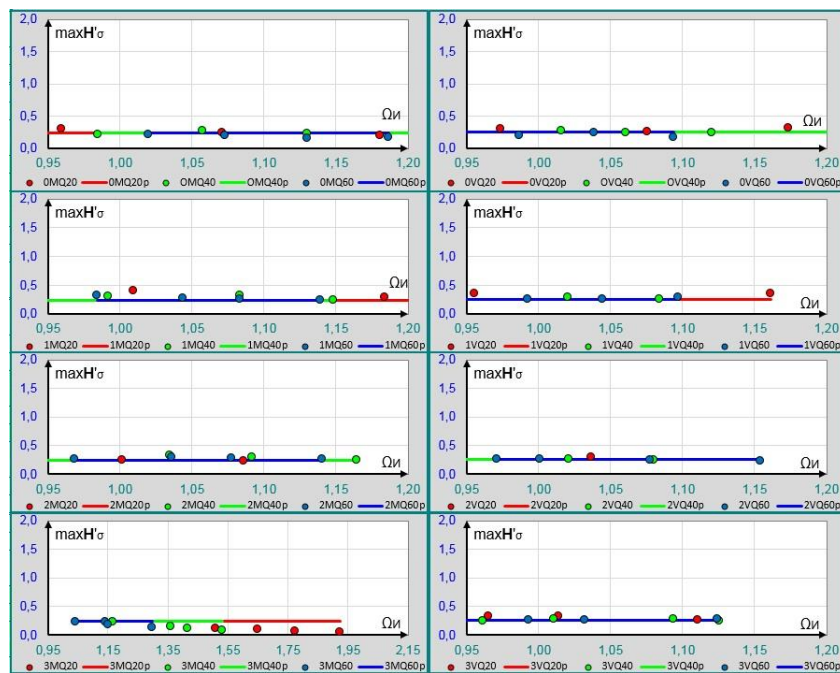
$$\max H'_{cp} = 1,3 \div 1,8, \quad (9)$$

$$\max H'_{\sigma} < 0,5. \quad (10)$$



Слика 13. Максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед средњих притисака

Figure 13. Maximum horizontal forces at the bottom of wall along of stilling basin due to average pressures



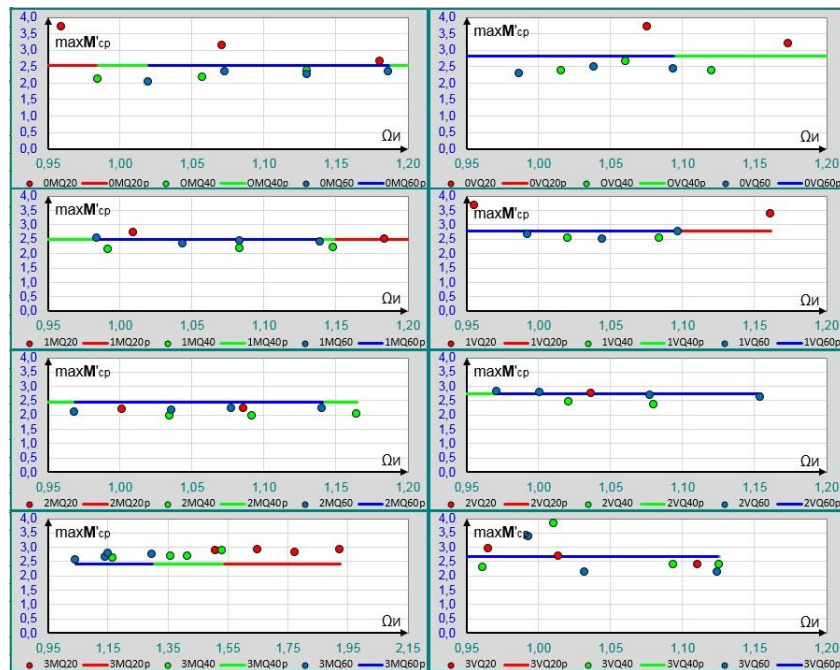
Слика 14. Максималне хоризонталне силе у уклештењу зида услед пулзација

Figure 14. Maximum horizontal forces at the bottom of wall along of stilling basin due to pulsations

Максималних момената у уклештењу зида (слика 15 и 16) су имали вредности:

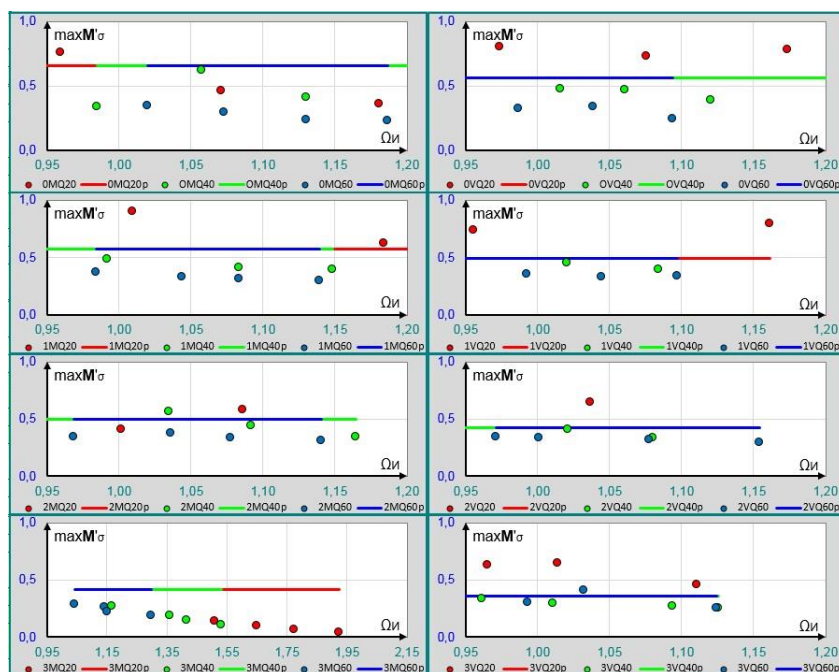
$$\max M'_{cp} = 2 \div 4, \quad (11)$$

$$\max M'_\sigma < 0,8. \quad (12)$$



Слика 15. Максимални моменти у уклештењу зида услед средњих притисака

Figure 15. Maximum moments at the bottom of wall along of stilling basin due to average pressures



Слика 16. Максимални momenti у уклештењу зида услед пулзација

Figure 16. Maximum moments at the bottom of wall along of stilling basin due to pulsations

Регресионом анализом су добијени су емпиријски изрази за процену максималних утицаја у уклештењу зида умирујућег базена. Занемаривањем утицаја при промени Фрудовог броја, добијена је грешка регресије од око 10%.

**Хоризонтална сила од средњих притисака** на домену  $\Omega_H = (1,0 \div 1,4)$  и  $Fr_I = (20 \div 50)$ :

$$\max H'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi o}, \quad (13)$$

где су:

$$C_o = 1,524 \quad (14)$$

$$C_{\chi o} = 1 + 0,070 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}. \quad (15)$$

**Хоризонтална сила од пулзација** на домену:  $\Omega_H = (1,0 \div 1,4)$  и  $Fr_I = (20 \div 50)$ :

$$\max H'_{\sigma} = C_o \cdot C_{\chi o}, \quad (16)$$

где су:

$$C_o = 0,248, \quad (17)$$

$$C_{\chi o} = 1 + 0,066 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}. \quad (18)$$

**Моменат од средњих притисака** на домену  $\Omega_H = (1,0 \div 1,4)$  и  $Fr_I = (20 \div 50)$ :

$$\max M'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o}, \quad (19)$$

где су:



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

$$C_o = 2,498, \quad (20)$$

$$C_{\chi o} = 1 + 0,115 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18}, \quad (21)$$

$$C_{\theta o} = 1 - 0,017 \cdot \frac{(\theta - 5)}{5}. \quad (22)$$

**Моменат од пулзација** на домену  $\Omega_{II} = (1,0 \div 1,4)$  и  $Fr_I = (20 \div 50)$ :

$$\max M'_\sigma = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o}, \quad (23)$$

где су:

$$C_o = 0,534, \quad (24)$$

$$C_{\chi o} = 1 - 0,155 \cdot \frac{(\chi - 1,5 \cdot 0,18)}{0,18}, \quad (25)$$

$$C_{\theta o} = 1 - 0,139 \cdot \frac{(\theta - 5)}{5}. \quad (26)$$

## 8 Закључци

Предмет истраживања овог рада је умирујући базен иза непризматичног степенастог брзотока. Најважнији циљ је одређивање хидродинамичких утицаја на зид базена. Истраживање је извршено на наменски припремљеној инсталацији у лабораторији Грађевинског факултета у Београду. На основу резултата приказаних у овом раду могу се извести се извести следећи закључци:

1. На расподелу хидродинамичког оптерећења и његов интензитет највећи утицај имају сужење брзотока, висина степеника на брзотоку, потопљеност хидрауличког скока и Фрудов број у суженом пресеку. Процену вредности хидродинамичких утицаја могуће је извести и без познавања Фрудовог броја. У том случају тачност прорачуна је до 10% и важи за потопљености хидрауличког скока у интервалу од  $\Omega_{II} = 1,0 \div 1,4$ .
2. Пулзације притиска у умирујућем базену су најизраженије на почетку хидрауличког скока. Повећање дубине воде у базену значајно пригушује пулзације. Пулзације иза непризматичног брзотока постају интензивније Ова појава је интензивнија при већим сужењима брзотока.
3. Највећи утицаји у уклештењу зида од средњих притисака се јављају на низводном крају умирујућег базена. Утицаји од пулзација у уклештењу зида су највећи на почетку хидрауличког скока.

## Литература

1. Миловановић Б., Зиндовић Б., Војт П., Капор Р., Кузмановић В., Савић Љ. (2015), *Зависност хидродинамичких притисака у слапишту од сужења степенастог брзотока*, 17. саветовање СДХИ и СДХ, Вршац.
2. Миловановић Б. (2018), *Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина*, докторска дисертација, Грађевински факултет, Београд.
3. Миловановић Б. (2018), *Меродавни хидродинамички утицаји на бочне зидове слапишта*, докторска дисертација, 18. саветовање СДХИ и СДХ, Ниш.

## Меродавни хидродинамички утицаји на дно слапишта

Бојан Миловановић<sup>1</sup>, Владан Кузмановић<sup>2</sup>, Љубодраг Савић<sup>3</sup>, Предраг Војт<sup>4</sup>,  
Будо Зиндовић<sup>5</sup>

САЖЕТАК: У раду се приказују меродавни хидродинамички утицаји (вертикалне силе) на плоче дна слапишта степенастих брзотока, добијени на основу мерења притисака у изабраним тачкама на физичком моделу. За различите протоке, димензије степеника степенастог брзотока, и потољности хидрауличког скока, извршена су мерења на великом броју мерних места, тако да је добијена поуздана расподела хидродинамичког оптерећења, а тиме и поуздана процена утицаја.

Кључне речи: слапиште, хидродинамичко оптерећење, пулзације притисака

## Hydrodynamic load on the bottom of stilling basin

ABSTRACT: This paper analyzes the hydrodynamic load acting on the bottom of a stilling basin, based on the pressure measurements at the selected points of a scale model. For different flow discharges, step heights and hydraulic jump submergence, the hydrodynamic pressures were measured at a number of points, providing the reliable distribution of hydrodynamic load.

Keywords: stilling basin, hydrodynamic load, pressures fluctuations

---

<sup>1</sup> Бојан Миловановић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [bojanmil@mts.rs](mailto:bojanmil@mts.rs)

<sup>2</sup> Проф. др Владан Кузмановић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [vladak@grf.bg.ac.rs](mailto:vladak@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Проф. др Љубодраг Савић Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [lidsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:lidsavic@grf.bg.ac.rs)

<sup>4</sup> Предраг Војт, Институт за водопривреду "Јарослав Черни", Пиносава-Београд, [predrag.vojt@jcerni.co.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.co.rs)

<sup>5</sup> Будо Зиндовић, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, [bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs](mailto:bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs)

## 1 Увод

Најчешће коришћен тип умиривача енергије код брана са степенастим брзотоком је умирујући базен (слапиште). У њему се јавља вртложни ваљак хидрауличног скока у коме долази до великог расипања кинетичке енергије тока. Последица снажног вртложног кретања је појава флукуација (пулзација) притисака, што представља значајно оптерећење на дно базена.

При пројектовању слапишта, неопходно је обезбедити да се плоче у дну могу супротставити флукуационим оптерећењима, због чега се ови утицаји морају узети у обзир.

У оквиру овог рада анализирају се хидродинамичка оптерећења која делују на дно базена за различите протоке, дубине доње воде, димензије степеника и степене сужења степенастог брзотока којим вода долази у слапиште.

## 2 Димензиона анализа

Утицаји који се јављају у умирујућем базену зависе од великог броја величина. Једне се односе на геометријске карактеристике разматраног проблема, друге на услове течења, а треће на физичке особине флуида. Геометријски услови су дати преко висине степеника у брзотоку  $h_c$ , као и угла сужења брзотока  $\theta$ . Услови течења у базену су дефинисани, дубином и брзином у суженом пресеку,  $h_1$  и  $v_1$  и дубином доње воде  $h_{дв}$ , односно одговарајућом потопљеношћу хидрауличног скока,  $\Omega_H$ . Величине које карактеришу физичке особине флуида су густина воде,  $\rho_w$ , динамичка вискозност воде,  $\mu_w$ , модул стишљивости воде,  $i_w$ , и површински напон између воде и ваздуха,  $\tau_w$ . Поред тога, у анализу је уврштено и гравитационо убрзање,  $g$ . Када се све наведене величине узму у разматрање, добије се да хидродинамички утицаји у умирујућем базену зависе од следећих димензионалних величина:

$$Y = f(h_c, \theta, h_1, v_1, \Omega_H, \rho_w, \mu_w, i_w, \tau_w, g), \quad (1)$$

где је променљивом "Y" симболички представљен утицај (вертикална сила) на неку од плоча умирујућег базена [2]. Ако се као основне величине усвоје  $h_1$ ,  $v_1$  и  $\rho_w$ , преласком на бездимензионе величине добија се:

$$Y' = f\left(\frac{h_c}{h_1}, \theta, \Omega_H, Re_1, Ca_1, We_1, Fr_1\right) \quad (2)$$

Рејнолдсов,  $Re_1$ , и Кошијев,  $Ca_1$ , број у овом истраживању немају битан утицај, због изразито развијене турбуленције и занемарљиве стишљивости воде. Утицај Веберовог броја,  $We_1$ , иако значајан за течење у умирујућем базену, такође није обухваћен анализом, првенствено због малих концентрација увученог ваздуха уз контуре објекта где су притисци мерени. Због тога једначина (2) практично постаје:

$$Y' = f\left(\frac{h_c}{h_1}, \theta, \Omega_H, Fr_1\right), \quad (3)$$

где први члан једначине на десној страни претставља релативну "храпавост" брзотока, која се може обележити са  $\chi_p$ :

$$Y' = f(\chi_p, \theta, \Omega_H, Fr_1). \quad (4)$$

У једначини (4) први, други и четврти члан описују течење на брзотоку, односно "узводне услове", а трећи члан описује доњу воду односно "низводни услов". На основу тога следи да се утицаји (вертикалне силе) на плоче дна умирујућег базена, могу анализирати

помоћу параметара: "храпавости" брзотока,  $\chi_p$ , угла сужења брзотока,  $\theta$ , Фрудовог броја,  $Fr_l$  и потопљености хидрауличног скока,  $\Omega_H$ .

### 3 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 различитим висинама степеника и степену сужења брзотока [1].



Слика 1. Физички модел за испитивање хидродинамичких притисака

Figure 1. Model for the hydrodynamic preasures study

Моделска испитивања су вршена у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику и водноеколошко инжењерство, који је део Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Физички модел (слика 2) обухвата резервоар, прелив, степенести брзоток и умирујући базен. Капацитет резервоара износи  $4,25 \text{ m}^3$ . На средини резервоара постављен је умирувач, како би се обезбедио равномеран дотицај на прелив. Модел је димензионисан за максималан проток  $100 \text{ l/s}$ , колико је допуштала инсталација у хидрауличкој лабораторији.

Узводни резервоар и слободни прелив практичног профила су непроменљиви делови експерименталне инсталације. Степенести брзоток је током испитивања имао две различите диспозиције висина степеника у брзотоку (слика 2):

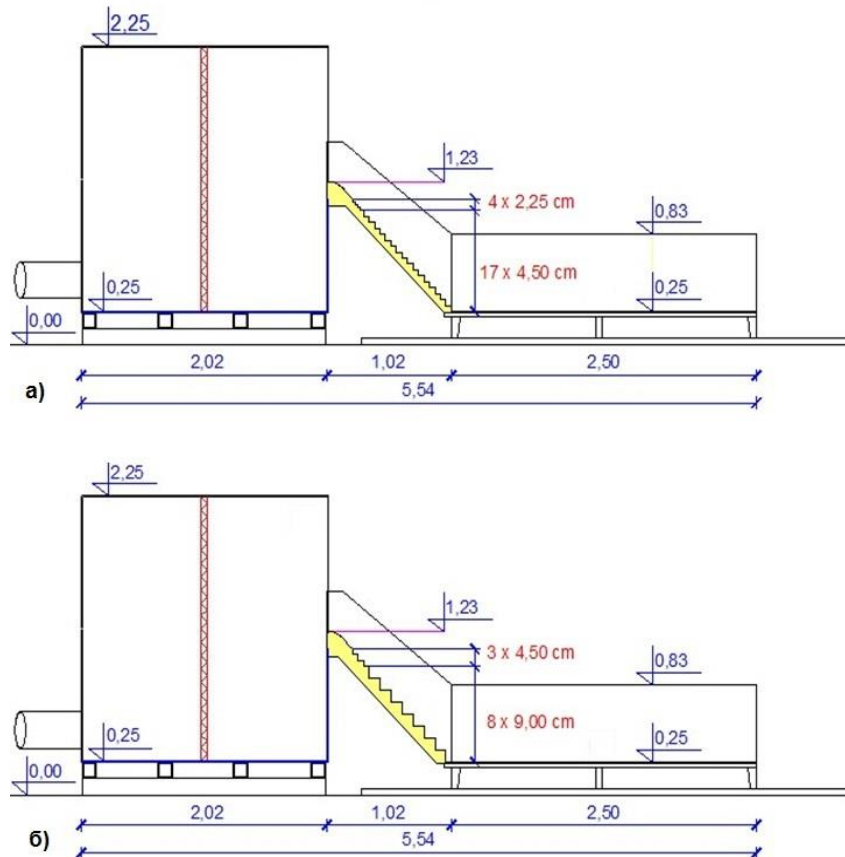
- а. Мањи степеници (4 узводна  $h_{cy} = 2,25 \text{ cm}$  и осталих 17  $h_{cn} = 4,5 \text{ cm}$ )
- б. Већи степеници (3 узводна  $h_{cy} = 4,5 \text{ cm}$  и осталих 8  $h_{cn} = 9 \text{ cm}$ ),

и четири диспозиције са различитим степенима сужења (слика 3):

1. Без сужења (ширина на крају брзотока је  $B_\delta = 98 + 2 \text{ cm}$ )
2. Мали степен сужења ( $B_\delta = 78 + 2 \text{ cm}$ )
3. Средњи степен сужења ( $B_\delta = 58 + 2 \text{ cm}$ )
4. Велики степен сужења ( $B_\delta = 38 + 2 \text{ cm}$ ).

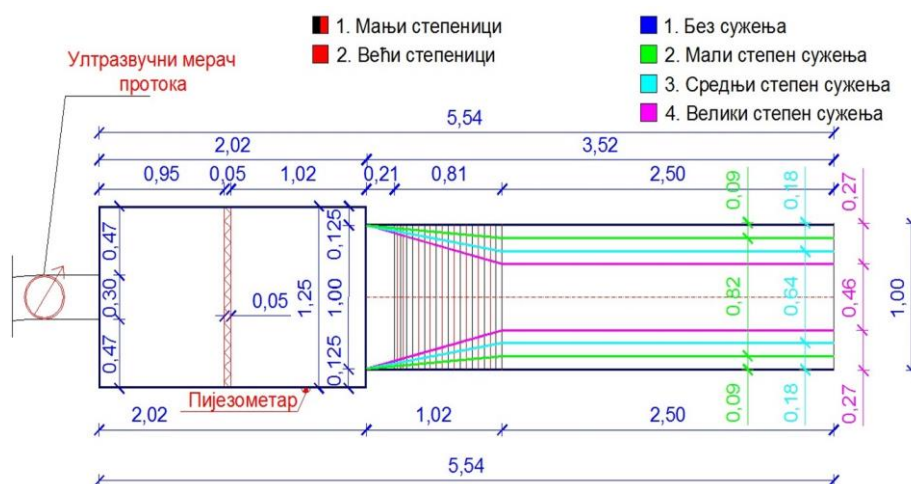
Ове диспозиције су међусобно комбиноване, тако да је укупно разматрано осам различитих диспозиција степенастог брзотока и умирујућег базена. Сагласно са различитим степенима сужења брзотока и умирујући базен је имао четири диспозиције са различитим ширинама (слика 3).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Слика 2. Подужни пресек кроз физички модел, а) мањи степеници, б) већи степеници

Figure 2. Longitudinal section of the scale-model a) small steps, b) large steps



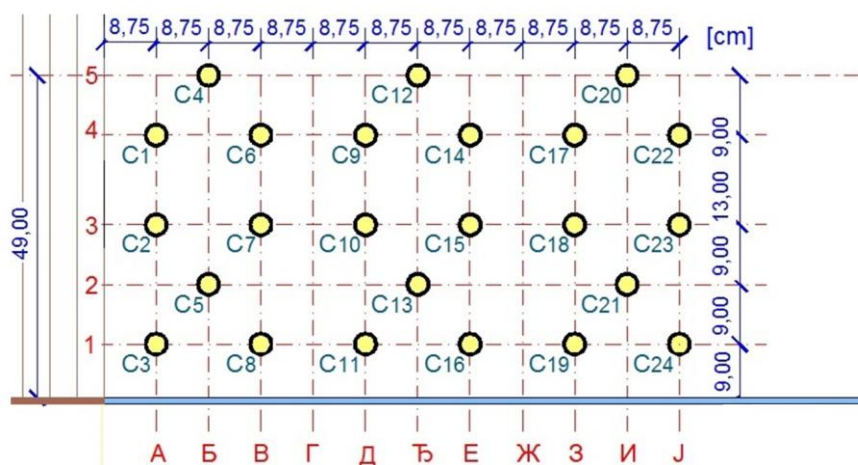
Слика 3. Основа физичког модела

Figure 3. Scale-model layout

Умирујући базен је призматичан, ширине која је једнака ширини низводног краја брзотока. Пуна дужина умирујућег базена је 250 cm, али су утицаји рачунати на узводном делу, дужине једнаке 5 других спрегнутих дубина при одговарајућем експерименту ( $L_c = 5 \cdot h_2$ ), колико се према препорукама усваја дужина овог типа слапишта. Контрола низводног граничног услова врши се помоћу дрвених летви, постављених у посебне жљебове.

## 4 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, зависно од сужења брзотока, односно од ширине умирујућег базена, на 8 за најужи, до 24 мерних места за најшири умирујући базен (слика 4).



Слика 4. Мерна места на физичком моделу са најширим умирујућим базеном

Figure 4. Measurement points on the scale-model for widest variant of the stilling basin

Притисци су мерени за сваку геометријску диспозицију, 4 различита степена сужења брзотока (ознака 0,1,2 и 3), са мањим и већим степеницима (ознака  $M$  и  $V$ ), три различита протока  $Q_1 = 20$  l/s,  $Q_2 = 40$  l/s и  $Q_3 = 60$  l/s (ознака 20, 40 и 60) и различитим дубинама доње воде (ознака је дубина доње воде у cm), односно различитим потошњеностима скока. За мерење притиска коришћене су сонде за притисак произвођача „DRUCK“, са тачношћу од  $\pm 0,1$  %. Предходним анализама које су спроведене на резултатима узорковања утврђено је оптимално трајање мерења од 120 секунди, и учесталост узорковања од 200 Hz. За синхрону аквизицију података коришћени су аквизициони уређаји „HBM Quantumx“.

## 5 Теоријске основе за процену хидродинамичког оптерећења

Тренутна вредност притиска,  $p$ , у некој тачки може се приказати као збир средње вредности притиска,  $\bar{p}$ , и вредности флукуационог одступања,  $p'$ :

$$p = \bar{p} + p' \quad (5)$$

Просечна вредност притиска  $\bar{p}$  дефинише се као:

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt, \quad (6)$$

где је Т укупно време посматрања [3].

Показатељ развијености флукуација је средње квадратно одступање  $\sigma$  [4]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (p - \bar{p})^2 \cdot dt}, \quad (7)$$

и представља квадратни корен из варијансе притиска (у даљем тексту "пулзација"):

$$\sigma = \sqrt{p'^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p'^2 \cdot dt}. \quad (8)$$

За димензионасања плоча у дну умирујућег базена, меродавна је вертикална сила која делује на њих:

$$V_i = \int_0^{A_i} p_i \cdot dA = \int_0^{A_i} \bar{p}_i \cdot dA + \int_0^{A_i} p'_i \cdot dA = \bar{V}_i + V'_i \quad (9)$$

Утицаји су раздвојени на утицаје услед средњег притиска,  $\bar{V}_i$ , и утицаје услед флукуација притиска,  $V'_i$ . Због неједновремене појаве екстремних утицаја по целој разматраној области струјања (што је особеност флукуационог оптерећења), потребно је урадити корелациону анализу узоркованих притисака на посматраним плочама. За то је коришћен поступак директне статистичке анализе (сортирања тренутних вредности укупних вертикалних сила на посматрану плочу у моменту узорковања  $j$ ,  $V'_{i,j}$ ), као и стандардни, Хајдинов поступак, детаљно приказан у [4]. Овај поступак подразумева претпоставку да се функција густине вероватноће узоркованих података може добро апроксимирати нормалном расподелом:

$$f\left(\frac{p}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{p/\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{p^2}{\sigma^2}} \cdot d\left(\frac{p}{\sigma}\right). \quad (10)$$

Са усвојеном нормалном расподелом, максималне и минималне вредности пулзације притиска могу се дефинисати као:

$$p'_{max} = -p'_{min} = k \cdot \sqrt{p'^2}, \quad (11)$$

где је  $k$  коефицијент који зависи од вероватноће појаве, и за 99,9 % износи  $k = 3,20$ .

Поређење добијених резултата, показало је слагање у границама тачности коришћене мерне опреме.

## 6 Резултати мерења

Мерењима су регистровани средњи притисци и флукуације притисака у десној половини дна слапишта, за различите степене сужења и висине степеника на брзотоку, усвојене протоке (различите Фрудове бројеве) и нивое доње воде (различите потошљености хидрауличког скока). Измерене вредности су статистички обрађене и приказане као бездимензиони однос измереног притиска (висина воденог стуба), и релативе енергетске коте (у односу на дно базена) на улазу у умирујући базен.

Да би се стекао утисак о прерасподели притисака при варијацији параметара одређених димензионом анализом, изабрани су добијени дијаграми при промени једног од параметара, док су остали држани константним.

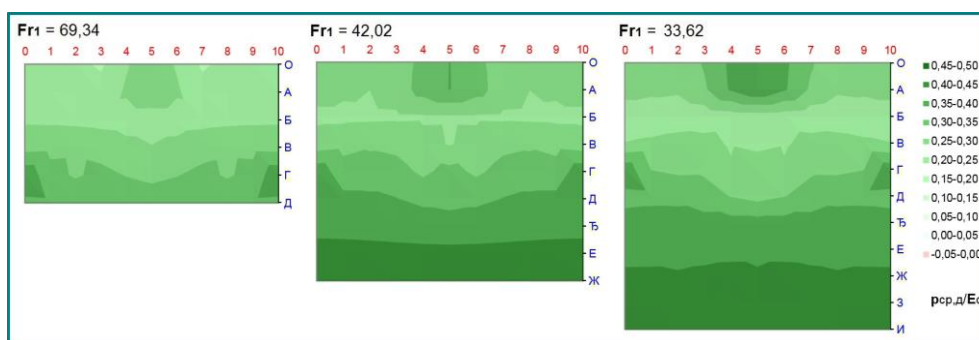
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Варирањем протока, односно Фрудовог броја на улазу у умирујући базен, уочава се да је потребна већа дубина доње воде како би се потопљеност хидрауличног скока одржавала константном. Последица тога је већа дужина умирујућег базена.

Промена средњих притисака на плоче дна базена при промени протока (Фрудовог броја  $Fr_1$ ) може се уочити на делу испред суженог пресека, а низводно је слабо изражена (слика 5).

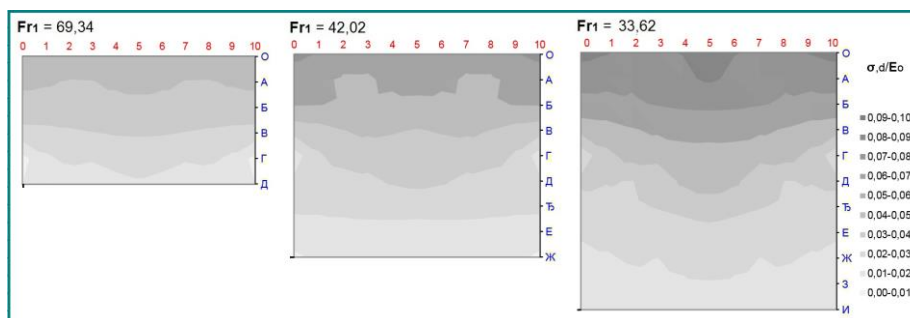
Флукуациони притисци се доминантно јављају испред суженог пресека и у том делу се приметно повећавају са повећањем протока (смањењем Фрудовог броја). На остатку базена (који доминира у његовој укупној дужини), оне се пригушују дужином доње воде и нису примећене њихове значајније промене (слика 6).

Повећањем висине степеника на брзотоку, смањена је енергија,  $E_0$ , којом вода улази у умирујући базен и преусмерен правца тока. Промене средњих притисака, и пулзација на плоче дна умирујућег базена су изражене само узводно од суженог пресека, док су занемарљиве у изводном делу (слике 7 и 8).



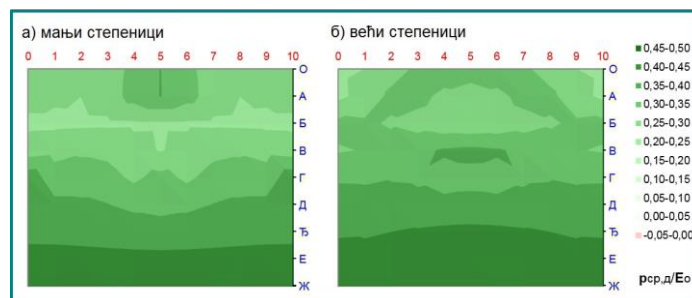
Слика 5. Промена средњих притисака на плоче базена за различите вредности Фрудовог броја ( $Fr_1$ )

Figure 5. Change in average pressures on the bottom of stilling basin for different Froude numbers ( $Fr_1$ )



Слика 6. Промена пулзација у дну базена при промени протока (Фрудовог броја)

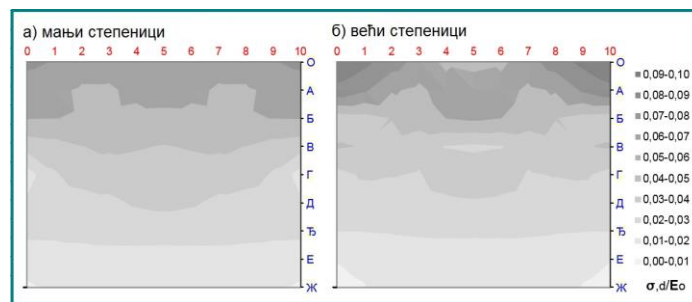
Figure 6. Change in pulsations on the bottom of stilling basin when changing the flow discharges ( $Fr_1$ )



Слика 7. Промена средњих притисака на дно базена при промени висине степеника

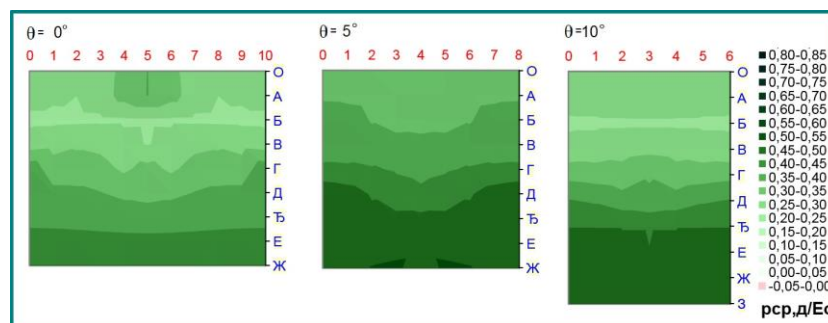
Figure 7. Change in average pressures on the bottom of stilling basin for different step heights





Слика 8. Промена пулзација на дно базена при промени величине степеника

Figure 8. Change in pulsations on the bottom of stilling basin for different step heights



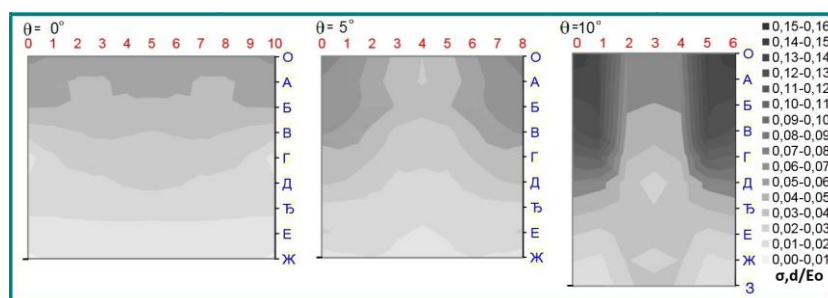
Слика 9. Промена средњих притисака на дно базена при промени угла сужења брзотока

Figure 9. Change in average pressures on the bottom of stilling basin for different spillway convergence angles

При промени степена сужења брзотока, сужава се и умирујући базен. Повећање степена сужења брзотока има велики утицај на прераспodelу пулзација у умирујућем базену. Око подужне осе базена оне слабе, али се према зиду базена знатно увећавају и то све израженије са порастом степена сужења (слика 10). У случају превеликог сужења брзотока, постоји опасност од појаве потпритисака на плочама које се налазе у суженом пресеку.

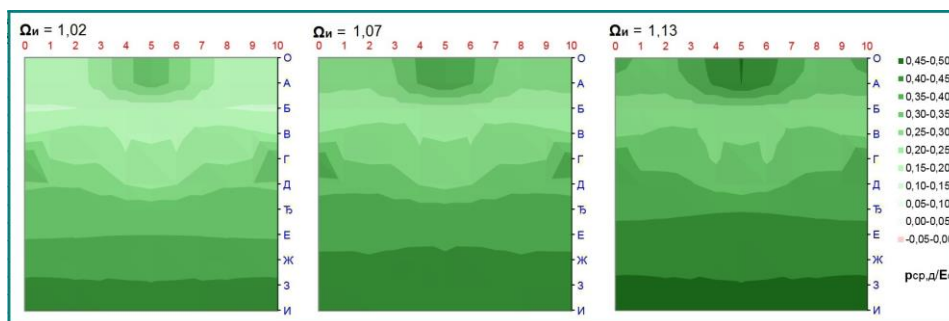
Протопљеност хидрауличког скока је једини низводни параметар који утиче на оптерећења у умирујућем базену. Он значајно утиче и на средње притиске и на пулзације (слике 11 и 12), првенствено на део низводно од суженог пресека, који је и доминантан део умирујућег базена.

Средњи притисци на плоче умирујућег базена, расту са порастом потопљености хидрауличког скока, првенствено због пораста дубине доње воде низводно од суженог пресека (слика 11). Због већег „баласта“ низводне воде и узводно од суженог пресека ниво расте, а самим тим и средњи притисци. Пулзације са порастом потопљености благо опадају, јер су пригушене већом дубином воде (слика 12).



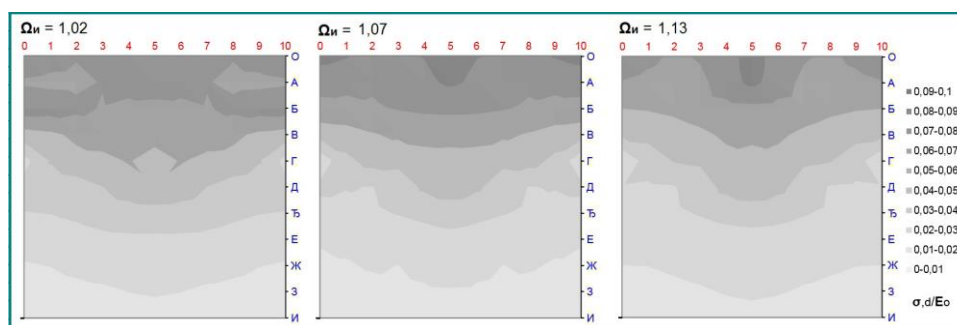
Слика 10. Промена пулзација на дно базена при промени при промени угла сужења брзотока

Figure 10. Change in pulsations on the bottom of stilling basin for different spillway convergence angles



Слика 11. Промена средњих притисака на дно базена при промени потољности скока

Figure 11. Change in average pressures on the bottom of stilling basin for different hydraulic jump submergence



Слика 12. Промена пулзација на дно базена при промени потољности скока

Figure 12. Change in pulsations on the bottom of stilling basin for different hydraulic jump submergence

## 7 Меродавни утицаји

При димензионисању плоча у дну умирујућег базена, меродаван је услов сигурности против испливавања на који доминантно утичу: сопствена тежина плоче, узгон и вертикална сила воде. Да би се лакше проценила хидродинамичка сила, она је посматрана као збир две силе, услед средњих притисака и услед пулзација. Ове силе су посматране као бездимензионе величине у односу на вертикалну хидростатичку силу када је базен напуњен доњом водом:

$$F' = \frac{F}{V_0} = \frac{F}{h_{ДВ} \cdot \gamma_w \cdot A_i} \quad (12)$$

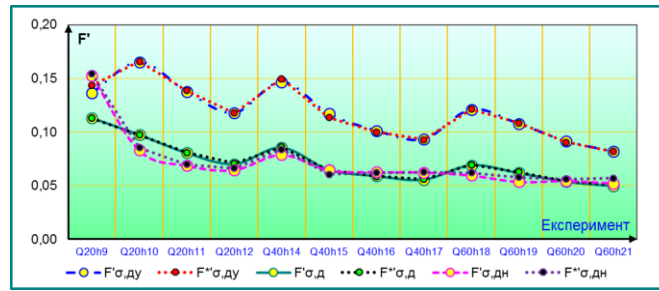
где је  $h_{ДВ}$  дубина воде у слапишту, а  $A_i$  површина плоче.

Силе услед пулзација су срачунате на два независна начина, поступком директне статистичке анализе [2] и стандардним Хајдиновим поступком [4]. Слагање резултата (слика 13) је било у преко 95% случајева и пратило је слагање измерених притисака са нормалном расподелом.

Регресионом анализом одређени су емпиријски изрази за процену вертикалне силе од средњих притисака (слика 14) и пулзација (слика 15) на посматраној плочи слапишта. Занемаривањем утицаја при промени Фрудовог броја, добијена је грешка регресије од око 10%.

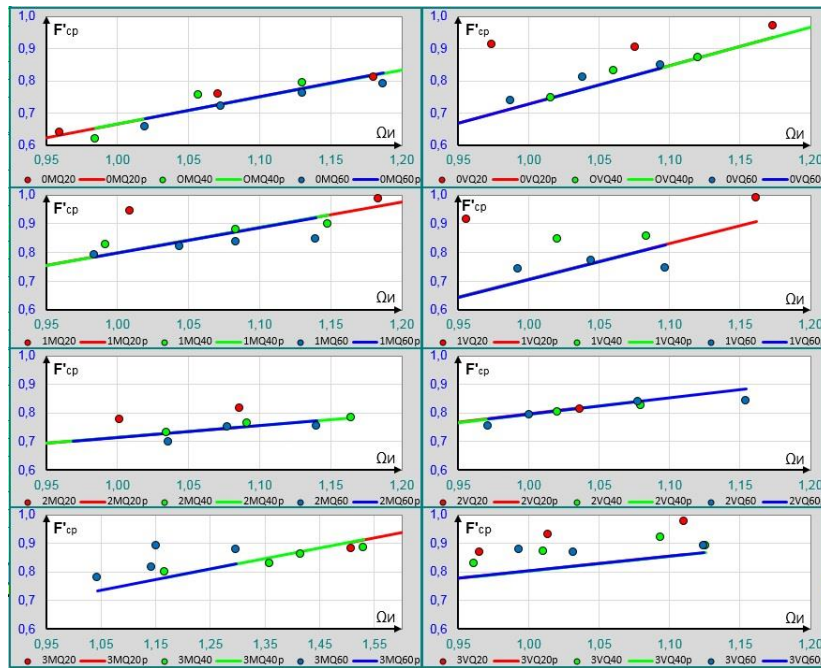
**Вертикална сила од средњих притисака** на домену  $\Omega_H = (1,0 \div 1,3)$  и  $Fr_I = (20 \div 50)$ :

$$F'_{cp} = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o} \cdot C_{\chi \theta o} + (\Omega_H - \Omega_{Ho}) \cdot C_{\Omega} \cdot C_{\chi} \cdot C_{\theta} \quad (13)$$



Слика 13. Резултати директне статистичке анализе и Хајдиновог поступка

Figure 13. Results of direct statistical analysis and Hajdin's procedure



Слика 14. Вертикална силе на плочу дна умирујућег базена услед средњих притисака

Figure 14. Hydrodynamic load on the bottom of the stilling basin due to average pressures

где су:

$$C_o = 0,759 \quad (14)$$

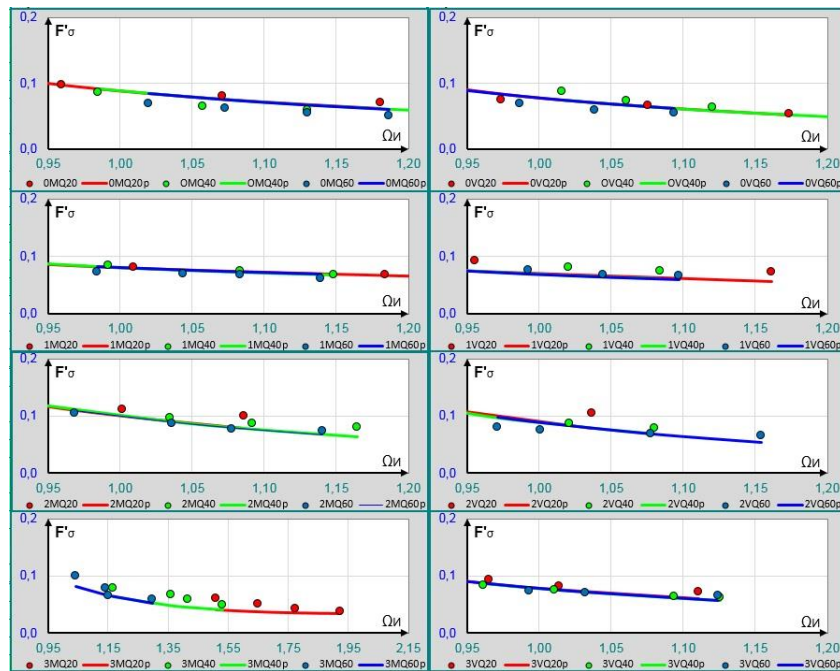
$$C_{\chi^o} = 1 + 0,134 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18} \quad (15)$$

$$C_{\theta} = 1 + 0,081 \cdot e^{-|\theta-5|} \quad (16)$$

$$C_{\chi^{\theta}} = 1 + \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,093 \cdot e^{-|\theta-5|} \quad (17)$$

$$\Omega_{Ho} = 1,112 \quad (18)$$

$$C_{\Omega} = 0,873 \quad (19)$$



Слика 15. Вертикална силе на плочу дна умирујућег базена услед пулзација

Figure 15. Hydrodynamic load on the bottom of the stilling basin due to pulsations

$$C_{\chi} = 1 + 0,406 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18} \quad (20)$$

$$C_{\theta} = 1 + 0,478 \cdot e^{-|\theta-5|} - \frac{0,573 \cdot \theta^{0,25}}{2} \quad (21)$$

Вертикална сила од пулзација на домену:  $\Omega_{И} = (1,0 \div 1,3)$  и  $Fr_I = (20 \div 100)$ :

$$F'_{\sigma} = C_o \cdot C_{\chi o} \cdot C_{\theta o} \cdot C_{\chi \theta o} - \frac{(\Omega_{И} - \Omega_{И o})}{\Omega_{И}^2} \cdot C_{\Omega} \cdot C_{\theta} \quad (22)$$

где су:

$$C_o = 0,07 \quad (23)$$

$$C_{\chi o} = 1 - 0,153 \cdot \frac{(\chi - 0,18)}{0,18} \quad (24)$$

$$C_{\theta o} = 1 + 0,045 \cdot e^{\frac{-|\theta-9,927|^3}{90}} \quad (25)$$

$$C_{\chi \theta o} = 1 - \frac{(3 \cdot 0,18 - 2 \cdot \chi)}{0,18} \cdot 0,005 \cdot e^{-|\theta-5|} \quad (26)$$

$$\Omega_{И o} = 1,112 \quad (27)$$

$$C_{\Omega} = 0,167 \quad (28)$$

$$C_{\theta} = 1 + 0,499 \cdot e^{-|\theta-9,927|} - 0,48 \cdot e^{\frac{-|\theta-5|}{0,1}}. \quad (29)$$

## 8 Закључци

Предмет истраживања овог рада је умирујући базен иза непризматичног степенастог брзотока. Најважнији циљ је одређивање хидродинамичких утицаја на плоче дна базена. Истраживање је извршено на наменски припремљеној инсталацији у лабораторији Грађевинског факултета у Београду. На основу резултата приказаних у овом раду могу се известити следећи закључци:

1. На расподелу хидродинамичког оптерећења и његов интензитет највећи утицај имају сужење брзотока, висина степеника на брзотоку, потопљеност хидрауличког скока и Фрудов број у суженом пресеку. Процену вредности хидродинамичких утицаја могуће је известити и без познавања Фрудовог броја, за потопљености хидрауличког скока у интервалу од  $\Omega_{II} = 1,0 \div 1,3$  и у том случају грешка процене је мања од 10%.
2. Пулзације притиска у умирујућем базену су најизраженије на почетку хидрауличког скока. Повећање дубине воде у базену значајно пригушује пулзације. Пулзације иза непризматичног брзотока постају интензивније по боковима, а пригушене у близини осе базена. Ова попречна прерасподела пулзација је интензивнија при већим сужењима брзотока.
3. Средњи притисци зависе од дубине воде, па њихов интензитет прати линију нивоа дуж базена.

## Литература

1. Миловановић Б., Зиндовић Б., Војт П., Капор Р., Кузмановић В., Савић Љ. (2015), *Зависност хидродинамичких притисака у слапшиту од сужења степенастог брзотока*, 17, саветовање СДХИ и СДХ, Вршац.
2. Миловановић Б. (2018), *Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина*, докторска дисертација, Грађевински факултет, Београд.
3. Савић Љ., (2009), *Увод у Хидротехничке грађевине*, Универзитет у Београду Грађевински факултет, Београд.
4. 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.

## **Uticaj regeneracije infiltracionih bazena na nivoe podzemnih voda: primjer izvorišta Novoselija**

Milan Jakšić<sup>1</sup>, Nenad Jaćimović<sup>2</sup>, Dragan Gligorić<sup>3</sup>

APSTRAKT: Rad se odnosi na razumjevanje procesa infiltracije i filtracionog toka vode ispod infiltracionih bazena na primjeru izvorišta podzemne vode Novoselija. Mnogo čimilaca utiče na performanse infiltracionih bazena za napajanje izdani. Uz uticaj ostalih čimilaca, najznačajniji su kolmatacioni proces, granični uslovi, oblik i veličina infiltracionih bazena, kvalitet vode, kao i hidrogeološke i geološke karakteristike porozne sredine. Početni dio rada čine literaturni pregled osnovnih karakteristike procesa infiltracije i filtracionog toka ispod infiltracionih bazena, te opis izvorišta Novoselija sa pregledom ranijih istražnih radova. Osnovni dio rada obuhvata prikaz i analizu osmotrenih nivoa podzemne vode na izvorištu Novoselija, prije i poslije revitalizacije glavnog infiltracionog bazena, zajedno sa interpretacijom mogućih linija nivoa za filtracioni tok ispod ovog bazena. Na kraju, prikazana je korišćena metodologija za određivanje brzina infiltracije prije i poslije revitalizacije infiltracionog polja, a na osnovu dobijenih vrijednosti data je ocjena poboljšanja infiltracionih karakteristika ovog postrojenja nakon revitalizacije.

Ključne reči: prelazni režim, filtracioni tok, brzina infiltracije

## **Influence of infiltration basin regeneration on groundwater table: Case of infiltration facility at groundwater source Novoselija**

ABSTRACT: This work refers to understanding of infiltration process and recharge flow below infiltration basins on the example of groundwater source Novoselija. Many factors have influence on the performance of infiltration basins for aquifer recharge. Besides the influence of other factors, the most important are soil clogging, boundary conditions, shape and size of infiltration basins, water quality, as well as hydrogeological and geological characteristics of porous matrix.

First part of this paper includes literature review about main characteristics of infiltration process and recharge flow below infiltration basins, and description of groundwater source Novoselija with an overview of previous research. The core part of the work encompasses representation and analysis of the observed water table levels at groundwater source Novoselija, before and after revitalization of the main infiltration basin, together with an interpretation of possible groundwater levels for recharge flow below this basin. In the end, the used methodology for determination of infiltration rates before and after revitalization of infiltration field is shown, and based on obtained values the estimate of the infiltration characteristics improvement after revitalization of the facility is given.

Keywords: transition regime, recharge flow, infiltration rate

---

<sup>1</sup> Mr Milan Jakšić, dipl.inž.građ., AGGF Univerziteta u Banja Luci, milan.jaksic@aggf.unibl.org

<sup>2</sup> Prof. dr Nenad Jaćimović, dipl. građ. inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, njacimovic@grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Dragan Gligorić, dipl.inž.građ., Vodovod a.d. Banja Luka, dragan.gligoric@vodovod-bl.com

## 1 Uvod

Nivo podzemne vode na neposrednoj lokaciji sistema za površinsko napajanje izdani zavisi od više faktora: površine i oblika infiltracionih bazena, brzine infiltracije, koeficijenta filtracije nezasićene zone, koeficijenta filtracije i transmisivnosti izdani, i dr., a koji su specifični za lokalitet posmatranog sistema. Pored toga, unutar istog sistema se javljaju prelazni hidraulički režimi kao posljedica redovnog održavanja, odnosno, čišćenja infiltracionih bazena.

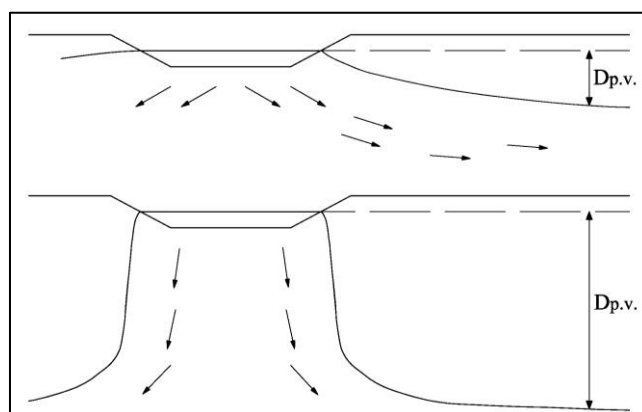
Za planiranje, projektovanje i upravljanje sistemima za površinsko napajanje izdani od najveće važnosti su odgovori na sljedeća pitanja [1]:

– Kojom brzinom će voda infiltrirati u tlo, koji je kapacitet sistema, i s tim u vezi, kolika je potrebna površina zemljišta za infiltracione bazene?

– Kakav je filtracioni tok vode prema izdani, postoje li slabo propusni slojevi u nezasićenoj zoni između dna infiltracionog bazena i izdani, da li će porast nivoa podzemne vode usljed infiltracije uzrokovati neželjene efekte kao npr. plavljenje podruma i zasićenje površinskog sloja tla vodom?

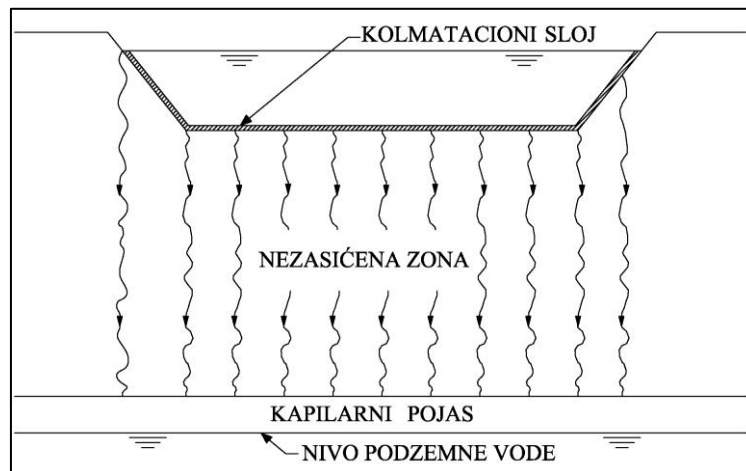
– Koliki će biti porast nivoa podzemne vode usljed infiltracije, na kojoj udaljenosti od zone napajanja i na kojoj dubini se crpljenjem treba održavati nivo podzemne vode da bi isti, u zoni napajanja, bio ispod određene maksimalne kote?

Prema [2] postoje dva karakteristična slučaja: sa i bez kolmatacionog sloja na dnu infiltracionog bazena, s tim da je slučaj sa kolmatacionim slojem: „prije pravilo nego izuzetak” kod sistema za površinsko napajanje izdani. Kada je voda za napajanje izuzetno čista, bez neorganskih i organskih suspendovanih čestica, temperatura vode niska a tlo sa relativno krupnim česticama, onda se infiltracija odvija prilično dugo vremena bez razvitka kolmatacionog sloja na dnu infiltracionih bazena. Tada postoji direktna hidraulička povezanost između infiltracionog bazena i izdani sa linijom nivoa podzemne vode koja se spaja sa nivoom vode u bazenu (Sl. 1). Ako je dubina podzemne vode  $D_{p.v.}$  na određenoj udaljenosti od bazena relativno mala, onda je filtracioni tok pretežno horizontalan i kontrolisan hidrauličkim gradijentom (Sl. 1, gore). Ukoliko je dubina podzemne vode  $D_{p.v.}$  relativno velika, filtracioni tok će biti pretežno vertikaln i kontrolisan gravitacijom (Sl. 1, dole). U ovom slučaju važi da je brzina infiltracije  $v_i$  približno jednaka zasićenom koeficijentu filtracije  $K_{zas}$  ( $v_i = K_{zas}$ ), a vrijednost hidrauličkog gradijenta je približno jednaka 1. Procjenjeno je da prelaz sa filtracionog toka kontrolisanog hidrauličkim gradijentom na filtracioni tok pod uticajem gravitacije nastaje pri dubini podzemne vode  $D_{p.v.}$  koja je jednaka dvije širine infiltracionog bazena  $B$  ( $D_{p.v.} = 2xB$ ). Prema drugim autorima, hidraulički gradijent se može smatrati jednakim 1 kada dubina podzemne vode od infiltracione površine iznosi 6 m i više, a zavisno od tipa i veličine infiltracionog sistema [3].



Slika 1. Presjeci prikazuju infiltracioni bazen sa plitkim nivoom podzemne vode i horizontalnim filtracionim tokom (gore), te sa dubokim nivoom podzemne vode i vertikalnim filtracionim tokom (dole). Izvor: Bouwer, 2002.

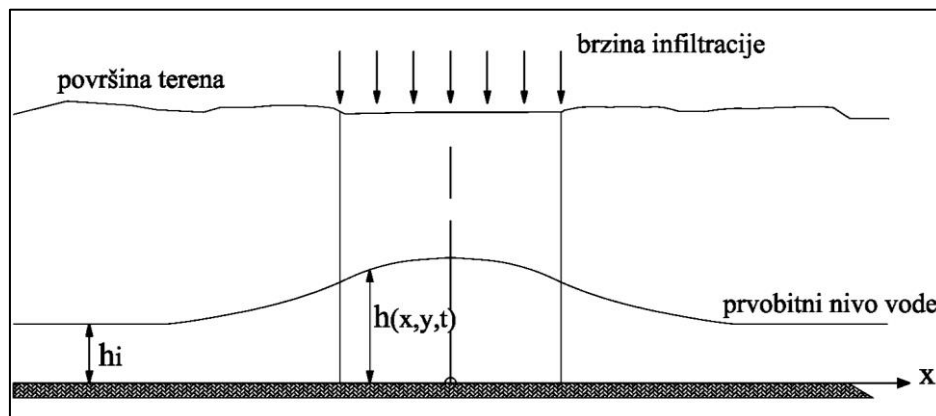
Figure 1. Sections showing recharge basin with shallow water table and lateral recharge flow (top), and with deep water table and downward recharge flow (bottom). Source: Bouwer, 2002.



Slika 2. Presjek prikazuje infiltracioni bazen sa kolmatacionim slojem, filtracioni tok kroz nezasićenu zonu i kapilarni pojas iznad nivoa podzemne vode. Izvor: Bouwer, 2002.

Figure 2. Sections showing infiltration basin with clogging layer, recharge flow through unsaturated zone and capillary fringe above water table. Source: Bouwer, 2002.

Kod bazena sa kolmatacionim slojem tipičan filtracioni tok je prikazan na Slici 2, ukoliko u nezasićenoj zoni ne postoji slabopropusan sloj na kojem će se nivo podzemne vode podići blizu dna bazena. U ovom slučaju filtracioni tok je kontrolisan gravitacijom a brzina infiltracije zavisi od stepena kolmiranosti, odnosno, od koeficijenta filtracije kolmatacionog sloja  $K_c$  i debljine kolmatacionog sloja  $L_c$ . Zasićenost vodom tla u nezasićenoj zoni se mijenja zavisno od promjene brzine infiltracije, na način da se, povećanjem stepena kolmiranosti smanjuju brzine infiltracije, a sadržaj vode u tlu nezasićene zone se smanjuje da bi se uspostavili takvi koeficijenti filtracije  $K_{nez}$  koji su jednaki brzinama infiltracije ( $K_{nez}=v_i$ ) [2].



Slika 3. Shematski prikaz lokalnog porasta nivoa podzemne vode ispod infiltracione površine. Izvor: Hantush, 1967.

Figure 3. Schematic representation of groundwater mound beneath infiltration area. Source: Hantush, 1967.

U izdani ispod infiltracionih sistema javlja se lokalni porast nivoa podzemne vode, pri čemu nivo podzemne vode poprima karakterističan oblik prikazan na Slici 3. U literaturi se zavisno od autora daju drugačija tumačenja pojave lokalnog porasta nivoa podzemne vode. Prema [3] kada vlažni front ispod infiltracionog bazena dosegne nivo podzemne vode vertikalni hidraulički gradijent naglo opadne na nultu vrijednost i dolazi do lokalnog porasta nivoa podzemne vode, a sva daljnja infiltracija se odvija usljed horizontalnog filtracionog toka. Drugačije tumačenje dato je u radu [4], gdje je navedeno da izraz Green-Ampt za vertikalni filtracioni tok ne važi od trenutka kada vlažni front



dosegne nivo podzemne vode. Brzina infiltracije se i dalje opisuje Darsijevim zakonom ali je u ovom slučaju teže procijeniti vrijednost hidrauličkog gradijenta koji odgovara nagibu nivoa podzemne vode u blizini infiltracionog bazena. Zajednička konstatacija za oba rada je da hidraulički gradijent pri lokalnom porastu nivoa podzemne vode ima vrijednost znatno manju od 1, a odgovarajuća brzina infiltracije je znatno manja od koeficijenta filtracije ( $vi < Kzas$ ).

Više naučnih radova je publikovano na temu izvođenja analitičkog izraza za porast nivoa podzemne vode u izdani usljed infiltracije iz sistema za napajanje u nestacionarnim [5] i stacionarnim uslovima [1].

Osnovni cilj ovog rada je prikaz i analiza osmotrenih nivoa podzemne vode na izvorištu Novoselija. U radu se daje interpretacija mogućih linija nivoa ispod infiltracionog bazena u hidraulički prelaznom režimu, prije i poslije njegove revitalizacije na osnovu odgovarajućih karakteristika filtracionog toka datim u naučno-stručnoj literaturi. Potvrda rekonstuisanih linija nivoa podzemne vode ispod infiltracionog bazena biće izvršena u narednom periodu primjenom postojećih analitičkih izraza, te numeričkim modeliranjem izvorišta Novoselija. Takođe, u radu su prikazani osmotreni podaci, proračun i dobijene vrijednosti brzina infiltracije prije i poslije revitalizacije infiltracionog bazena, te je na osnovu poređenja vrijednosti brzina infiltracije data ocjena poboljšanja infiltracionih karakteristika.

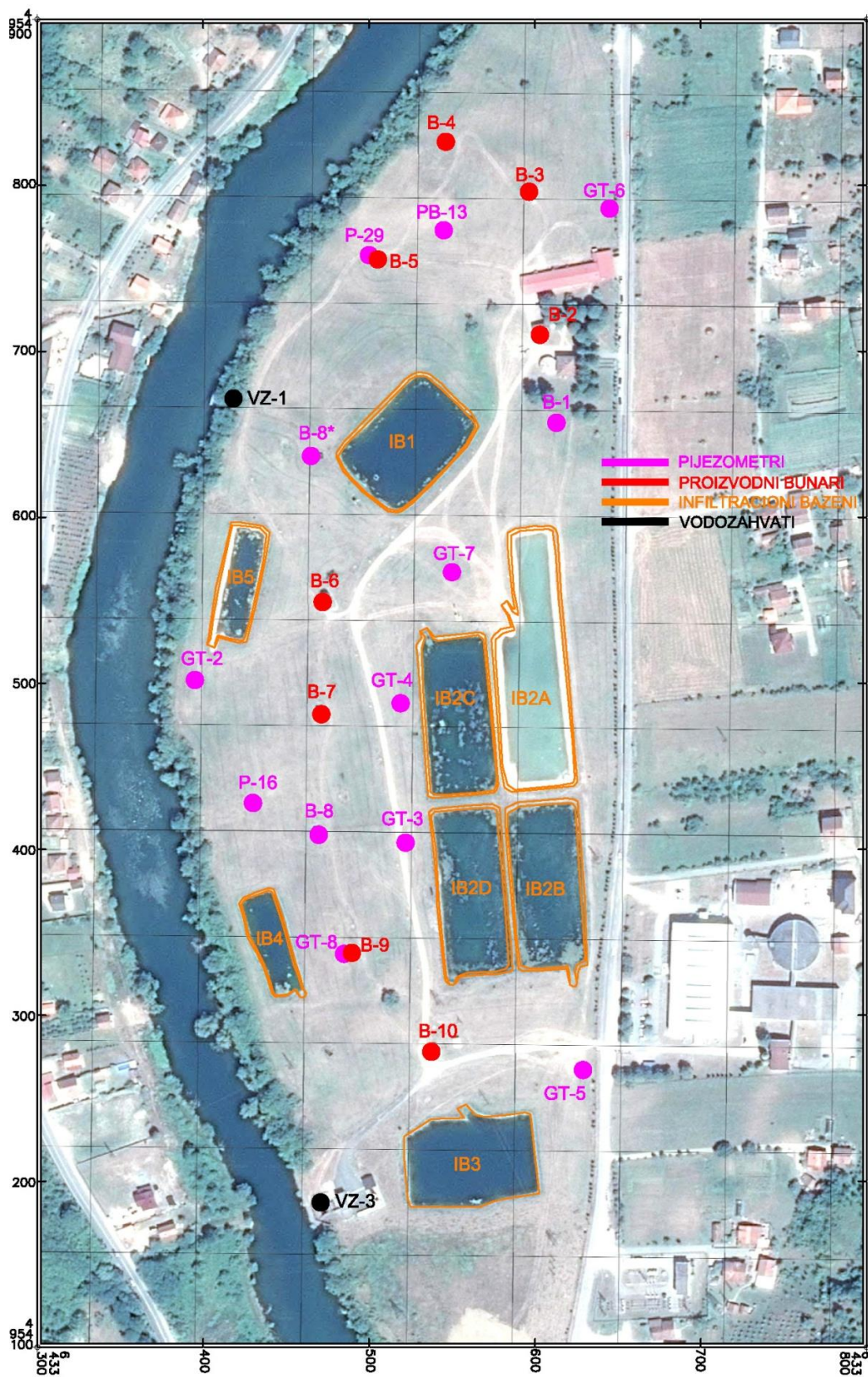
## 2 Izvorište podzemne vode Novoselija

### 2.1 Opis izvorišta

Izvorište podzemne vode Novoselija nalazi se oko 7 km uzvodno od grada Banja Luka na desnoj obali rijeke Vrbas. Od objekata na izvorištu postoji 9 proizvodnih bunara (B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9 i B10), 5 infiltracionih bazena (IB1, IB2, IB3, IB4 i IB5), a dovod vode u infiltracione bazene omogućen je iz 2 vodozahvata na rijeci Vrbas (VZ1 i VZ3). Najveći infiltracioni bazen IB2 se sastoji iz 4 hidraulički povezana polja s oznakama od IB2A do IB2D. Na izvorištu postoji ukupno 12 osmatrački funkcionalnih pijezometara, a ovaj broj obuhvata i dvije stare bunarske bušotine s oznakama B8\* i B1. Osnovni podaci o kapacitetima crpljenja i nivoima na pojedinim bunarima se registruju u komandnoj zgradi iz koje se upravlja radom izvorišta (Sl. 4).

Na osnovu geološke karte uže okoline izvorišta Novoselija [6], izvorište je locirano na relativno malom prostoru, orijentacionih dimenzija 1000x300 m, a čiji geološki sastav čine Kvarterni terasni sedimenti Vrbasa predstavljeni pjeskovitim šljunkovima. Ovaj prostor je ograničen koritom rijeke Vrbas sa zapada, dolomitima i krečnjacima gornjeg Trijasa sa jugozapadne strane, Krednim karbonatnim fliševima na sjeverozapadu i jugoistoku, te Krednim alb-cenomanskim flišem na sjeveroistoku.

Geometrija izdani u profilu definisana je na osnovu litološko-tehničkih profila registrovanih tokom bušenja proizvodnih bunara i pijezometara, kao i detaljnog geodetskog plana izvorišta podzemne vode Novoselija. Gornji sloj izdani formiran je od zaglinjenih šljunkova debljine 0,7-1,3 m. Sloj pjeskovitih šljunkova ispod gornjeg sloja čini osnovnu izdan. Debljina ovog sloja varira, a u zoni proizvodnih bunara iznosi 10-12 m. Podinu čine nepropusne naslage krednog fliša debljine i do 130 m [7]. Grafička i numerička predstava kota nepropusne podine u planu data je u priložima Elaborata o analizi mogućnosti povećanja kapaciteta izvorišta podzemne vode [8]. Na osnovu podataka o kotama podine određena je granica isklinjavanja akvifera na istoku. Izdan se u profilu prostire na nadmorskim visinama od 160 do 174 mnm.



Slika 4. Geografska pozicija izvorišta podzemne vode Novoselija sa položajem hidrotehničkih objekata.

Figure 4. Geographical position of groundwater source Novoselija with locations of hydrotechnical objects.

## 2.2 Pregled ranijih istraživanja

Aluvijalni sedimenti Vrbasa se odlikuju intergranularnim strukturnim tipom poroznosti i vrlo dobrom vodopropusnošću. U Elaboratu istražnih radova na području crpilišta Novoselija [9] dati su rezultati ranijih hidrogeoloških istraživanja na istom lokalitetu, prema kojima koeficijent filtracije pjeskovitih šljunkova iznosi  $K=8,6 \times 10^{-3}$  m/s, poroznost  $n=0,3$ , visina vodonosnog sloja iznad podine  $h \approx 3$  m, a transmisivnost  $T=0,028$  m<sup>2</sup>/s. Pri izradi pomenutog Elaborata izvršeno je simultano mjerenje nivoa vode u rijeci Vrbas i na pijezo-bušotini B12 čiji položaj se nalazio oko današnjeg bunara B8, na udaljenosti od oko 100 m od Vrbasa. Mjerenje je trajalo 8 dana u period 22.jun-1.jul 1974.godine, a rezultati su prikazani odgovarajućim nivogramom u Elaboratu. Infiltracioni bazen IB2 je tada bio manjih dimenzija a nisu postojali infiltracioni bazeni IB4 i IB5. Primjenom analitičkog rješenja diferencijalne jednačine nestacionarne filtracije od rijeke Vrbas do pijezo-bušotine B12, a za usvojenu transmisivnost od  $T=0,03$  m/s, dobijena je pijeziprovođljivost  $a=0,3$  m<sup>2</sup>/s i efektivna poroznost, odnosno, specifična izdašnost izdani od  $S=0,1$ .

## 3 Prikaz linija nivoa podzemne vode i kapaciteta crpljenja

Na izvorištu podzemne vode Novoselija završen je sveobuhvatan jednogodišnji monitoring nivoa površinskih vodnih tijela i nivoa podzemne vode, u periodu 3. mart 2017.- 12. mart 2018. godine. Monitoring je obuhvatio mjerenja nivoa vode na svim funkcionalnim pijezometrima i proizvodnim bunarima, mjerenja nivoa vode rijeke Vrbas na vodozahvatima, mjerenja nivoa vode u infiltracionim bazenima, a uporedo su registrovani podaci o kapacitetima crpljenja proizvodnih bunara na izvorištu. Mjerenja nivoa vode su izvršena nivomjerom sa zvučnim i svjetlosnim signalom tačnosti 0,5 cm, a registrovana su relativna mjerenja od tačke sa poznatom nadmorskom visinom do nivoa podzemne vode. Budući da se voda iz bunara B8 nije crpila tokom trajanja monitoringa ovaj bunar je korišćen kao pijezometar (SI.4).

Tabela 1. Izmjereni podaci o nivoima podzemne vode.

Table 1. Measured data of groundwater levels.

Datum mjerenja	Profil	1-1					2-2			
	Osm. objek.	IB2D	GT3	B9	GT8	IB4	GT4	B7	GT2	
11-Jun-17		172.54	164.73	163.80	164.16	172.51	164.81	164.64	165.96	
16-Jun-17		172.65	164.59	163.73	164.07	172.63	164.60	163.14	165.96	
28-Jun-17		172.63	164.70	164.02	164.23	172.62	164.70	163.45	165.96	
10-Aug-17		171.48	168.38	167.07	167.21	171.47	167.93	166.46	166.73	
31-Aug-17		171.23	167.49	166.35	166.51	171.27	167.08	165.67	166.24	
28-Nov-17		172.10	166.88	165.87	166.05	172.08	166.67	165.31	166.17	
12-Mar-18		170.40	166.29	166.20	166.24	170.39	165.91	164.69	166.20	
Datum mjerenja	Profil	3-3					Vrbas			
	Osm. objek.	IB2C	GT7	B1	B2	GT6	VZ3			
	11-Jun-17	172.52	164.84	164.20	163.19	164.10	165.10			
	16-Jun-17	172.64	164.75	164.20	163.36	164.04	165.62			
	28-Jun-17	172.61	164.85	164.36	163.49	164.21	164.98			
	10-Aug-17	171.04	167.98	167.34	165.47	166.67	165.08			
	31-Aug-17	171.19	167.15	166.54	164.85	166.11	165.02			
	28-Nov-17	172.19	166.82	166.17	164.54	165.88	165.72			
	12-Mar-18	170.00	165.95	165.49	163.73	165.58	166.70			

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

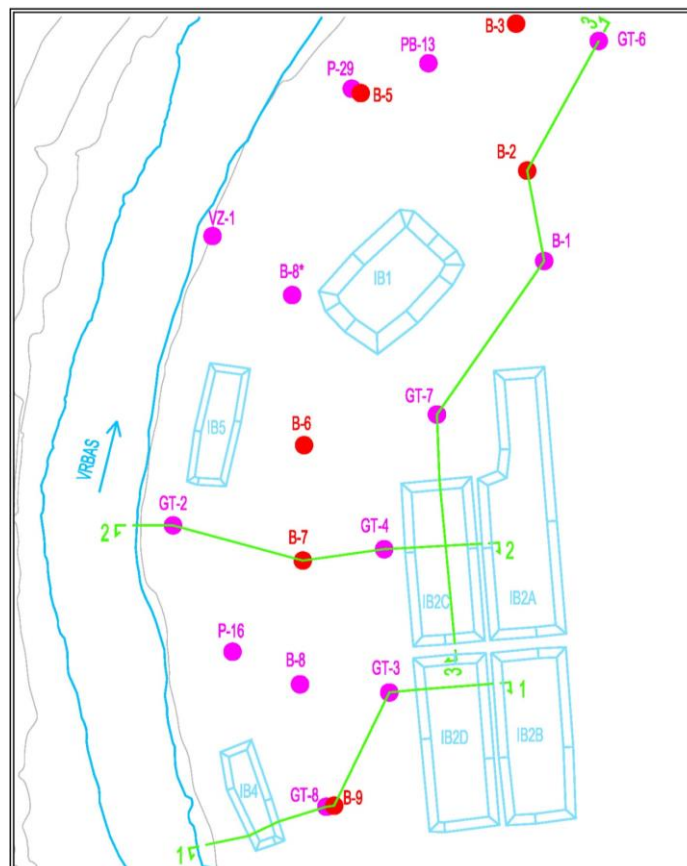
Učestalost mjerenja je u najvećem dijelu monitoring bila dva puta sedmično, s tim da su postojali vremenski intervali u kojima je, usljed objektivnih okolnosti, period između dva uzastopna mjerenja produžen. U periodu 4. jul - 6. avgust 2017. godine, izvršeno je čišćenje svih polja infiltracionog bazena IB2. U ovom periodu uzeti su uzorci tla sa dna infiltracionog polja IB2B i obavljeno je mjerenje brzine infiltracije pri pražnjenju infiltracionog polja IB2A.

Za potrebe ovog rada, iz kompleta mjerenih podataka odabrani su podaci za 3 dana iz vremenskog perioda koji je prethodio, i podaci za 4 dana iz vremenskog perioda nakon čišćenja infiltracionog bazena IB2 (Tab. 1). Na piježometru GT2 podaci iz juna 2017. godine odnose se na kotu dna piježometra, uz konstataciju da je nivo podzemne vode bio niži od kote 165,96 mm.

Za prikaz linija nivoa podzemne vode u profilima odabrani su karakteristični presjeci koji prolaze kroz osmatračke objekte na kojima je vršeno mjerenje nivoa podzemne vode (Sl. 5)

Na Slici 6 prikazane su linije nivoa podzemne vode za reprezentativni profil P2-2. Radi bolje preglednosti na istoj slici se daje pregled za vremenske presjeke prije i nakon čišćenja infiltracionog bazena IB2. Ispod infiltracionog bazena oblik linije nivoa je pretpostavljen u skladu sa karakteristikama filtracionog toka datim u dostupnoj literaturi.

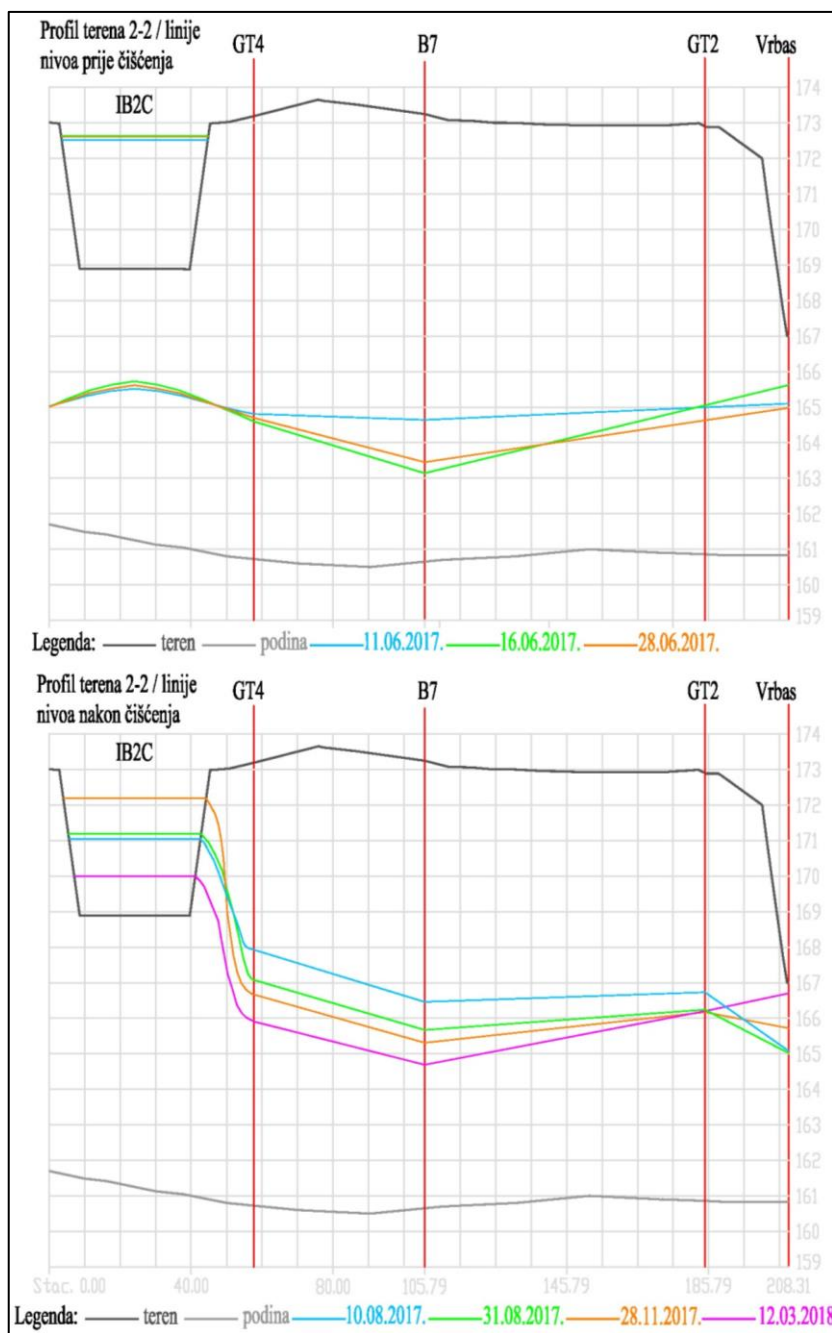
Pojedinačni i zbirni kapacitet crpljenja proizvodnih bunara prikazani su u Tabeli 2.



Slika 5. Odabrani presjeci terena.

Figure 5. Selected terrain cross-sections.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 6. Linije nivoa podzemne vode u profilu P2-2.

Figure 6. Groundwater level lines in profile P2-2.

Tabela 2. Registrovani kapaciteti crpljenja.

Table 2. Registered pump flow-rates.

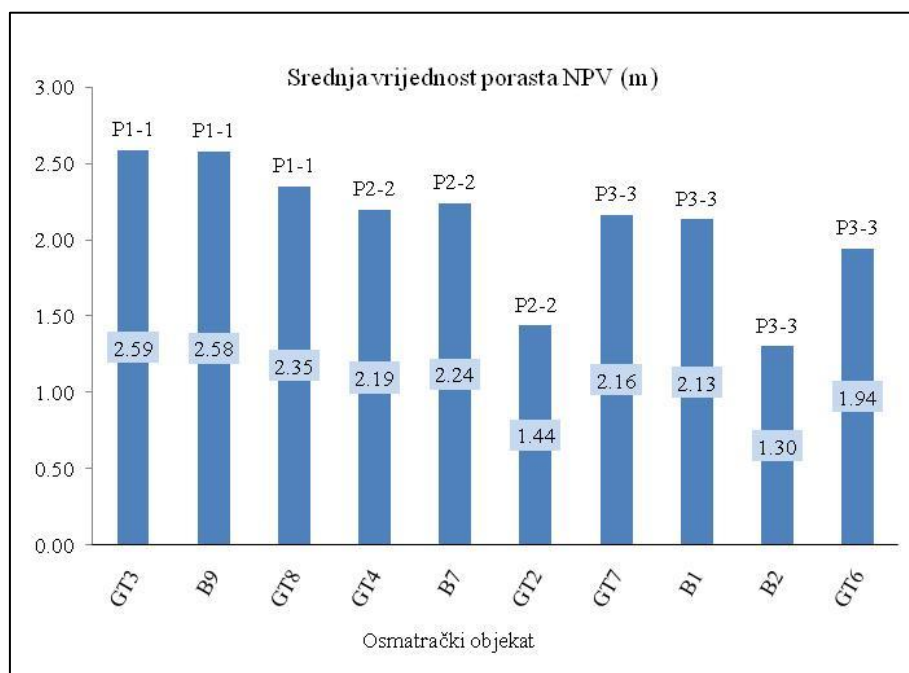
Datum mjerenja	Kapaciteti crpljenja (l/s)									
	Bunar	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-9	B-10	Σ
11-Jun-17	57.0	15.3	15.3	15.3	50.0	0.0	37.0	53.0	243.0	
16-Jun-17	44.7	15.1	15.1	15.1	50.0	19.3	38.7	50.0	248.0	
28-Jun-17	44.8	15.4	15.4	15.4	49.0	20.0	40.0	52.0	252.0	
10-Aug-17	41.4	15.9	15.9	15.9	57.0	26.3	52.7	58.0	283.0	
31-Aug-17	65.6	16.7	0.0	16.7	56.0	29.3	58.7	61.0	304.0	
28-Nov-17	66.4	0.0	0.0	17.6	53.0	27.7	55.3	67.0	287.0	
12-Mar-18	81.0	0.0	0.0	0.0	60.0	43.0	0.0	58.0	242.0	

## 4 Osvrt na linije nivoa podzemnih voda

Pregledom linija nivoa podzemne vode u svim profilima uočeno je nekoliko karakteristika nivoa podzemne vode na izvorištu Novoselija.

Na nivo podzemne vode na lokaciji izvorišta Novoselija utiču dva granična uslova: nivo vode u rijeci Vrbas i nivo u infiltracionim bazenima. Pored toga, nivo podzemne vode zavisi od rada proizvodnih bunara, odnosno, od pogonskog stanja svakog pojedinačnog bunara.

Kada su brzine infiltracije, a samim tim, i količine vode koja se infiltrira manje (slučaj prije čišćenja), nivo podzemne vode ispod infiltracionog bazena IB2 je niži, a granica dodira uticaja rijeke Vrbas i infiltracionog bazena IB2 na formiranje nivoa slobodne površine podzemne vode nalazi se kod bunara B9 na profilu *P1-1* i kod bunara B7 na profilu *P2-2*.



Slika 7. Porast nivoa podzemne vode nakon revitalizacije infiltracionog bazena IB2.

Figure 7. Rise of groundwater level after revitalization of infiltration basin IB2.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Linije nivoa podzemne vode u profilima *P1-1* i *P2-2* za vremenske presjke nakon čišćenja pokazuju dominantan uticaj infiltracionog bazena IB2 na nivoe podzemnih voda, pri čemu je nivo slobodne površine podzemne vode u akviferu bio viši od nivoa u rijeci Vrbas, a smjer filtracionog toka od izdani ka koritu rijeke. Izuzetak je linija nivoa podzemne vode za 12. mart kada je nivo u rijeci Vrbas bio visok (166,70 mm), bunar B9 isključen, a infiltracija smanjena zbog niskog nivoa vode u infiltracionom bazenu IB2.

Nakon čišćenja bazena IB2 uslijedio je porast nivoa podzemne vode na lokaciji izvorišta. Srednji porast nivoa podzemne vode na osmatračkim objektima, dobijen kao razlika osrednjenih nivoa nakon i prije čišćenja infiltracionog bazena IB2, prikazan je na Slici 7. Za proračun srednjih nivoa na bunarima nije uzet podatak kada je bunar bio isključen, npr. nivo na bunaru B7 od 11. juna i nivo na bunaru B9 od 12. marta.

Na profilu P3-3 vidljiv je snažan uticaj direktne hidrauličke veze između nivoa vode u očišćenom infiltracionom bazenu IB2 i nivoa podzemne vode. Uticaj u vidu povećanja nivoa podzemne vode proteže se do pjezometra GT6 koji je od infiltracionog bazena udaljen preko 300 m.

Početak procesa kolmatacije u očišćenom bazenu IB2 ogleda se kroz linije nivoa podzemne vode za vremenske presjke 10. avgust i 28. novembar. Nivo podzemne vode na svim profilima za 28. novembar je niži, iako su nivoi vode u infiltracionom bazenu IB2 i u rijeci Vrbas viši od odgovarajućih nivoa za 10. avgust.

## 5 Proračun brzina infiltracije za infiltraciono polje IB2A

Brzina infiltracije je generalno definisana kao zapremina vode koja infiltrira u jedinici vremena po jedinici površine okvašenog dna infiltracionog bazena [4]. Može se vizualizovati kao brzina opadanja nivoa vode u infiltracionom bazenu kada je punjenje bazena zaustavljeno a evaporacija zanemarena [2]. Ovakve okolnosti nastale su u periodu od 4. do 8. jula, 2017. godine prilikom pražnjenja infiltracionog polja IB2A radi njegovog čišćenja, kada je obustavljen dotok i zatvoren odvod na ispustu, a pražnjenje se odvijalo isključivo preko infiltracije. Od 4. jula kada je očitani početni nivo vode na vodomjernoj letvi u IB2A i u obalu pobijen horizontalni čelični anker od kojeg su se mjerili nivoi, pa do 07. jula vršena su uzastopna mjerenja nivoa vode u različitim vremenskim intervalima. Naknadno su izvršena mjerenja nivelirom radi utvrđivanja apsolutnih kota na osnovu poznate kote šahta IB2a,c (Tab. 3).

Tabela 3. Podaci iz infiltracionog testa pri pražnjenju infiltracionog polja IB2A.

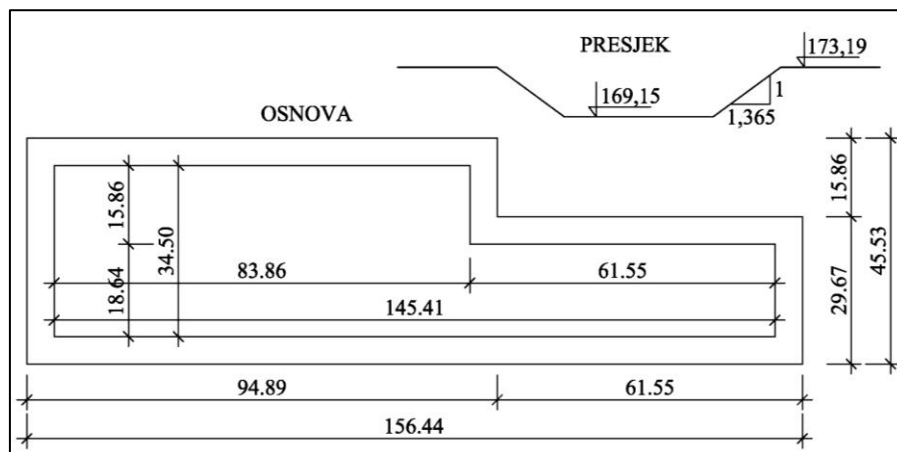
Table 3. Data from infiltration test during discharge of infiltration field IB2A.

Apsolutna kota šahta IB2a,c = 173.24 m.n.m					
Tačka br.	Opis tačke	Mjer. nivelir	Mjer. od hor. ank. [m]	Apsolutna kota [m.n.m]	$\Delta z$ [m]
1	od vizure do vrha šahta IB2 a,c	0.948		173.240	
2	od vizure do horizontalnog ankera	1.815		172.373	
3	početni nivo, 04.07. u 12:00 č.	1.632		172.556	
4	nivo 05.07. u 16:12 č.		-0.32	172.053	0.503
5	nivo 05.07. u 17:42 č.		-0.34	172.033	0.020
6	nivo 06.07. u 07:54 č.		-0.56	171.813	0.220
7	nivo 06.07. u 14:45 č.		-0.66	171.713	0.100
8	nivo 07.07. u 06:55 č.		-0.87	171.503	0.210

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Oblik i dimenzije infiltracionog polja IB2A za potrebe proračuna brzine infiltracije, usvojene su uz uslov da površina bazena usvojenog za proračun bude jednaka površini horizontalne projekcije stvarnog bazena. Nakon dodatnih mjerenja nivelirom, za kote dna i obala proračunskog modela infiltracionog polja IB2A usvojene su srednje vrijednosti kota dobijenih mjerenjima (Sl. 8).

Proračun brzina infiltracije za slučaj prije revitalizacije IB2A prikazan je u Tabeli 4.



Slika 8. Oblik i dimenzije infiltracionog polja IB2A za proračun.

Figure 8. Shape and dimensions of infiltration field IB2A for calculation.

Tabela 4. Proračun brzina infiltracije u IB2A prije revitalizacije.

Table 4. Calculation of infiltration rates in IB2A before revitalization.

Red. br. mjer.	Prot. vrijeme $\Delta t$ [s]	Promj. dubine $\Delta z$ [m]	Srednja dubina $z_s$ [m]	Površ. vod. ogledala $A_{v.o.}$ [m <sup>2</sup> ]	Zapr. infil. vode $V_{inf}$ [m <sup>3</sup> ]	Okv. površ. bazena $A_{o.b.}$ [m <sup>2</sup> ]	Brz. infiltr. $v_i$ [m/s]	Brz. Infiltr. $v_i$ [cm/h]
1	101520	0.503	3.155	5664.09	2849.04	6053.12	4.64E-06	1.67
2	5400	0.020	2.893	5523.86	110.48	5879.29	3.48E-06	1.25
3	51120	0.220	2.773	5459.84	1201.17	5799.94	4.05E-06	1.46
4	24660	0.100	2.613	5374.83	537.48	5694.56	3.83E-06	1.38
5	58200	0.210	2.458	5292.84	1111.50	5592.92	3.41E-06	1.23

U periodu od 23. do 28. oktobra, 2017. godine, dotok u infiltracione bazene je bio obustavljen zbog povećane mutnoće rijeke Vrbas. U sklopu redovnog monitoringa vršena su mjerenja nivoa na svim osmatračkim objektima 25. i 27. oktobra, te su podaci o nivoima za infiltraciono polje IB2A poslužili za proračun brzine infiltracije za slučaj poslije revitalizacije. Vremenski period između dva mjerenja nivoa u IB2A iznosio je 47 sati i 14 minuta, početna dubina vode 1,74 m a krajnja 0,79 m. Proračunom je dobijena vrijednost brzine infiltracije za slučaj poslije revitalizacije od  $v_i=1,931$  cm/h.

Pod pretpostavkom da je hidraulički gradijent imao istu vrijednost tokom mjerenja nivoa vode u IB2A prije i poslije revitalizacije, potrebno je uravnotežiti uticaje dubine vode u bazenu i dužine vremenskog intervala na vrijednosti brzine infiltracije s ciljem kvalitetnijeg poređenja. Zbog toga je izračunata uprosječna brzina infiltracije prije revitalizacije za vremenski interval od 38 sati i 43 min, sa početnom dubinom od 2,90 m i krajnjom dubinom od 2,35 m. Proračunom je dobijena vrijednost



brzine infiltracije za slučaj prije revitalizacije od  $v_i=1,34$  cm/h. Na osnovu analize dobijenih vrijednosti utvrđeno je da povećanje brzine infiltracije izraženo u procentima iznosi 44,1 %.

## 6 Zaključak

Ovaj rad predstavlja uvod u istraživanje uticaja procesa kolmatacije na kvantitet i kvalitet podzemne vode na izvorištu Novoselija, a koja se preduzimaju u okviru izrade doktorske disertacije.

Daljnje faze istraživanja podrazumjevaju monitoring odabranih parametara kvaliteta vode, numeričko modeliranje izvorišta, geomehanička ispitivanja uzoraka tla sa dna infiltracionog bazena, monitoring razvoja kolmatacionog sloja na dnu infiltracionog bazena IB2 uz upotrebu dajvera za kontinualno registrovanje nivoa podzemnih voda, te laboratorijska ispitivanja uticaja procesa kolmatacije na filtracione parametre pomoću Darsijevog aparata.

Prikazane linije nivoa podzemne vode na izvorištu Novoselija u saglasnosti su sa postulatima filtracionog toka datim u naučno-stručnoj literaturi. Potvrda predloženih linija nivoa podzemne vode ispod infiltracionih bazena biće izvršena u narednom periodu primjenom postojećih analitičkih izraza, te numeričkim modeliranjem izvorišta Novoselija.

Proračun i analiza brzina infiltracije za infiltraciono polje IB2A prije i poslije revitalizacije, ukazuje na poboljšanje stope prihranjivanja podzemne vode na izvorištu Novoselija u iznosu od 44,1%.

## Literatura

1. Bouwer H., Back J.T., Oliver J.M. (1999) Predicting Infiltration and Ground-Water Mounds for Artificial Recharge, *Journal of Hydrologic Engineering*. Am Soc Civil Eng, 4 (4): 350-357.
2. Bouwer H. (2002) Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, *Hydrogeology Journal*, 10: 121-142.
3. Philips C.E., Kitch W.A. (2011) A review of methods for characterization of site infiltration with design recommendations, *Journal of the Nevada Water Resources Association*: 29-46.
4. Massman J.W. (2003) Implementation of Infiltration Ponds Research, Final research report, Washington State Transportation Commission Department of Transportation, in cooperation with U.S. Department of Transportation.
5. Hantush M.S. (1967) Growth and Decay of Groundwater-Mounds in Response to Uniform Percolation, *Water Resources Research*, 3(1): 227-234.
6. Mojičević M. sa sar. (1969) Karta i tumač OGK SFRJ list Banja Luka, Institut za geološka istraživanja Sarajevo.
7. Trkulja D. (1973) Projekat hidrogeoloških istraživanja u cilju zahvatanja karstne izdani u području Novoselije za vodovod Banja Luke, Institut za ispitivanje materijala - Banja Luka.
8. Projektni biro (1985) Analiza mogućnosti i prijedlog sanacije i proširenja crpilišta Novoselija na ukupnu izdašnost 550 l/s u trajnom pogonu, Geotehnika-Zagreb OOUR za specijalne građevinske i hidrološke radove.
9. Bagarić I. sa sar. (1974) Istražni radovi na području crpilišta Novoselija kod Banja Luke, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu (HZ).

## Preparation of a monitoring system on the Palic and Ludas Lakes

Zoltan Horvat<sup>1</sup>, Mirjana Horvat<sup>2</sup>, Ognjen Gabrić<sup>3</sup>, Biljana Isic<sup>4</sup>

**ABSTRACT:** The Palic-Ludas Lake system is a complex system that consists of a wide, partially protected area. Aiming to develop a sound monitoring system on this area, the authors started from evaluating the already existing historical data and continued by looking for ways to complement these. This resulted in periodical measurements of hydraulic and water quality parameters. After a couple of months the authors found it unattainable on a long term to carry out such a large number of field measurements. In addition of the fact that conducting these measurements is hard and expensive, there is also the fact that different weather conditions made it hard or even impossible to gather the required information. Consequently, they found an alternative way of continuously monitoring some of the data, thus reducing the number of needed measuring campaigns, and the possible human errors as well. This paper presents the work carried out until now, and some of the results.

**Keywords:** Monitoring system, Palic and Ludas Lakes, hydraulic measurements, water quality measurements

## Priprema monitoring sistema na jezerima Palić i Ludaš

**APSTRAKT:** Sistem jezera Palić-Ludaš obuhvata veliku površinu delom zaštićenih oblasti. Sa ciljem pripreme održivog sistema upravljanja autori ovog rada su krenuli od analize raspoloživih istorijskih podataka nakon čega su pristupili prikupljanju novih podataka. Da bi se postojeći podaci dopunili pristupilo se periodičnim hidrauličkim merenjima i merenjima kvaliteta vode. Nakon nekoliko meseci ovakvih merenja smo konstatovali da je dugoročno sprovođenje ovakvih sistematskih merenja neodrživo. Uz činjenicu da su ovakva merenja teška i veoma skupa, tu je i dodatni problem, naime u zavisnosti od vremenskih uslova nije uvek moguće sprovesti potrebna merenja, ili se dovodi u pitanje tačnost prikupljenih podataka. Zbog toga smo se opredelili za alternativni pristup koji bi nam omogućio kontinualno praćenje pojedinih podataka uz istovremeno smanjenje potencijalnih grešaka tokom merenja. Ovaj rad prikazuje dosadašnje rezultate na pripremi održivog sistema monitoringa na sistemu jezera Palić-Ludaš.

**Ključne reči:** Sistem monitoringa, jezera Palić i Ludaš, hidraulička merenja, merenja kvaliteta vode

---

<sup>1</sup> PhD. Zoltan Horvat, C.E., Faculty of Civil Engineering Subotica, [horvatz@gf.uns.ac.rs](mailto:horvatz@gf.uns.ac.rs)

<sup>2</sup> PhD. Mirjana Horvat, C.E., Faculty of Civil Engineering Subotica, [isicm@gf.uns.ac.rs](mailto:isicm@gf.uns.ac.rs)

<sup>3</sup> PhD. Ognjen Gabrić, C.E., Faculty of Civil Engineering Subotica, [ogabric@gf.uns.ac.rs](mailto:ogabric@gf.uns.ac.rs)

<sup>4</sup> MSc. Biljana Isic, Biotech., Waterworks & Sewerage Public Utility Company, [isic.biljana@gmail.com](mailto:isic.biljana@gmail.com)

## 1 Overview of the previous work

Aiming to improve the state of the Palic-Ludas Lake system, we started our work by gathering and evaluating already existing historical data regarding any information that could be of importance for the management of the considered area. Since the goal is to mirror the already existing monitoring system established in the Hungarian Lake Kolon, we compared the existing data found at the Palic-Ludas Lake system in Serbia with it and found that there are no official measurements of water levels on the Palic-Ludas Lake system. There are measurements of water quality but their frequency is too low to give any reasonable conclusions. The only measurements regarding water quantity are those carried out by the Waste Water Treatment Plant Subotica (WWTP Subotica) where they regularly measure the outflow and its quality. On the other hand, measurements of both water levels and water quality on Lake Kolon in Hungary are a normal part of its management framework.

### 1.1 The Palic – Ludas Lake system

The Palic-Ludas Lake system is made of three Lakes, The Palic Lake of a total surface of cca. 590ha, Omladinsko Lake with the total surface of cca. 13ha, and Lake Ludas with the total surface of cca. 358ha. Lake Palic is divided into four Sectors presented on Fig. 1. The Sectors are marked I, II, III and IV. The first Sector is divided into three Lagoons. And on the upstream end of this system is the WWTP Subotica, that presents the main inflow of water into the system. The water exits the fourth Sector of Lake Palic, and flows into the Omladinsko Lake which is connected with Lake Ludas via a cca. 4.5km long channel, marked as the Palic-Ludas channel on Fig.1. The I and II Sectors are connected through a „Y“ shaped culvert that allows water from the second Lagoon to flow two ways optionally, to the third Lagoon or to the II Sector. The II and III Sector are also linked through a culvert, while the III and IV Sector are connected through a structure that is made of a weir and gate. The water exits Lake Palic through a circular underground culvert (pipe) entering Lake Omladinsko. The outflow from Lake Omladinsko is accommodated by a broad crested weir, after which the water flows through a pipe entering the Palic-Ludas channel. Finally the water exits Lake Ludas over a weir.

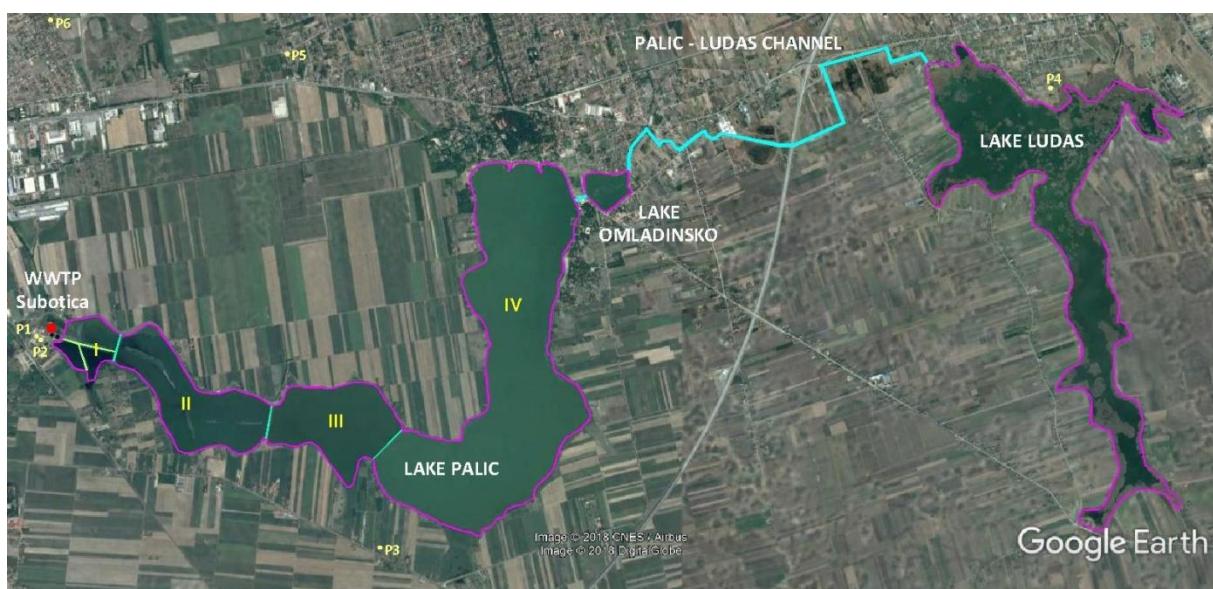


Figure 1. The Palic – Ludas Lake system.

Slika 1. Sistem jezera Palić - Ludaš.

## 1.2 Overview of the gathered historical data

Among others, one of the partial outputs in the preparation of a monitoring system, is the development of a comprehensive model. This requires a series of measurements regarding hydraulic and water quality parameters.

Table 1. Information about the hydraulic structures on the Palic-Ludas Lake system.

Tabela 1. Podaci o hidrotehničkim objektima na sistemu jezera Palić-Ludaš.

<i>Hydraulic structure connecting</i>	<i>Data from the design</i>	<i>Measured data</i>	<i>Note</i>
Lagoon 1 – Lagoon 2	Box culvert		Measured
	$B^* = 1\text{m}$	$B_{\text{upstream}}^* = 1.26\text{m},$ $B_{\text{downstream}}^* = 1.30\text{m},$ $Z_b^{**} = 101.28\text{m},$ $L^{***} = 9.98\text{m}.$	
Lagoon 2 – Lagoon 3 – Sector II	Y shaped box culvert		Measured
	$B^* = 1\text{m}, Z_b^{**} = 101.7\text{m}$	$B^* = 1\text{m},$ $Z_{b,L2}^{**} = 101.21\text{m},$ $Z_{b,L3}^{**} = 101.37\text{m},$ $Z_{b,S2}^{**} = 101.23\text{m},$ $L_{L2-C}^{****} = 5.60\text{m},$ $L_{L3-C}^{****} = 5.60\text{m},$ $L_{C-S2}^{****} = 7.80\text{m}.$	
Sector II – Sector III	Box culvert		Measured
	$B^* = 1\text{m}, Z_b^{**} = 101.7\text{m}$	$B_{\text{upstream}}^* = 1.02\text{m},$ $B_{\text{downstream}}^* = 1.01\text{m},$ $Z_{b, \text{up}}^{**} = 101.58\text{m},$ $Z_{b, \text{d}}^{**} = 101.77\text{m},$ $L^{****} = 24.70\text{m}.$	
Sector III – Sector IV	Gate, $B^* = 1\text{m}, Z_b^{**} = 101.5\text{m}$		Partially measured
	Weir, $B^* = 6\text{m}, Z_c^{***} = 102.7\text{m}$		Partially measured
Sector IV – Lake Omladinsko	Pipe culvert, $B^* = 1.2\text{m}, L^{****} = 109\text{m}$		The pipe is fully submerged and wasn't possible to review the given measures
Lake Omladinsko – Palic-Ludas channel	Broad crested weir, $B^* = 9\text{m}, Z_c^{***} = 101.45\text{m}$		The weir is kept under lock, making it impossible to review its width precisely.
	Pipe, $B^* = 1.2\text{m}, L^{****} = 50\text{m}$		The pipe is submerged partially, so it is impossible to review it's length.
Broad crested weir on the Palic-Ludas channel	Broad crested weir, $B^* = 1.4\text{m}, Z_c^{***} = 98.14\text{m}$		Partially measured
Outlet from Lake Ludas	Weir		Partially measured
Note: $B^*$ width/diameter of the hydraulic structure (according to the designs we could find the structures width is always same at the upstream and downstream end), $Z_b^{**}$ bed elevation of the hydraulic structure (according to the designs we could find the bed elevations of the structures is always same at the upstream and downstream end), $Z_c^{***}$ crest elevation of the hydraulic structure, $L^{****}$ length of the hydraulic structure.			

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

As a part of the management process of the WWTP Subotica, the Public Utility Company “Waterworks & Sewerage” Subotica conducts daily measurements of the following water quality parameters that were of interest for the purpose of this research: biological oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen, total phosphorous and suspended solids, as well as the total outflow into the first Lagoon. The data concerning precipitation relies on measured values, while the evaporation from the free water surface of the lakes can be computed using measured temperatures and wind speeds in the researched area.

The characteristics of the hydraulic structures on the system were at first attained from the designs and are given in Table 1. The table presents the information about the hydraulic structures on the Palic-Ludas system that was gathered from the designs, and the information that was reviewed by measuring the structures where it was possible. Some of the data can't be confirmed due to its nature, e.g. the fully submerged pipe connecting the IV Sector of the Lake Palic with the Omladinsko Lake. The remaining data will be gathered in time as well.

Additionally, the City of Subotica regularly publishes measurements conducted by the Public health Institute in Subotica. All though these measurements are officially carried out every month since 2011 in every part of the lake system (along the first, second and third levee of the I Sector, in the middle of the IV Sector, at the outflow from Lake Palic, in the Palic-Ludas channel, and in Lake Ludas on its north part, in the middle and on the south of the lake, when we examined the published data we found that measurements of the quality parameters considered in this work started at 2015. A more in depth analysis showed that even then the data is not complete since only three times in a year are they carried out at every location. The remaining months they sample at four points instead of all nine. There are no results for September, while in December they conducted measurements in 2016, but not in 2017. Table 2. Presents the spatial and temporal frequency of the sampling in the Palic-Ludas lake system.

Table 2. Frequency of the measurements conducted by the Public health Institute in Subotica.  
Tabela 2. Učestalost uzorkovanja od strane Zavoda za Javno Zdravlje u Subotici.

<i>Sampling date/spot</i>	<i>First levee</i>	<i>Second levee</i>	<i>Third levee</i>	<i>Middle of the IV Sector</i>	<i>Outflow of the IV Sector</i>	<i>Palic-Ludas channel</i>	<i>North part of Lake Ludas</i>	<i>Middle of Lake Ludas</i>	<i>South part of Lake Ludas</i>
January	+	+	+	+	+	+	+	+	+
February	+				+	+	+		
March	+				+	+	+		
April	+	+	+	+	+	+	+	+	+
May	+				+	+	+		
June	+				+	+	+		
July	+				+	+	+		
August	+				+	+	+		
September	<b>The results given for September are actually the October results</b>								
October	+	+	+	+	+	+	+	+	+
November	+				+	+	+		
December	+				+	+	+		

\* results are given for 2016, but are not available for 2017

A more detail overview of the historical data can be found in [1,2]. Due to the incomplete water quality data, its examination gave us inconclusive conclusions. In addition to the incomplete water quality data, we found no water level measurements. This lead us to plan and start the implementation of periodical water quality and water level measurements as well as carrying out the planned measuring campaign in order to gather as much data as possible.

## 2 Overview of the previous work

### 2.1 The first measuring campaign and other supplementary measurements

After evaluating the gathered data we found that the conclusions that could be drawn out are inconclusive, Therefore the logical solution is conducting a series of measurements that would allow us to attain new data and help us with our goals.

The first step was organizing a measuring campaign that took place between June 15th and June 21st of 2018. Within that week a series of measurements were conducted including water level measurements throughout the lakes, bathymetry measurements, water quality analysis, and grain size distribution of the banks. Additionally, the height of the hydraulic structures within the Palic-Ludas Lake system were measured, including the piezometers. The bathymetry of the lakes is required in order to have a clear picture of the size and shape of the lakes. Also, it is a necessary element when developing a hydraulic model. The grain size distribution of the banks around the lakes is also a model requirement. One of the input parameters of the rainfall runoff model is knowing the grain size distribution of the banks. Water level and water quality data were measured throughout the lakes within this week, but since this type of measurements has to be carried out systematically through time, these measurements were done before and after the measuring campaign as well.

Figure 2 presents the grain size distribution of the coastline around the considered area. More precisely, banks samples were taken from the North and South of Lake Palic and East and West of Lake Ludas. It can be concluded from the results that the grain size distribution around the Lakes is quite even. Nevertheless, these results are one of the input data required for the preparation of the runoff model.

Figure 3 presents Lake Palic and Lake Omladinsko in ACAD on the right and a three dimensional representation of the on the left. As it can be seen, not all of the Lake Palic Sectors were measured. Due to difficulties with some of the equipment it wasn't possible to measure all of the Sectors, only the I and the IV Sector of Lake Palic, and Lake Omladinsko, as can be seen on the left figure. It should be noted that the I Sector of Lake Palic is made of three Lagoons which explains the three lake parts on the left drawing. The bathymetry measurements of the remaining Sectors of Lake Palic will be complemented in the future.

Figure 4 presents Lake Ludas, its three dimensional representation on the left side and the ACAD drawing on the right.

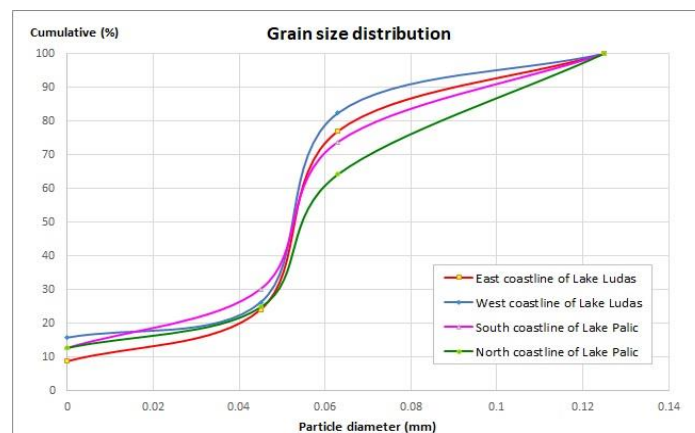


Figure 2. Grain size distribution of the coastline around the lakes.

Slika 2. Granulometrijske krive materijala obale oko jezera.

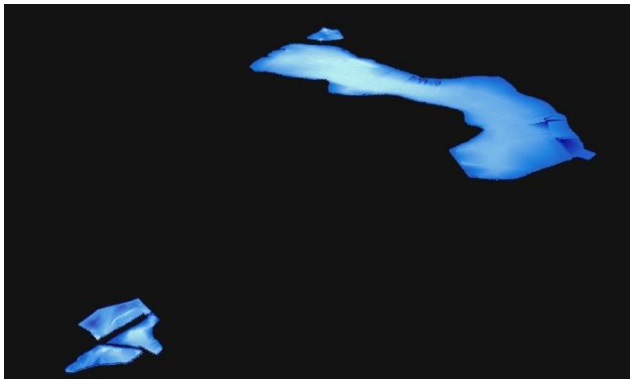


Figure 3. Lakes Palic and Omladinsko.

Slika 3. Jezera Palić i Omladinsko.

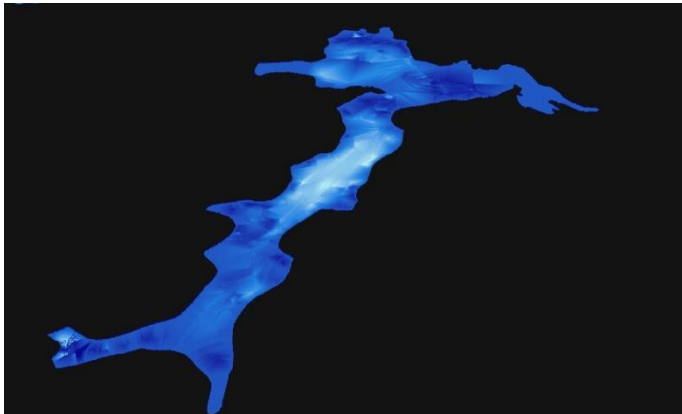


Figure 4. Lake Ludas.

Slika 4. Jezero Ludaš.

Figures 5, 6, 7, and 8 show some of the water quality results. On the left side are the results from measurements carried out by Faculty of Civil Engineering Subotica (GFS), while the results on the right are results that are given from Public health Institute in Subotica (ZJZ). The measurements are not taken at the same time since the results presented by GFS are the results from the latest measurements from September, while these results from ZJZ can't be found yet. Therefore the goal of this comparison is not to show the difference between samples taken at the same time. The goal is to present the difficulties we are faced with due to the inconsistent measurements from ZJZ at one hand, and conflicting results attained by GFS on the other.

The first problem is, as stated earlier, that the samples ZJZ takes are irregular through time and space. While GFS took samples from all of the water bodies in the Palic-Ludas system (WWTP – results are not measured but gathered from WWTP Subotica, L1 – Lagoon 1, L2 – Lagoon 2, L3 – Lagoon 3, S2 – Sector II, S3 – Sector III, S4 – Sector IV, OL – Omladinsko Lake, Ch – Palic-Ludas channel, LL – Lake Ludas), the ZJZ doesn't regularly take samples from all of them, making it difficult to compare any results. It should be outlined that the results at the WWTP on all images are attained from their laboratory and not checked by GFS of ZJZ.

The first two figures 5 on the left present the Chemical Oxygen Demand (COD) in space. Results given by GFS show that the COD is smallest at the outlet from the WWTP Subotica and slowly increases towards the outlet from the system, Lake Ludas. The sudden large COD value is measured in the third Lagoon (L3) that is by our evaluation a section of the lake where there isn't much flow through which can explain these results. By omitting the third Lagoon (if we assume there is no flow through than it should not be taken in consideration when evaluating the water quality

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

changes through the system), we get the middle picture presented on Fig. 5, where the increase in COD through the system seems fairly regular. By evaluating the picture on the left side of Figure 4. (results from ZJZ) we can observe a sudden increase in COD in the first Lagoon, but than the values decrease and stay low throughout the system. Although the results are not presented for the same time, even the tendencies don't match, so instead of being able to use these data to complement our measurements, we are left wondering if there is something wrong with the results.



Figure 5. COD values throughout the Palic-Ludas Lake system.

Slika 5. Rezultati HPK kroz sistem jezera Palić-Ludaš.

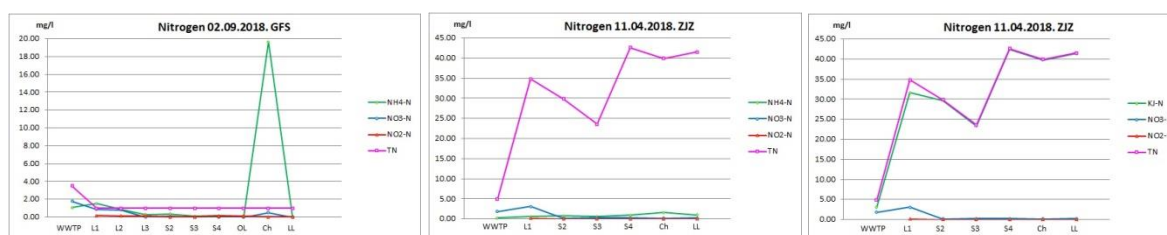


Figure 6. TN, NH4-N, NO3-N, NO2-N and KJ-N results throughout the Palic-Ludas Lake system.

Slika 6. Rezultati TN, NH4-N, NO3-N i NO2-N kroz sistem jezera Palić-Ludaš.

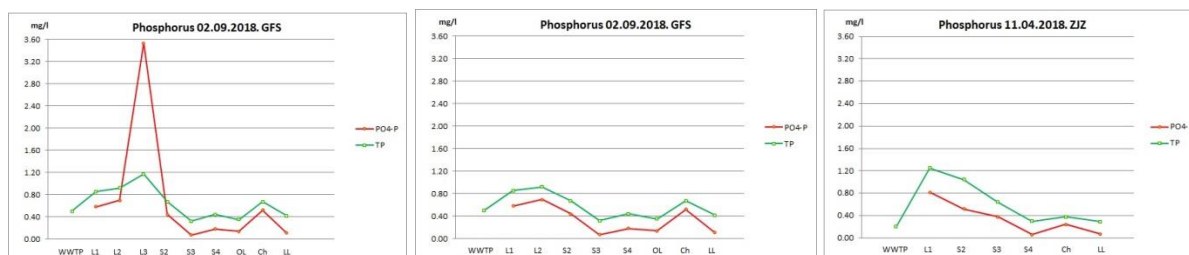


Figure 7. TP and PO4-P results throughout the Palic-Ludas Lake system.

Slika 7. Rezultati TP i PO4-P kroz sistem jezera Palić-Ludaš.

Figures 6 show the changes in TN – total Nitrogen, NH4-N – ammonium Nitrogen, NO3-N – Nitrate, NO2-N – nitrite Nitrogen and Kjeldahl Nitrogen for samples analyzed by GFS in September and ZJZ in April. The first thing to notice that the results are not even similar, although this could be due to the large time difference when the samples were gathered. This can be evaluated in a couple of months when ZJZ results for September are published and can be compared to the GFS values. Another problem with the results is that after adding the NH4-N, NO2-N and NO3-N one should approach the value of TN. In the case of the results attained by GFS (left image of Figure 6) this is true for all but one spot, the results from the Palic-Ludas channel where we measured extremely big values



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

of NH<sub>4</sub>-N. Although there is a slight divergence from this in the first Lagoon, we could overlook this since it isn't such a big difference. It should be noted that the results for TN attained by GFS showed the values are under 1mg/l which is the horizontal line on the picture. On the middle Figure 6 we have the results from ZJZ that also after summarizing don't seem to match, since the value of TN is between 25mg/l and 45mg/l. For that reason we tried using the Kjeldahl Nitrogen instead the NH<sub>4</sub>-N. In that case by adding NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N and KJ-N we should get TN. As presented on the right image of Fig. 6, the results from ZJZ match these expectations.

Figure 7 presents the TP – Total Phosphorus and PO<sub>4</sub>-P orthophosphate. In this case the Total Phosphorus is made from PO<sub>4</sub>-P and organically bound phosphorus. Since we only measured PO<sub>4</sub>-P what we do know is that the TP should be greater than PO<sub>4</sub>-P. As can be seen of the left Figure 7, this is not always the case. Both, same as earlier one can find that the large value of PO<sub>4</sub>-P is found in the third Lagoon that could be showing bad results due to the lack of flow through it. By omitting the values from the third Lagoon we get the image in the middle that gives reasonable results. In this case comparing the results from GFS and ZJZ seem to make sense. Namely, the values are in a reasonable range within one another, they both seem to increase in the Palic-Ludas channel and decrease before and after it. This is a possible scenario due to the fact that there is still a large number of households whose sewerage is attached to this channel through a lagoon, which could explain the increase in phosphorus.

Newertheless, due to the illogical results for the NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P, GFS decided to redo the measurements of the sample from the Palic-Ludas channel. It should be noted that after acquiring these conflicting results we revised the results by doing the measurements again using the same samples. The problem was that the results were always the same. Consequently, it was decided to take a new sample and try and conduct the analysis using this sample. Sadly this didn't solve the problem since once again the results didn't make any sense. As a consequence it was decided to ask the WWTP Subotica's Laboratory to analyze these samples as well hoping to help us determine the issue causing these irrational results. The results gathered from the second sample taken from the Palic-Ludas channel are presented in Table 3 in columns GFS I and WWTP I.

Table 3. Results of the second-testing sample taken from the Palic-Ludas channel.

Tabela 3. Rezultati drugog-uzorka za proveru uzetog iz kanala Palić-Ludaš.

<i>Parametar (mg/l)</i>	<i>GFS I</i>	<i>WWTP I</i>	<i>GFS II a)</i>	<i>GFS II b)</i>	<i>WWTP II</i>
PO <sub>4</sub> -P	0.977	0.724	1.58 filt.	1.71 unfilt.	0.61
TP	1.048	1.12	1.98 30min, 120 °C	2.067 60min, 120 °C	0.98
NH <sub>4</sub> -N	>12	9.97	>12 filt.	>24 unfilt.	8.04
NO <sub>3</sub> -N	0.47	*	0.23		
NO <sub>2</sub> -N	0.031	*			
KJ-N	*	14.5			12.9
TN	<1	15.001	<1 30min, 120 °C	<1 60min, 120 °C	
COD					64

\* The parameter wasn't measured

After comparing the results for the same sample from the analysis carried out by GFS and WWTP we found that when it comes to Nitrogen compound values WWTP seems to get results more similar to those from ZJZ. Namely, our tests kept showing that the TN<1mg/l while both ZJZ and WWTP got values that are well over 1 mg/l. This suggested that there are some issues concerning the way these measurements are done at GFS. A more in depth analysis of the potential interferences in the water quality measurements suggested that in the case there is a large concentration of suspended solids in the water that is sampled for the determination of NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P, they could hinder the measurements.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 4. List of possible interferences in the Hach tests a).

Tabela 4. Lista mogućih smetnji kod primene Hach-ovih testova a).

Param.	Range (mg/l)	Value	Interference		
NH4-N	0.015-12	1000 mg/l	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
		500 mg/l	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup>		
		50 mg/l	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>6+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup>		
		25 mg/l	Fe <sup>2+</sup>		
		10 mg/l	Sn <sup>2+</sup>		
		5 mg/l	Pb <sup>2+</sup>		
		2 mg/l	Ag <sup>+</sup>		
		4-9	pH		
		20 °C	Temp		
NO3-N	0.23-13.5	500 mg/l	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup>		
		100 mg/l	Ag <sup>+</sup>		
		50 mg/l	Pb <sup>+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Sn <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>		
		10 mg/l	Co <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup>		
		5 mg/l	Cr <sup>6+</sup>		
		3-10	pH		
		20-24 °C	Temp		
	0.1-10	above 100 mg/l	Cl <sup>-</sup>		
		all levels	Ferric iron		
		all levels	Nitrite		
		highly buffered samples or extreme sample pH			
		all levels	strong oxidizing and reducing levels		
		TNb	1-16	800 mg/l	Cl <sup>-</sup>
				400 mg/l	COD
3-12	pH				
15-25 °C	Temp				
5-40	2000 mg/l		Cl <sup>-</sup>		
	1000 mg/l		COD		
	3-12		pH		
	15-25 °C		Temp		
NO2-N	0.015-0.6	2000 mg/l	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
		1000 mg/l	K <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
		500 mg/l	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup>		
		100 mg/l	Mg <sup>2+</sup>		
		50 mg/l	Cr <sup>3+</sup>		
		25 mg/l	Co <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup>		
		12 mg/l	Ni <sup>2+</sup>		
		10 mg/l	Ag <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup>		
		5 mg/l	Sn <sup>4+</sup> , Fe <sup>3+</sup>		
		3-10	pH		
		15-25 °C	Temp		

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Table 5. List of possible interferences in the Hach tests b).

Tabela 5. Lista mogućih smetnji kod primene Hach-ovih testova b).

<i>Param.</i>	<i>Range (mg/l)</i>	<i>Value</i>	<i>Interference</i>
<b>PO4-P</b>	0.5-5.0	20000 mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		10000 mg/l	Cl <sup>-</sup>
		4000 mg/l	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>
		1000 mg/l	Ca <sup>2+</sup>
		500 mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		400 mg/l	Mg <sup>2+</sup>
		200 mg/l	Co <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Cd <sup>2+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
		100 mg/l	I <sup>-</sup>
		50 mg/l	SiO <sub>2</sub>
		40 mg/l	Hg <sup>2+</sup>
		20 mg/l	Pb <sup>2+</sup>
		10 mg/l	Ag <sup>+</sup> , Sn <sup>4+</sup>
		5 mg/l	Cr <sup>3+</sup>
		1 mg/l	Cr <sup>6+</sup>
		2-10	pH
	15-25 °C	Temp	
	0.05-1.50	5000 mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		2000 mg/l	Cl <sup>-</sup>
		1000 mg/l	K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>
		500 mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		250 mg/l	Ca <sup>2+</sup>
		100 mg/l	Mg <sup>2+</sup>
		50 mg/l	Co <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , I <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Cd <sup>2+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , SiO <sub>2</sub>
		5 mg/l	Hg <sup>2+</sup> , Sn <sup>4+</sup>
		2.5 mg/l	Ag <sup>+</sup> , Pb <sup>2+</sup>
		1 mg/l	Cr <sup>3+</sup>
0.5 mg/l		Cr <sup>6+</sup>	
2-10	pH		
15-25 °C	Temp		
<b>COD</b>	50-300	1500 mg/l	Cl <sup>-</sup>

In these cases the samples should be filtrated before continuing the analysis. Since GFS did not conduct suspended sediment measurements, we used the measurements carried out by ZJZ and found that in some parts of the Palic-Ludas system (e.g. the Palic-Ludas channel) the concentrations of suspended sediment gets over 160-170mg/l. This is not a representative value but something that changes over time. Nevertheless, the filtration of the samples could be the solution to the problem.

Similarly, after investigating what could cause inconclusive results for the TN and TP, we found that in cases the samples contain some compounds prolonging the time of heating the samples could be required. Additionally, when sampling water to determine TN, if the analysis isn't carried out right away, the sample should be properly preserved using acid. So this is another issue since all of the samples were analyzed between 24 and 48 hours after sampling. Tables 4 and 5 list the possible interferences when using the Hach's spectrophotometer.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

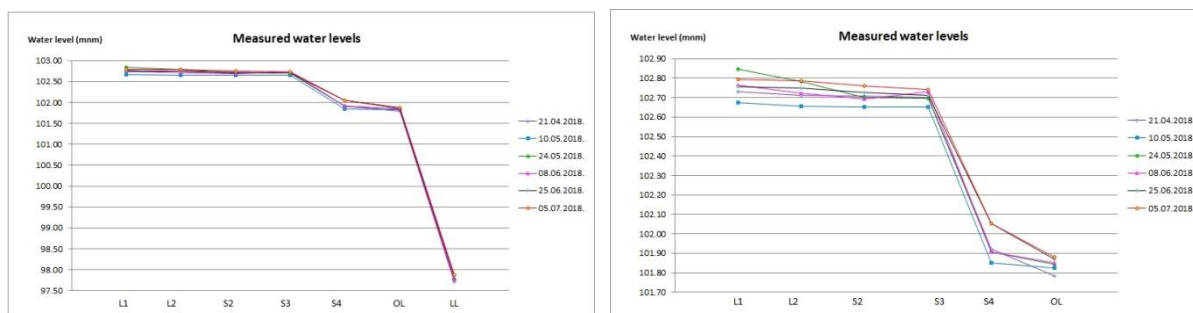


Figure 8. Measured water levels throughout the Palic-Ludas Lake system.

Slika 8. Rezultati merenja nivoa kroz sistem jezera Palić-Ludaš.

Consequently, the following was decided. GFS will take another sample in order to test these suggestions. For the NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P three tests will be done. One is going to be carried out by WWTP's laboratory using their standard approach, and two by GFS. The first test will be done same as the last time, without filtration, and the second applying filtration. This should help us determine the influence of the filtration on the NH<sub>4</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P results.

Regarding the TN and TP, we will also conduct three tests for each. WWTP will evaluate the samples using their usual approach, while GFS will determine TP and TN in two ways, using the same approach as the last time, and by prolonging the heating time. The comparison of these results should help resolve if the problem in the inconsistent results are due to compounds that possibly hindered the result. The results are also given in Table 3 in columns GFS II a), GFS II b) and WWTP II. The value of PO<sub>4</sub>-P and NH<sub>4</sub>-N was determined in two ways at GFS, using a filtered sample in column a) and an unfiltered in column b). Judging by the results this was not the solution to the problem since our results still don't match the results from WWTP. TP and TN were also examined in two ways, by heating the sample for 30 minutes in column a), and by prolonged heating in column b). This also didn't solve the problem of hindered results. Since large values of COD can also cause false results, it's value was also measured, but is in normal range so this can also be excluded as the cause of mistakes. As a result from all of the above, the next step is to go over every possible issue listed in Tabs. 4 and 5 in order to eliminate the possible issues one by one. GFS will also contact the equipment's distributor in the country in order to try and find out if they have any ideas about the problems we are having.

Next to the water quality measurements, it is also necessary to carry out systematic water level elevation measurements. Some of the measurements conducted using a standard levelling instrument are presented on Fig. 8. The left image shows the result throughout the Palic-Ludas Lake system where there is flowing water, Lagoon 1, Lagoon2, Sector II, Sector III, Sector IV, Omladinsko Lake and Lake Ludas. The right image shows the same results without the values in Lake Ludas so that the magnitude of the water level oscillation would be more apparent. The greatest value of the water level fluctuation is in the first Lagoon and amounts to 17 cm. The average variation of the water levels throughout the system is 4.4 cm. Since the water elevation is determined using a levelling instrument and a grade rod that should be placed on the water surface, it should be noted that this act by itself introduces a measuring error caused by the hand movements while holding the rod. Another difficulty while measuring the water levels was due to the waves caused by the wind, which made it impossible to precisely determine the water surface (since it was constantly moving). Keeping in mind that a waves were a couple of centimeters high and the hand movement is also in this range, we came to the conclusion that the average water level change is in the range of the measuring errors, making these measurements unreliable.

The solution to this issue was found in the implementation of measuring probes, Micro Divers. Since GFS has two of these Divers we installed one of them into Lake Ludas, and the other into the Palic-Ludas channel. The probes are set to measure the depth every hour, and the result for two weeks are presented on Fig. 9. The installed probes measure the water temperature in addition to the water

pressure that is then converted into water level elevation. The left image on Fig. 9 presents the water levels, while the right image shows the changes in temperature at the same time. Since these measurements are much more reliable, the goal is to try and cover the complete Palic-Ludas Lake system with Micro Divers. This would allow us to gather continuous water level measurements for a long time interval that would be much more reliable than our previous measurements.

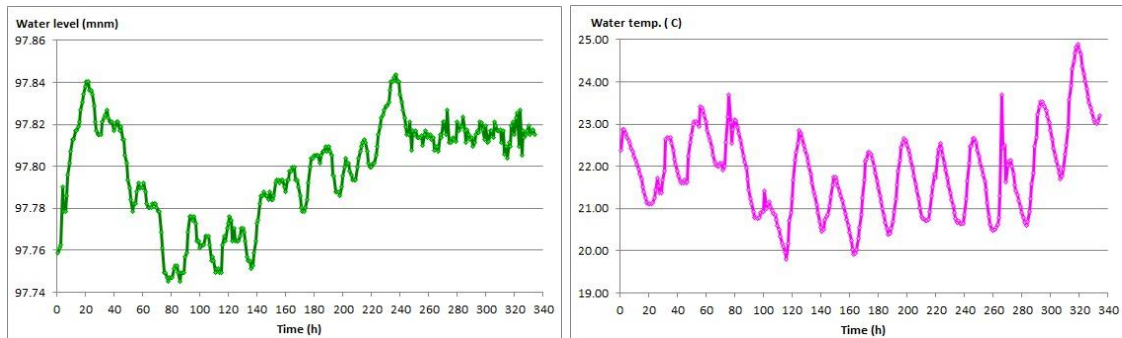


Figure 9. Measured water levels using a Micro Diver in Lake Ludas.

Slika 9. Rezultati merenja nivoa jezera Ludaš primenom Micro Diver-a.

### 3 Conclusions

After a year of data gathering and trying to develop an approach to a sustainable monitoring system we found that regarding the water level measurements the most reasonable solution would be to install Micro Divers in all water bodies in the Palic-Ludas system. This is the only approach that can produce continuous and reliable measurements.

Regarding the water quality measurements, we still couldn't find out what could be causing interferences in our measurements. Since the aim is to solve this issue without too much additional funding, the first approach is conducting every test possible within the GFS and possibly the help of WWTP. Additionally, the equipment distributors will be contacted as they may be able to steer us in the right direction. If this doesn't help us find the answers, the next step would be to increase the number of parameters that are measured and maybe that could help us solve this mystery.

Regarding the remaining hydraulic structures, they will be measured in the near future since all of these data need to be checked so that we would have up to date values.

### Acknowledgement

This work was partially funded by Interreg-IPA CBC Hungary-Serbia, project number HUSRB/1602/12/0014 and the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia, project number TR37009.

### References

1. Horvat M., Horvat Z. (2018) An overview of the Palić Ludaš Lake System, *Zbornik radova 6. Međunarodne konferencije Savremena dostignuća u građevinarstvu 2018*: 437-445.
2. Horvat Z., Horvat M. (2018) A basic water budget model for the Palić Ludaš Lake system, *Zbornik radova 6. Međunarodne konferencije Savremena dostignuća u građevinarstvu 2018*: 429-436.

## Uređenje dela Rokovog potoka u Petrovaradinu

Igor Radović<sup>1</sup>, Srđan Kolaković<sup>2</sup>, Goran Jeftenić<sup>3</sup>, Andrea Salvai<sup>4</sup>

APSTRAKT: Rokov potok se nalazi na severnim padinama Fruške Gore. Nastaje na padinama Fruške Gore, a uliva se u Dunav u Petrovaradinu. Potok prolazi kroz naseljena mesta Bukovac i Petrovaradin. Rokov potok jednim svojim delom kroz naselje Petrovaradin nije regulisan i korito potoka nije obloženo. Za vreme poplava usled obimnih padavina obale Rokovog potoka su erodirale i došlo je do ozbiljnog ugrožavanja stambenih objekata i ostale infrastrukture koja se nalazi u blizini potoka. Projektom izgradnje i uređenja potoka predviđeno je oblaganje budućeg korita betonom MB30 sa pratećim AB gredama. Pre ugradnje betona izvršeni su radovi na regulaciji ovog dela Rokovog potoka, koji se svode na produbljivanje korita, manja usecanja i oblikovanja kosina. U ovom radu su opisana tehnička rešenja koja su radjena kod regulacije potoka kao i opis radova na uređenju predmetne deonice Rokovog potoka.

Ključne reči: Rokov potok, uređenje potoka, regulacija potoka

## The Petrovaradin Roko Creek Section Management

ABSTRACT: The Roko Creek flows downhill the northern part of Fruška Gora. It flows from the hillsides of Fruška Gora to the Danube river at Petrovaradin. The Creek runs through the settlements of Bukovac and Petrovaradin. A section of the Roko Creek in Petrovaradin has not been managed and the Creek bed has not been lined. The banks along the Roko Creek have eroded due to flooding caused by heavy rainfalls, which seriously endangers houses and other structures nearby the Creek. The Project of the Creek section management provides for the lining of the future Creek bed with MB30 concrete including RC beams. The works on the regulation of this section of the Roko Creek including deepening the Creek bed, minor slope cuttings and shaping have been performed before lining with concrete. Technical solutions applied in the Creek regulation and the description of works required for the management of the given Roko Creek section are discussed in the paper.

Keywords: Roko creek, management of the creek, creek regulations

---

<sup>1</sup> Mast Igor Radović, dipl.inž.građ., AD "Vojvodinaprojekt", Novi Sad, [igor@vojvodinaprojekt.rs](mailto:igor@vojvodinaprojekt.rs)

<sup>2</sup> Prof dr Srđan Kolaković, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, [kolak@uns.ac.rs](mailto:kolak@uns.ac.rs)

<sup>3</sup> Mast Goran Jeftenić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, [goran.jeftenic@uns.ac.rs](mailto:goran.jeftenic@uns.ac.rs)

<sup>4</sup> Mast Andrea Salvai, dipl.inž.građ., Uprava za građevinsko zemljište i investicije, [andrea.salvai@ugzins.rs](mailto:andrea.salvai@ugzins.rs)

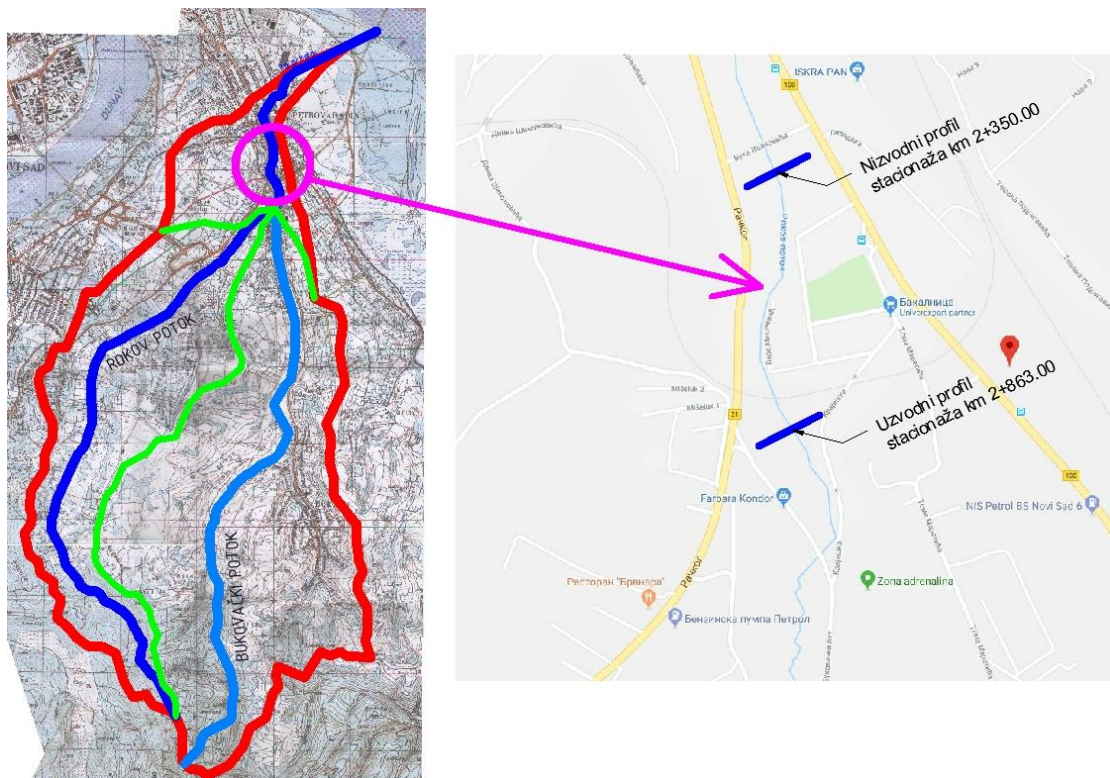
## 1 Uvod

Lokacija na kojoj se vrše radovi na uređenju dela Rokovog potoka nalazi se na potezu od Bukovačkog puta i ul. Vuka Isakovića, u južnom delu naselja Petrovaradin. Na ovom potezu korito potoka nije regulisano.

Rokov potok se nalazi na severnim padinama Fruške Gore. Nastaje na padinama Fruške Gore, a uliva se u Dunav u Petrovaradinu. Potok prolazi kroz naseljena mesta Bukovac i Petrovaradin. Ukupna površina sliva iznosi oko 25 km<sup>2</sup>.

Delovi potoka su regulisani preko redovnog održavanja od strane JVP "Šajkaška". Usled nezapamćenih padavina početkom maja meseca 2014. godine došlo je do erodiranja obala koje nisu obložene, što je pretilo da ugrozi okolne objekte. Predmet ovog rada je regulacija odnosno sanacija i uređenje dela Rokovog potoka od km 2+350.00 do km 2+863.00. [1]

Da bi se pristupilo radovima na uređenju neregulisanog dela Rokovog potoka, prethodno su određeni svi hidrološko-hidraulički parametri za regulisanje potoka i urađena hidrološka analiza kompletnog sliva, na osnovu ulaznih podataka koji su pribavljeni od Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) [1] i [3]. Dimenzionisanje i izbor poprečnog profila regulisanog potoka izvršen je na osnovu hidrauličkog proračuna sprovedenog za merodavne računске proticaje [1].



Slika 1. Pregledna Situacija sa slivnim područjem Rokovog potoka i deonicom koja se uređuje.

Figure 1. Plan overview with Roko creek watersheds and creek section management

## 2 Deonica Rokovog potoka pre radova na uređenju i posledice poplava

Kiše velikog intenziteta već dugi niz godina a posebno one iz 2014. godine izazivaju nanošenje zemljanih i drvenih nanosa praćenih otpadom i eroziju obala potoka koja ugrožava postojeće stambene objekte. Okolni teren karakteriše zatalasan reljef karakterističan za područje spiranja i jaružanja severne podgorine Fruške gore. Kote površine terena na predmetnoj deonici kreću se od 84.00 do 90.00 mm. Potok ima prilično duboku dolinu sa strmim stranama. Dubina doline najčešće je između

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

3 – 4 m, a nagib strana najčešće varira između 1:1 i 1:1,5. U donjem delu toka na predmetnoj deonici dolina se proširuje, te se oko potoka formira dolinska ravan [2]. Osim stambenim objektima opasnost je pretila i stubovima postojećeg železničkog mosta. Na slikama 2 i 3 prikazana je predmetna deonica potoka i stanje postojećih objekata, stubova železničkog mosta, kosina i korita Rokovog potoka posle poplava 2014 god. i pre uređenja.



Slika 2. Stanje postojećih objekata, kosina i korita Rokovog potoka posle poplava 2014.god.

Figure 2. State of the existing buildings, slopes and creek bed after the flooding in 2014.



Slika 3. Stub železničkog mosta na Rokovom potoku posle poplava 2014.god.

Figure 3. Pillar of the railway bridge on Roko creek after the flooding in 2014.



Veliki udeo zbog zapuštenog korita Rokovog potoka, nagomilanog nanosa i velike količine otpada ima i neredovno čišćenje i održavanje kao i nemar stanovništva. Poplave 2014. god. su bile poslednji alarm i signal da se krene sa sveobuhvatnim radovima na obezbeđenju potrebne projektne dokumentacije i obezbeđenjem sredstava za radove na uređenju Rokovog potoka koji predstavlja važan recipijent čitave sremske strane Grada Novog Sada i naselja Petrovaradin.

### 3 Tehničko rešenje i radovi na uređenju korita Rokovog potoka

Na osnovu topografskih podloga, geotehničkih istraživanja, hidrološkog i hidrauličkog proračuna određene su dimenzije poprečnog profila regulisanog korita. Projektom izgradnje i uređenja potoka predviđeno je oblaganje budućeg korita betonom MB30 sa pratećim AB gredama. Pre ugradnje betona izvršeni su radovi na regulaciji ovog dela Rokovog potoka, koji se svode na produbljivanje korita, manja usecanja, oblikovanja kosina i sl. Da bi se radovi odvijali nesmetano na suvom, voda iz potoka evakuisala se u nizvodnu deonicu postavljanjem cevovoda Ø500 na obe strane korita (obale) i pravljenjem zagata.

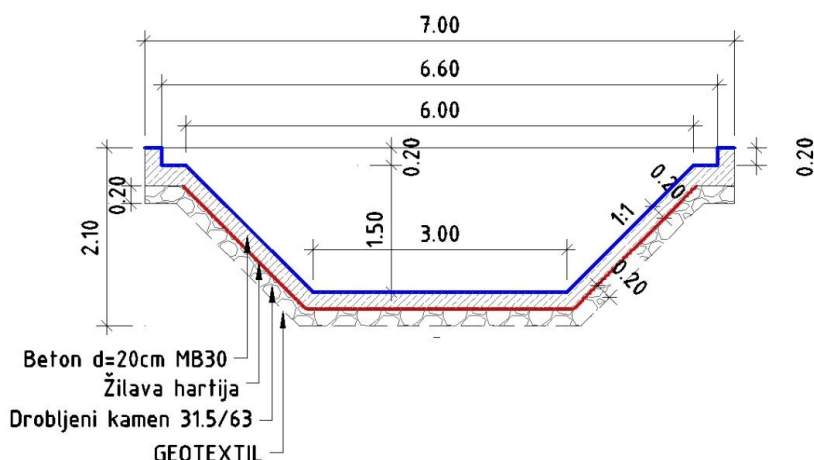
Nakon završetka zemljanih radova (iskopa, nabijanja i planiranja) čitava površina korita zajedno sa kosinama, obložila se netkanim geotekstilom čija je uloga da spreči spiranja sitnijih frakcija u periodima oscilacija nivoa podzemne vode.

Preko geotekstila izvršena je ugradnja i nabijanje drobljenog kamenog agregata frakcije 31.5/63 debljine  $d=20\text{cm}$ . Nabijanje drobljenog kamenog agregata frakcije 31.5/63 izvršeno je do zbijenosti 95-100 % po Proctor-u. Pre ugradnje betona (MB30) preko drobljenog kamena položena je žilava hartija ili PVC foliju kako bi se sprečilo curenje cementnog mleka iz svežeg betona. Betoniranje korita izvršeno je betonom MB30, sa otpornošću na dejstvo mraza M200.

Poprečni presek projektovanog glavnog korita potoka je trapezast, širine dna 3.0m, sa nagibom kosina 1:1, dubine 1,5m (slika 4). Na gornjem kraju kosine izveden je zub visine 0,2m. Prilikom projektovanja vođeno je računa o nagibu kosina kako bi se uklapali u levu i desnu obalu potoka. Završne kosine od uređenog dela potoka do regulacione linije planirane su u nagibu 1:2 i 1:1,5. Na slici 5 prikazani su i neki karakteristični poprečni profili regulisanog korita na predmetnoj deonici.

Na predmetnoj deonici su urađene i ulivne građevine na mestu spajanja sa ranije regulisanom deonicama postojećeg korita. Ulivne građevine preko kojih se projektovani deo spaja sa ranije regulisanom deonicama nalaze se na stacionažama km 2+350 i km 2+863.

Ulivna građevina na stacionaži km 2+863 je sastavljena od ploče sa AB gredama, prelaznog betonskog dela i potpornog zida na mestu prelaska iz ranije regulisanog dela potoka u novoprojektovani tj novoizgrađeni deo. Ploča ulivne građevine od betona MB30 je debljine  $d=0,45\text{m}$ .

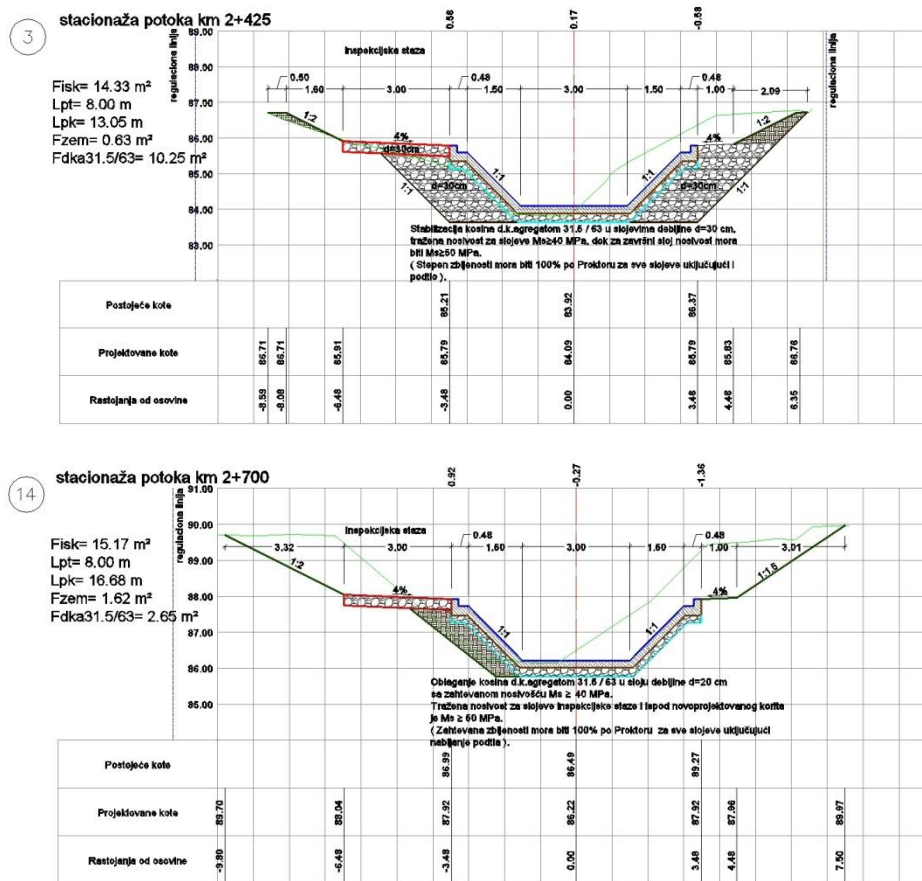


Slika 4. Poprečni presek regulisanog glavnog korita na predmetnoj deonici

Figure 4. Cross section of regulated main bed on given section

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Ulivna građevina je predviđena iz razloga da umiri tok i smanji udar bujične vode na betonsko korito. U blizini ulivne građevine je privatni posed koji treba obezbediti tokom izvođenja radova a koji će izradom potpornog zida, ulivne građevine i uređenja potoka biti stabilizovan. Na slici 6 prikazana je urađena ulivna građevina na Rokovom potoku.



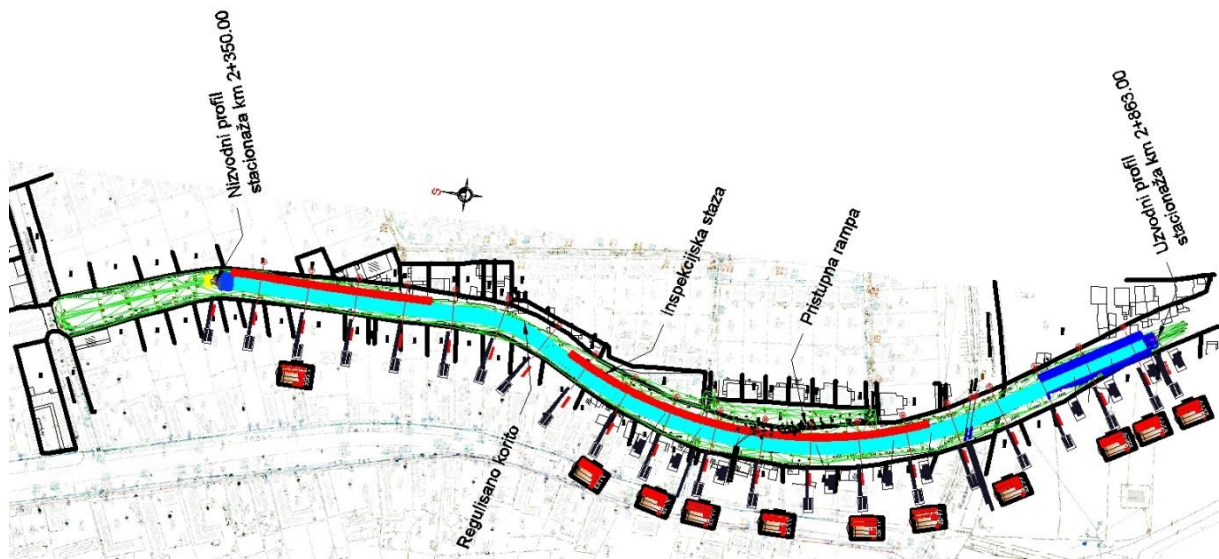
Slika 5. Primeri poprečnih profila

Figure 5. Cross sections examples



Slika 6. Radovi na izgradnji ulivne građevine.

Figure 6. Works on the construction of a inlet structure



Slika 7. Situacioni prikaz regulisanog korita sa inspekcionsom stazom

Figure 7. Plan overview of regulated creek bed with inspection road

Na deonici potoka od stacionaže km 2+350.00 - 2+460.00 i km 2+540.00 - 2+737.60 predviđena je izgradnja inspeksijskih staza. Položaj inspeksijske staze je na desnoj obali Rokovog potoka. Inspeksijska staza je od drobljenog kamenog agregata frakcija 0/63 debljine  $d=20\text{cm}$  širine 3,0m sa nagibom 4% prema potoku. Situacioni prikaz regulisanog korita sa položajem inspekcione staze dat je na slici 7.

U ulici Mirka Mataka u toku su radovi na izgradnji privremenog pristupnog puta. Privremeni pristupni put će biti od drobljenog kamena debljine  $d=20\text{cm}$  i širine 3,0m. Prilikom izrade potrebno je prethodno teren očistiti i trasu pripremiti za mehanizaciju. Širina pristupnog puta je 3.0 m duž većeg dela deonice sve dok put ne počne da se spušta prema inspeksijskoj stazi i tu se njegova širina menja u 6m, što omogućava bolju sigurnost prilikom manevrisanja vozilom. Takođe se vodilo računa o što lakšem pristupu u periodima održavanja i čišćenja, pa je iz tih razloga i predviđen pristupni put sa privremenom pristupnom rampom.

Prilikom ugradnje betona izrađeni su i otvori za podzemnu vodu. Otvori su napravljeni uz upotrebu PVC cevi  $\varnothing 160$  koja se postavlja pre betoniranja dužine oko 0,40m.



Slika 8. Radovi na uređenu korita Rokovog potoka i inspekcione staze.

Figure 8. Works on the Roko creek bed management and inspection road



Slika 9. Radovi na uređenu korita Rokovog potoka.

Figure 9. Works on the Roko creek bed management

Prilikom projektovanja regulisanog korita vođeno je računa o ekosistemu. Deo obale iznad glavnog korita će biti uređen tako da se na njemu može odvijati nesmetano kretanje sitnih životinja a planirano je dodatno ozelenjavanje obalnog dela. U samom koritu predviđeni su nabori na betonu kako bi se omogućilo olakšano prelaženje sitnijeg životinjskog sveta.

U toku su završni radovi na uređenju Rokovog potoka i prema rokovima planirani su da se završe do novembra 2018. god. Na slikama 8 i 9 su prikazani trenutni radovi i završeni radovi na uređenju Rokovog potoka.

## 4 Zaključak

Bujične poplave mogu da izazovu velike posledice posebno po ljudske živote , a tako i po životinjski svet i infrastrukturu. Najveći problem na ovoj deonici Rokovog potoka koji je bio neobložen i neregulisan bila je erozija dna i obala potoka a tako i veliki nanos zemljanih i drvenih masa kao i velika količina komunalnog otpada. Obezbeđenjem potrebnih finansijskih sredstava i izradom projekne dokumentacije uz stalnu saradnju sa nadležnim vodoprivrednim preduzećima došlo se do ispravnog rešenja koje će zadovoljiti potrebe za bezbednim odvođenjem atmosferskih voda koje nastaju usled sve učestalijih kiša velikog intenziteta i koje će sprečiti erozivna dejstva koja imaju fatalne posledice po okolinu. U budućnosti se mora intenzivnije raditi na preventivnim dejstvima za ublažavanje posledica od poplava i podizanju svesti kod lokalnih institucija i građana na važnosti odbrane od poplava i zaštitu voda i rečnih tokova kao i njihovo redovno održavanje.

## Zahvalnica

Posebnu zahvalnost iskazujemo odgovornim projektantima Danilu Tomoviću, dipl.građ.inž. i Aleksandru Markoviću dipl.građ.inž. ispred firme AD“Vojvodinaprojekt“ na intenzivnom učestvovanju u izradi projektne dokumentacije, Gradskoj upravi za građevinsko zemljište i investicije, urbanistima, fakultetu Tehničkih nauka u Novom Sadu, vodoprivrednim preduzećima JVP "Šajkaška" i "Vode Vojvodine" i firmi "Hidrozaod DTD" iz Novog Sada.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia

## Literatura

1. AD "Vojvodinaprojekt" Novi Sad, Izrada tehničke dokumentacije za *Uređenje dela Rokovog potoka od km 2+350 do km 2+863 u Petrovaradinu* (Idejno rešenje, Projekat za građevinsku dozvolu i Projekat za izvođenje), 2014 do 2016. god.
2. AD "Hidrozaod DTD" Novi Sad, *Elaborat o geotehničkim uslovima uređenja dela Rokovog potoka od km 2+350 do km 2+863 u Petrovaradinu*, januar 2016. god.
3. CPV "Centar za puteve Vojvodine" Novi Sad, Generalni projekat za izgradnju obilaznice oko Petrovaradina, januar 2008. god.

## **Primeri analize hidrauličkog udara u vodovodnim sistemima primenom softverskog paketa AFT Impulse**

Danilo Stipić<sup>1</sup>, Ljubomir Budinski<sup>2</sup>

APSTRAKT: U radu je proučavan fenomen hidraulički udar, koji nastaje kao posledica nagle promene brzine tečenja fluida usled iznenadnog prekida rada pumpe. Upravo ovo je jedan od najčešćih problema koji mogu prouzrokovati havariju cevovodnog sistema, što je i razlog odabira ove teme. Rad obuhvata analize dva primera, pri kojima postoji opasnost od nastanka prelaznih režima, u cilju uspostavljanja mera za ublažavanje ili potpuno sprečavanje štetnih efekata. Analiza je izvršena korišćenjem softverskog paketa AFT Impulse, koji je opšte prihvaćen za ovakvu vrstu proračuna, a za svaki primer je dat i predlog mera za zaštitu od hidrauličkog udara.

Ključne reči: hidraulički udar, AFT Impulse

## **Examples of water hammer analysis in water supply systems using software package AFT Impulse**

ABSTRACT: This thesis studies the phenomenon known as water hammer which is caused by a sudden change in fluid velocity due to a sudden stop of pump's functioning. The choice of the topic was led by the fact that this is one of the most common problems which can cause a disaster of a pipe system. In order to establish necessary measures for mitigation or complete prevention of harmful effect, the thesis analyses several different examples of possible transient regime occurrences which can be dangerous. The analysis was done by using software package AFT Impulse, which is generally accepted for this type of calculation, and every example is followed by a proposal for protection measures.

Keywords: water hammer, AFT Impulse

---

<sup>1</sup> Mast Danilo Stipić, dipl. inž. građ., Saradnik u nastavi, Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, [danilostipic@uns.ac.rs](mailto:danilostipic@uns.ac.rs)

<sup>2</sup> Doc dr Ljubomir Budinski, dipl. inž. građ., Fakultet Tehničkih nauka, Novi Sad, [ljubabu@gmail.com](mailto:ljubabu@gmail.com)

## 1 Uvod

Analizom su obuhvaćena dva postojeća vodovodna sistema. U prvom slučaju razmatran je potisni cevovod između naselja Stanišić i Riđica, dok je u drugom razmatran sistem za navodnjavanje u naselju Jarkovac. U oba slučaja postoji opasnost od hidrauličkog udara usled prestanka rada pumpi, tako da je potrebno izvršiti hidraulički proračun udara i ustanoviti način na koji će se izvršiti zaštita cevovodnog sistema, pumpi i prateće opreme [3]. U oba primera postoji posuda pod pritiskom čije su dimenzije izabrane iskustveno, kao i vazdušni ventili čiji je broj takođe iskustveno odabran. Cilj ovog rada je da se utvrdi da li su postojeći elementi dovoljni za zaštitu od hidrauličkog udara, pri čemu su rezultati potkrepljeni hidrauličkim proračunom, izvršeni primenom softverskog paketa AFT Impulse [1, 2].

## 2 Metodologija

AFT Impulse je programski paket za modeliranje hidrauličkog udara u cevovodima pod pritiskom. Zbog brzine rešavanja problema i tačnosti rezultata, ovaj programski paket je jedan od najčešće korišćenih u svetu za simulaciju prelaznih režima tečenja u cevovodima pod pritiskom. Veoma jasan grafički prikaz pojednostavljuje kompleksan proces izgradnje modela. Prikaz rezultata proračuna je razumljiv i nedvosmislen, u vidu tabela i dijagrama [7].

Softver se zasniva na osnovnim jednačinama hidrotehnike, jednačini kontinuiteta i dinamičkoj jednačini, a za formiranje numeričkog modela koristi metodu karakteristika.

Mogućnosti modela su sledeće:

- omogućava modelovanje granatih i prstenastih sistema, kao i sistema koji su gravitacioni ili pod pritiskom,
- pruža mogućnost modelovanja velikog broja komponenata koji predstavljaju granične uslove,
- razmatra Njutnovske i Nenjutnovske fluide koristeći velik broj različitih modela.

Kao i većina inženjerskih programa i AFT Impulse primenjuje određene pretpostavke. One se uvode kako bi se proračun pojednostavio i time vreme trajanja proračuna skratilo. Ponekad je određene parametre teško precizno odrediti jer na njih utiče velik broj promenljivih veličina, pa je stoga, i u tom slučaju potrebno uprostiti proračun. Pretpostavke se moraju kretati u granicama u okviru kojih njihovo uvođenje neće u velikoj meri uticati na rezultate.

Pretpostavke na kojima se bazira AFT Impulse su:

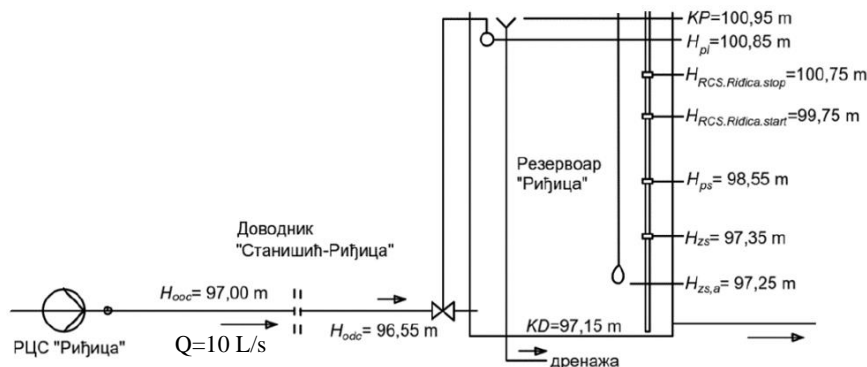
- tečenje je jednodimenzionalno,
- nema hemijske reakcije,
- brzina propagacije talasa ostaje konstantna tokom vremena,
- cevi su potpuno ispunjene fluidom,
- sledeći parametri su nepromenljivi za jednu cev:
  - o gustina tečnosti,
  - o dinamička viskoznost,
  - o zapreminski modul stišljivosti.

## 3 Studije slučaja

### 3.1 Potisni cevovod između naselja Stanišić i Riđica

Naselje Riđica trenutno se snabdeva vodom iz 3 bunara smeštenih u samom naselju. Voda se iz bunara potiskuje u hidrofor odakle se distribuira u vodovodni sistem. Kako voda iz bunara nije zadovoljavajućeg kvaliteta, a kapacitet bunara vremenom opada, predviđeno je da se postojeći sistem poveže na gradski vodovodni sistem „PPV Jaroš ” u Somboru, kako bi se trajno rešio problem

snabdevanja naselja pijaćom vodom zadovoljavajućeg kvaliteta. Iz navedenih razloga predviđa se izgradnja rezervoara i crpne stanice, koja je izgrađena unutar zatvaračnice rezervoara „Stanišić“. Na slici 1, dat je šematski prikaz položaja crpne stanice, potisnog cevovoda i rezervoara sa karakterističnim nivoima vode [2].



Slika 1. Šematski prikaz položaja crpne stanice, potisnog cevovoda i rezervoara sa karakterističnim nivoima vode

Figure 1. Schematic view of position of a pumping station, a pressure pipeline and a reservoir with characteristic water levels

Dovodni cevovod, od naselja Stanišić do Ridice, je dužine 7780 m [4]. Hidrauličkim proračunom je dobijen potreban prečnik cevi. Usvojena je cev PEHD PN10 (OD 160 mm, s=9,5 mm, d=141 mm, E=1070 MPa,  $\nu=0,3$ , apsolutna hrapavost cevi je usvojena kao  $k=0,2$  mm). U RCS „Ridica“ predviđene su dve centrifugalne pumpe, jedna radna i jedna rezervna, tipa „KSB Multitec V65/3-6.1 11.167“, nominalne brzine obrtanja  $1478 \text{ min}^{-1}$ .

Hidraulički model formiran je korišćenjem programskog paketa AFT Impulse, unosom prethodno datih podataka. Kao granični uslovi korišćeni su pumpa i rezervoar, spojeni cevovodom. Za zaštitu od hidrauličkog udara korišćeni su vazdušni ventili i posuda pod pritiskom.

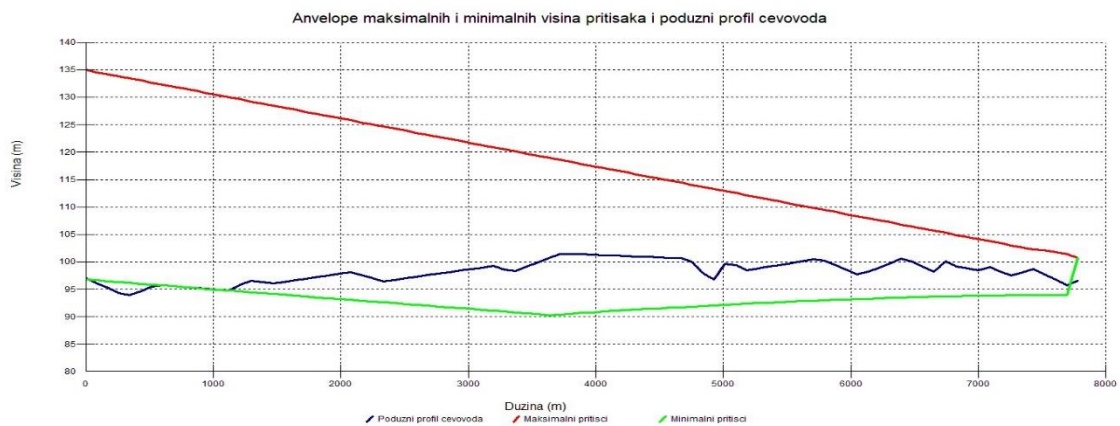
### 3.1.1 Postojeće stanje bez zaštite od hidrauličkog udara (PEHD cevovod)

U ovom slučaju, sistem se sastoji samo od pumpe (u naselju Stanišić), cevi i rezervoara (u naselju Ridica), bez elemenata za zaštitu. Primer je urađen kako bi se utvrdilo ponašanje sistema i dobio uvid u moguće načine sprečavanja ili ublažavanja posledica usled negativnog efekta pri nastanku prelaznih režima. Modelom je simuliran ispad pumpe iz sistema, tj. nagli prestanak rada pumpe. Neposredno iza pumpe nalazi se nepovratna klapna koja ima ulogu da onemogući povratak vode ka pumpi i time spreči oštećenje radnog kola pumpe. Na slici 2, date su anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota kao i podužni profil terena.

Kao što se vidi sa slike 2, skoro celom dužinom cevovoda će se javiti potpritisci. Najveća vrednost potpritiska će se javiti na stacionaži 3650 m od pumpe i iznosi 12 mvs. Usled ovakvog stanja doći će do pojave kavitacije što može prouzrokovati oštećenje zidova cevi, skupljanje cevi, oštećenja ostalih elemenata na sistemu. Stoga, sistem bi bio van svoje funkcije dok se ne izvrši popravka ili zamena svih oštećenih elemenata, a to za sobom nosi i velike ekonomske posledice. Dobijena vrednost potpritska je samo teorijska iz razloga što kavitacija neće dozvoliti da pritisak opadne ispod pritiska zasićenja vodene pare, pri kojoj dolazi do ove pojave.

Iz navedenih razloga potrebno je ustanoviti način na koji će se štetne posledice hidrauličkog udara umanjiti ili eliminisati.





Slika 2. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritisaka i poduzni profil terena – postojeće stanje

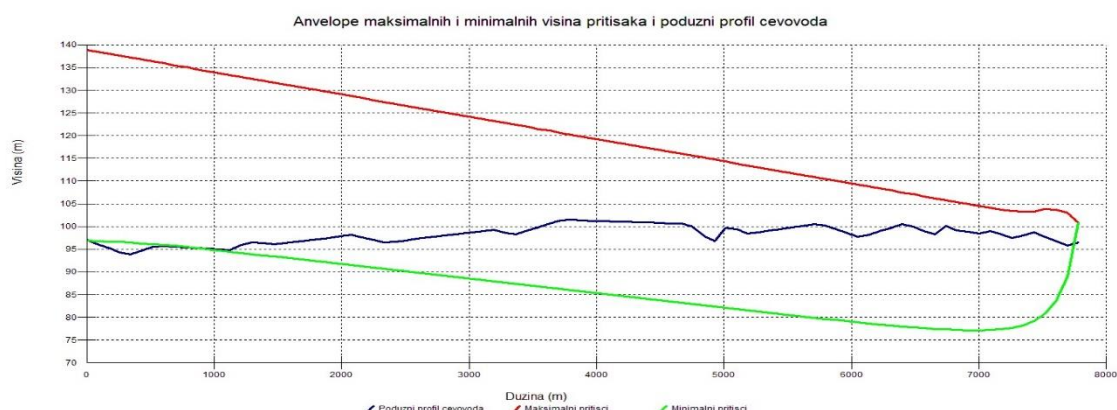
Figure 2. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path – existing case

### 3.1.2 Stanje bez zaštite od hidrauličkog udara (cevovod od duktilnog liva)

Razmatrana je mogućnost primene cevi od duktilnog liva umesto PEHD cevi. Anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota za slučaj cevi od duktilnog liva, date su na slici 3.

Upoređivanjem dijagrama na slikama 2 i 3, vidi se da se anvelopa minimalnih pritisaka promenila. Najveća vrednost minimalnog pritiska se pomerila nizvodno, na stacionažu 7000 m od pumpe i iznosi oko 22 mvs, što je znatno nepogodnije u odnosu na PEHD cev. Ovo se javlja iz razloga što je modul elastičnosti za duktilne cevi oko 85 puta veći nego za PEHD cevi, pa je i brzina propagacije za duktilnu cev veća nego za PEHD cev, a to za posledicu ima i veću vrednost promene pritiska. PEHD je dosta elastičniji pa prema tome ima mogućnost da se bolje prilagođava promenama pritiska. Opet, treba naglasiti da nije uzet u obzir uticaj kavitacije pri proračunu i da ovolike vrednosti potpritisaka nisu moguće u praksi.

Iz prethodna dva primera uočava se da je za potrebe smanjenja štetnih posledica prelaznih režima pogodnije koristiti elastičniji materijal za cevi.



Slika 3. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritisaka i poduzni profil terena – duktilna cev

Figure 3. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path – ductile iron pipe

### 3.1.3 Stanje sa jednim vazдушnim ventilom (PEHD cevovod)

Korišćenje usisno-izduvnog tj. vazdušnog ventila, omogućava da se na mestu njegovog postavljanja pritisak u cevovodu izjednači sa atmosferskim. Vazdušni ventil uvlači vazduh usled pojave potpritiska i tako ne dozvoljava pojavu vakuuma u cevovodu, dok usled pojave vazduha u cevi, isti izbacuje i ne dozvoljava zadržavanje vazduha u cevovodu. Na taj način znatno se redukuju pritisci u sistemu. Na slici 4, date su anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota za slučaj PEHD cevi sa jednim vazдушnim ventilom. Vazdušni ventil je postavljen na stacionaži 3650 m od pumpe, iz razloga što je na tom mestu zabeležen najmanji pritisak.

Sa slike 4, može se videti da je upotreba samo jednog vazdušnog ventila znatno poboljšala stanje pritiska u cevovodu. Uzvodno od vazdušnog ventila ne dolazi do pojave potpritiska ali nizvodno i dalje postoji opasnost od kavitacije. Sada se najveća vrednost minimalnog pritiska javlja na sa stacionaži 6800 m od pumpe i iznosi oko 6 mvs.



Slika 5. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritiska i poduzni profil terena - sa jednim ventilom

Figure 5. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path – with one air valve



Slika 6. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritiska i poduzni profil terena - sa posudom pod pritiskom

Figure 6. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path – with gas accumulator

### 3.1.4 Stanje sa posudom pod pritiskom (PEHD cevovod)

U ovom primeru pokazano je kako posuda pod pritiskom utiče na prelazne režime i zaštitu cevovoda. Posuda pod pritiskom je uređaj koji se veoma često koristi za zaštitu od hidrauličkog udara. To je sud ispunjen vazduhom pod pritiskom koji se nalazi pri vrhu a ispod vazduha je voda. Kako bi se sprečio gubitak vazduha u posudi zbog rastvaranja vazduha u vodi ili isticanja kroz neispravnu armaturu, između vode i vazduha nalazi se membrana. Posuda funkcioniše tako što prima ili dodaje

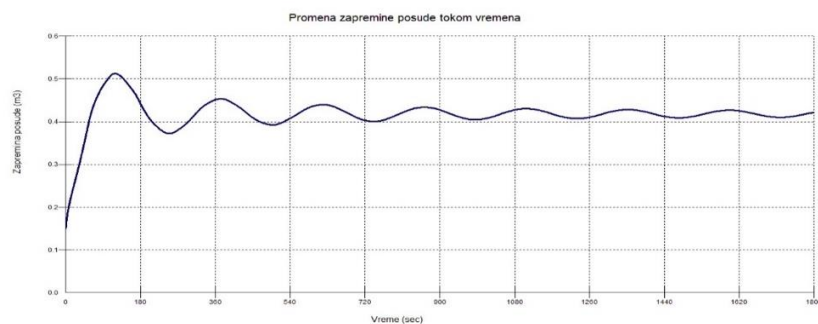
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

određenu količinu vode u cevovod u zavisnosti od pritiska. Pri povećanju pritiska, posuda prima određenu količinu vode a kada se dostigne maksimalan pritisak, posuda vraća višak vode i tako ne dozvoljava da se pri nižim pritiscima stvori vakuum. Ona se na neki način ponaša kao amortizer, koji ublažava promene pritiska nastale kao posledica prelaznih režima.

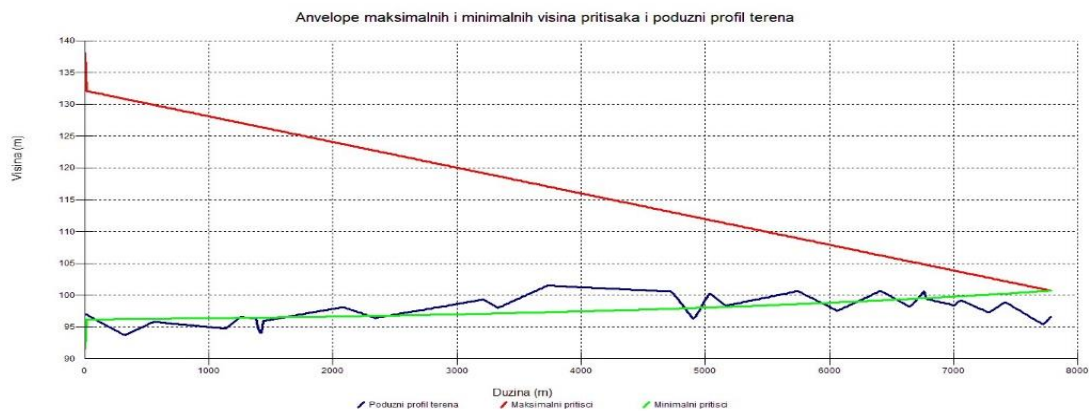
Za potrebe zaštite sistema korišćena je posuda početne zapremine vazduha 150 L, a postavljena je neposredno iza pumpe. Upoređenjem dijagrama na slikama 2 i 6, uočava se da posuda u velikoj meri utiče na stanje pritiska u cevovodu. Sada najveća vrednost potpritiska u sistemu ne prelazi 3,5 mvs, što znači da je jedna posuda sasvim dovoljna za zaštitu. Na slici 7, data je promena zapremine posude pod pritiskom tokom vremena.

Sa dijagrama se očitava početna zapremina od  $0,15 \text{ m}^3$ , te nakon prekida rada pumpe, ona naglo raste do  $0,51 \text{ m}^3$ . Nakon 2 minuta zapremina dobija svoju maksimalnu vrednost a zatim vremenom oscilira dok se ne ustali. S obzirom na standardne dimenzije, usvojena je posuda zapremine  $0.7 \text{ m}^3$ .



Slika 7. Promena zapremine posude pod pritiskom

Figure 7. Time change of volume of the reservoir



Slika 8. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritisaka i poduzni profil terena, sa posudom pod pritiskom – duktilna cev

Figure 8. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path – with gas accumulator, ductile iron pipe

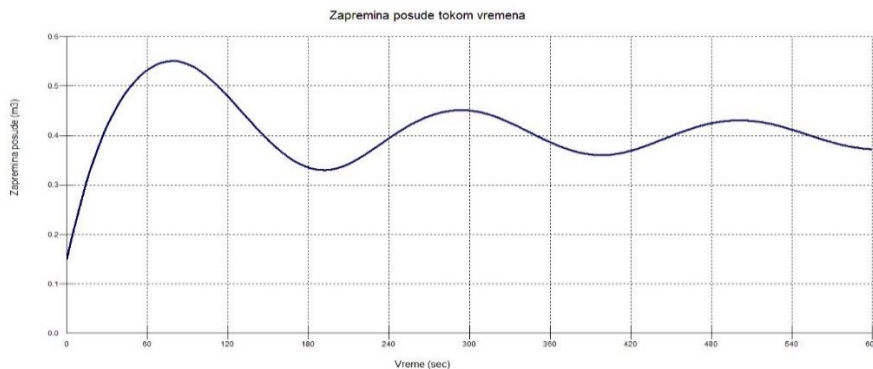
### 3.1.5 Stanje sa posudom pod pritiskom (cevovod od duktilnog liva)

Poređenja radi, urađen je primer cevovoda od duktilnog liva, sa posudom pod pritiskom. Na slici 8, mogu se videti anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota za slučaj cevi od duktilnog liva sa posudom pod pritiskom.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

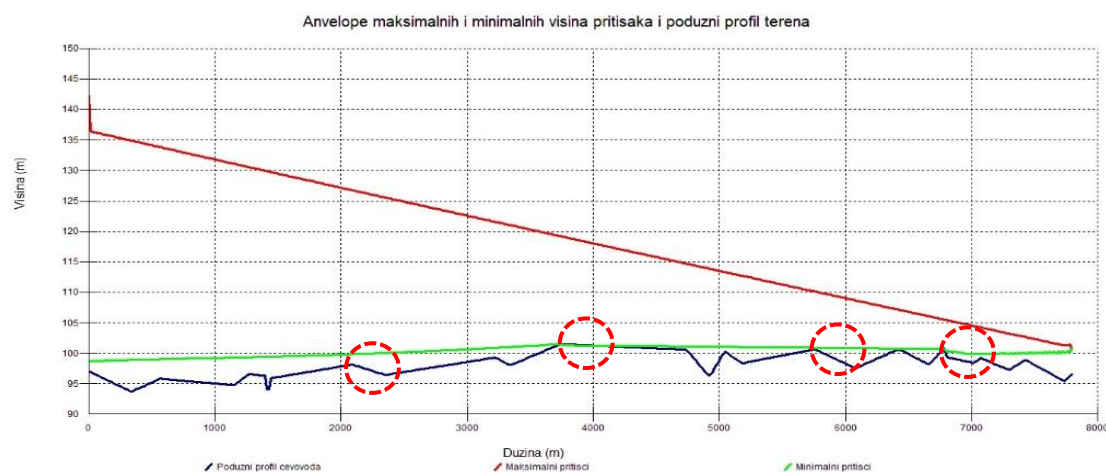
## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Najveća vrednost potpritiska je 4 mvs. Na slici 9, data je i promena zapremine posude pod pritiskom za slučaj cevi od duktilnog liva. Ako se sada uporede potrebne zapremine posude za slučaj PEHD cevi i cevi od duktilnog liva, uočava se da i ovde nema velike razlike u potrebnoj zapremini, koja u ovom slučaju iznosi  $0,55 \text{ m}^3$ . Povećali su se amplituda i period oscilovanja nivoa vode, ali to nema nikakvog značaja za izbor posude.



Slika 9. Promena zapremine posude pod pritiskom – cev od duktilnog liva

Figure 9. Time change of volume of the reservoir – ductile iron pipe

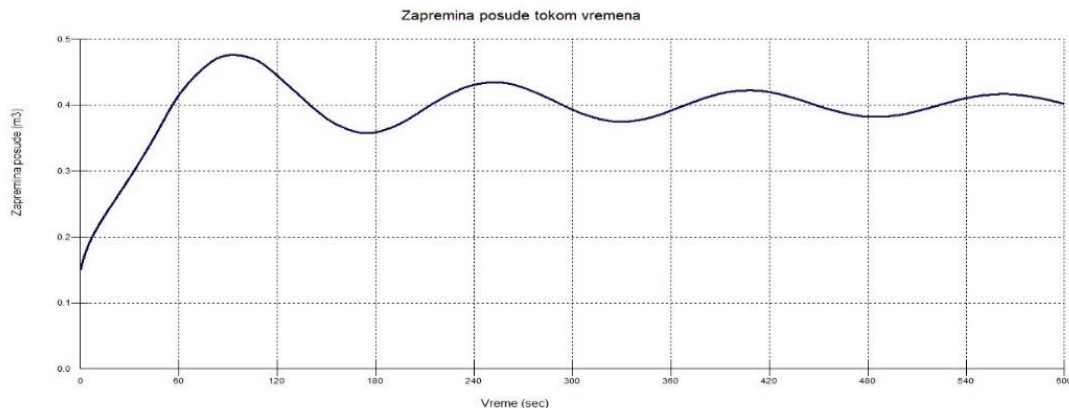


Slika 10. Anvelope maksimalnih i minimalnih pritisaka i poduzni profil terena, sa posudom pod pritiskom i ventilima

Figure 10. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path with gas accumulator and air valves

### 3.1.6 Konačno stanje – stanje sa posudom pod pritiskom i vazдушnim ventilima (PEHD cevovod)

U distribitivnoj vodovodnoj mreži preporuka je da se na svakih 1500 do 2000 m na cevovodu postave vazdušni ventili, pri čemu treba obratiti pažnju da se postavljaju na najvišim tačkama cevovoda. Na taj način se obezbeđuje ovazdušenje cevovoda. Iako možda na prvi pogled izgleda da posuda nije potrebna ako se koristi toliki broj vazdušnih ventila, ona se ipak primenjuje jer reaguje trenutno i štiti pumpu. Takođe, moguće je da iz nekog razloga vazdušni ventili nisu u funkciji, a i mogu da kasne pri otvaranju i upuštanju vazduha, pa je tada posuda od velike važnosti.



Slika 11. Promena zapremine posude pod pritiskom- konačno stanje

Figure 11. Time change of volume of the reservoir – final case

Na slici 10, prikazane su anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota za slučaj cevi od polietilena sa posudom pod pritiskom i ventilima, obeleženim crvenim krugovima. U ovom slučaju nigde u cevovodu se neće javiti negativni pritisci tokom prelaznih režima.

Potrebna zapremina posude pod pritiskom prikazana je na slici 11 i iznosi  $0,48 \text{ m}^3$ , tako da se usvaja posuda standardne zapremine od  $0.5 \text{ m}^3$ . Upoređivanjem sa potrebnim zapreminama posuda u prethodnim slučajevima, nema velike razlike.

Rezultatima sprovedene analize potvrđuje se da nema odstupanja od projektovanog stanja, kako u broju vazдушnih ventila, tako ni u potrebnoj zapremini posude pod pritiskom.

### 3.2 Sistem za navodnjavanje u Jarkovcu

Za potrebe sistema za navodnjavanje u naselju Jarkovac, izgrađeni su pumpna stanica i granati cevovodni sistem, ukupne dužine 7470 m. Pumpna stanica zahvata vodu iz kanala „Nadel“, na stacionaži 71+000 km. Nivo vode u kanalu se ustavama održava konstantnim, na koti 80,67 mm. Površina se zaliva pomoću pet centar pivota, koji su na cevovod priključeni na krajevima grana cevovoda [5]. Skica sistema a ujedno i model formiran u AFT Impulsu, sa prikazom elemenata sistema data je na slici 11.

U crpnoj stanici predviđena je ugradnja četiri pumpe, tri radne i jedna rezervna, tipa Caprari NCH 150-500/547. Radna tačka je definisana sledećim parametrima:  $Q=130 \text{ L/s}$ ,  $H=90 \text{ m}$ ,  $P=150 \text{ Kw}$ ,  $n=1480 \text{ min}^{-1}$ .

Kao i u prethodnom primeru, proračun je izvršen korišćenjem softverskog paketa AFT Impulse. Hidraulički model formiran je korišćenjem sledećih elemenata: pumpe, cevi, posuda pod pritiskom, vazdušni ventili, račve, redukcije i sprinkleri.

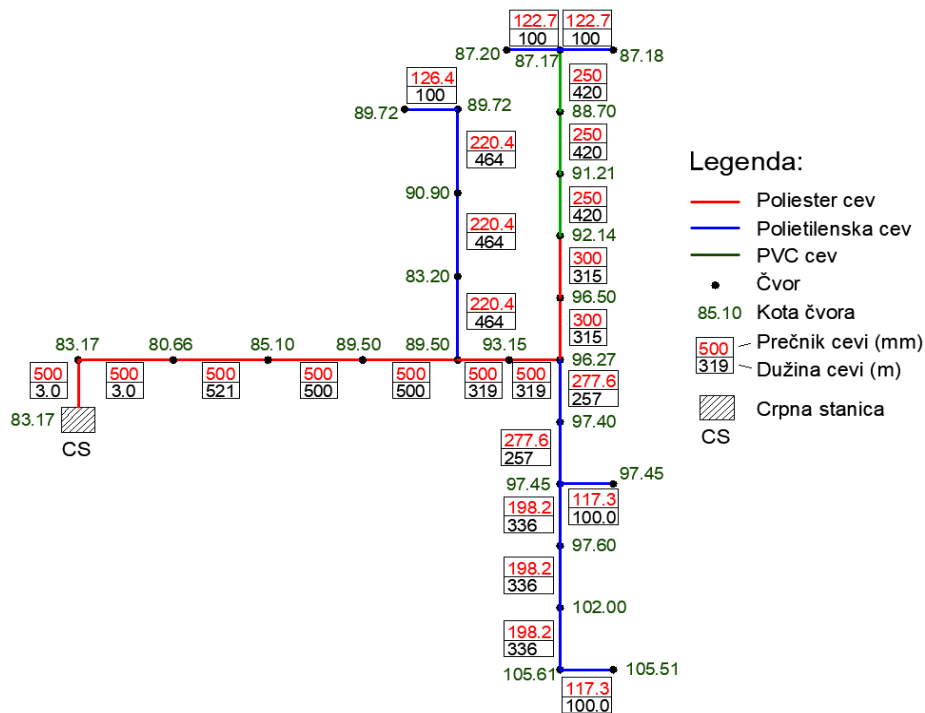
#### 3.2.1 Stanje bez elemenata za zaštitu od hidrauličkog udara

Hidrauličkim proračunom utvrđeno je da se celom dužinom cevovoda, duž sva tri kraka, javljaju negativni pritisci koji prevazilaze vrednosti pri kojima dolazi do nastanka kavitacije. Usled takvog stanja može doći do oštećenja cevovoda usled kavitacije i do skupljanja cevi ali i do oštećenja centar pivot sistema za navodnjavanje. Centar pivot sistem je veoma osetljiv na udar, stoga postoji velika verovatnoća da usled udara dođe do pucanja cevi i prateće opreme, što prouzrokuje prekid funkcionisanja sistema i velike ekonomske posledice.

Iz navedenih razloga neophodno je izvršiti zaštitu sistema. Zaštita je izvršena primenom vazдушnih ventila i posude pod pritiskom.

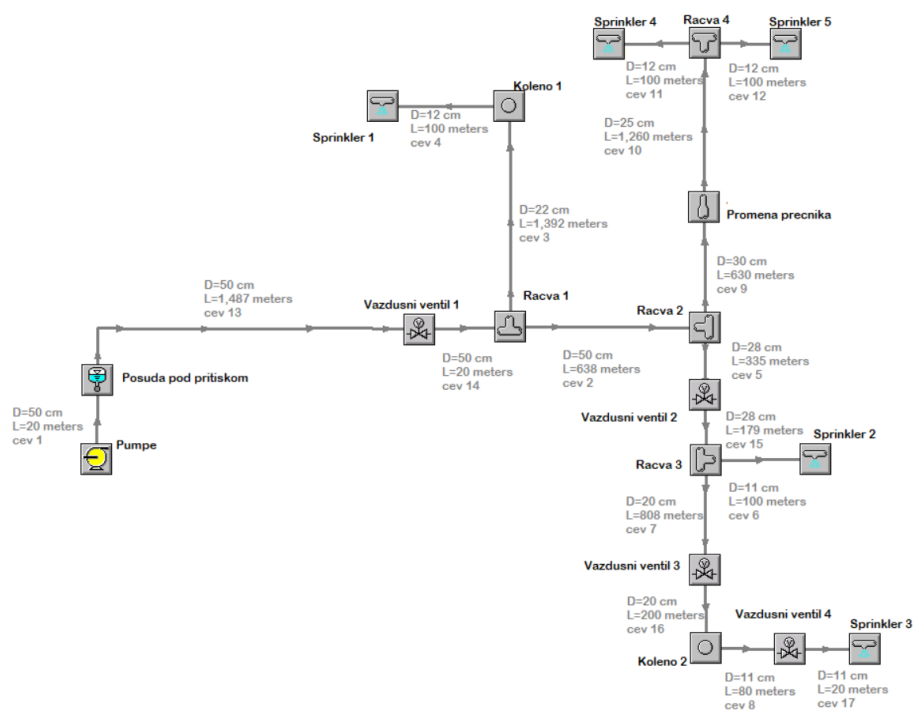
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 11. Skica sistema za navodnjavanje

Figure 11. Schematic view of irrigation system

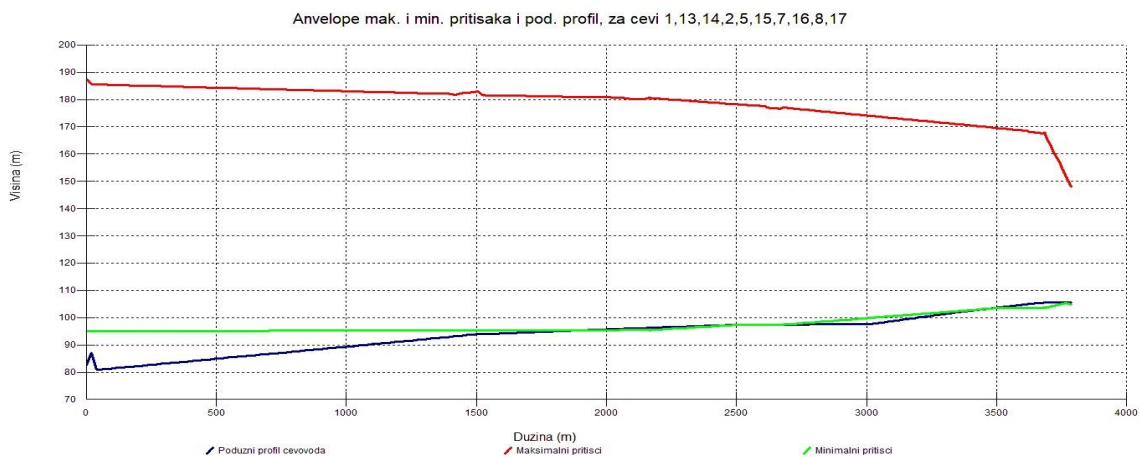


Slika 12. Model sistema za navodnjavanje formiran u AFT Impulsu - slučaj 2

Figure 12. Model of system of irrigation formed in AFT Impulse – case 2

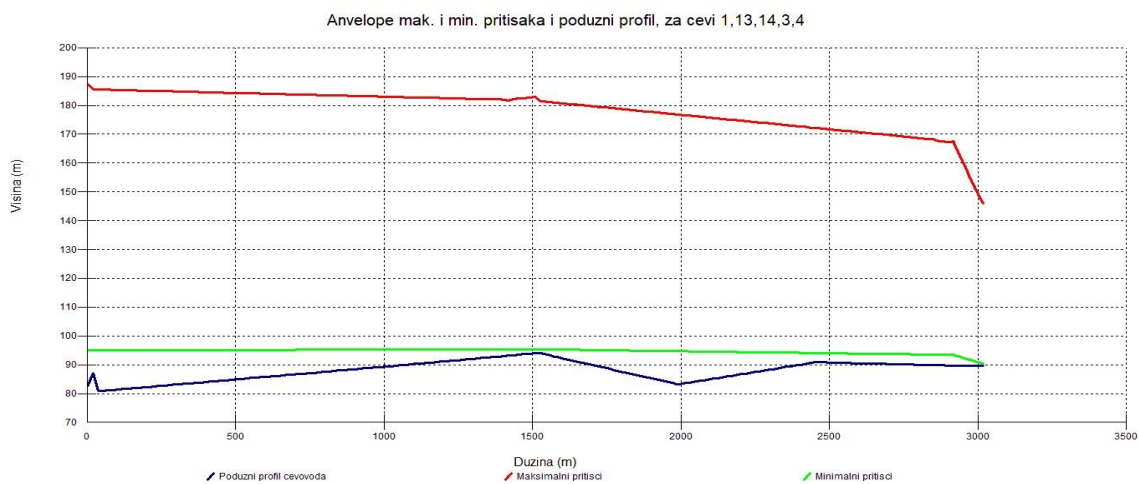
### 3.2.2 Stanje sa elementima zaštite od hidrauličkog udara

Razmatrano je više različitih položaja ventila i utvrđena su najpogodnija mesta za njihovo postavljanje. Posuda je postavljena neposredno iza pumpi, a njena zapremina je određena na osnovu dijagrama promene potrebne zapremine. Na slici 12, dat je prikaz modela formiranog u AFT Impulsu sa položajem svih elemenata u sistemu, dok su na slikama 13, 14 i 15 date anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota, za sva tri kraka.



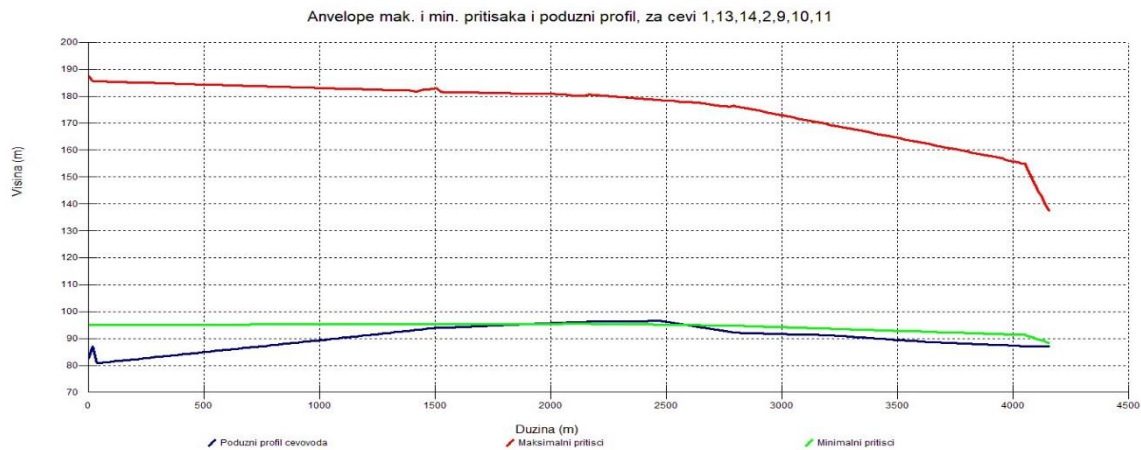
Slika 13. Anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota, za cevi 1, 13, 14, 2, 5, 15, 7, 16, 8, 17

Figure 13. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path 1, 13, 14, 2, 5, 15, 7, 16, 8, 17, with gas accumulator and air valves



Slika 14. Anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota, za cevi 1, 13, 14, 2, 9, 10, 11

Figure 14. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path 1, 13, 14, 2, 9, 10, 11, with gas accumulator and air valves

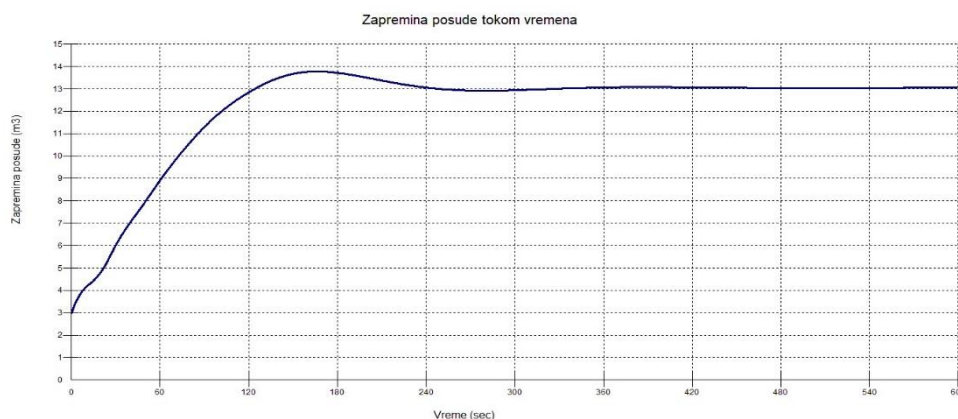


Slika 15. Anvelope maksimalnih i minimalnih  $\Pi$  kota, za cevi 1, 13, 14, 3, 4

Figure 15. Presentation of max. and min. piezometric head along pipeline path 1, 13, 14, 3, 4, with gas accumulator and air valves

Sa dijagrama na slici 13, vidi se da je potrebna zapremina posude 14 m<sup>3</sup>, ako je početna zapremina vazduha 3 m<sup>3</sup>. Vodeći računa o standardnim dimenzijama posuda, usvaja se posuda zapremine 16 m<sup>3</sup>. Posuda je izdignuta 1 m iznad terena, a cev koja posudu spaja sa cevovodom je dužine 4 m i prečnika 250 mm.

Upoređujući slučaj 1 sa slučajem 2, uviđa se da je upotrebom dodatnih elemenata zadovoljen kriterijum da ne dođe do pojave kavitacije u cevovodu, tj. da ne dođe do oštećenja cevi, pumpi i ostalih elemenata u sistemu.



Slika 13. Promena zapremine posude pod pritiskom – sistem za navodnjavanje

Figure 13. Time change of volume of the reservoir – irrigation system

## 4 Zaključak

U radu je proučavan fenomen hidraulički udar, koji nastaje kao posledica nagle promene brzine tečenja fluida usled iznenadnog prekida rada pumpe. U radu je izvršena analiza dva primera pri kojima postoji opasnost od nastanka prelaznih režima, u cilju uspostavljanja mera za ublažavanje ili potpuno sprečavanje štetnih efekata. Analiza je izvršena korišćenjem softverskog paketa AFT Impulse, a za svaki primer je dat i predlog mera za zaštitu.

Prema rezultatima sprovedene analize zaključuje se sledeće:



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Za slučaj dugačkog potisnog cevovoda između naselja Stanišić i Riđica urađeno je više varijanti. Najpre je posmatrano stanje bez zaštitnih elemenata za polietilensku cev i utvrđeno je da se u tom slučaju celom dužinom cevovoda javljaju potpitisici u nedozvoljenim granicama. Nakon ovoga urađen je isti primer ali sada sa cevi od duktilnog liva, da bi se pokazalo kako materijal cevi može uticati na konačne rezultate. Utvrđeno je da cev od duktilnog liva zbog veće krutosti tj. većeg modula elastičnosti, predstavlja nepovoljnije rešenje kada je u pitanju eliminisanje nepovoljnih posledica usled hidrauličkog udara.

Zatim su razmatrani slučajevi sa zaštitnim elementima. Prvo je posmatrano šta se dešava ako se postavi jedan vazdušni ventil i ustanovljeno je da on značajno poboljšava stanje pritisaka u cevovodu. Položaj vazdušnog ventila je biran tako da pruža najpovoljnije rešenje u pogledu smanjenja potpritisaka. Iako je slika pritisaka bolja, ipak se javljaju negativne vrednosti pritisaka koje mogu uzrokovati pojavu kavitacije. Iz tog razloga postavljen je još jedan vazdušni ventil, pri čemu je i njegov položaj pažljivo biran. Potpitisici u ovom slučaju ne predstavljaju opasnost od oštećenja cevovoda i elemenata na cevovodu, jer se kreću u dozvoljenim granicama.

Naredni primer koji je uzet u obzir je slučaj sa posudom pod pritiskom. Ovaj primer je analiziran da bi se uvrđilo kako posuda utiče na prelazne režime. Ustanovljeno je da primena jedne posude, bez korišćenja vazdušnih ventila, obezbeđuje zaštitu elemenata sistema i data je potrebna zapremina posude. Takođe, izračunata je i zapremina posude pod pritiskom ali za slučaj duktilne cevi i zapaženo je da nema bitne razlike u vrednostima pritisaka kao ni pri potrebnoj zapremini posude za slučajeve polietilenske i duktilne cevi.

Na kraju je dato konačno rešenje zaštite od hidrauličkog udara, sa posudom pod pritiskom i dva vazdušna ventila. Određeni su optimalni položaji ventila, kao i potrebna zapremina posude.

Rezultatima sprovedene analize potvrđuje se da nema odstupanja od projektovanog stanja, kako u broju vazdušnih ventila, tako ni u potrebnoj zapremini posude pod pritiskom.

U drugom primeru simuliran je ispad pumpi u sistemu za navodnjavanje u Jarkovcu. Najpre je analizirano stanje bez elemenata za zaštitu i utvrđeno je da duž svih cevi postoji opasnost od kavitacije. Iz tog razloga u sistem su dodati vazdušni ventili i posuda. Elementi su raspoređeni tako da se postigne najbolje stanje pritisaka u mreži. Određeni su tip i dimenzije ventila i posude pod pritiskom. Ustanovljeno je da je za zaštitu cevovodnog sistema od hidrauličkog udara potrebna jedna posuda pod pritiskom utvrđene zapremine, kao i četiri vazdušna ventila.

Upoređujući rezultat sprovedene analize sa postojećim stanjem, potvrđuje se da nema značajnih odstupanja u zapremini posude kao i broju vazdušnih ventila.

## Literatura

1. AFT Impulse version 4.0 Tutorial, Applied Flow Technology Corporation.
2. Budinski Lj. i saradnici, Modeliranje hidrauličkog udara u softverskom paketu AFT Impulse, Zbornik radova, 17. naučno savetovanje SDHI i SDH, Vršac 2015.
3. Generalni projekt snabdevanja vodom naselja opštine Sombor, Beograd, 2006.
4. Ivetić M., Računska hidraulika - Tečenje u cevima, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996.
5. PGD osnovnih objekata vodosnabdevanja i dovodnika vode Kljajićevo – Telečka, Svetozar Miletić – Aleksa Šantić i Stanišić – Riđica sa objektima: rezervoar i crpna stanica u Telečkoj, rezervoar i crpna stanica u Aleksu Šantiću, rezervoar i crpna stanica u Riđici.
6. PGD sistema za navodnjavanje u Jarkovcu.
7. Stipić D., Analiza hidrauličkog udara u vodovodnim sistemima, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu – master rad, Novi Sad, 2018.

## Crpne stanice u kanalizacionim sistemima

Matija Stipić<sup>1</sup>, Slobodan Tašin<sup>2</sup>

APSTRAKT: Objekti kanalizacionih crpnih stanica predstavljaju hidrotehničke objekte opremljene pumpnim agregatima i pratećom hidromašinskom i elektro opremom. Projektovanje i izgradnja ovih objekata zahteva timski rad različitih tehničkih struka, u kojem vodeće mesto, skoro uvek pripada inženjeru hidrotehnike. Za projektovanje objekata malih crpnih stanica, kapaciteta do 100 L/s, postoje uglavnom razvijena standardna rešenja. Za crpne stanice srednjeg kapaciteta, od 100 L/s do 1000 L/s, rešenja se traže u sprezi lokalne pozicije objekta u prostoru i zahteva rada pumpnih agregata. Crpne stanice kapaciteta preko 1000 L/s su veoma retke, i zahtevaju poseban pristup pri projektovanju. Rad obuhvata način pristupa i prikaz projektnog rešenja hidrotehničkog objekta crpne stanice radnog kapaciteta 15260 L/s u kombinovanom-opštem sistemu kanalizacije.

Ključne reči: crpne stanice, kombinovana kanalizacija

## Sewer pumping stations

ABSTRACT: Sewer pumping station facilities are hydrotechnical structures equipped with pumps and related hydromechanical and electrical equipment. The design and construction of these structures requires team work of various engineers, with the leading position almost always occupied by a hydrotechnical engineer. Mainly developed standard solutions are applied for the design of small pumping stations with a capacity of up to 100 L/s. Solutions for pumping stations with a medium capacity, from 100 L/s to 1000 L/s, are searched for taking into account the location of the structure and the requirements of the pumps operation. Pumping stations with a capacity of more than 1000 L/s are very rare and a special approach is required in the design process. The approach and the description of the proposed design of the pumping station with a working capacity of 15260 L/s in a combined-general sewer system.

Key words: pumping stations, combined sewer

---

<sup>1</sup> Doc dr Matija Stipić, dipl. inž. građ., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, [matija@vojvodinaprojekt.rs](mailto:matija@vojvodinaprojekt.rs)

<sup>2</sup> Doc dr Slobodan Tašin, dipl. inž. maš., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, [tasholi@uns.ac.rs](mailto:tasholi@uns.ac.rs)

## 1 Uvod

Crpne stanice, kao sastavni delovi objekata kanalizacione mreže, predstavljaju hidrotehničke objekte opremljene pumpnim agregatima i pratećom hidromašinskom i elektro opremom. Pumpni agregati u crpnoj stanici dotekloj otpadnoj vodi dodaju energiju i podižu je na viši nivo – potreban za tečenje ka recipijentu.

Razlikujemo primenu crpnih stanica u gravitacionoj kanalizaciji i kanalizaciji pod pritiskom. Kod kanalizacije sa gravitacionim tečenjem, pumpni agregati u crpnim stanicama podižu otpadnu vodu iz nižeg u viši kolektor (tzv. „liftovanje”) [2]. U kanalizaciji pod pritiskom otpadna voda se putem pumpnih agregata i cevovoda pod pritiskom potiskuje do izliva (udaljenog više desetina ili stotina metara).

U poslednje vreme objekti crpnih stanica grade se u velikom broju, onako kako se grade i razvijaju kanalizacioni sistemi. Savremene crpne stanice u kanalizaciji zahtevaju primenu opreme za uklanjanje otpada na ulasku u crpni bazen sa bezbednom evakuacijom istog. Sva oprema i primenjeni materijali moraju biti dugotrajno otporni na koroziju pri radu u agresivnoj sredini. Takođe, zahtevi za dodatnom opremom crpne stanice postaju sve strožiji, posebno kada je u pitanju automatizacija i uniformisanje njenog rada.

Kod izbora tehničkog rešenja teži se da objekat bude stabilan, vodeći računa o kontroli na uzgon, saobraćajnom opterećenju, a posebno o blizini javnog prostora. Kako je kanalizacija objekat javne infrastrukture, ona se nalazi na javnoj površini i deli svoj koridor sa drugim objektima. Objekti crpnih stanica radnog kapaciteta do 100 L/s, sa svojim dimenzijama, mogu se bez većih poteškoća izgraditi na javnoj površini. Po pravilu, objekti malih crpnih stanica su podzemni, sa potrebnim nadzemnim delom prateće opreme i ormana koji su ograđeni na javnoj površini.

Objekti crpnih stanica radnog kapaciteta od 100-1000 L/s moraju da se planiraju na posebnim delovima parcela (ili na posebno utvrđenom delu javne parcele) i zahtevaju poseban pristup. Problemi neprijatnog mirisa i odnošenja otpada prikupljenog sa rešetke počinju da se rešava. Ovakve crpne stanice se javljaju kod naselja veličine preko 15.000 ES a veoma su česte kod velikih gradova (Beograd, Novi Sad,...).

U kombinovanim-opštım sistemima kanalizacije, pogotovo u većım gradovima, izgrađene su i postoje objekti crpnih stanica radnog kapaciteta preko jednog i više m<sup>3</sup>/s [2]. Za izgradnju ovih objekata posebno se planira parcela, infrastruktura i opremljenost crpne stanice. Uglavnom su to objekti koji se veoma često nalaze u blizini stambenih objekata (škola, domova zdravlja, javnih ustanova). Projektovanje i izgradnja objekata velikih crpnih stanica zahteva timski rad različitih tehničkih struka i redovno je pod budnim okom javnosti. Objekat crpne stanice pre svega treba hidrotehnički dimenzionisati tako da bez ikakvih problema protok koji dotiče do nje podigne bezbedno na višu kotu, da teče dalje ka recipijentu. U objektu može da se javlja buka, izazvana radom pumpi, a po pravilu se javljaju neprijatni mirisi od otpada sa rešetki i povećana koncentracija gasova iz kolektora. Objekat crpne stanice je potrebno planirati tako da se pre svega obezbedi stabilan protok otpadne vode i bezbedan rad pumpnih agregata, da se smanji buka, smanji ili eliminiše pojava neprijatnih mirisa i gasova. Iz objekta se mora obezbediti uredan odvoz uklonjenog otpada sa rešetki.

## 2 Metodologija

Pri izboru i projektovanju objekata crpnih stanica u domaćoj praksi neretko se poklanja nedovoljno adekvatna pažnja. Status objekata je veoma često pod uticajem drugih struka, koje ne moraju biti vezane za sam objekat. O konstrukciji i obliku objekta se više vodi računa sa aspekta položaja u prostoru i samog izgleda. Pored toga, proizvođači pumpnih agregata preporučuju „gotove objekte” crpnih stanica želeći time da tipiziraju objekte, odlazeći daleko od svog osnovnog proizvoda – pumpnog agregata, za koji su kompetentni da daju određene preporuke. Nije retkost da se u projektantskoj praksi koriste „gotove” crpne stanice nekog od proizvođača pumpi, bez ikakvog obrazloženja za korišćenje takvog objekta na konkretnoj poziciji. Tome doprinosi ponekad i

nedovoljna angažovanost projektanta i svođenje rešenja na „tipski objekat“. Sve ovo ukazuje na to da se projektovanju objekata crpnih stanica, kao hidrotehničkom objektu, mora posvetiti dovoljna pažnja od strane inženjera hidrotehnike.

U traženju rešenja i efikasnom projektovanju objekata crpnih stanica potrebno je držati se sledećih principa:

- hidrauličkim proračunom kanalizacione mreže, koja dovodi otpadnu vodu do crpne stanice, potrebno je odrediti merodavni hidrogram na ulazu u crpnu stanicu tokom 24 sata (suv period i period sa kišom), što će biti jedan od osnovnih parametara za utvrđivanje radnih karakteristika pumpnih agregata [1],
- utvrđivanjem merodavnog protoka na ulazu stiču se uslovi za određivanje potrebne radne zapremine crpnog bazena, vodeći računa pri tom o maksimalnom broju uključenja pumpi u toku jednog sata,
- broj radnih i rezervnih pumpi odrediti na osnovu merodavnog protoka i značaja crpne stanice u sistemu,
- broj pumpi će odrediti minimalne unutrašnje dimenzije osnove crpne stanice,
- cevovode pod pritiskom za transport otpadne vode unutar i izvan objekta crpne stanice dimenzionisati prema merodavnim protocima pri čemu voditi računa o minimalnim i maksimalnim preporučenim brzinama strujanja,
- potreban napor pumpi (visinu dizanja) utvrditi putem hidrauličkog proračuna nakon čega treba odabrati odgovarajući tip pumpi,
- na osnovu usvojene radne zapremine crpilišta, merodavnog protoka, kapaciteta, broja i tipa pumpi dobija se podatak i o dubini crpnog bazena koji mora zadovoljiti uslove rada pumpi bez opasnosti od pojave kavitacije i uvlačenja vazduha,
- uklanjanje otpada pre ulaska otpadne vode u crpni bazen, u cilju zaštite rada pumpnih agregata, rešiti adekvatnim izborom rešetke (korpa sa rešetkom, vertikalno sito, kosa rešetka sa štapovima, ...),
- konstrukciju objekta crpne stanice utvrditi nakon urađenog geomehaničkog elaborata o karakteristikama tla i hidrogeološkim uslovima njegove izgradnje, (veoma često će način fundiranja crpnih stanica zavisti od načina sniženja podzemnih voda i karakteristika tla (dubina manjih crpnih stanica može biti i do 7 m)),
- otpad sa rešetke je potrebno bezbedno ukloniti bez uticaja po zdravlje na okolinu,
- objekat crpne stanice zahteva učestalo provetravanje objekta za slučaj rada radnika na održavanju crpnih stanica, što zahteva potrebnu opremu.

Pored osnovnog znanja struke hidrotehnički inženjeri trebaju da imaju i saznanja iz sledećih tehničkih struka:

- mašinstvo – da vladaju korišćenjem softverskih paketa oko inicijalnog izbora pumpnih agregata u saradnji sa mašinskim inženjerom,
- elektrotehnika – da u odabiru pumpi vode računa o energetske efikasnosti pumpi i ostale primenjene opreme; ormani za smeštaj elektro opreme traže određene gabarite koji nisu zanemarljivi i mogu uticati na sam položaj i izbor objekta crpne stanice,
- tehnologija – posebno kod odabira načina uklanjanja gasova i neprijatnih mirisa i načina ostvarivanja izmene vazduha u objektu crpne stanice,
- geologija – u cilju interpretacije dobijenih rezultata geomehaničkih istraživanja, strukturalna bušotina i test statičke penetracije, i način fundiranja objekata,
- arhitektura – potrebna kod rešenja izgleda crpnih stanica sa nadzemnim delom objekta, koji je potrebno uklopiti u okolni ambijent,
- zaštita životne sredine – potreba za izradom studije uticaja kao i primenjenih mera na objekat.

Prepuštanje oblikovanja i projektovanja crpnih stanica nekoj od prethodno navedenih struka, što se ponekad dešava u praksi, može crpnu stanicu, kao prevashodno hidrotehnički objekat, značajno ugroziti u njenoj eksploataciji.

### 3 Studija slučaja

Studija slučaja obuhvata kanalizacioni sistem grada Novog Sada sa pripadajućim crpnim stanicama [3]. Radi se o sistemu koji se veoma brzo širi i razvija. Primera radi, broj crpnih stanica na teritoriji grada (u domenu održavanja javne kanalizacione mreže) za poslednjih 10 godina je porastao sa 36 na 76 objekata. Kanalizacionim sistemom dominiraju dve crpne stanice, poznatije kao glavne (GC1 i GC2), koje svu upotrebljenu i atmosfersku vodu grada, za vreme visokih vodostaja reke Dunav, prepumpavaju u Dunav [4]. Radni kapacitet glavnih crpnih stanica je po  $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Crpne stanice su tokom poslednjih desetak godina nekoliko puta radile sa maksimalnim kapacitetom.

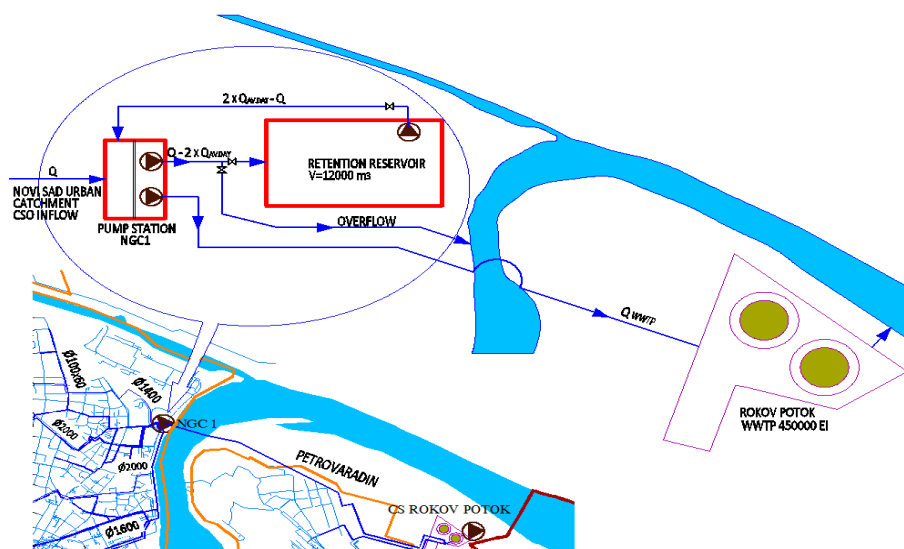
U cilju rešavanja odvođenja otpadnih voda grada do planiranog centralnog postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (CPPOV), prvi korak predstavlja povezivanje dve glavne crpne stanice na lokalitetu crpne stanice GC2 (slika 1). Tokom proteklih godina, najpre je usvojena revizija razvojnog programa kanalizacionog sistema grada Novog Sada. Revizijom su utvrđene strateški pravci razvoja sistema, a na prvom mestu je povezivanje dve glavne crpne stanice, kao preduslov za zajednički odvod otpadnih voda do CPPOV [3]. Pomenutom revizijom, kao i Studijom razvoja osnovnih objekata kanalizacionog sistema na lokaciji GC2 utvrđen je položaj i kapacitet novih glavnih crpnih stanica. Nova glavna crpna stanica 1 (NGC1) planirana je da ima radni kapacitet  $15,36 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok druga glavna crpna stanica (NGC2) treba da ima radni kapacitet od  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Planirano povećanje ukupnog kapaciteta crpnih stanica je za oko 20%. Prvi koraci u razvoju pomenutog sistema su izmeštanje i uklanjanje crpne stanice GC1, te izgradnja poveznog cevovoda do lokacije crpne stanice GC2 i izgradnja NGC1.

Crpna stanica NGC1 koncipirana je tako da u sebi sadrži tri funkcionalno povezane crpne stanice, svaka za odgovarajući očekivani dotok i tip (uslovno rečeno) otpadnih voda (slika 2) [5].

Prva crpna stanica (C pumpe) namenjena je za transport upotrebljenih otpadnih voda do CPPOV (odnosno Dunav u prvoj fazi izgradnje). Njen kapacitet predviđen je kao dvostruka vrednost protoka  $Q_{\text{max.dn.}}$ , odnosno  $2,16 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Druga crpna stanica (D pumpe) otpadnu vodu odvodi do retenzionog bazena, kako se ne bi ugrozio kvalitet ispuštene otpadne vode u Dunav, i kapaciteta je  $3,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Treća crpna stanica (P pumpe) služi da razblaženu otpadnu vodu, do mere predviđene propisima, ispusti direktno u Dunav. Kapacitet treće crpne stanice je  $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

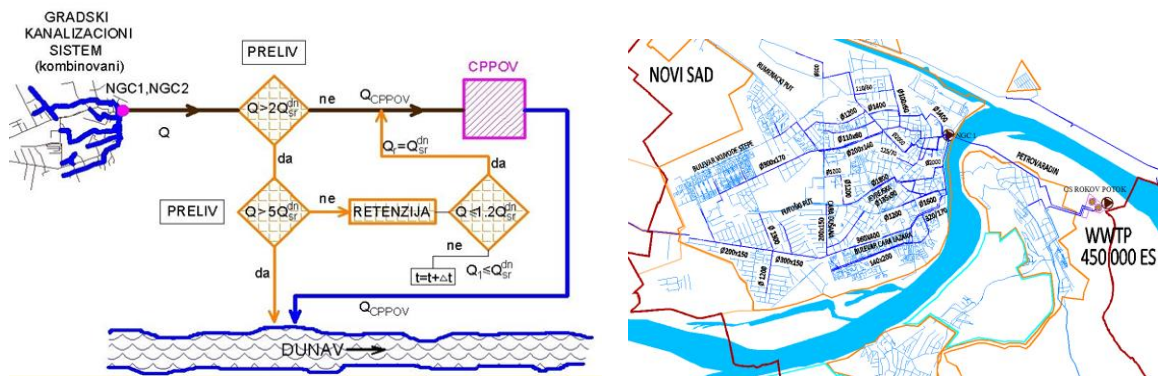


Slika 1. Položaj i šema rada NGC1

Figure 1. NPS1 location and process flow diagram

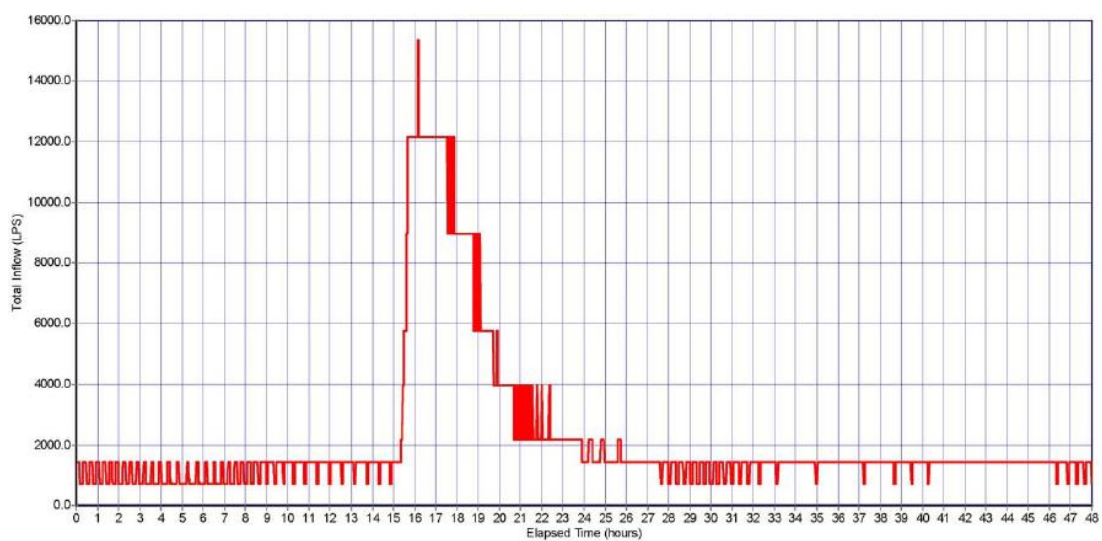
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



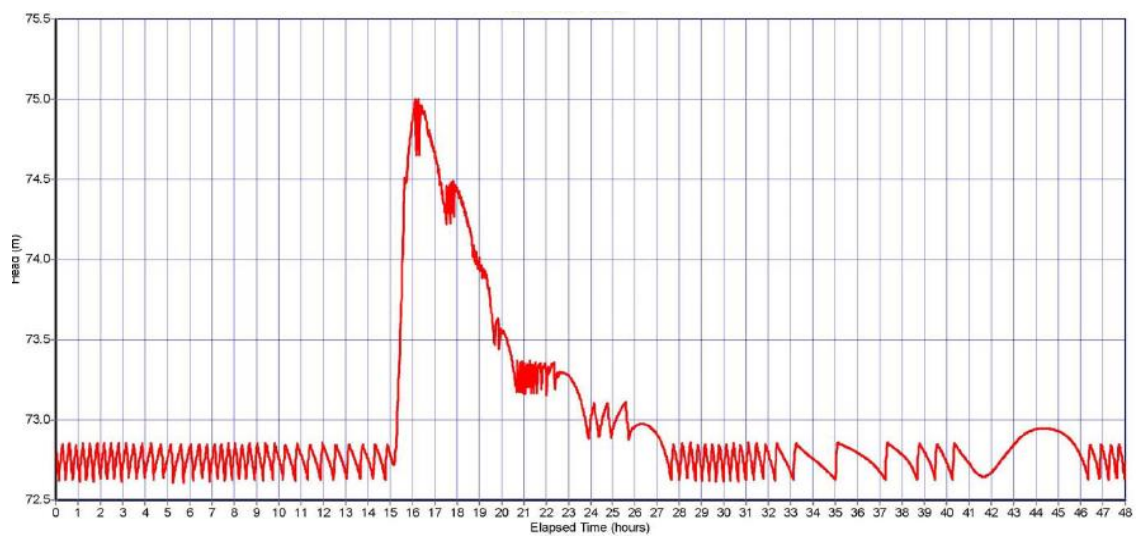
Slika 2. Prikaz razdvajanja protoka

Figure 2. Flow separation



Slika 3. Hidrogram na ulivu u crpni bazen

Figure 3. Hydrograph at the wet well input



Slika 4. Nivogram na ulazu u crpnu stanicu

Figure 4. Stage hydrograph at the pumping station inlet

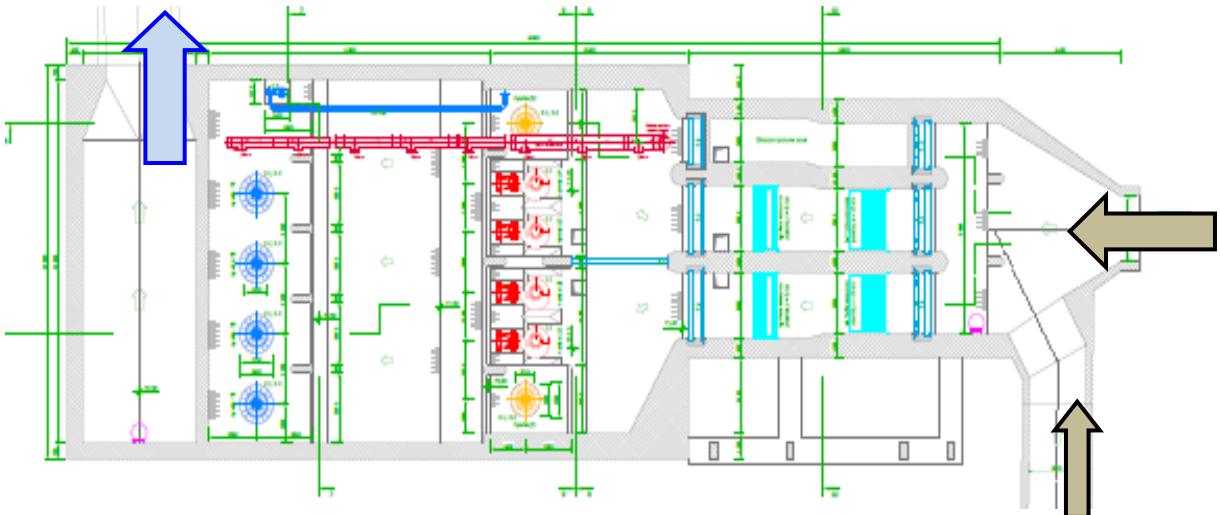
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Na slici 3. prikazan je ulazni hidrogram na NGC1 dobijen nakon modeliranja i kalibriranja kanalizacionog modela grada primenom softverskog paketa EPA SWWM, [3] i [5]. Na bazi sračunatog hidrograma doticaja izvršen je odabir primenjenih pumpnih agregata i utvrđen režim rada. Nakon utvrđenog režima rada, sračunata je i korisna zapremina crpnog bazena. Na slici 4. dat je nivogram na ulazu u NGC1.

Na slikama 5, 6, 7 i 8 date su karakteristične osnove i preseci crpne stanice NGC1. U funkcionalnom smislu NGC1 je podeljena na šest uslovno nezavisnih celina:

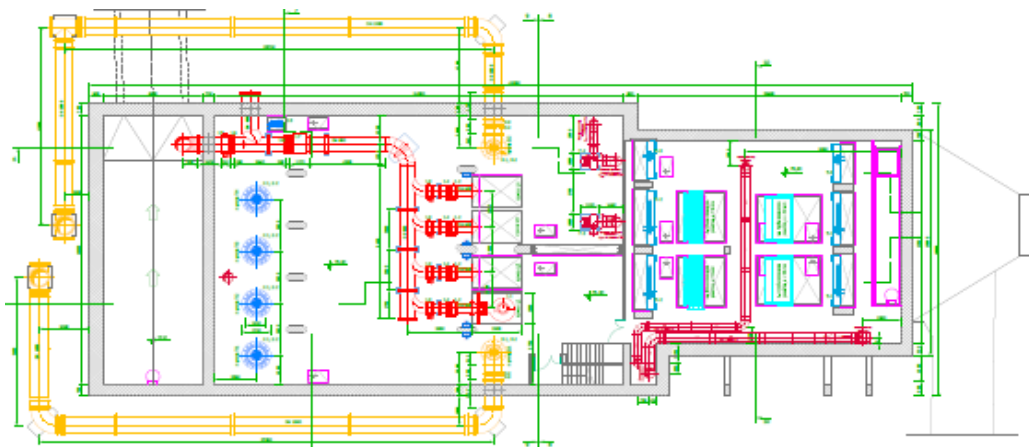
1. protočni kanali sa rešetkama i tablastim zatvaračima,
2. crpna stanica za otpadne vode (C pumpe),
3. crpna stanica za prvi talas atmosferskih voda (D pumpe),
4. crpna stanica za atmosferske vode (P pumpe),
5. sistemi unutrašnjeg transporta i
6. sistem za eliminaciju neprijatnih mirisa.

Ulazni deo crpne stanice podeljen je na tri kanala koji dovode vode do bazena crpnih stanica. Dva kanala su širine po 3 m, a treći je 2,2 m. Prva dva kanala su glavni (radni) dovodni kanali do crpilišta crpnih stanica a treći je rezervni (ili obilazni) koji ima ulogu u ekstremnim i vanrednim situacijama. U redovnom radu ovaj kanal je zatvoren.



Slika 5. Osnova crpne stanice

Figure 5 . Layout of the pumping station

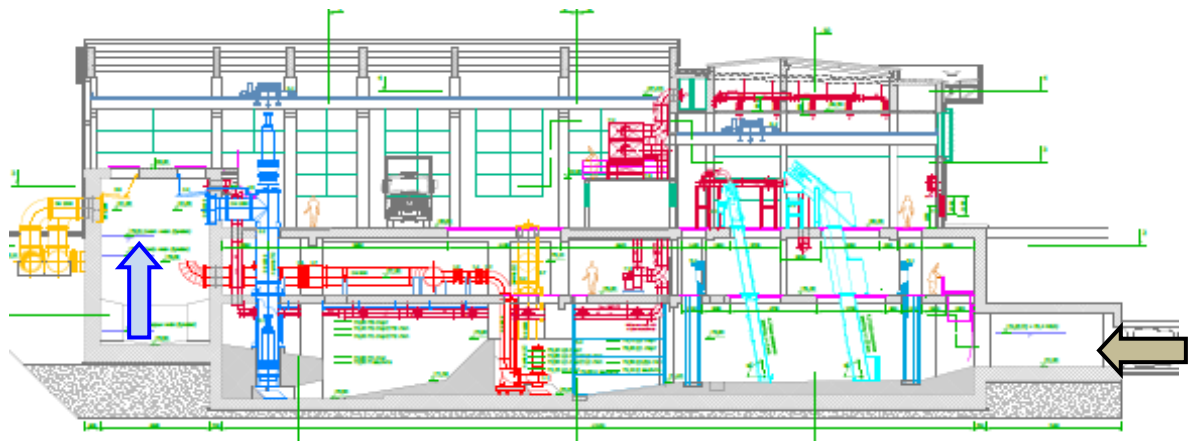


Slika 6. Osnova cevne galerije

Figure 6. Layout of the piping gallery

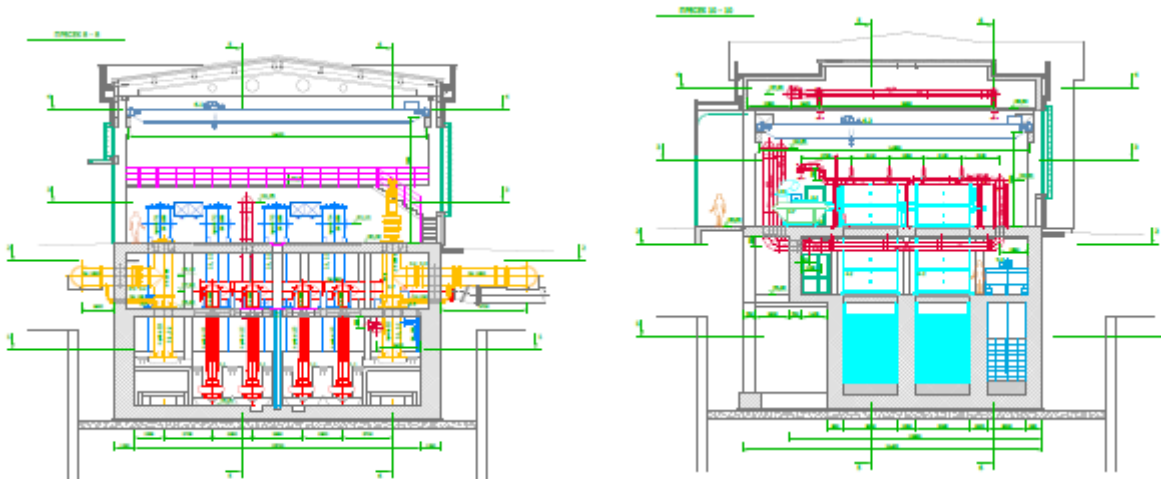
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 7. Podužni profil objekta crpne stanice

Figure 7. Longitudinal section of the pumping station



Slika 8. Poprečni profili crpne stanice

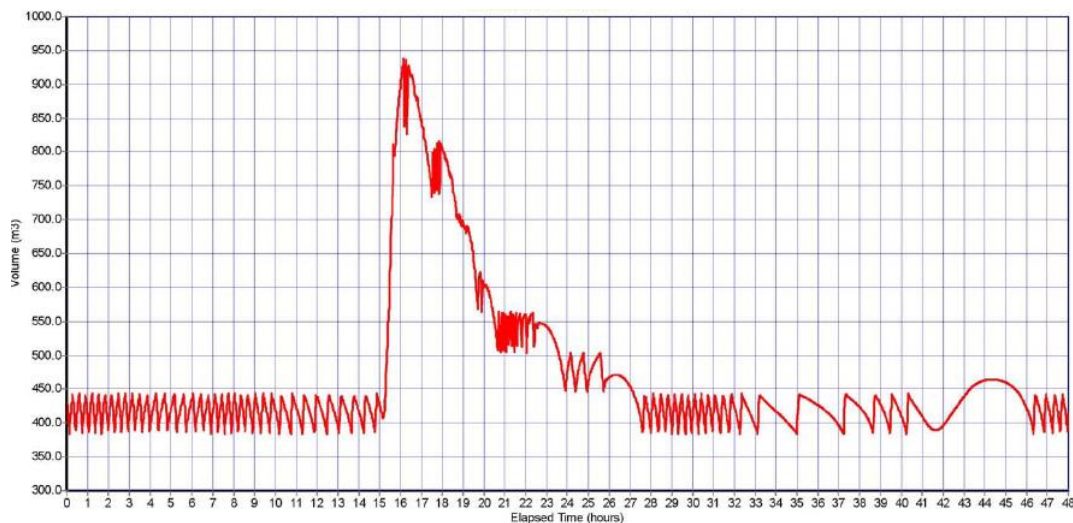
Figure 8. Cross section of the pumping station

Oba radna kanala opremljena su sa po jednom grubom i jednom finom rešetkom. Gruba rešetka namenjena je za odvajanje krupnog otpada u cilju zaštite pumpnih agregata i fine rešetke. Gruba rešetka je razmaka štapova 50 mm, a fina 6 mm (kao što je navedeno u UK WAPUG vodiču (2006)), imajući u vidu da kod nas ne postoje tehničke smernice u vezi ispuštanja razblaženih otpadnih voda direktno u recipijent (kao njegova zaštita).

Objekat crpne stanice ima dva crpilišta, odvojena prelivnim zidom. Prvo crpilište je za crpne stanice C i D a drugo za crpnu stanicu P. Objekat je po visini podeljen na podrum - crpilište sa pumpnim agregatima, galerija - za prolaz cevi do izliva i prizemlje - za smeštaj opreme za uklanjanje i pranje otpada i uklanjanje neprijatnog mirisa. Shodno prethodnim delovima objekata dobijeni su spoljni gabariti objekta crpne stanica, 22x54x18 m. Objekat je fundiran na dubini od devet metara od površine terena, dok je vrh objekta na 9 m iznad terena. Ukupna razvijena površina objekta je 1900 m<sup>2</sup>. Prizemni deo objekta je podeljen u dva dela.

Prednji deo je rezervisan za rešetke, uređaje za transport i pranje otpada i odvoz otpada na deponiju. Drugi deo prizemlja je predviđen za instalacije elektro opreme, servisne službe, hemijsko fizičke filtre i ventilaciju objekta. Blizina stambenih objekata (na oko 50 m) uslovljavala je primenu opreme za zaštitu od neprijatnih mirisa i zaštitu zdravlja ljudi.





Slika 9. Promena radne zapremine u crpnom bazenu

Figure 9. Wet well storage volume change

Sve pumpe u crpnoj stanici NGC1 rade u automatskom režimu, prema nivoima vode u crpilištima, odnosno prema trenutnom proticaju otpadnih i atmosferskih voda. Sem u automatskom režimu, predviđeno je da se, po potrebi, pumpnim agregatima ugrađenim u crpnoj stanici može upravljati i ručno. Na slici 9. Prikazan je grafik promene radne zapremine crpnog bazena u funkciji režima rada i nivoa vode u bazenu.

### 3.1 Protočni kanali sa rešetkama i tablastim zatvaračima

Otpadne i atmosferske vode, koje se dovode u crpnu stanicu NGC1, raspodeljuju se na dva identična protočna kanala, opremljena grubim i finim mehaničkim rešetkama, odakle se slivaju u zajedničko crpilište crpnih stanica otpadnih voda i prvog talasa atmosferskih voda (C i D pumpe). Kapacitet oba kanala sa rešetkama je po  $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , i odgovara polovini ukupnog projektovanog kapaciteta crpne stanice NGC1. Za slučaj eventualnog ispada bilo koje od rešetki (npr. usled kvara automatskih čistača rešetki, ili pak u uslovima pojave nepredviđeno visokih doticaja na crpnu stanicu), predviđen je i obilazni protočni kanal pomoću kojeg se otpadne i atmosferske vode mogu direktno dovesti u crpilište C i D pumpi, odnosno, preko preliva, u crpilište crpne stanice atmosferskih voda (P pumpe). U svim normalnim projektovanim radnim režimima, ovaj kanal je zatvoren.

Sistem protočnih kanala, kao i samo crpilište C i D pumpi, koncipirani su tako da, po potrebi, u funkciji može biti samo jedan kanal sa rešetkama i polovina instalisanih pumpi (2 C pumpe i 1 D pumpa). Otvaranje odnosno zatvaranje pojedinačnih protočnih kanala vrši se uz pomoć tablastih zatvarača, koji su postavljeni na početku i kraju svakog od kanala.

### 3.2 Crpna stanica otpadnih voda (C pumpe)

Crpna stanica otpadnih voda (C pumpe) namenjena je za prepumpavanje otpadnih voda koje se dovodnim kolektorom dovode na crpnu stanicu NGC1 sa južnog i severnog sliva kanalizacionog sistema Novog Sada. Pod otpadnim vodama podrazumevaju se svi proticaji do oko  $2.160 \text{ L/s}$ , što je i projektovani kapacitet crpne stanice otpadnih voda.

U crpnoj stanici otpadnih voda ugrađena su četiri vertikalna utopna pumpna agregata namenjena za transport otpadnih voda. Tri pumpe su radne, a jedna je rezervna. Orijentacione karakteristike C pumpi su:

- $Q = 720 \text{ L/s}$
- $H = 8,2 \text{ m}$

- $P = 90 \text{ kW}$

Sabirni cevovod C pumpi za otpadne vode je DN 900. Na svom kraju, sabirni cevovod račva se na dve grane DN 900, jednu prema novoprojektovanom izlivu (tj. Dunavu) a drugu prema pretpostavljenom cevovodu kojim će se otpadne vode transportovati ka CPPOV, nakon njegove izgradnje. U sabirni cevovod ugrađuje se elektromagnetno merilo protoka DN 900.

Nakon izgradnje CPPOV i transportnog cevovoda, pumpni agregati u crpnoj stanici otpadnih voda zamenjuju se novim pumpama, istog kapaciteta, ali uvećanog napora i potrebne snage koji će zavisiti od lokacije CPPOV i konfiguracije transportnog cevovoda.

### 3.3 Crpna stanica za prvi talas atmosferskih voda (D pumpe)

Pumpna stanica za prvi talas atmosferskih voda (D pumpe) namenjena je za prepumpavanje prvog talasa atmosferskih voda u retenzioni bazen koji se predviđa u krugu pumpne stanice NGC1. Pod prvim talasom atmosferskih voda podrazumevaju se proticaji veći od 2.160 L/s (otpadne vode) pa sve do 5.700 L/s, i to samo u periodu nakon početka padavina na području gradskog kanalizacionog sliva (stepen razređenja za prvi talas atmosferskih voda je od 1:2 do 1:5). Projektovani kapacitet ove crpne stanice za prvi talas atmosferskih voda je 3.600 L/s. Nakon prestanka padavina, u uslovima smanjenih proticaja, voda prikupljena u retenzionom bazenu se vraća u NGC1, a zatim prepumpava prema CPPOV. U periodu do izgradnje retenzionog bazena, D pumpe će prepumpavati vodu u izlivni kolektor crpne stanice NGC1, odnosno u Dunav. U crpnoj stanici za prvi talas atmosferskih voda ugrađena su dva propelerna utopna pumpna agregata u cevnom izvođenju. Obe pumpe su radne. Orijentacione karakteristike D pumpi su:

- $Q = 1.800 \text{ L/s}$
- $H = 9,5 \text{ m}$
- $P = 250 \text{ kW}$

### 3.4 Crpna stanica atmosferskih voda (P pumpe)

Namena crpne stanice atmosferskih voda (tj. P pumpi) je prepumpavanje atmosferskih voda koje se dovodnim kolektorom dovode na crpnu stanicu NGC1. Atmosferske vode prepumpavaju se u izlivni kolektor crpne stanice NGC1, odnosno u Dunav. Projektovani kapacitet crpne stanice atmosferskih voda je 9.600 L/s. U crpnoj stanici atmosferskih voda ugrađena su četiri propelerna utopna pumpna agregata u cevnom izvođenju. Tri pumpe su radne, a jedna je rezervna. Orijentacione karakteristike D pumpi su:

- $Q = 3.200 \text{ L/s}$
- $H = 6,95 \text{ m}$
- $P = 310 \text{ kW}$

### 3.5 Sistem za ventilaciju i eliminaciju neprijatnog mirisa

Crpna stanica NGC1 locirana je u neposrednoj blizini stambeno-poslovne zone, hotela, pijace i šetališta. Iz tog razloga objekat je opremljen odgovarajućim sistemom za ventilaciju i eliminaciju neprijatnih mirisa. Sistem je podeljen je na dva, uslovno rečeno nezavisna dela:

- Podsystem A): deo sistema za izvlačenje i prečišćavanje otpadnog vazduha iz prostora crpilišta pumpi i
- Podsystem B): deo sistema za ventilaciju i eliminaciju neprijatnih mirisa iz prostora u kojem se nalaze rešetke, trakasti i pužni transporter, spiralna presa i kontejneri za otpad.

Podsystem A sastoji se iz jednog hemijsko-fizičkog filtera kapaciteta 10.000 m<sup>3</sup>/h prečišćenog vazduha, centrifugalnog ventilatora i cevnog razvoda. Ventilator preko usisnog cevovoda izvlači otpadni vazduh iz prostora zone A, potiskuje ga u hemijsko-fizički filter gde se prečišćava i odlazi u betonski ventilacioni kanal ispod krova crpne stanice NGC1 i dalje u spoljašnju sredinu.

Podsystem „B“ vrši ubacivanje svežeg vazduha u prostor zone „B“ i odvođenje i prečišćavanje otpadnog vazduha iz tog prostora. Podsystem „B“ sastoji se iz hemijsko-fizičkog filtera kapaciteta

10.000 m<sup>3</sup>/h prečišćenog vazduha, centrifugalnog ventilatora, klima komore, elektromotorne zidne žaluzine i cevnog razvoda za svež i otpadni vazduh.

Otpadni vazduh iz zone „B“ odsisava se direktno iz grubih i finih rešetki i iznad kontejnera za otpad sa rešetki (ukupno maksimalno do 5.000 m<sup>3</sup>/h), kao i sa plafona zone „B“ (maksimalno do 5.000 m<sup>3</sup>/h). Otpadni vazduh prolazi kroz klima komoru, centrifugalni ventilator i hemijsko-fizički filter u kojem se prečišćava i odlazi u betonski ventilacioni kanal ispod krova crpne stanice NGC1 i dalje u spoljašnju sredinu.

### 3.6 Tehnologija rada pumpnih stanica

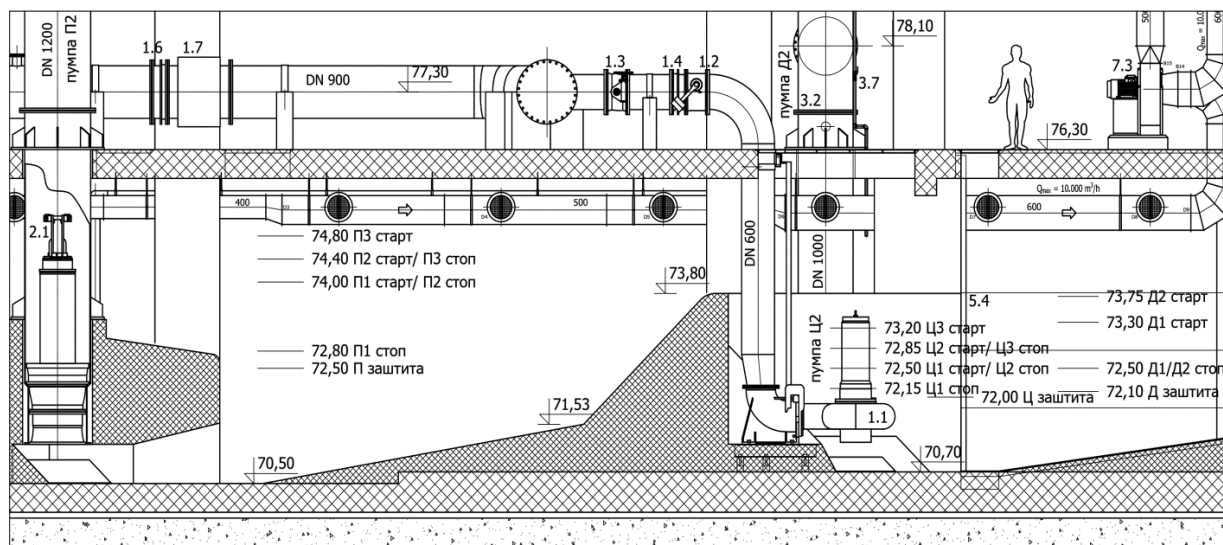
Sve pumpe u crpnoj stanici NGC1 uobičajeno rade u automatskom režimu, prema nivoima vode u svojim crpilištima, odnosno prema trenutnom proticaju otpadnih i atmosferskih voda. Nivoi uključivanja i isključenja odgovarajućih pumpnih agregata prikazani su na slici 10.

Sem automatskog radnog režima predviđeni su i ručni i nužni režimi rada pumpnih agregata u NGC1. U ručnom režimu, pogonom pumpi neposredno upravlja kvalifikovan i odgovoran izvršilac, pri čemu ostaju prisutna ograničenja i zaštite pumpnih agregata. Ručni režim aktivira se u slučaju ispada automatskog režima ili u slučaju testiranja opreme.

U nužnom režimu rada, pumpnim agregatima se upravlja prema nivoima vode u crpilištima i vremenu rada i to preko zasebne, elementarne digitalne elektronike i senzoričke. Ovaj režim aktivira se u slučaju ispada automatskog režima i nedostupnosti kvalifikovanih izvršilaca. Nužni režim predviđen je samo za C i P pumpe. I u nužnom režimu ostaju prisutna ograničenja i zaštite pumpnih agregata.

U crpilištu P pumpi ugrađena je zasebna pumpa za pražnjenje crpilišta. Ova pumpa radi u autonomnom automatskom režimu prema signalu sopstvenog plovka, tj. ova pumpa radi sve vreme dok ima vode u crpilištu P pumpi, prepumpavajući vodu u crpilište C i D pumpi.

Grube i fine rešetke koje su ugrađene u protočnim kanalima rade u automatskom režimu samočišćenja prema razlici nivoa vode ispred i iza odgovarajuće rešetke i prema vremenu proteklom od trenutka završetka poslednjeg ciklusa čišćenja (uključivanja češljeva). Uključivanje i isključivanje trakastog i pužnog transportera za otpad koji se izbacuje sa rešetki, kao i uključivanje spiralne prese, odvija se u funkciji uključivanja i isključivanja automatskih čistača odgovarajućih rešetki.



Slika 10. Nivoi uključivanja i isključenja pumpi u NGC1

Figure 10. Pumping ON/OFF water levels in the NPS1 pumping station

## 4 Zaključak

Izgradnja gravitacione kanalizacije u velikim ravničarskim gradovima zahteva izgradnju i velikih crpnih stanica. U kombinovanim sistemima kanalizacije (kakav je u gradu Novom Sadu), a posebno u urbanim gradskim celinama, od posebnog je značaja projektovanje, izgradnja i funkcionisanje crpnih stanica. Velike crpne stanice svojim gabaritima i načinom rada zahtevaju poseban urbanistički, graditeljski i ekološki pristup. U radu je prikazana nova glavna crpna stanica u Novom Sadu koja ispunjava gore navedene zahteve. Od značaja u funkcionisanju ovakvih objekata potrebno je izdvojiti bitnu spregu uzajamnog rada u projektovanju, odnosno sagledavanju svih potrebnih delova rada crpne stanice, pre svega inženjera hidrotehnike, mašinstva, konstrukcije, elektrotehnike i arhitekture.

## Literatura

1. 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, 2011.
2. Srpski standardi SRPS EN 752-4:2007. Kanalizacioni sistem izvan objekata- deo 4: Hidraulički proračun i aspekti zaštite životne sredine.
3. Stipić M., i saradnici, (2011), *Novi Sad sewerage system development programme revision*, Novi Sad, Srbija
4. Stipić M., i saradnici, (2012), *Redesign of the Existing Combined Sewer System (CSS) od Novi Sad*, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling Belgrade 2012, Srbija
5. Stipić M., Tašin S., Oros Đ., Tulenčić M., 2017, *Nova Glavna crpna stanica, NGC1, u Novom Sadu*, Projekat za građevinsku dozvolu, Vojvodinaprojekt, Novi Sad, Srbija

## **Analiza uzroka pojave vode u podrumskim prostorijama objekta u Nišu**

Dragan Radivojević<sup>1</sup>, Borislava Blagojević<sup>2</sup>, Aleksandra Ilić<sup>3</sup>

**APSTRAKT:** U radu se vrši analiza mogućih uzroka pojave vode u podrumskim prostorijama stambeno-poslovnog objekta „Čačanska banka“ u ulici 7. Jula 25, uočenih 25. i 26. maja 2012 godine. Za potrebe analize uzroka prikupljeni su svi raspoloživi podaci i analizirani mogući uzroci pojave vode u objektu, uzimajući u obzir položaj i konfiguracija terena oko objekta, litološki sastav terena ispod objekta, infrastrukturne uslove u interakciji sa objektom i hidrometeorološke uslove u periodu od stavljanja objekta u upotrebu 2007. do kraja oktobra 2013. godine. Poseban akcenat prilikom obrade podataka stavljen je na period u maju 2012 godine, kada je došlo do incidentne pojave vode u podrumskim prostorijama. Za svaki od navedenih mogućih uzroka, izvedeni su i opisani odgovarajući zaključci, koji su sistematizovani tekstualno i na grafičkim prilogima. Analizom hidrometeoroloških podataka, utvrđeno je da je 2012 godine maj mesec imao dva izuzetno kišna perioda. Sve upućuje na incidentni prodor atmosferskih voda kroz rezervni izlaz ili iz objekta ili kroz ulaz u podrumske prostorije.

Ključne reči: plavljenje podrumskih prostorija, višednevne padavine, podzemne i površinske vode

## **Analysis of the water occurrence causes in the basement premises of the building in the city of Niš**

**ABSTRACT:** The paper analyzes the possible causes of water occurrence in the basement premises of the residential and business building "Čačanska banka" in street 7. July 25, observed on May 25 and 26, 2012. For the analysis all available data were collected. The possible causes of water occurrence in the facility were analyzed considering the location and configuration of the terrain around the facility, the litological composition of the terrain below the building, the infrastructure conditions in interaction with the facility and hydrometeorological conditions during the period of putting the facility into use in 2007 until the end of October 2013. A focus in the data processing was pointed to the period of May 2012, when water incidentally occurred in the basement premises. For each of the possible causes, conclusions were drawn up and described, systematized in textual and graphic formats. Based on hydro-meteorological data analysis, two extremely rainy periods are found in May 2012. Conclusion points to the incidental breakthrough of the atmospheric waters through the backup building outlet, or from the building, or through the entrance to the basement rooms.

Keywords: basement premises flooding, precipitation, ground and surface water

---

<sup>1</sup>Dr Dragan Radivojević, asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, dragan.radivojevic@gaf.ni.ac.rs

<sup>2</sup>Dr Borislava Blagojević, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs

<sup>3</sup>Aleksandra Ilić, asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

## 1 Uvod

Incidentne pojave vode u podrumskim prostorijama mogu imati jasne uzroke, ali u određenim slučajevima, naročito bez prisustva očevidaca, može doći do nedoumica u shvatanju načina pojave i puteva dolaska vode. Na primeru stambeno-poslovnog objekta „Čačanska banka“ u ulici 7. Julia 25a u Nišu, analiziraju se mogući uzroci pojave vlage, vode i plavljenja u podrumskim prostorijama (IGA GAF, 2013). U objektu je tokom maja 2012. godine došlo do pojave vode. Kao mogući uzroci analizirani su kondenzacija, kvarovi na spoljnim i unutrašnjim instalacijama, prodor podzemnih voda kroz oštećenja na hidroizolaciji, kao i prodor spoljašnjih površinskih voda u objekat.

Svi potencijalni uzroci pojave vode u objektu su analizirani uzimajući u obzir položaj i konfiguraciju terena oko objekta, litološki sastav terena ispod objekta i konfiguraciju lokalne infrastrukture u interakciji sa objektom. Tokom analize su korišćeni raspoloživi podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ, 2013) u periodu od stavljanja objekta u upotrebu 2007. do kraja oktobra 2013. godine.

Poseban akcenat prilikom obrade podataka stavljen je na period maj 2012. godine, kada je došlo do incidentne pojave vode u podrumskim prostorijama.

Za svaki od navedenih mogućih uzroka, na osnovu obrade podataka, izvedeni su i opisani odgovarajući zaključci, koji su sistematizovani tekstualno i na grafičkim priložima.

## 2 Opis objekta i njegovog okruženja

Poslovno stambeni objekat Po+Pr+3+Pk zvani „Čačanska banka“ nalazi se u ulici 7. Julia 25a, na samom uglu ulica 7. juli i Stefana Prvovenčanog. U objekat se ulazi sa trotoara na jugoistočnoj fasadi objekta. Objekat je izgrađen na parceli br 711, koja je bila na koti 192.30 – 192.50 m.n.m., a nakon izgradnje, teren iza objekta na jugozapadnoj strani je popunjen i izdignut 1.10 m u odnosu na ulaz u objekat sa ulice. Veza između zadnjeg i frontalnog dela objekta je izvedena pod nagibom kroz pasaž.

Kote terena u neposrednom okruženju objekta su u rasponu 192.22 – 192.39 m.n.m. na trotoaru sa jugoistočne strane objekta (ulica Stefana Prvovenčanog). Na kolovozu se ispred glavnog ulaza u objekat nalazi mala depresija u odnosu na okolni teren sa najnižom kotom 192.10 m.n.m.. Teren prema zapadu u ulici 7. juli prema Gradskoj kući dostiže kote preko 192.20 m.n.m.. U ulici Stefana Prvovenčanog severnom stranom od objekta počinje uspon od kote 192.30 m.n.m. prema mostu Mladosti (koji je udaljen 210 m). Sa istočne strane, u ulici 7. juli kote rastu do 192.20 m.n.m.. U pravcu juga, u ulici Stefana Prvovenčanog prema Narodnom pozorištu, kote u samoj raskrsnici narastaju do 192.20 – 192.30 m.n.m.. Na najnižem delu kolovozne površine ispred zgrade postavljena su dva slivnika za prikupljanje atmosferskih voda, na kotama 192.10 i 192.14 m.n.m.

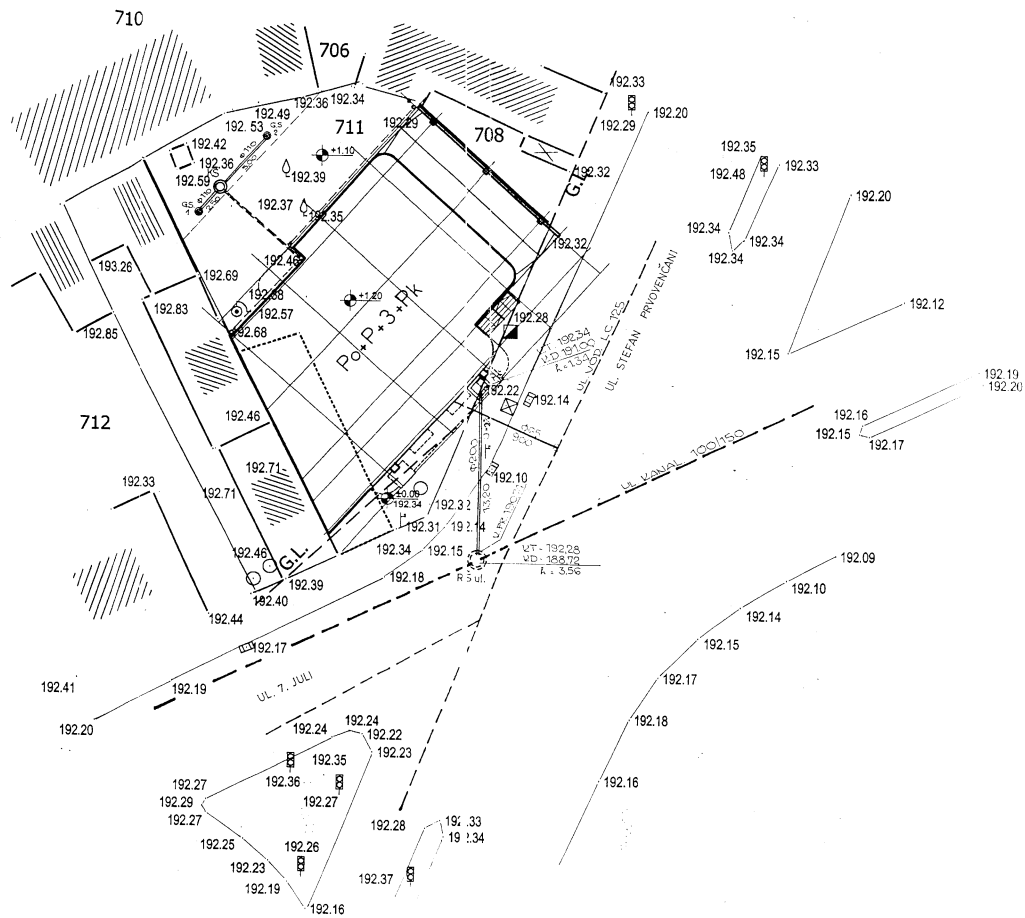
Kroz ulicu 7. juli prolazi kolektor ulične kanalizacije 1000/150, na koji je priključen i objekat „Čačanska banka“. Otpadna voda objekta se izliva u sabirno reviziono šaht na trotoaru (kota poklopca šahta 192.34 m.n.m., dno 191.00 m.n.m.). U podrumu objekta su ugrađene fekalne pumpe, zbog niske kote sanitarnih instalacija u suterenu, pa se vrši prepumpavanje otpadne vode do sabirno revizionog šahta. Iz ovog šahta se priključnom cevi  $\phi 200$  mm otpadna voda prebacuje u reviziono šaht ulične kanalizacije na raskrsnici. Kota terena uličnog revizionog šahta kanalizacionog sistema gde je izvršen priključak je u nivou trotoara 192.28 m.n.m., 18 cm viša od kote slivnika. Dubina šahta je 3.56 m, tj. dno šahta je na koti 188.72 m.n.m..

Na predmetnoj lokaciji je česta pojava zabarivanja zbog prevazilaženja prijemne moći uličnih slivnika, tj. nedovoljnog kapaciteta kanalizacije da primi atmosferske vode, na šta su se u više navrata žalili i korisnici objekta.

Priključak objekta na javnu gradsku vodovodnu mrežu je izveden iz ulice Stefana Prvovenčanog priključnom cevi LC 125 mm.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



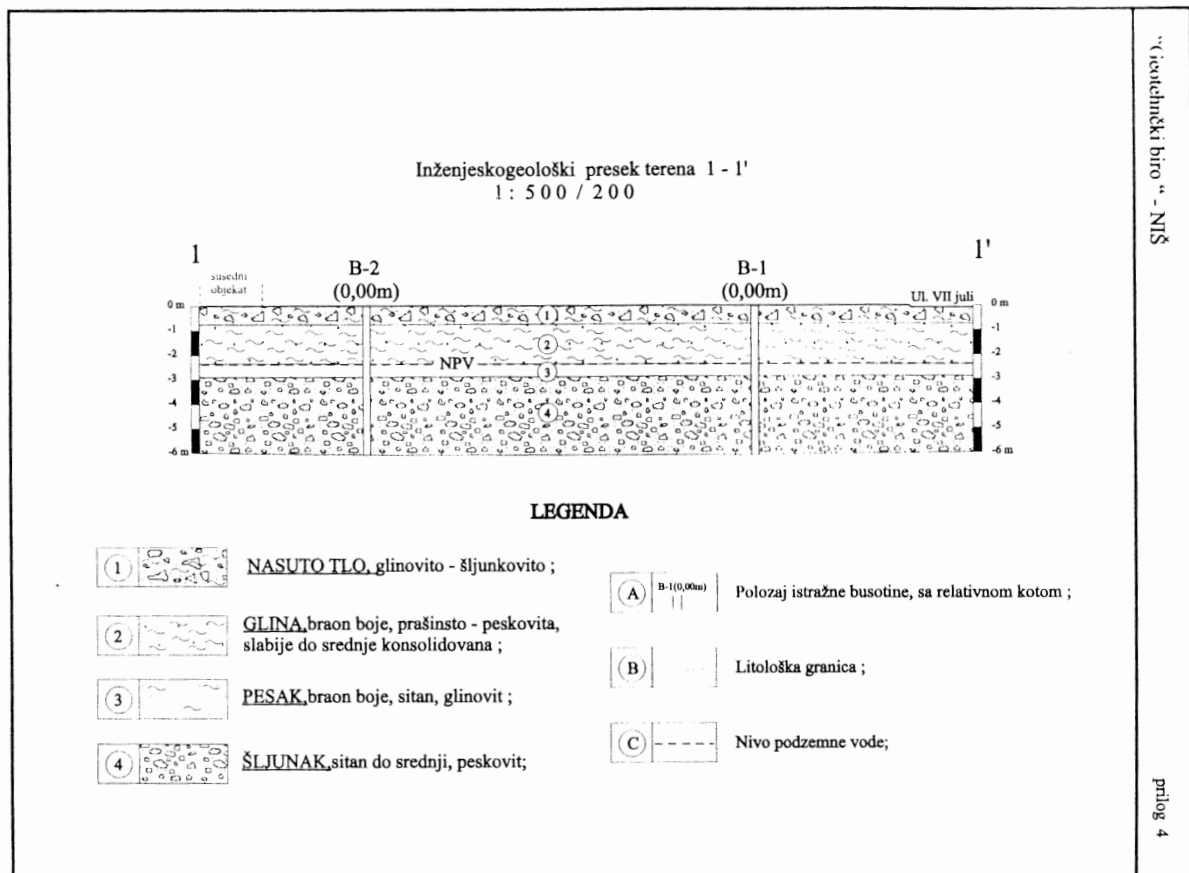
Slika 1. Situacioni plan objekta „Čačanska banka“.

Figure 1. Building „Čačanska banka“ disposition.



Slika 2. Objekat „Čačanska banka“, pogled sa jugoistočne i severoistočne strane iz ulice Stefana Prvovenčanog.

Figure 2. The „Čačanska banka“ building from the Southeast and Northeast, Stefana Prvovenčanog street.



Slika 3. Inženjersko geološki presek terena na lokaciji objekta “Čačanska banka”(Geotehnički biro, 2005).

Figure 3. Geological profile at the location of “Čačanska banka“ building (Geotehnički biro, 2005).

Uvidom u geotehnički elaborat (Geotehnički biro, 2005), utvrđene su hidrogeološke karakteristike terena. Naslici 3 prikazan je inženjersko geološki presek i litološki sastav terena. Do dubine od 0.8 m nakon izgradnje objekta izvršena je zamena tla vodonepropusnim materijalom; do dubine 2.40 m je vodonepropusna glina, pa zatim slabo propustan sitan glinoviti pesak, dok je na dubini 2.90 m sloj od šljunkovitog, vodopropusnog i vodonosnog materijala. Prilikom izvođenja radova evidentirana je izdan (vodonosni sloj) zbijenog i kolebljivog nivoa sa srednjim nivoom podzemne vode na -2.40 m od kote terena u obe izvedene bušotine. Izdanski sloj šljunka na kome je fundiran objekat je u direktnom hidrauličkom kontaktu sa tokom reke Nišave, tako da postoji hidraulička povezanost nivoa vode u Nišavi i podzemne vode na lokalitetu objekta. U blizini objekta ne postoje ugrađeni pijeometri, tako da se ne može kontinuirano pratiti nivo podzemnih voda.

Kota poda u podrumskim prostorijama objekta je na dubini 2.30 m, 10 cm iznad uobičajenog višednevnog nivoa podzemne vode. Prilikom temeljenja, izvršena je delimična zamena tla, tako što je prirodni materijal ispod ploče zamenjen prirodnim iberlaufom i uvaljan, pa je na njemu urađena temeljna ploča.



### **3 Mogući uzroci pojave vode u podrumskim prostorijama stambeno poslovnog objekta „Čačanska banka“**

Uzroci pojave vode u podrumskim prostorijama stambeno poslovnog objekta Čačanska banka se generalno mogu klasifikovati u pet grupa uzroka, koji su predmet dalje analize.

#### **3.1 Izdvajanje vode iz vazduha – kondenzacija**

Do pojave kondenzacije može doći usled nejednake temperature i vlažnosti vazduha u spoljnoj i unutrašnjoj sredini u kojoj vlada mikro klima. Količine vode iz vazduha su male i ne mogu izazvati plavljenje prostorija.

#### **3.2 Kvarovi na spoljnim instalacijama komunalnog vodovodnog sistema**

Kvarovi na spoljnim instalacijama vodovoda mogli bi se manifestovati na dva načina:

- Ukoliko se radi o malim oštećenjima na vodovodnim instalacijama, iz njih bi voda kontinualno procurivala u okolnu poroznu sredinu i mogla bi lokalno podići nivo podzemne vode, što bi moglo izazvati prodor kroz eventualna oštećenja na hidroizolaciji objekta.
- Teža oštećenja vodovodnih instalacija podrazumevaju procurivanja jačih intenziteta, koja ne bi mogla proći nezapaženo, jer bi došlo do pojave vode na površini terena, oštećenja asfaltnog pokrivača, a u slučaju velikih havarijskih procurivanja i do plavljenja ulične površine i eventualno, suterenskih i podrumskih prostorija okolnih stambenih objekata.

Kvarovi na spoljnim instalacijama, ako su burni i jačeg intenziteta odmah bi bili primećeni i izazvali bi reakciju nadležnog preduzeća JKP „Naissus“. U slučaju da se radi o manjim defektima, koje je teško uočiti sa površine terena, dotok vode kroz potencijalno loše izvedenu hidroizolaciju bi se manifestovao u kontinuitetu, ili učestalo, što bi moralo da se primeti i sanira. Pored toga, u toku 2012 godine na predmetnoj lokaciji nije bilo pucanja cevi niti intervencija ekipa JKP „Naissus“, pa se kvar na spoljnim instalacijama može isključiti kao razlog plavljenja prostorija u objektu „Čačanska banka“. Kvarovi na unutrašnjim instalacijama

##### *3.2.1 Kvar na vodovodnom sistemu unutar objekta*

Kvar na vodovodnom sistemu, u zavisnosti od obima havarije, pritiska u mreži i prečnika cevi (popuštanja spoja, delimično prskanje cevi, odvajanja cevi iz cevovoda sa otvaranjem u punom profilu), može imati za posledicu dotok vode u unutrašnjost objekta u intenzitetu koji se karakteriše „procurivanjem“ do burnog isticanja velikih količina vode pod pritiskom. Procurivanja vode iz unutrašnjih instalacija niskog intenziteta se u kraćem periodu manifestuje vlaženjem, dok u dužem vremenskom periodu može doći do sakupljanja većih količina vode koje se mora primetiti, jer su delovi prostorije stalno vlažni ili mokri. Teži kvar na vodovodnoj instalaciji (pucanje cevi, spoja ili ventila) uzrokuje nagli dotok većih količina vode u prostorije, koji ne može biti neprimećen osim ukoliko se kvar desi u periodu kada u prostorijama ne boravi niko (obično noću). Teži kvarovi mogu uzrokovati značajno plavljenje prostorija, koje ostaju mokre i nakon otklanjanja kvara zbog natapanja košuljice na podnoj ploči, termoizolacije i podne obloge. Voda je bistra i prozirna, bez mirisa.

##### *3.2.2 Kvar na mašinskim instalacijama unutar objekta*

Karakteristično je za mašinske instalacije da u periodu grejanja na kritičnim spojevima može imati za posledicu isticanje pare iz sistema, a u periodu van grejne sezone, sistem ostaje pod pritiskom, ali sa hladnom vodom, tako da su efekti curenja iz sistema grejanja isti kao i kod vodovodnih instalacija, a voda je takođe bistra i prozirna bez mirisa.

### 3.2.3 Kvar na kanalizacionim instalacijama

Kvar na kanalizacionim instalacijama bi se mogao manifestovati curenjem na spojevima, spontano, pri funkcionisanju kanalizacije, ne kontinualno. Pri težim kvarovima, uzrokovan bi bio prodor upotrebljene (fekalne) vode iz stambene zgrade isigurno bi bilo zapaženo prisustvo vode iz kanalizacionog sistema zbog neprijatnog mirisa.

Kvar na unutrašnjim instalacijama, bilo to na vodovodnim, instalacijama grejanja ili kanalizaciji bio bi incidentan i vidljiv slučaj, zahtevao bi brzu intervenciju. Obzirom da takvih intervencija nije bilo, tj. nema zapažanja o tragovima havarije ili intervencije, kao i da su na vodomerima očitane uobičajene mesečne potrošnje vode, ovaj se uzrok može isključiti iz analize.

### 3.3 Prodor podzemnih voda u podrumke prostorije

Do prodora podzemnih voda u prostorije može doći usled loše izvedene hidroizolacije, koja je obavezna na delu objekta koji može dospeti u kontakt sa podzemnim vodama. Hidroizolacijase po pravilu izvodi ispod kontra ploče i po zidovima sve do iznad kote terena, kako bi se odmah nakon betoniranja u temeljnoj jami obezbedila vodonepropusnost za suterenske i podrumke prostorije i onemogućio prodor vode iz spoljne porozne sredine. U slučaju da hidroizolacija nije ispravno izvedena, tj. da je vodopropusna, došlo bi do zasićenja mikropora u betonu kontra ploče, što bi za dalju posledicu imalo kapilarno penjanje vode u košuljicu od cementnog maltera i njenu vlažnost, podizanje podne obloge, stvaranje buđi u donjim uglovima prostorija i kapilarno penjanje vode po zidovima, usled čega bi se na njima primećivali tragovi vlaženja i miris memle. Ako bi u nekom slučaju postojao prekid u hidroizolacijipodzemna voda bi nadirala kontinualno i vidljivo u periodu povišenog nivoa. Obzirom da je izradi projektno tehničke dokumentacije (Nišprojekt, 2005) i izgradnji prethodila izrada geotehničkog eleborata (Geotehnički biro, 2005), Investitor je imao uputstva kako da izradi hidroizolaciju i obezbedi objekat od prodora podzemne vode. Pritisak podzemne vode dolazi iz nižih vodopropusnih šljunkovitih slojeva, tako da je pod objekta najugroženiji. Sa povišenjem nivoa podzemnih voda povećava se i hidrostatički pritisak na podnu ploču, ali postoji mogućnost i pojave pritiska na hidroizolaciju izvedenu po zidovima objekta. Promene nivoa u reci Nišavi se odražavaju na nivo podzemnih voda u vodonosnom sloju, tako da povećanje vodostaja Nišave izaziva povećanje nivoa podzemne vode u blizini objekta. Oscilacije nivoa podzemnih voda na mestu objekta imaju manje amplitude nego nivo u reci Nišavi, jer izdan služi kao filter koji ih amortizuje.

Obzirom da je u toku geotehničkih istraživanja zabeležen nivo podzemne vode na koti -2.40 m od kote terena (ovaj nivo se može smatrati ustaljenim u dužem vremenskom periodu, obzirom da su isti nivoi registrovani i prilikom izgradnje objekata u susedstvu), podna obloga je postavljena na koti -2.30 m ispod kote terena. U slučaju propusnosti hidroizolacije na pojedinim mestima u periodu povišenog nivoa podzemnih voda, prostorije bi se vlažile i punile vodom svaki put kada bi došlo do podizanja nivoa podzemne vode do određene kote, tj. povećanja pritiska podzemnih voda preko određene mere. Na zidovima bi dolazilo do kapilarnog penjanja i ovo bi bila periodična pojava. Obzirom da ne postoji obaveza ugradnje osmatračkih piježometara u okolini objekta, kao ni obaveza njihovog registrovanja od strane Investitora ili Korisnika, ne postoje zapisi o kretanju nivoa podzemnih voda na lokaciji objekta Čačanska banka.

Uvid u kretanje podzemnih voda može se steći na osnovu kretanja nivoa u mernim piježometrima stanica podzemnih voda RHMZ u okolini Niša, i to: stanica podzemnih voda 506 Brzi Brod – Nišava 3NP506, udaljena 60 m od Nišave, stanica podzemnih voda 507 Brzi Brod – selo 3NP507 – udaljena 810 m od Nišave, stanica podzemnih voda 509 Medoševac – selo 3NP509 – udaljena 370 m od Nišave, stanica podzemnih voda 510 Medoševac betonjerka 3NP510 – udaljena 210 m od Nišave, stanica podzemnih voda 511 Popovac – selo 3NP511 – udaljena 60 m od Nišave, stanica podzemnih voda 3NP513 Novo selo stara škola – udaljena 710 m od Nišave, stanica podzemnih voda 3NP514 Mramor – udaljena 100 m od Južne Morave.

Za analizu kretanja nivoa podzemnih voda bitna je i merna (hidrološka) stanica površinskih voda Niš, udaljena 210 m od lokacije objekta koja se nalazi na lokalitetu u neposrednoj blizini mosta Mladosti, severno od lokacije objekta, na kojoj se kontinualno beleži nivo vode.

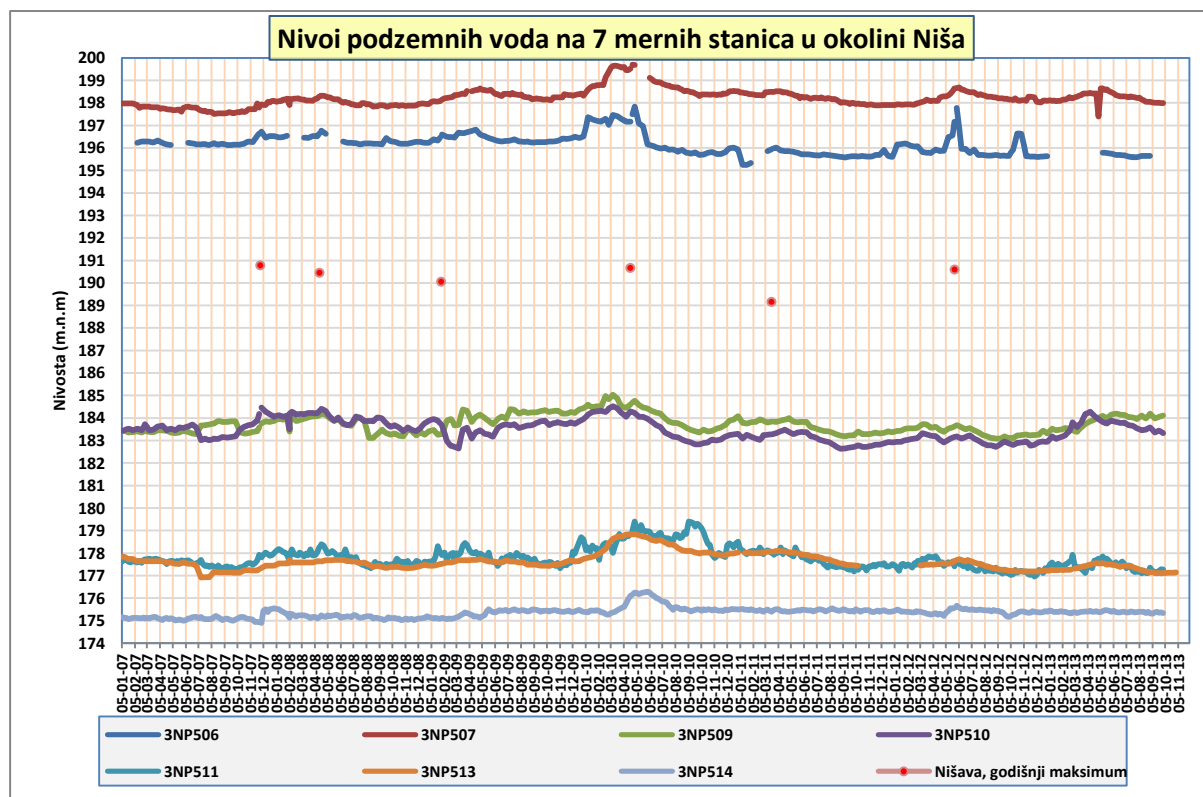
Litološki profili mernih stanica podzemnih voda RHMZ imaju veliku sličnost sa litološkim profilom koji je kartiran na lokaciji objekta. Sloj vodonepropusne gline u gornjim slojevima prati sloj zaglinjenog peska (debljine 40-50 cm) do dubine od 2.90-3.20m, odakle počinju vodonosni slojevi šljunka, promenljive debljine od 3 - 3.5 m. Kroz vodonosne slojeve šljunka formira se jedinstvena freatska izdan, koja je u neposrednoj vezi, kako međusobno, tako i sa nivoima vode u reci Nišavi ali i Južnoj Moravi u najnižim delovima toka reke Nišave.

### 3.3.1 Analiza podataka o nivou podzemnih i površinskih voda

Na slici 4 prikazani su obrađeni podaci RHMZ o izmerenim nivoima na mernim piježometrima u mreži stanica podzemnih voda. Da bi se obezbedila uporedivost, izmerene vrednosti nivoa podzemnih voda su iskazane kao apsolutne kote u metrima nad morem (m.n.m.). Na istoj slici prikazani su uporedo i zabeleženi maksimalni godišnji nivoi vode u reci Nišavi, na vodomernoj stanici Niš. U periodu 01.01.2007-30.10.2013. jasno su izraženi vrhovi tri talasa velikih voda, koji se poklapaju sa maksimalno zabeleženim vrednostima nivoa podzemnih voda na mernim stanicama. Vrednosti maksimalnih godišnjih vodostaja, kota nivoa vode i datuma njihove pojave na reci Nišavi, V.S. Niš su sledeći:

- Hmax, god = 290 cm, Zmax, god = 190.78 m.n.m, 28.11.2007,
- Hmax, god = 278 cm, Zmax, god = 190.66 m.n.m, 21.04.2010,
- Hmax, god = 271 cm, Zmax, god = 190.59 m.n.m, 26.05.2012.

Sa slike 4 može se jasno zapaziti da su varijacije nivoa podzemnih voda nešto veće na najuzvodnijim mernim stanicama uz reku Nišavu, pri čemu je od uticaja i udaljenost stanice od reke Nišave. Manje promene nivoa na nizvodnijim stanicama su uslovljene položajem u odnosu na Južnu Moravu, jer je tu i tečenje u Nišavi pod uticajem nivoa vode u reci Južnoj Moravi.



Slika 4. Promena nivoa podzemnih voda na 7 mernih stanica podzemne vode u okolini reke Nišave i godišnji maksimumi registrovani na VS Niš u periodu 01.01.2007-30.10.2013.

Figure 4. Groundwater level variation at 7 gauging groundwater stations in the surrounding of the river Nišava and annual maxima recorded at hydrologic station Niš in the period 01.01.2007-30.10.2013.

U periodima pojave tri najizraženija talasa velikih voda, može se uočiti izvesna sličnost u srednjim dnevnim nivoima podzemnih voda na 7 mernih stanica na talasima iz novembra 2007. i maja 2012, gde je vrh talasa zabeležen 2007. godine veći u odnosu na maj 2012, dok je vrh talasa zabeležen krajem aprila 2010. godine znatno izraženiji.

U slučaju nekorektno izvedene hidroizolacije na objektu, pod pretpostavkom da je maja 2012. godine došlo do prodora podzemnih voda u podrumске prostorije, logično je očekivati da bi se i u vreme sva tri vrha poplavnih talasa desila ista pojava, tj. plavljenje prostorija. **Kako tokom najizraženijeg vrha krajem aprila 2010. godine NIJE bilo plavljenja prostorija, mogućnost prodora podzemnih voda zbog nekorektno izvedene hidroizolacije se može smatrati nereálnom.** Mogućnost oštećenja hidroizolacije u međuvremenu, takođe nije realna, obzirom na podlogu i način temeljenja. U Elaboratu o geotehničkim uslovima fundiranja se ističe da je uočena horizontalnost slojeva i konstatuje da će se „objekat fundirati na prorodnom, peskovitom šljunku, koji je konsolidovan, ne treba očekivati značajnija sleganja, odnosno ona će biti zanemarljiva“ (Geotehnički biro, 2005), iz čega proizilazi da oštećenje ugrađene hidroizolacije usled neravnomernog sleganja terena nije realno očekivana pojava.

### 3.4 Prodor atmosferskih voda iz spoljne sredine u podrumске prostorije

#### 3.4.1 Prodor atmosferske vode u objekat kroz stepenište i izlaz iz dvonamenskog skloništa

Do prodora atmosferske vode u objekat moglo bi doći usled dugotrajnih padavina, koje bi uzrokovale zabarivanje na površini terena, sa efektima poplave. U neposrednoj okolini poslovno stambenog objekta „Čačanska banka“ redovno se stvaraju velike bare prilikom dugotrajnih kiša, a naročito pri kišama jačeg intenziteta. Kako je kanalizacioni sistem u ovom delu grada mešovitoг tipa, fekalni kanalizacioni kolektor koji prolazi ulicom 7. juli (kao i ulicom Stefana Prvovenčanog) ne može da primi kišni oticaj u periodu intenzivnih i dužih padavina zbog nedostatka kapaciteta kolektora usled:

- gomilanja nanosa u kolektoru, što je posledica akumuliranja prašine i nečistoće sa ulica prilikom pranja ulica i istaložavanja prilikom manjih proticaja u kanalizaciji, zbog malih brzina koje nemaju moć transporta krupnijih čestica
- namernog ubacivanja otpadaka od zimmice, hrane, odeće, kesa sa smećem u šahtove od strane nesavesnih stanara objekata u okolini, pa se time redukuje mogućnost prijema kišnog oticaja.

Prva negativna posledica ovih pojava je tečenje u kanalizacionom sistemu pod pritiskom, pa se događa povratno tečenje kroz kanalizacione instalacije i proboj prljave vode kroz WC šolje i lavaboe u suturenskim prostorijama objekata u ulici 7. juli i Stefana Prvovenčanog, zbog čega su mnogi građani ugrađivali nepovratne ventile koji automatski blokiraju povratno tečenje. Voda koje prodire iz kanalizacionog sistema je zamućena i prljava.

Druga negativna posledica je stvaranje bara na površini terena, čime se onemogućava normalan prilaz, naročito poslovno stambenom objektu „Čačanska banka“ iz koje su često dolazile pritužbe. Postoji opasnost od prodora vode iz bare u objekat ukoliko akumuliranje traje u dužem vremenskom periodu, jer može doći do izdizanja nivoa vode do kote ulaza u zgradu. Voda može prodreti kroz izlaz iz dvonamenskog skloništa koji se nalazi na ulici i pokriven je limenim plaštom, kao i kroz ulaz u podrumске prostorije. Pomenuti izlaz iz skloništa se nalazi na nižoj koti od kote ulaza u podrum, tako da postoji velika verovatnoća incidentnog prodora atmosferskih voda u slučaju akumuliranja kišnog oticaja (sa efektima poplavljanja).

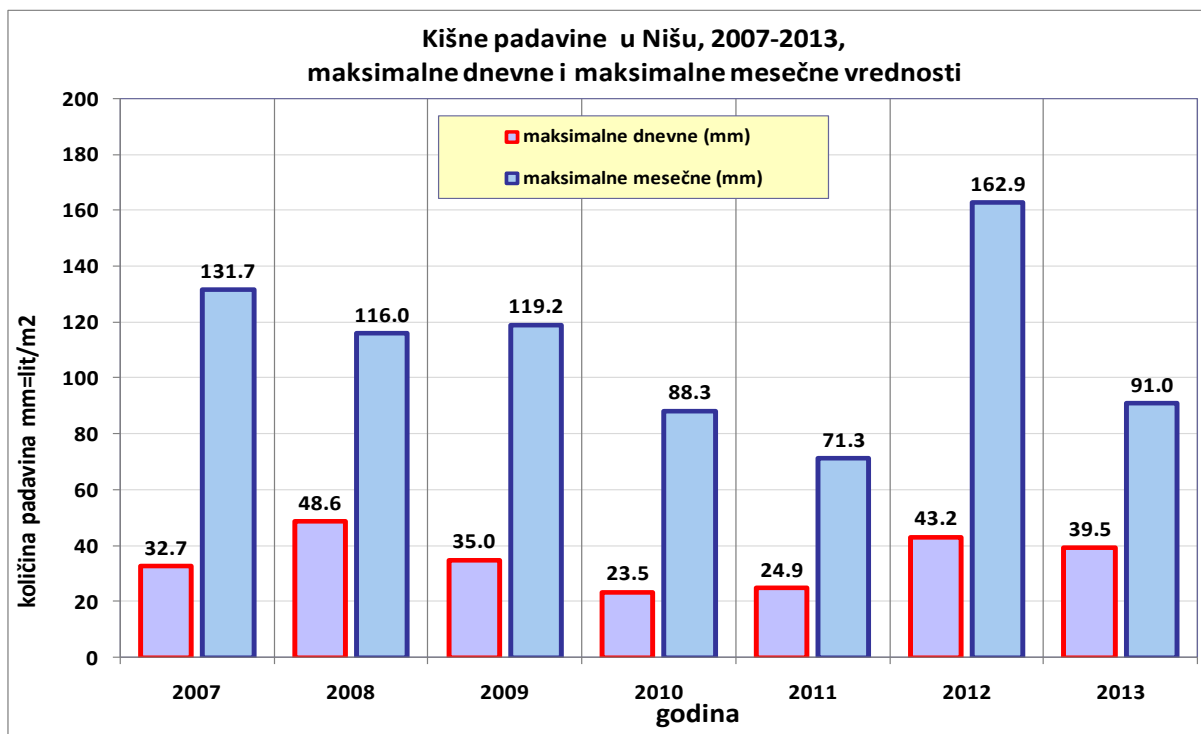
### 3.4.2 Prodor kišnog oticaja kroz parter objekta

Prodor atmosferskih voda kroz parter objekta je moguć kroz otvore na objektu, pre svega kroz prozore koji se nalaze na dvorišnoj strani objekta, u slučaju da ne dihtuju dobro ili da su u nekom kišnom periodu ostavljeni otvoreni zbog ventilacije. Druga mogućnost prodora atmosferskih voda kroz parter jeste kroz bušotine koje su izvedene radi učvršćivanja pojedinih unutrašnjih ili spoljnih instalacija, ukoliko ne postoji kvalitetno rešeno zaptivanje. Do prodora vode bi dolazilo prilikom tečenja sloja vode, tj. prilikom svakog kišnog dana, preko parterno uređenog dela objekta, a primećene posledice bile bi procurivanje, kapanje sa plafona ili niz zidove objekta uz stvaranje fleka, što svakako ne bi moglo biti neprimećeno. Količine vode koje bi mogle prodrati zavise od veličine otvora, intenziteta i dužine trajanja padavina, tako da je moguće i plavljenje prostorija. Voda koja bi prodrila u objekat bi najverovatnije bila bistra.

### 3.4.3 Analiza prikupljenih podataka o padavinama

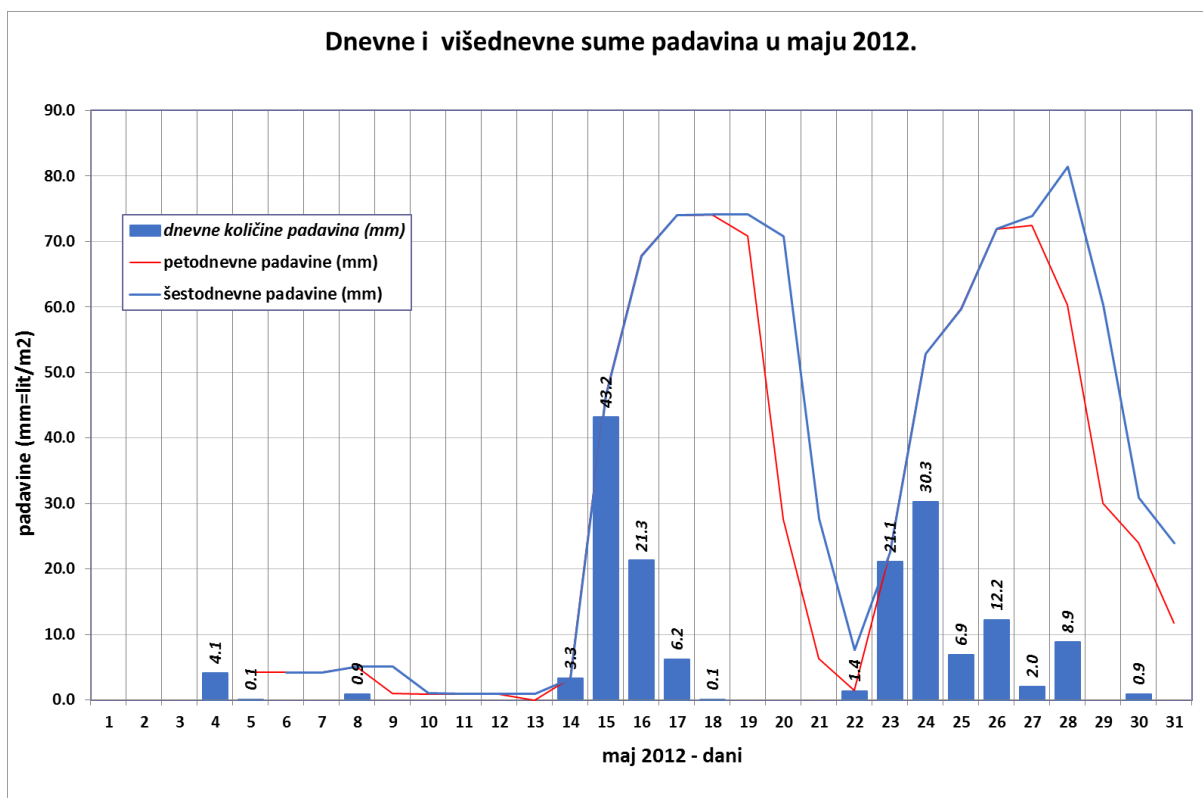
Na osnovu podataka RHMZ o padavinama izmerenim na meteorološkoj stanici Niš za period 01.01.2007-30.10.2013 (RHMZ, 2013), kao i podataka objavljenih u Meteorološkim godišnjacima RHMZ, izvršena je analiza padavina tokom perioda stavljanja objekta u upotrebu. Dijagram na slici 5 prikazuje maksimalne dnevne, maksimalne mesečne i sume godišnjih padavina na lokaciji MS Niš. Suma godišnjih padavina nije merodavna za analize u kraćem vremenskom periodu, ali zato maksimalne dnevne, višednevne i mesečne sume to jesu.

Na dijagramu na slici 5 prikazane su maksimalne dnevne i mesečne padavine na MS Niš za sedam godina analiziranog perioda. Maksimalne mesečne padavine u razmatranom periodu su zabeležene tokom maja meseca 2012. godine, dok su maksimalne dnevne padavine (48.6 mm) zabeležene 2008. godine.



Slika 5. Maksimalne dnevne i mesečne količine padavina u godini na MS Niš tokom perioda 2007-2013

Figure 5. Rainfall at MS Niš, daily and monthly sums maxima per year, during the period 2007-2013



Slika 6. Dnevne i kumulativne višednevne padavine u Nišu tokom maja 2012.

Figure 6. Daily rainfall, five- and six-days rainfall sum in Niš during May 2012.

Od stavljanja objekta u upotrebu 2007, najkišniji mesec je maj 2012. Inače se i u analizama RHMZ (2012), dokument „Klimatološka analiza proleća 2012 za Srbiju u odnosu na referentni period 1961-90“, na strani 10 kaže: „suma prolećnih padavina je bila u kategoriji kišno, veoma kišno i ekstremno kišno“, dok se na strani 12 konstatuje: „u drugoj polovini maja, kumulativna količina padavina je u Čupriji, Nišu i Negotinu bila znatno iznad normale“ (RHMZ, 2012).

Na slici 6 su prikazane dnevne i višednevne količine padavina za maj 2012. Mogu se uočiti dva kišna perioda. Period 14. – 18. maja karakteriše velika količina padavina, sa najvećom dnevnom sumom padavina od 43.2 mm (15.05.), neznatno manjom od maksimalno zabeležene od stavljanja objekta u upotrebu (48.6 mm, 28.08.2008).

Pored najveće dnevne sume padavina u 2012. godini, u petodnevnom kišnom periodu maja 2012. palo je ukupno 74.1 mm. Dugotrajne i obilne kiše tokom ovog petodnevnog perioda su direktno uticale na uslove vlažnosti u drugom višednevnom kišnom periodu 22.05 – 28.05, gde je tokom 6 dana palo ukupno 82.8 mm, što je najkišniji takav period od 01.01.2007. godine. Uz velike količine padavina, tokom prvog višednevnog perioda padavina, nanete su velike količine nanosa u slivnike i kolektore koji su ostali neočišćeni i time je smanjena propusna moć celog kanizacionog sistema.

Usled obilnih padavina, može tvrditi, na osnovu analize terenskih uslova, količine kišnih padavina i prethodnog iskustva, da je došlo do stvaranja bara na površini terena, u karakterističnoj depresiji u kojoj se nalaze slivnici ispred objekta „Čačanska banka“.

Stvaranjem bara velike površine, sa kotom višom od kote revizione šahte na uličnoj kanalizaciji vrlo lako može se potopiti i trotoar pred ulazom u objekat banke i stambeni deo objekta. Pod tim okolnostima nivo vode se nalazi iznad nivoa poklopca rezervnog izlaza iz podruma objekta, pa je sasvim realan prodor vode sa površine u šaht ispod njega.

Količine vode koje prodiru nisu velike kao kada bi se radilo o pucanju ulične cevi, ali u dužem vremenskom kišnom periodu i potapanju poklopca rezervnog izlaza može doći do punjenja prostora u šahtu ispod poklopca rezervnog izlaza, koji se mogao napuniti do određenog nivoa prilikom prvog

kišnog perioda bez preliivanja vode u objekat. Naknadno punjenje šahta i koridora prema objektu tokom drugog kišnog perioda moglo je dovesti do laganog preliivanja vode niskim intenzitetom u objekat. U ovom slučaju bi se radilo o bistroj vodi, jer bi ona dolazila sa površina već ispranih dugotrajnom kišom, iz gornjih slojeva bare nastale na uglu ispred zgrade. Ako do preliivanja dođe u vremenskom periodu kada se ne boravi u prostorijama, tj. popodnevnim i večernjim satima ili preko vikenda, mogu se nakupiti znatne količine vode i izazvati plavljenje prostorija, koje može biti značajno kvašenja podne obloge, cementne košuljice i zidova, ali i stvaranja sloja vode iznad kote poda, kada su potrebne čizme da bi se hodalo kroz podrumске prostorije.

Mogućnost prodora kiše kroz prozore je malo verovatna. Pretpostavka je da prozori dobro dihtuju, jer se u prethodnim kišnim periodima nije dogodila pojava plavljenja prostorija, kao i da su bili u zatvorenom položaju, jer je prethodni kišni period svakako bio upozoravajući.

Do prodora atmosferskih voda kroz parter moglo bi doći kroz bušotine koje su izvedene radi učvršćivanja pojedinih unutrašnjih ili spoljnih instalacija, ali bi ovaj uzrok takođe morao biti primećen tokom prethodnih kiša, zato što bi takvo plavljenje ostavilo primetna oštećenja i tragove na plafonu objekta.

## 4 Zaključak

U radu je izvršena analiza mogućih uzroka pojave vode u produmskim prostorijama poslovno stambenog objekta „Čačanska banka“, ul. 7. Juli 25 a tokom maja 2012. Prikupljeni su i analizirani svi raspoloživi podaci, kako iz projektne tehničke dokumentacije i geotehničkih istražnih radova, tako i merodavni podaci koje prikuplja ovlašćena institucija RHMZ.

Kao mogući razlozi pojave vode u suterenskim prostorijama eliminisani su kondenzacija zbog vrlo malih količina vode koja se tom prilikom stvara, mogućnost incidentnog otvavanja prozorskih okana, kao i havarije na unutrašnjim ili spoljnim infrastrukturnim instalacijama, koje bi bile vrlo uočljive.

Analizom nivoa podzemnih voda sa sedam mernih stanica u okruženju i nivogramom na reci Nišavi u periodu od 2007-2014 uočena su tri karakteristična vrha poplavnih talasa u 2007, 2010 i 2012. godini, gde je najveći od njih zabeležen 2010. godine. Obzirom da tokom pojave talasa velikih voda 2007 i 2010 na teritoriji Grada Niša nije bilo pojave vode u podrumskim prostorijama objekta „Čačanska banka“ (a nije ih bilo ni do 2018), kao razlog plavljenja može se eliminisati prodor podzemnih voda kroz hidroizolaciju objekta.

Tokom maja 2012. godine veoma velike kiše koje su pale tokom dva višednevna kišna perioda su izazvale stvaranje velike bare ispred objekta, na raskrsnici ulica 7. Juli i Stefana Prvovenčanog. Ove bare su zbog dužine trajanja kišnog perioda i obilnih padavina, kao i smanjene propusnosti slivnika ispred zgrade i uličnog kanalizacionog sistema, mogle dostići nivo koji izaziva prodor vode ispod poklopca rezervnog izlaza na trotoaru, poplaviti izlazni put i lagano preliiti u prostor objekta.

Na osnovu prikazanih sveobuhvatnih analiza, može se zaključiti da se višednevne padavine u toku maja meseca i nedovoljan kapacitet uličnog kanalizacionog sistema mogu smatrati glavnim uzrokom plavljenja prostorija, jer su mogle stvoriti uslove za prodor vode u objekat kroz rezervni izlaz, kao i za prodor vode kroz bušotine u pasažu kada je dolazilo do slivanja vode u slapovima iz zadnjeg dela parcele prema ulici.

## Literatura

1. Geotehnički biro (2005) „Geotehnički uslovi fundiranja stambeno-poslovnog objekta spratnosti Po+Pr+3s+Pk u ulici 7. Julia 25 u Nišu (k.p. br. 711 KO Niš – Čele Kula), Elaborat, mart 2005.
2. Institut za građevinarstvo i arhitekturu Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu (IGA GAF) (2013) Mogući uzroci pojave vlage i vode u suterenskim prostorijama poslovno stambenog objekta u ulici 7. Julia 25 a, sa posebnim osvrtom na period mesec maj 2012, Ekspertiza.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

3. Nišprojekt (2005) Projektno tehnička dokumentacija za izgradnju objekta „Čačanska banka“ u ulici 7. Juli 25, Niš.
4. RHMZ (2012) Klimatološka analiza proleća 2012 za Srbiju u odnosu na referentni period 1961-90.
5. RHMZ (2013) Isporučeni podaci o registrovanim padavinama na MS Niš 2007-2013, nivou podzemnih voda na 7 mernih stanica podzemne vode (Brzi Brod selo, Brzi Brod Nišava, Medoševac selo, Medoševac Nišava, Popovac selo, Novo selo – stara škola i Mramor) 2007-2013, vodostaji na reci Nišavi u profilu VS Niš 2007 - 2013.



## **Hidrotehnički objekti u ekstremnim uslovima – primeri ponašanja i neke pouke kroz praksu**

Goran Radović<sup>1</sup>

APSTRAKT: Vrlo često veliki hidrotehnički objekti se planiraju i grade u izolovanim, slabo pristupačnim i teško osvojivim predelima koje često karakterišu ekstremno klimatsko i topografsko okruženje. Počev od projektovanja koje zahteva prilaz zoni budućih radova do poznavanja klimatsko-hidrološko-geoloških uslova terena svaki korak koji vodi projektovanom i izvedenom hidrotehničkom objektu podložan je promenama uvođenju novih kriterijuma i adaptaciji na nove uslove. Ideja ovog rada jeste prikaz tri hidrotehnička projekta izvedena od strane Energoprojekt Niskogradnja na tržištu Perua, i to: i) za ekstremne hidrološke uslove, brana Sullana u sklopu velikog hidromelioracionog sistema Chira Piura 3, ponašanje brane i slapišta sa posledicama u uslovima ekstremno velikih voda prouzrokovanih klimatskim fenomenom El Niño 1997-98 i mesečnim padavinama koje su 30 do 40 puta veće od prosečnih sa prikazom rekonstrukcije izvršene 2000, ii) za ekstremnu eroziju izazvanu rečnim nanosom, brana Chavimochic, problem erozije slapišta nametnutog izvanrednom količinom nanosa sa prikazima elemenata rekonstrukcije i proizvodnje materijala, i iii) za ekstremne topografske uslove, slučaj hidrocentrale Chancay Rucuy, sa posledicama od kiša 2017 godine i to u zoni cevovoda pod pritiskom i zoni mašinske zgrade. Prikaz ova tri objekta ima za cilj da ukaže na ponašanje objekata u ekstremnim uslovima, posledice istih na primenjena rešenja i pokušava izvesti neka iskustva vezana za usvojena projektantska rešenja.

Ključne reči: ekstremni hidrološki događaji, kriterijumi za projektovanje, hidrotehnički objekti

## **Hydrotechnical structures in extreme conditions – examples and lessons learned in practice**

ABSTRACT: Very often large hydrotechnical structures are planned and constructed in isolated, hardly accessible areas characterized by extreme climatic and topographic environment. Starting with design that requires access to the area of future site to the knowledge of the climatic-hydrological-geological conditions every step that leads to the designed and executed hydrotechnical facility is subject to changes, introduction of new criteria and adaptation to new conditions. The idea of this paper is to show three hydrotechnical projects carried out by Energoprojekt Niskogradnja constructing company in Peru: i) for extreme hydrological conditions, Sullana dam, as a part of a huge land conservation system Chira Piura 3rd stage, the consequences on the dam and its stilling basin after the extreme floods caused by the climatic phenomenon El Niño 1997-98 with monthly precipitation which were 30 to 40 times bigger than an average, and the dam stilling basin reconstruction in 2000, ii) of extreme erosion triggered by sediment materials, dam Chavimochic, the problem of stilling basin erosion imposed by extraordinary amounts of sediments with views to the elements of reconstruction and material production, and iii) for extreme topographical conditions, the case of a hydropower plant Chancay-Rucuy, the consequences of the 2017 year rains on the penstock and power plant area. These three cases aim to draw attention to the behaviour of structures under the extreme conditions, and the consequences of the extreme conditions on applied solutions trying to outline some experiences related to the engineering solutions adopted.

Key words: extreme hydrological events, design criteria, hydraulic structures

---

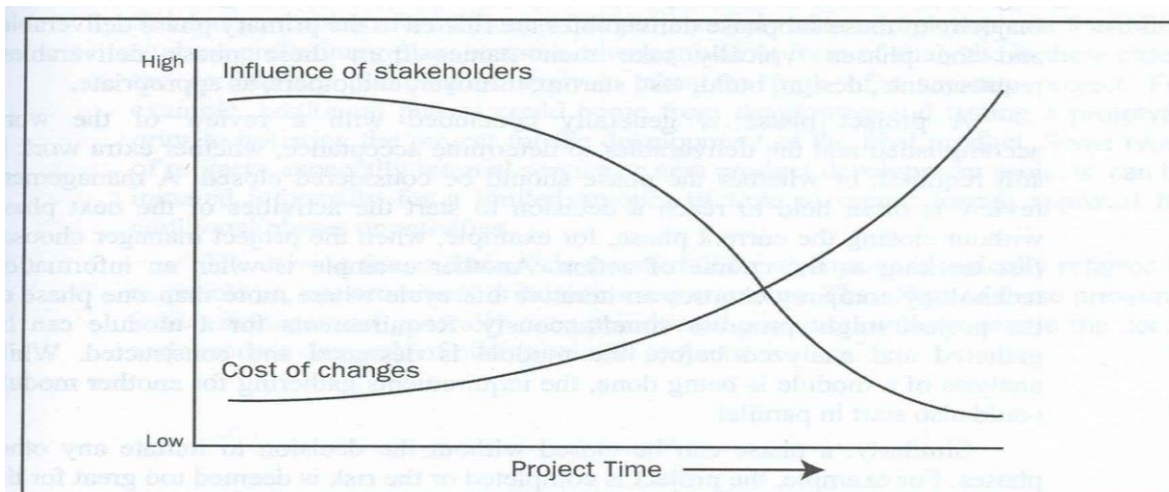
<sup>1</sup> Mr Goran Radovic, dipl inž. Energoprojekt-Niskogradnja, Novi Beograd, [g.radovic@energoprojekt-ng.rs](mailto:g.radovic@energoprojekt-ng.rs)

## 1 Uvod

U hidrotehnici često koristimo termine kao što su sistemske analize, vodoprivredni sistemi, bavimo se primenom matematičkih metoda, optimizacija u cilju postizanja prihvatljivog rešenja. Proces donošenja odluka (*Decision making process*) gotovo uvek uključuje termin *Povratna sprega/Feedback*. Kaže se da je *feedback*: „Proces u kome informacija o prošlosti utiče na isti fenomen u sadašnjosti ili budućnosti“.

Vrlo često nismo svesni koliko naše buduće odluke zavise od načina i uspešnosti u korišćenju *Povratne sprege*, primeni prethodnih iskustava, dobrih ili loših, na nova rešenja i nove situacije, odnosno koliko su ista sistematizovana, pri čemu da bi bila sistematizovana prvo moraju biti prepoznata i priznata. Nameće se pitanje, da li, koliko i kako koristimo povratnu spregu, i da li smo spremni da iskustva iz prethodnog perioda prepoznamo, priznamo i primenimo ubuduće.

Na Slici 1. nalazi se graf preuzet iz *A Guide to Project Mangement, Project Management Institute* koji na vremenskoj skali prikazuje veličinu značaja i stepen mogućnosti izmene na projekat i trošak koji promena može imati. Ukratko, što pre se primeni povratna sprega/feedback/korekcija, niži je trošak promene, ili što pre se primeni povratna sprega/korekcija/feedback veća je mogućnost promene.



Slika 1. Mogućnost i cena uticaja na projekat kroz vreme

Figure 1. Possibility and cost of Influence on project through time

U oblasti hidrotehnike proces feedback-a/povratne sprege, može ići od generalnih i opštih organizacionih tema kao što je npr. uređenje i gazdovanje vodoprivrednim resursima, do analize rešenja primenjenih na pojedinim hidrotehničkim objektima, kao singularnim tačkama u okviru sistema.

Kada je reč o vodoprivredi kao sistemu od strateškog interesa za jednu državu, izvanredan primer bi bila situacija koja je desila sa poplavama u Srbiji tokom 2014 godine i tekst prof B. Đorđevića u Politici od 29.05.2014. gde se u tekstu pod naslovom ***Kako smo urušili vodoprivredu***, kaže: *“Padavine se, naravno, ne mogu izbeći (a biće ih sve više zbog globalnih klimatskih promena), ali bi štete bile mnogostruko manje da država par decenija nije sistematski urušavala čitav sektor voda, delatnost koju u svim zemljama smatraju najvitalnijim sistemom države. Da pomenem primer koji pokazuje svu našu nesuvislost, na koju smo uzaludno upozoravali. Da bi se površinski kopovi REIS Kolubare branili od poplava, na veoma bučnoj reci Kladnici napravljena je namenska akumulacija Paljuvi-Vis, čiji je glavni zadatak bio da štiti kopove potpuno ublažavajući bujične povodnje. Tako važnim objektima se u svemu upravlja sa najvišeg nivoa države. No, nadležni su taj vitalni objekat, od koga zavisi energetska sigurnost Srbije, poverili na upravljanje-ribolovcima. Dobro ste pročitali”*

U daljem tekstu daju se 3 primera izgrađenih hidrotehničkih objekata unutar kompleksnih hidrotehničkih sistema, koji su bili predmet oštećenja, rekonstrukcija i promena rešenja. Autor ovog teksta je bio angažovan na predmetnim projektima kao radnik Energoprojekt Niskogradnja.

## 2 Prvi primer – Brana Sullana

### 2.1 Opis okruženja

Brana Sullana je derivacioni zahvat, sastavni deo Treće Etape kompleksnog hidromelioracionog projekta Chira Piura koji se nalazi na severu Perua. Projekat uključuje akumulacionu branu Poehos (inicijalni kapacitet oko 1 milijarde m<sup>3</sup>), derivacione brane Los Ejidos y Sullana, mrežu glavnih i sekundarnih kanala za navodnjavanje kapaciteta do 70m<sup>3</sup>/s sa nasipima i pratećim objektima zaštite od poplava. Ukupna navodnjavana površina je oko 100,000 hektara sa zahvatanjem vode za vodosnabdevanje više gradova. Ceo projekat je projektovan i vecim delom izveden od strane Energoprojekta, osim inicijalnog projekta brane Sullana.

Brana Sullana služi za skretanje vode u glavni kanal kapaciteta 25m<sup>3</sup>/sec, ima slobodan fiksni preliv dužine 200m i preliv sa 8 radijalnih ustava sirine 8m. Projektovana je za maksimalni proticaj u reci Chiri od 4,000m<sup>3</sup>/sec. Na delu sa radijalnim ustavama na koji ćemo naročito obratiti pažnju, slapište je projektovano sa betonskim delom i delom kamene obloge sa nevezanim kamenom različite veličine.

### 2.2 Definisanje ekstremnih uslova

Pod ekstremnim hidrološko hidrauličkim uslovima ovde smatramo one nametnute klimatskim fenomenom El Niño koji se javlja svakih 10-15 godina i karakterističan je za sever Perua. Karakteriše se intezivnim padavinama što uzrokuje poplave i oštećenja infrastrukture. Nastaje kao posledica promene strujanja morskih struja u Tihom okeanu i to promenom smera strujanja, od obala Austarije i Indonezije linijom ekvatora ka severu Perua, pri čemu dolazi do značajnog podizanja temperature mora što dolaskom do peruanske obale prouzrokuje intezivne padavine tokom celog kišnog perioda od januara do maja.

U ovom tekstu ćemo se baviti ponašanjem brane Sullana tokom i nakon fenomena El Niño 1997/1998. Ukupne godišnje padavine u regionu brane su u kišnom period 1997/1998 tokom fenomena EL Niño iznosile iznosile oko 1,900mm sto je 30 puta više od prosečnih godišnjih padavina od oko 60mm, pri čemu je merenje u jedom danu pokazalo 210mm/24h.

### 2.3 Ponašanje brane Sullana

Na slici 2. Prikazano je ponašanje slapišta brane Sullana pri različitim proticajima tokom 1997/1998, i to za Q=500m<sup>3</sup>/s, Q=1,500m<sup>3</sup>/s i Q=3,500m<sup>3</sup>/s. Vidi se da je situacija nizvodno od brane najmirnija pri maksimalnom proticaju bliskom projektovanom, ali i značajno različito ponašanje pri drugim manjim proticajima.

Na slici 3. vidi se stanje slapišta brane Sullana posle prolaska velikih voda uzrokovanih El Niñom. Više ne postoji nizvodna kamena zaštita dok je betonski deo slapišta znacajno oštećen i ugrozava ceo objekat. Projekat rekonstrukcije brane Suljana je urađen 1999/2000. i uključio je i analizu stanja na hidrauličkom modelu. Model je izgrađen u hidrauličkoj laboratoriji univerziteta u Piuri/Peru u saradnji sa stručnjacima Instituta Jaroslav Černi iz Beograda. Analizirano je ponašanje novoprojektovane nizvodne zaštite slapišta sa produženjem betonske zaštite plus tzv. fleksibilna zaštita koju čine gabionski tepih debljine 1,0 m upleten u mrežu armaturnog gvožđa.

Rezultat hidrauličkog modela prikazan je na slici broj 4. Pokazalo se da ovo rešenje daje odgovarajući stepen zaštite, pri čemu fleksibilna zaštita prati kretanje rečnog dna, ali i da nizvodno od zone zaštite dolazi do znatne erozije neštićenog dela korita, do 8m.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



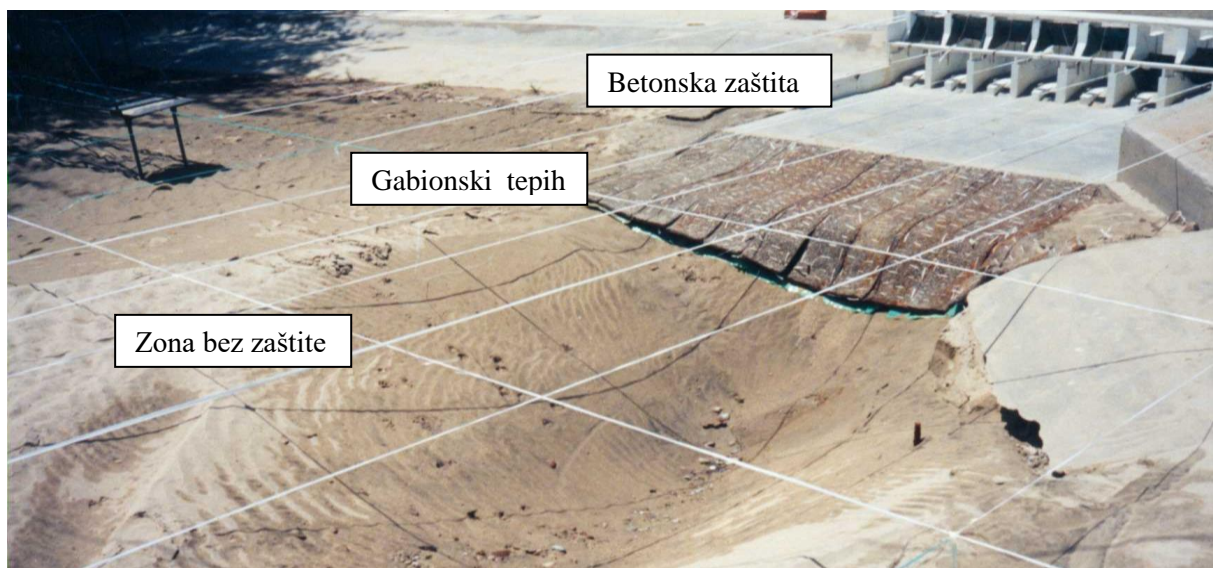
Slika 2. Slapište brane Sullana pri različitim proticajima

Figure 2. Sullana dam stilling basin under different discharges



Slika 3 Spapište brane Sullana posle prolaska podvodnja 1997/1998

Figure 3. Sullana dam stilling basin after 1997/1998 rainy season

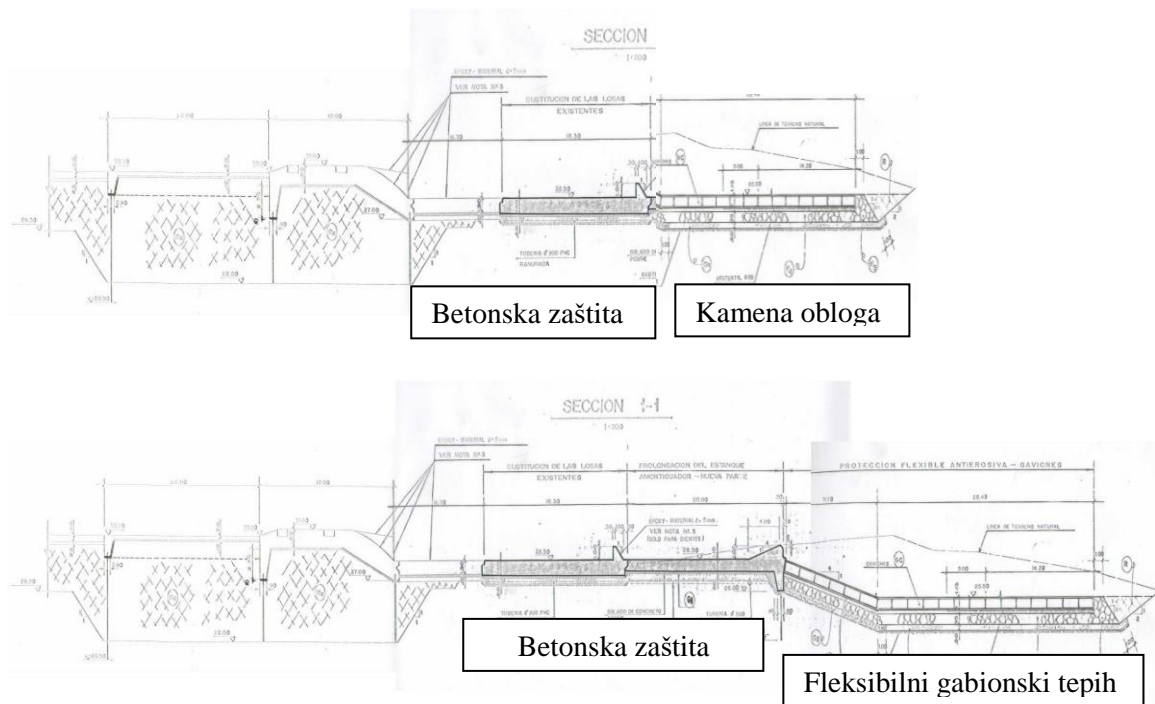


Slika 4 Hidraulički model slapišta sa nizvodnim delom

Figure 4. Stilling basin and its downstream part hydraulic modelling

Ponašanje fleksibilnog i stanje novoprojektovane zaštite brane je, nakon analize na hidrauličkom modelu ocenjeno kao zadovoljavajuće. Naravno ovo rešenje je, iako je analiza sveobuhvatna, ograničeno elementima iz inicijalnog/osnovnog projekta, što nas vraća na krive sa slike 1. i uvodi u igru princip povratne sprege, pri čemu se naravno u analizi jedne novonastale situacije pored čisto tehničkih razloga i objašnjenja i dokaznica mora voditi računa i o troškovima odnosno sredstvima sa kojima raspolaže investitor.

Poprečni presek inicijalnog rešenja i novo projektovanog rešenja izvedenog stanja 2000-te godine su prikazana na slici 5.



Slika 5. Poprečni presek slapišta brane Sullana- inicijalni projekat naspram projekta rekonstrukcije 1999

Figure 5. Sullana Dam cross section – initial design VS 1999 reconstruction design

### 3 Drugi primer – Brana Chavimochic

#### 3.1 Opis okruženja

Brana Chavimochic je derivaciona brana slična brani Sullana. Nalazi se na reci Santa iznad grada Trujillo severno od glavnog grada Lime. Na brani se zahvata voda za navodnjavanje za više od 120 hiljada hektara i vodosnabdevanje za skoro milion stanovnika. Ima fiksni preliv i tri radijalne ustave. Izgrađena je krajem sedamdesetih godina prošlog veka. Radovi rekonstrukcije slapišta su izvedeni u periodu 2010-2012.

#### 3.2 Definisanje ekstremnih uslova

Ako je brana Sullana bila građena u nekoherentnom materijalu, brana Chavimochic je locirana u potpuno drugačijim uslovima, tvrdj steni i rečnom dnu sa krupnim materijalom sa permanentnim promenljivim proticajima i veilkom količinom agresivnog nanosa reke Santa. Nanos u reci Santi dolazi iz celog sliva koji se karakteriše izostankom bilo kakvog vegetacionog pokrivača. Nanos čine čestice granodiorita ciji osnovni element je kvarc, koji kristališe po heksagonalnoj strukturi i u osnovi mu je sastojak silicijum dioksid. Po Mosovoj skali čvrstoće od 1 do 10 pri čemu je 1-talk a 10-dijamant, kvarc se nalazi na mestu broj 7. Visoka tvrdoća i oštroična struktura mineralu kvarca daju agresivne eroziona karakteristike. Na slici 5 prikazana je brana Chavimochic gde se vidi stalno tamna boja reke Santa usled velike količine nanosa sa prikazom strukture minerala kvarca.



Slika 5 Brana Chavimochic, pogled sa nizvodne strane. Gore desno, struktura minerala kvarca

Figure 5. Chavimochic dam, downstream view. Up right, kvarz mineral structure

### 3.3 Ponašanja brane Trujillo

Štete nastale kao posledica erozije na slapištu i stubovima brane Trujillo su popravljane više puta do rekonstrukcije 2010-2012. Pitanje je da li se pod ovim uslovima visoke erozije agresivnosti uopšte moguće dati trajno rešenje. Na slici broj 6. prikazana su oštećenja već rekonstruisanog preliva, stubova preliva i dela slapišta pri čemu je prethodna rekonstrukcija uključivala oblaganje osnovnog betona kamenim pločama ali ne dovoljne mase i debljine.

Rekonstrukcija brane Chavimochic koju je izvela Energoprojekt Niskogradnja 2010-2012 godine uključivala je sledeće elemente: i) izrada novih betonskih elementa, masivnih ploča debljine 2 m na koje su, ii) po celoj površini preliva i slapišta u dnu locirane kamene kocke 1x1x1m zalivene u betonu, a iii) sa strane, betonski zidovi i stubovi brane su obloženi kamenim kvadrata 0.2x0.2x0.4m. Važno je napomenuti da su ove velike kocke i manje kvadre od istog prirodnog materijala iz kojeg dolazi nanos u reci Santi, granodiorit. Odnosno, rešenje koje je primenjeno jeste prirodan material istih karakteristika kao i materijal koji uzrokuje problem pri čemu su uključena znatna ojačanja. U ovom momentu nije poznato kako se ponaša novo rešenje primenjeno 2012 (Investitor nije imao reklamacije do sada) ali se mora računati sa redovnim periodičnim održavanjem. Na Slici 7. prikazan je deo procesa rekonstrukcije preliva i slapišta 2010-2012 godine.

Umesto zaključka u ovom slučaju se možemo zapitati u kojoj meri je pri projektovanju slapišta na brani Chavimochic moguće uključiti ovako ekstremnu situaciju kada je reč o abrazivnom dejstvu rečnog toka sa velikom količinom agresivnog nanosa, a da pri tome ne pristupimo čistom iskustvenom pristupu kao što je učinjeno pri projektu rekonstrukcije 2010-2012. Ako pođemo od pretpostavke da je inicijalno rešenje za slapište verovatno uključivalo ojačanu betonsku podlogu sa površinskom zaštitom, a da su zatim popravke koje su usledile uključivale granitne kocke manjih dimenzija (30 cm debljine) onda je ponovna povratna sprega dovela do rešenja koje uključuje masivne betone pokrivene masivnim kamenim kockama debljine 1 m. Da je rešenje iz 2010 godine bilo primenjeno prilikom izgradnje brane problemi naknadne popravke bi bili manji. Ovde se u svakom slučaju može zaključiti

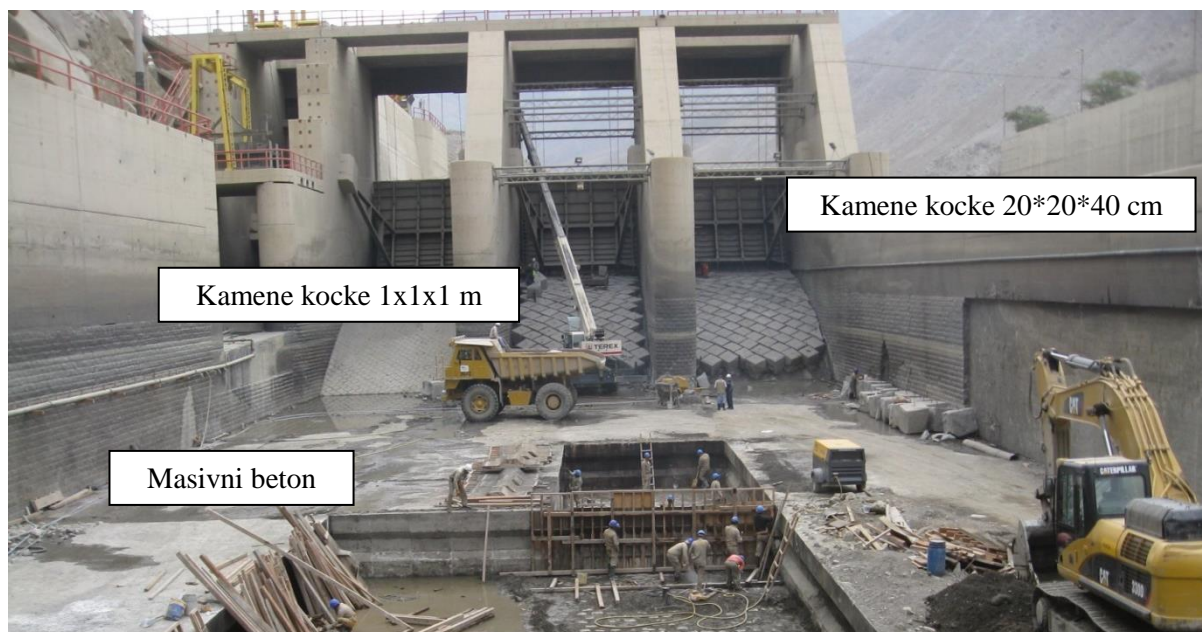
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

da se radi o slučaju kada silama prirode treba odgovoriti sa istim prirodnim materijalima. Takođe, kao u slučaju brane Sullana, treba uključiti i vreme kao promenljivu, dajući dinamički karakter objektu, tokom kog voda i njeni tokovi i elementi utiču na projektovana rešenja.



Slika 6. Brana Chavimochic, oštećenja preliva i slapišta usled nedovoljne zaštite

Figure 6. Chavimochic Dam, stilling basin damages due to insufficient protection



Slika 7. Brana Chavimochic, rekonstrukcija 2010-2012 godine

Figure 7. Chavimochic Dam, reconstruction year 2010-2012



Interesantan je način na koji se proizvode kamene kocke. Radi se o tradicionalnom načinu izrade od strane ljudi sa iskustvom uz minimalnu primenu mehanizacije. Vađenje kocki iz stenske brdske mase i dovođenje na projektovanu meru praktično je rađeno ručno kao što se to vidi na Slici broj 8.



Slika 8. Brana Chavimochic, proizvodnja materijala u pozajmištu

Figure 8. Chavimochic Dam, quarry areas material extraction

## 4 Treći primer – Hidrocentrala Chancay Rucuy

### 4.1 Opis okruženja

Hidrocentrala Chancay Rucuy nalazi se u zoni Lime, centralni Peru. Uključuje zahvat sa slobodnim prelivom na reci Chancay sa peskolovom i otvorenim i zatvorenim (tunelskim) dovodnim kanalom sa slobodnim tečenjem do cevovoda pod pritiskom, ukupne dužine oko 21 km na koti od oko 2,700mm. Instalisan snaga je 2\*20MW. Hidrocentrala je privatna investicija izgrađena za potrebe rudarskih kompanija.

### 4.2 Definisane ekstremnih uslova

U ovom slučaju pod ekstremnim uslovima podrazumevamo topografske uslove. Čak ne toliko nadmorsku visinu od 2,700mm što za Peru i nije čudno jer se mnogi projekti izvode na visinama od 4-5,000 metara, pa ni trasa projekta koja ide strmim liticama planina, niti samom serpentinskom pristupu delovima projekta, nego ćemo se više baviti lokacijom cevovoda pod pritiskom, načinom fundiranja, posledicama odabira lokacije praćenom promenama usled intervencije čoveka u prirodnom okruženju i posledicama pri prvom intenzivnijem kišnom periodu.

### 4.3 Ponašanje objekta

Cevovod pod pritiskom na HC Chancay je metalni cevovod prečnika 1,200mm dužine 1,290m i denivelacije oko 700m. Lociran u prirodnom useku sa zonama osutog materijala. U donjem delu je zaliven u betonski blok ili postavljen na betonsku podlogu a na prelomima je oslonjen samo na ankerne blokove bez značajnijeg osiguranja dubljim iskopima ili ankerima (Slika 9).



Slika 9. Položaj cevovoda pod pritiskom

Figure 9. Penstock layout

Konstrukcija ovakvog cevovoda je sama po sebi morala biti komplikovan i težak zadatak. Obzirom na uslove terena, lokaciju i pristupe izgradnja je uključivala mnogo ručnog rada, pre svega kada je reč o transportu, iznošenju i ugradnji materijala kao i montaži cevovoda na skućenom prostoru.

Godina 2017 je bila kišna godina. Prve intenzivnije padavine su uticale da dođe do oštećenja cevovoda i onemogućavanja rada hidrocentrale. Voda od kiša je i) našla put kroz usečeni deo trase cevovoda, ii) pojačala eroziju i dovela do iii) ispiranja materijala u zoni cevovoda i ankernih blokova što je uticalo na iv) dislokaciju blokova i cevovoda što je na kraju dovelo do v) pucanja cevovoda.

Kao što je inicijalna ideja dovoda vode od zahvata na reci do cevovoda pod pritiskom predviđao otvoren kanal u stenskom useku pa tokom izgradnje preprojektovan na (većim delom) tunelski vod sa slobodnim tečenjem, tako se posle pretrpljenih steta i kod cevovoda pod pritiskom analizira varijanta ukopavanje u stensku masu kroz vertikalni šaht ili kosu tunelsku cev čime bi se eliminisao uticaj spoljnih faktora kao što su padavine i erozija. Ovakvo tunelsko rešenje, ako se usvoji, će verovatno biti nešto skuplje ali izvesno značajno bezbednije i dugotrajnije u odnosu na spoljašni cevovod što, može se reći, kompromituje inicijalno primenjeni način donošenja odluka I uspostavlja feedback u ovom singularnom slučaju ali tek kada je šteta nastala menjajući ciljnu funkciju pri čemu ekonomski kriterijum vrlo često ne treba biti glavni kriterijum optimizacije građevinskih objekata.

## 5 Zaključak

Iz navedenih primera vidimo kako su tri objekta evoluirala, pri čemu svaki sledeći korak ili primenjeno rešenje nije posledica neke velike matematičke pa ni ekonomske kalkulacije nego više posledica poruka koja nam šalje ili nameće priroda. Faktor koji je teško uključiti u model optimizacije ili sistemske analize.



Slika 10. Ostećenja cevovoda

Figure 10. Penstock damages

*Povratna sprega/Feedback*, kako je napred navedeno, je uglavnom lične prirode, iskustvo pojedinca ili grupe ljudi angažovanih na projektima. U ovom slučaju povratna sprega je na neki način nametnuta. Čini se, da ako se želi bolje razumevanje prirode, treba izaći na teren, detaljno ga obići i dobro osmotriti mesto budućeg objekta, jer pri izgradnji hidrotehničkih objekata uvek treba imati na umu da postoji značajna interakcija sa prirodom i prirodnim okruženjem, pri čemu prisustvo vode daje izražen dinamički faktor čije delovanje kroz vreme treba posebno razmatrati.

## Zahvalnica

Autor se zahvaljuje svim kolegama koji su sarađivali na izgradnji hidrotehničkih objekata koji se navode u ovom tekstu.

## Домаћа мобилна опрема за одбрану од поплава и управљање поплавама

Раде Милутиновић<sup>1</sup>

АПСТРАКТ: Поплаве у долинама река су природна појава. Међусобно се битно разликују по штетама које изазивају и по степену плавлена. При истом степену плавлена ако буде поплавлен град или друга вредна имовина, штете су огромне, а ако буду поплавлене необрађене површине и ненасељене територије, штете су минималне. Разлика између поплаве и катастрофалне поплаве, при истом степену плавлена је у штетама које настају. Дошло је време поплава које не можемо спречити, али можемо спречити штете или их свести на нама подношљиву меру. Рад представља став аутора о стању екстремне одбране од поплава кад река достигне и превазиђе дотадашњи максимални водостај. Градовима и другој вредној имовини на брањеној територији треба обезбедити виши степен заштите од околних пољопривредних површина. Степен заштите који пружају постојеће одбрамбене линије се смањује, опасност од поплава се повећава, а вредност брањене имовине се вишеструко увећава. Однос степена заштите и вредности брањене имовине је значајно нарушен, а нарушава се и даље. Мирне периоде између две велике воде треба искористити за повећање степена заштите. За то су нам потребне попречне и обухватне унутрашње одбрамбене линије. Најбоље је да буду мобилне, али унапред припремљене. За то је потребно знање, искуство и опрема. То и кошта, али само 5-15% од сигурних штета. У противном, поплаве се враћају и кажњавају немар, лакомисленост, незнање, алкавост, неорганизованост и сиромаштво. У раду се приказују оригинална решења за избегавање будућих проблема. Приказују се “L” елементи – Европски патент мобилне опреме за одбрану од поплава и њихова примена. Више нема одбране без мобилне опреме. Приказује се формирање водонепропусних баријера побијањем. Дају се смернице за формирање и примену система управљања поплавама.

Кључне речи: поплаве, штете, одбрана од поплава, спољашње и унутрашње одбрамбене линије, управљање поплавама, мобилна опрема, водонепропусне баријере

---

<sup>1</sup> Раде Милутиновић, дипл. грађ. инж., “HIDRO CLB CONSULT” d.o.o., Нови Сад, [rademilu@yahoo.com](mailto:rademilu@yahoo.com), [rade.hidro@gmail.com](mailto:rade.hidro@gmail.com)

## 1 Увод

Дунав је наша највећа река. Али, није само наша. Ми се налазимо на почетку доње половине тока. Средина тока Дунава је на граници између Србије и Мађарске. Узводно од те границе се налази још 1.440 км Дунава. Дунав настаје у Дунауешингену на надморској висини 930 мнм. Коте терена у зони границе су око 90 мнм. Денивелација Дунава од почетка до наше границе са Мађарском је 840м. До ушћа у Црно море је још 90 м. Дунав - од настанка до границе са Мађарском и Дунав од границе са Мађарском до Црног мора, то нису исте реке! Наше подручје је хидротехничко чвориште Европе. На нашем подручју се површина слива Дунава повећава 272%. Површина слива Дунава на уласку у нашу земљу је 210.250 км<sup>2</sup>. На 235 км ваздушном линијом низводније, после ушћа Велике Мораве, површина слива Дунава је 571.951 км<sup>2</sup> (Голубац).

У кругу пречника ~200 км од ушћа Драве до ушћа Велике Мораве се на нашем подручју у Дунав уливају највеће европске реке. Из алпског подручја – дотиче Драва са Муром и Сава са босанским рекама. Са истока, из карпатског подручја дотичу реке Тиса са Моришем, Бегеј и Тамиш. Са југа дотичу Дрина, Колубара и Морава. На том подручју где почиње Ђердапска клисура, изградили смо две бране и Ђердапску акумулацију. То је хидротехнички врло сложено подручје. На том подручју нам живи највише становника. Ту су нам највећи градови, највећа индустријска постројења, најважније саобраћајнице, највећа енергетска постројења, велике и плодне пољопривредне површине, велике фарме и пољопривредна постројења.



Слика 1. Хидрографска карта Дунава

Живети поред велике реке, у њеном кориту за велике воде, заштићен насипима, и веровати да не можеш бити поплављен је лакомисленост или незнање. Живети поред велике реке је стање лабилне равнотеже и варљивог мира. У хидротехници се то зна. Али то није довољно. То морају да разумеју и да знају сви који живе поред реке, а нарочито они који доносе одлуке о заштити од реке тј. о одбрани од поплава. Опстанком на овом простору морају управљати наши најбољи стручњаци. Мада је дошло време да су од њих постали важнији преводиоци европских директива из ове области.

Начини и могућност настанка поплава су врло различити. Зависе од реке, одбрамбених линија, конфигурације града, морфологије терена итд. Разматрање у овом раду се у највећој мери односи на градове поред великих равничарских река, које нам дотичу са туђих територија које не контролишемо. Приступ проблему и принципи решавања се односе и на наше градове и реке чије сливове контролишемо.

Рака надође и превазиђе највиши дотадашњи водостај или водостај за који је насип диментзионисан. Тада ниво воде буде на делу заштитне висине насипа тј. изнад рачунског нивоа. На дунавским насипима је та заштитна висина 120 цм изнад рачунског нивоа.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Максимални водостаји који изазивају поплаве су све виши. Превазилажење претходног највишег водостаја је све веће. На почетку прошлог века је превазилажење било 9 цм а већ 1965.год. 122цм (измерено 72цм)

Знатно превазилажења досадашњих највиших водостаја је наговештено 2002. и 2013.год. У Бечу и у Братислави је Дунавом протицало по 10.540 м<sup>3</sup>/с. (По неким извештајима и по 11.400 м<sup>3</sup>/с). 2013.год превазиђени су дотадашњи највиши водостаји - у Братислави за 41цм и у Будимпешти за 31цм. Ако би се поновио хидролошки сценарио из 1965.год. у Новом Саду би био водостај 828 уместо 778, а Дунав би био на коти 80.01мнм.

Из ових података о протицајима за Братиславу датим уз слику бр.2. се види да је при истим или сличним протицајима, водостај све виши. А поплаве не настају због великих протицаја већ због високих водостаја.

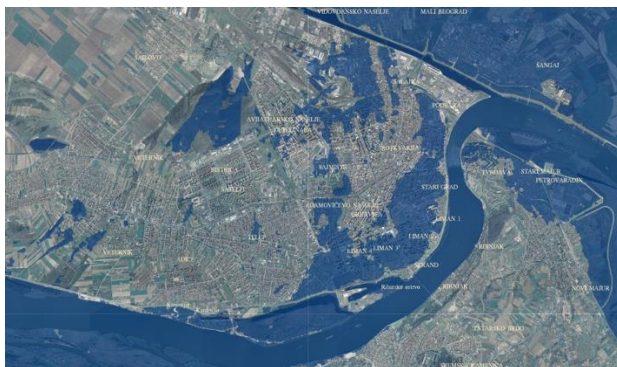


Слика 2. Братислава 2013.год. Проток Дунава је 10.540 м<sup>3</sup>/с; Максимални дотадашњи водостај је превазиђен за 41см.



Слика 3. Будимпешта 2013.год. Максимални дотадашњи водостај је превазиђен за 31см.

Највећа количина воде која је протицала Дунавом поред Новог Сада 1965. год. је била 9.250 м<sup>3</sup>/с при чему је узводно било пет продора насипа. Велике воде које су се узводно већ два пута јавиле, ако су биле по 11.400 м<sup>3</sup>/с, биле су за 23% веће од највећег протицаја поред Новог Сада. А низводно од Братиславе се као леве притоке уливају словачке реке Вах, Хорн, Ипел, и Нитра које долазе из словачких планина и које су пресудно утицале да 1965. год. код нас дође до поплаве. Све то је наговештај да нам долазе велике воде које поред нас не могу протећи без изливања.



Слика 4. Површине Новог Сада испод коте 78.00 мнм,



Слика 5. Ниво 80.00 мнм који одговара нивоу који би био да 1965. год. није било продора насипа узводно. На слици се види да је Нови Сад изграђен у кориту Дунава за велике воде и линија насипа којим се штити град.

У последње две деценије се уочавају све изразитије климатске промене или осцилације климе. Поплаве су све чешће, штете су све веће, а жртава поплава је све више. Поплаве уназађују заједницу. Зато заједница треба да благовремено нађе одговор на промене које су у току. Хидротехничка струка тај одговор има. Решење се приказује у овом раду. Његовом применом се могу избећи многи проблеми. Ако то не препознају они који доносе одлуке и ако се не буде веровало струци, па нам се катастрофална поплава понови, онда ће нам свима бити јасно шта смо требали чинити, а нисмо. Али, тад је касно. Након досадашњих катастрофалних поплава, ваљда нам је свима јасно да катастрофе могу бити и знатно веће. Једна таква катастрофална поплава би нас могла уназадити и урушити стабилност државе да би се деценијама опорављали. Катастрофе се дешавају када одговорни мисле да се неће десити. Кашњење са применом потребних мера и решења, нема оправдања.

Предмет овог рада нису одбране од поплава које се с времена на време проглашавају и спроводе, већ стање екстремних одбрана и настајање поплава које не можемо спречити. Разматра се појава великих вода какве се до сад нису јављале, које су по својим последицама катастрофалне и за које престаје одговорност оних који су сада одговорни за одбрану од поплава.

У нашем постојећем систему одбране, са насипима поред река, исти степен заштите нам имају и градови и околни терен на брањеној територији. Наш постојећи систем и објекти за одбрану од поплава, за промене које су настале и које су у току – неће бити довољан. Велике воде се повећавају, карактер поплава се мења, а наш систем остаје исти. Зато нам многи градови више немају декларисану заштиту од стогодишњих великих вода за коју су насипи грађени. Сада су нам градови заштићени само са стране реке. Постојећи насипи су спољашње одбрамбене линије. Градове је потребно заштити и са страна са којих сада нису заштићени. За то су нам потребне унутрашње одбрамбене линије. Њима се контролише кретање поплавне воде по брањеном терену тј управља поплавом, ако настане. Њима се штити највреднија имовина.

## 2 Меродавни нивои и како долази до поплава

Поплаве у долинама река могу настати на више начина. Најчешће настају преливањем насипа, пробојем тела насипа или пробојем тла испод насипа.

Однос према насипима, који нас чувају од поплава, нам је лош. То се освети. У Холандији су насипи светиња. Лошим односом и лошим одржавањем се омогућује настанак лоших места. Некад се лоша места покажу кад се више ништа не може урадити.

Највећа опасност прети од пробоја тла на коме је насип.

До пробоја дође ако водостај буде виши од претходног или ако дуже траје од претходног. Тад буду превазиђени параметри хидрауличке и статичке стабилности материјала и дође до слома, пробоја и поплаве. А виши водостаји од досадашњих су извесни.

## 3 Како долази до хидрауличког слома тла испод насипа

Ако не буду превазиђени досадашњи највиши водостаји и ако не трају дуже него што су претходни пут трајали, можемо сматрати да смо сигурни. У противном, улази се у зону несигурности.

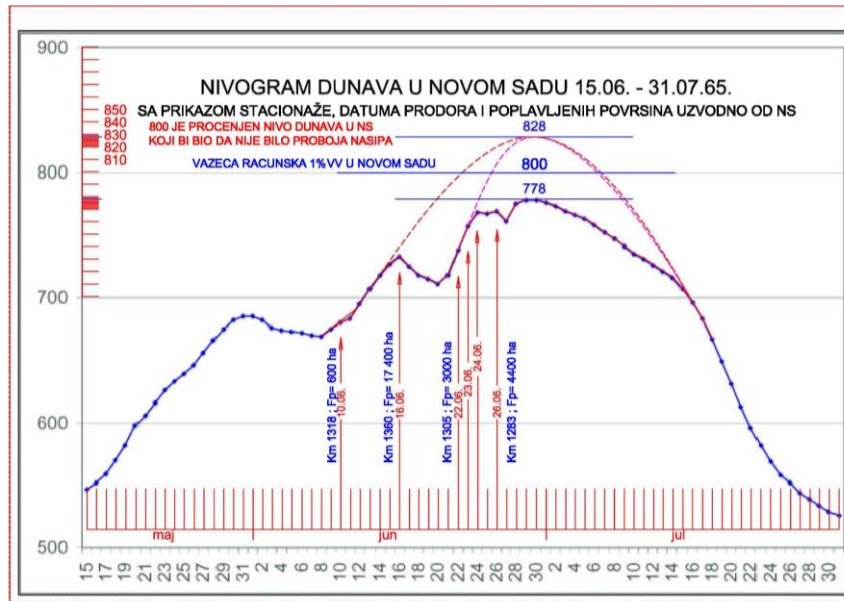
Када водостаји буду превазиђени, може доћи до нарушавања структуре тла и угрожавања хидрауличке стабилности. Суфозија тла је појава испирања ситних честица из тла. Ако се она не уочи и не спречи, доводи до хидрауличког слома тла који се сматра **еластичним** пробојем. Друга опасна појава је **крти лом тла** који настаје са брањене стране насипа кад притисак у водопрпусном слоју превазиђе отпорност површинског слоја тла на смицање. Дође до пролома тла тј површински слој тла се проломи.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Од ова два најчешћа начина настанка продора кроз тло испод насипа, изненадни крти лом тла је опаснији и подмуклији продор.

За време велике воде Дунава 1965. године, у периоду од 10.06 до 26.06. дошло је до више продора насипа узводно од Новог Сада. Резултати те одбране су вишеструки. Главни резултат је да су после поплаве сви насипи реконструисани и надвишени. 2007. год. је поновљен прорачун стогодишње велике воде са водостајем 830 који би био да није било продора и добијена вредност 828. То је озбиљна примедба на вредност меродавне велике воде за Нови Сад.



Слика 6. Нивограм Дунава у Новом Саду за време таласа велике воде 1965.год. са приказом датума продора и ефектима на обраће водостаја у Новом Саду.

Након реконструкције насипа степен заштите је значајно подигнут у односу на ранији. Од тад је дошло до промена у којима је степен заштите опао, а вредност имовине на брањеном подручју се вишеструко увећала. Предстоји нам да поново повећамо степен заштите. Остала богата искуства из одбране 1965. год. су само делимично искоришћена. Локализациони насипи су уклоњени, а трасе су заборављене и напуштене као да никад више неће затребати. Нове и погодније нису одређене и припремљене. То су били кораци управљања поплавом, али нису претворени у систем.

Са данашње позиције, трасе насипа крај великих река су нам спорне. Да су одмакнуте од реке ка брањеном терену 100 м реке би имале и по 500 м<sup>2</sup> већи протицајни профил, а на том проширеном кориту би било акумулисано и по 500.000 м<sup>3</sup>/км'. Овако, са садашњим положајем насипа имамо наслеђен прилично нерешив проблем високих насипа, а недовољног протицајног профила за реку јер смо узели од реке тих 10 ха/км' пољопривредног земљишта и угрозили и то земљиште и знатно вреднију имовину.

Нашим садашњим насипима поред река, често штитимо и неке ниске терене и депресије које из неког разлога, а најчешће због локалне конфигурације терена, нису заобиђене насипом већ су остављене у склопу брањеног терена. Те депресије су при високим водостајима места највећих денивелација водостаја и брањеног терена. По критеријуму денивелације су најосетљивија и најопаснија места за настанак продора.

Зато је и одговор на питање о нашој садашњој сигурности – да смо сигурни и заштићени до водостаја који су се већ јављали. За све више водостаје, улази се у зону смањене сигурности или несигурности. Велике воде које превазиђу досадашње највише водостаје су велика опасност да проузрокују поплаве које не можемо спречити. А управо нам се такве велике воде приближавају јер су се узводно од нас већ јављале и правиле велике штете. Узводни се штите и



повећавају степен своје заштите. Све чине да велике воде пропусте поред себе без изливања. Проблем се премешта низводно. А низводно смо ми.

Пошто све поплаве не можемо спречити, можемо се организovati да будемо спремни да избегнемо катастрофе које оне изазивају и штете сведемо на нама подношљиву меру.

Поред организоване одбране од поплава, морамо бити спремни и организovati се и да управљамо поплавама. За то је потребно формирати систем управљања поплавама и имати опрему. У овом раду се даје одговор и како.

## 4 Евидентирана лоша места на одбрамбеним линијама и одговорност

При порасту водостаја реке, проглашавају се редовна, а потом ванредна одбрана од поплава. Посебна пажња се усмерава на регистрована лоша места при претходним великим водама.

Раније евидентирани извори су велика непознаница. Ако највиши дотадашњи водостај буде превазиђен и ако траје дуже, улази се у стање повећане опасности и неизвесности. Настаје опасно стање описано у претходном одељку.

Након завршетка одбране од поплаве, сабирају се трошкови и губици и заједница се враћа уобичајеним активностима, као да се одбрана од поплаве више никад неће поновити. Одједном пара више нема да се уради плански и систематски санација свих уочених лоших места на свим деоницама на којима је то потребно и на којима су уочени проблеми. Тако се долази до кључног момента одговорности о коме се не говори. Водопривреда је одговорна за одбрану од поплава до нивоа воде за који су нам одбрамбени објекти димензионисани. Пошто није било пара да се потпуно санирају сва проблематична места појаве извора која су регистрована при претходној одбрани, за евентуални продор при следећој великој води на неком од тих места, поново није одговорна водопривреда, јер за то није имала средства. Улази се у зачаран круг немања средстава, не отклањања проблема и не сношења одговорности. Ово је битан елемент при оцени степена сигурности и стања одбране од поплава пре наилаaska следеће велике воде.

## 5 Могућност елиминисања лоших места у одбрамбеним линијама

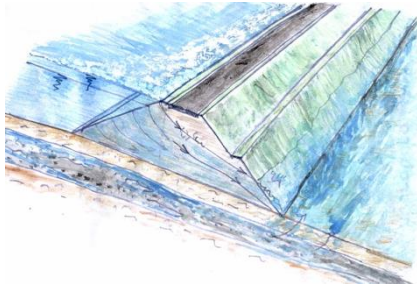
Санација је могућа пресецањем привилегованих токова воде кроз тло на коме је насип или заустављањем проласка воде кроз тело насипа. То се може постићи формирањем водонепропусних баријера. Један од најефикаснијих и најекономичнијих начина је побијањем водонепропусних баријера. Код нас је проверено побијањем до дубине 5 м. Баријере могу бити од различитих материјала у зависности од намене и агресивности средине.



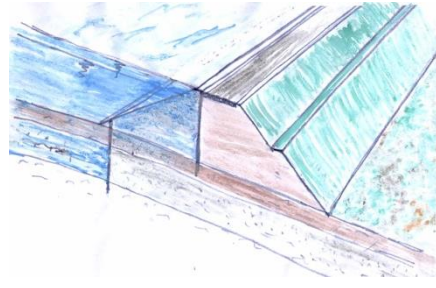
Слика 7. Побијање водонепропусних баријера у тло



Слика 8. Побијање водонепропусних баријера у тло



Слика 9. Хидрауличка шема насипа оптерећеног водом до рачунског нивоа и до круне



Слика 10. Хидрауличка шема санираног насипа са побијеним водонепропусним баријерама кроз тело насипа и водопрпусни слој подлоге

## 6 Шта је управљање поплавама?

То је сложени систем кога треба да чине организације и објекти као и мере и поступци за ограничавање и контролисање плавлeња територије **након настанка поплаве**.

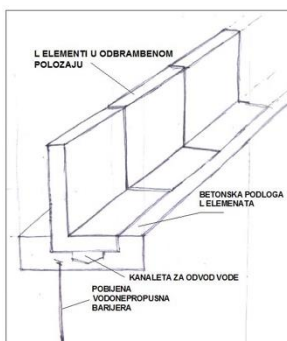
Овим системом треба да се контролишу поплаве које се не могу спречити.

Систем за управљање поплавама би се могао назвати и “Систем за заштиту највредније имовине од плавлeња”.

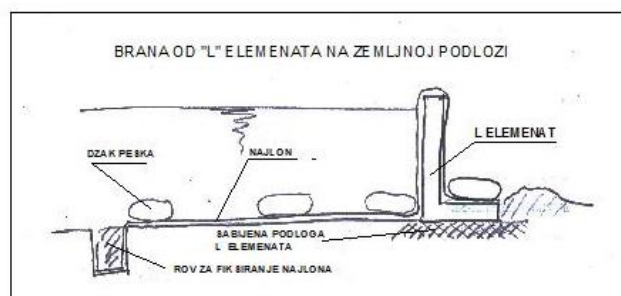
## 7 Каква је мобилна опрема за одбрану од поплава и управљање поплавом?

У овом раду се приказују бетонски „L“ елементи као домаћа опрема, признати домаћи и европски патент универзалне мобилне опреме за одбрану и управљање поплавом. Иначе, најчешће примењивана опрема су цакови с песком и земљом, а постоје и разне друге врсте техничке мобилне опреме.

„L“ елементи су бетонски блокови који су својим обликом и тежином стабилни на превртање при оптерећењу водом. Поуздана су опрема и пружају велику сигурност при примени. Трајни су. Једном направљени трају „сто“ година. Складиште се на месту примене. Димензије се одређују према потреби места примене. Ређају се један до другог са заптивачима на контактима и тако се формира водонепропусна баријера у виду бетонског зида. Постављају се машински на унапред припремљена места, а може и где затреба.



Слика 11. Подлога и „L“ елементи у одбрамбеном положају



Слика 12. Формирање одбрамбене линије са „L“ елементима на неприпремљеном земљаном терену

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Слика 13 Формирање баријере од „L“ елемената



Слика 14. Формирана баријера од „L“ елемената

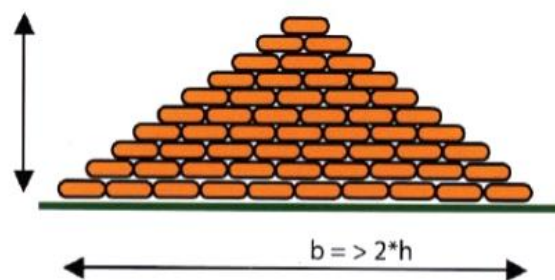
Баријере од цакова с песком су поуздане, ако су стручно израђене. Захтевају пуно радне снаге, пуно места за постављање и знатну стручност. Пошто се постављају „у последњем моменту,“ често не буде унапред дефинисана потребна висина па се дешава да се не формира правилан облик тј правилан попречни пресек такве баријере. Онда је она нестабилна и непоуздана. Нестручно урађене баријере од цакова су често узрок пробоја и плавлeња брањене територије.



Слика 15. Пример неправилно урађене баријере од цакова с песком пошто је претходно постављена специјална мобилна баријера била недовољне висине



Слика 16. Пробој неправилно направљене баријере од цакова с песком и почетак поплаве града



Слика 17. Мобилна баријера од цакова са песком према европским нормама за заштиту од поплава (ЕНЗОП).

## 8 Које су предности „L“ елемената у односу на цакове с песком?

Основна предности "L" елемената су поузданост у одбрани, трајност, скалдиштење на месту примене и цена.

У табели 1 се дају упоредне вредности броја цакова и количине бетона за „L“ елементе, за баријере исте висине. Подаци за цакове с песком су из европских норми за одбрамбене линије са цаковима.

Табела 1. Потребне количине материјала за цакове и број цакова за 100 м' баријере према европским нормама за заштиту од поплава (ЕНЗОП); потребна количина бетона за баријере исте заштитне висине од „L“ елемената са коефицијентима стабилности на превртање  $k_s > 1.5$  и при пуном оптерећењу водом

Цакови			“L” елементи			
Одбрамбена линија		Количина песка (м <sup>3</sup> / 100 м баријере)	Број цакова за 100 м баријере	Висина (м)	Количина бетона (м <sup>3</sup> /м')	Количина бетона (м <sup>3</sup> / 100 м' баријере)
Дужина (м)	Висина (м)					
100	0,5	52,50	3200	0,5	0,11	11
100	1,0	192,50	11800	1,0	0,28	28
100	1,5	420,00	25800	1,5	0,55	55
100	2,0	735,00	45000	2,0	0,90	90



- Пуњење до 2/3 запремине;
- Тежина око 20 кг
- Формула за број цакова:  $Sum = n * (n/2 + 0.5)$
- n – број цакова у првом реду
- Дебљина једног реда је 0,1м
- За 1 метар висине треба 10 редова

Слика 18. Стандардни јутани цак по ЕНЗОП.

## 9 Зашто треба да управљамо поплавама?

Зато што се могу десити поплаве које нашим садашњим одбрамбеним линијама не можемо спречити. Оне поплаве које можемо спречити, самим тим нису поплаве. Поплаве које не можемо спречити, опасне су и по месту настанка, по количини воде која би се излила, по површинама територија које би захватиле, по трајању и по штетама које би нанеле. Од њих нисмо заштићени. Време таквих великих поплава је дошло ! Од њих се не можемо одбранити на стари начин.

## 10 Кад почиње управљање поплавом?

Управљање поплавом почиње када поплава настане или непосредно пре настанка поплаве. До тад је одбрана од поплава.

Активирање система управљања поплавом се врши у току одбране од поплаве када се процени да ће река превазићи највиши дотадашњи водостај или да ће превазићи нивое за које су одбрамбене линије димензионисане.

## 11 Шта је важно за управљање поплавом помоћу „L“ елемената?

Важне су припрема и организација. Припреме се врше кад нема опасности од поплава и обухватају:

- Прављење процена и дефинисање шта је највреднија имовина коју треба заштити на брањеној територији. Најважнији су градови и насеља. Потом термо-електране, трафо-станице, отворени копови, значајни објекти комуналне инфраструктуре, изворишта воде, постројења за пречишћавање, депоније, велике фарме, значајни индустријски погони са еколошки осетљивим производњама идр.
- Избор трасе унутрашњих одбрамбених линија.
- Дефинисање потребне заштитне висине на тим унутрашњим линијама,
- Израда постоља „L“ елемената на изабраним трасама унутрашњих одбрамбених линија и израда „L“ елемената.
- Пробно формирање, размонтирање одбрамбене линије и складиштење „L“ елемената.

## 12 Како се управља поплавом ?

Када се прогласи ванредна одбрана од поплава и процени се да ће бити достигнут претходни највиши водостај који се до тада јавио, приступа се формирању унутрашњих одбрамбених линија. Уклањају се плоче које покривају лежиште L“ елемената и „L“ елементи се постављају у одбрамбени положај. Тиме се формира унутрашња одбрамбена линија.

Системом руководе штабови за одбрану од поплава града или фирме чији се објекти штите.

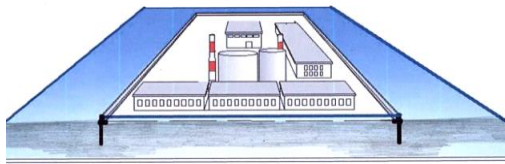
## 13 Како изгледа припремљена линија мобилне одбране или линија за управљање поплавом

Линије мобилне одбране се формирају са мобилном опремом где то затреба. На стабилним линијама одбране служе за надвишење тј обезбеђење недостајуће висине. У функцији унутрашњих одбрамбених линија служе за самостално формирање одбрамбених линија или за надвишење старих насипа, путева и пруга да би постали унутрашње одбрамбене линије. Унутрашње одбрамбене линије могу бити и новоиграђени објекти који ће бити плански надвишавана мобилном опремом.

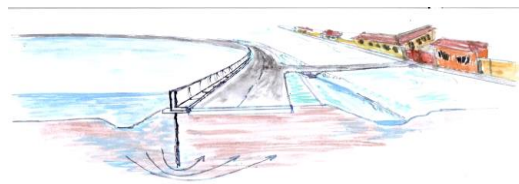
Унутрашњим одбрамбеним линијама се брањена долина реке касетира. Поплава је успешно контролисана ако остане поплављена само касета у којој је основна линија насипа поред реке пробијена. За заштиту важних објеката су потребни и обухватни насипи или баријере.

Најпогоднија и најсигурнија опрема која се и најбрже поставља су „L“ елементи. Уколико се плански примењују, онда су они унапред дефинисане висине. Ређају се у своје, унапред припремљено лежиште и добија се за кратко време сигурна, стабилна и водонепропусна баријера.

Уколико се са „L“ елементима формирају одбрамбене линије на неприпремљеном земљишту, потребно је проценити будућу висину воде која ће бити па на основу расположиве висине „L“ елемената одредити трасу тако да новоформирана линија не буде преливена.



Слика 19. Индустрijско постројење заштићено обухватном мобилном баријером са противфилтрационом побијеном баријером



Слика 20. Пут у насипу недовољне висие, надвишен „L“ елементима и формирана одбрамбена линија са побијеном противфилтрационом баријером

## 14 Колико кошта управљање поплавом?

Док се изгради систем, кошта око 10% од потенцијалних штета. Када се систем изгради, следи одржавање система које је знатно јефтиније.

Систем управљања поплавама представља иновативан приступ великом потенцијалном проблему са патентираном опремом. Он се базира и на правилу да се проблеми који могу настати, избегавају, а не да се дозволи да проблеми настану па да се решавају. Када при одбрани од поплава проблеми настану - често бивају нерешиви.

Систем управљања поплавама је резултат домаће памети и богатог искуства. Објављен је благовремено да се може усвојити и применити. Компензује недостатак времена и пара којих нема довољно.

Ако избегнемо катастрофалне штете од само једне поплаве коју не можемо спречити, можемо формирати десет појединачних система за управљање поплавама на другим местима.

## 15 Ко активира систем управљања поплавом?

Систем активирају штабови за одбрану од поплава.

Сваки штаб за одбрану од поплава у оквиру своје надлежности. У градовима је то градски штаб. У привредним субјектима су то њихови штабови. Свако има право и обавезу да себе заштити на најбољи начин који зна! Ово је посебно важно за локалне заједнице које су доживеле поплаву више пута и у којима се зна одакле им долазе поплаве.

## 16 Ко спроводи управљање поплавом?

Управљање поплавом спроводи уиграни тим у оквиру штаба са увежбаним људством и механизацијом.

Два су златна правила одбране од поплава па и управљања поплавама:

1. Припрема, припрема, припрема...
2. Организација, организација, организација...

## 17 Закључак

- У последње две деценије су се узводно од нас јављале у више наврата велике воде веће од досадашњих и које су у горњем току изазвале велике поплаве.
- Климатске промене или колебања климе су прво изазвале велике поплаве и штете у горњем току Дунава.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Те велике воде ни поред нас не би протекле без озбиљних проблема. Неке би могле изазвати поплаве које нећемо моћи спречити.
- Узводни буду први на реду, а низводни више страдају,
- Кад се узводни заштите, поплаве се премештају низводно. А низводно смо ми.
- На нашем подручју површина слива Дунава се повећа за 272% и у Дунав се уливају највеће европске реке. Зато смо хидротехничко чвориште Европе.
- Након досадашњих катастрофалних поплава 2005. и 2014.год. јасно нам је да катастрофе могу бити и веће него што су биле и одакле долазе.
- Требало би да нам је јасно и да ће поплава доћи са стране са које нисмо заштићени - „иза леђа“.
- Ни после два упозорења, нисмо спремни за такав сценарио поплаве. Градови су нам заштићени само са стране реке.
- Имамо решења и домаћу мобилну опрему. Треба их применити.
- Једна катастрофална поплава већа од поплаве 2014. год. ( каква је срећом избегнута ) могла би нас уназадити и нарушити стабилност државе.
- Катастрофе настају кад одговорни мисле да се неће десити.
- За велике воде, веће од досадашњих, тј веће од оних за које су нам насипи димензионисани, престаје одговорност оних који су одговорни за одбрану од поплава.
- За велике воде које би нам могле нанети велике штете - нико не би био одговоран.
- Највеће штете су нам могуће у највећим градовима, а они су нам поред највећих река које нам долазе са туђих подручја која ми не контролишемо.
- Степен заштите који обезбеђују постојеће одбрамбене линије се смањује од времена када су грађене.
- Постојећи систем за одбрану од поплава више не обезбеђује довољну заштиту највреднију имовину на брањеној територији,
- Вредност имовине на брањеној територији се вишеструко увећала од времена градње одбрамбених линија.
- Однос степена заштите и вредности брањене имовине је вишеструко нарушен.
- Систем за управљање поплавама служи за контролисање поплава које не можемо спречити и за заштиту највредније имовине.
- Нема одбране од поплава без мобилне одбране и мобилне опреме.
- Пошто не можемо спречити поплаве, можемо спречити штете које би поплаве изазвале или их свести на нама подношљиву меру.
- Док река расте, у току је одбрана од поплава. Ако настане поплава, тада је управљање поплавом, ако смо спремни и опремљени.
- После сваке одбране од поплаве треба отклонити све уочене проблеме и санирати сва уочена лоша места.
- Код нас пара нестане чим поплава прође, па се не санирају сва уочена лоша места. Тиме престаје одговорност за хаварије насипа при следећој великој води на тим лошим местима.
- Улази се у зачарани круг немања пара, не вршења санација, не сношења одговорности.

## Литература

1. Патентна пријава „Универзални конструктивни „L“ елементи и поступак примене 2008. и 2009. године“. Раде Милутиновић, дипл. инг.
2. Одбрана од великих вода Дунава у Војводини у 1965. год. Инж. Димитрије Милованов.

## Studija obezbeđenja vodnih resursa na slivu reke Cheliff (Alžir)

Jovana Anđelić<sup>1</sup>, Miloš Ivetić<sup>2</sup>

**APSTRAKT:** Severni Alžir je područje sa semiaridnom klimom, koju odlikuju suva leta i delimično vlažne zime, te je nedostatak vode, prvenstveno za vodosnabdevanje, a zatim i navodnjavanje, industriju itd, najveći problem sa kojim je suočeno stanovništvo ovog područja. Na teritoriji ove zemlje postoji mnoštvo izgrađenih, kao i brana u izgradnji, čije se puštanje u rad predviđa u narednom periodu. Reka Cheliff predstavlja najveći vodotok na prostoru Alžira ukupne dužine preko 730 km. U okviru ovog rada, razmatran je sliv reke Cheliff sa pritokama. Ceo sistem brana, koji čine 21 brana i dva vodozahvata na reci, postavljen je u softverskom okruženju Hec – ResSim, gde su vršene simulacije tečenja i bilansiranje za svaki od 4 razmatrana Scenarija. Cilj rada bio je pronalaženje optimalnog upravljanja branama, pri čemu je kriterijum maksimizacija količine isporučene vode prema korisnicima, uz zadovoljenje kriterijuma za vremensku obezbeđenost, usvojenih u zavisnosti od vrste potrošača vode. Prikazani su rezultati nultog scenarija, koji predstavlja inicijalni rad brana, kao i dodatna tri scenarija u okviru kojih su razmatrani uticaj kontrolisanog ispuštanja iz akumulacija (Scenario 01), procenjenog zasipanja akumulacija na količine raspoložive vode (Scenario 02), kao i poboljšanje iskorišćenosti vodnih potencijala do kog bi se došlo izgradnjom novih objekata u sistemu.

**Cljučne reči:** vodoprivredni sistemi, vodosnabdevanje, optimizacija sistema, modeliranje, brane

## Study of water resource provision in the river basin of Cheliff (Algeria)

**ABSTRACT:** Northern Algeria is a semi-climatic climate region characterized by dry years and partly moist winters, and the lack of water, primarily for water supply, and then also for irrigation, industry etc., is the biggest problem faced by the population of this area. In the territory of this country, there are a lot of built, as well as dams under construction, whose commissioning is foreseen in the coming period. The river Cheliff is the largest watercourse in the Algerian area with a total length of over 730 km. Within this paper, the river basin of the river Cheliff was considered with tributaries. The entire dam system, consisting of 21 dams and two waterbuses on the river, was set up in the software environment Hec - ResSim, where flow simulations and balancing were performed for each of the 4 Scenarios discussed. The aim of the paper was to find optimal dam management, whereby the criterion is to maximize the quantity of water supplied to users, while meeting the criteria for time security, adopted depending on the type of water consumers. The results of the zero scenario, which represents the initial work of dams, as well as the additional three scenarios in which the influence of controlled release from the accumulations (Scenario 01), the estimated accumulation of accumulations on the quantities of available water (Scenario 02), and the improvement of the utilization of water potentials which would be achieved by the construction of new facilities in the system were presented.

**Keywords:** water management systems, water supply, system optimization, modeling, dams

<sup>1</sup> Dipl.građ.inž., Jovana Anđelić, samostalni inženjer, Hidroinženjering, jandjelic@ephydro.com

<sup>2</sup> Dipl.građ.inž., Miloš Ivetić, odgovorni projektant, Hidroinženjering, mivetic@ephydro.com



## 1 Uvod

Nedostatak vode za piće, ali isto tako i za druge potrebe, kao što su industrija i navodnjavanje, predstavlja sve veći problem u svetu. Borba protiv ovog problema iziskuje stalno praćenje i analizu rada sistema kojima se upravlja raspoloživim količinama vode. Severni Alžir je područje na kome postoji preko 110 aktivnih i brana u izgradnji. Kako zahtevi za vodom stalno rastu, u cilju što racionalnije upotrebe dostupne vode, postoji potreba za konstantnim unapređivanjem sistemima koji služe da postojeće vodne resurse sačuvaju, raspodele i isporuče korisnicima, kao i da se teži ka novi izvorima vode. U skladu sa tim, u poslednjih nekoliko godina, pribeglo se izgradnji sistema za desalinizaciju vode, ne bi li se obezbedile dodatne količine vode za piće i navodnjavanje ugroženih područja.

Tema ovog rada jeste analiza rada sistema brana na slivu najveće reke u Severnom Alžiru, reke Cheliff. Na ovom slivu nalazi se 21 brana i dva vodozahvata na reci, iz kojih se voda transferiše u akumulacione prostore određenih brana. Takođe, na području sliva ove reke, tačnije na nizvodnom kraju iste, predviđa se puštanje u rad velikog postrojenja za desalinizaciju vode, koje bi trebalo da rastereti sistem, što svakako otvara nove mogućnosti za preraspodelu suficita vode koje će biti rezultat smanjenja trenutnih zahteva za isporuku iz sistema. Sve ovo ukazuje na to da je nad ovakvim sistemima neophodno konstantno praćenje rada elementa sistema kao prilagođavanje upravljanja elementima sistema, kako bi se odgovorilo na promene i održala funkcionalnost sistema.

Cilj ovog rada bio je simulacijom različitih slučajeva, od kojih je u okviru rada prikazano odabrana četiri scenarija, pokazati mogućnost uticaja različitih faktora na racionalnost iskorišćenja vodnih resursa, odnosno na obezbeđenost korisnika vode sa ovog sliva. Osim modela aktuelnog stanja sistema, koje je usvojeno kao inicijalno stanje odakle se krenulo u sve dalje analize, ispitano je još tri različita scenarija. U okviru prvog, ispitana je osetljivost sistema na pravila upravljanja nad odabranim branama, odnosno mogućnost poboljšanja isporuke vode prema korisnicima uvođenjem određenih pravila po kojima se kontrolišu ispuštanja iz brana.

Nakon toga, ispitan je uticaj zasipanja akumulacija i smanjenja akumulacionog prostora, na količine isporučene vode prema korisnicima.

Na samom kraju, ispitan je doprinos izgradnje novih objekata (transfera), uz puštanje u rad postrojenja za desalinizaciju, na sliku obezbeđenosti korisnika vode sa ovog sistema.

Uticaj svake od razmatranih stavki na rad sistema, analiziran je iz ugla obezbeđenosti korisnika, prema unapred utvrđenom kriterijumu. Korisnici su odeljeni u dve grupacije, odnosno, na korisnike vode za piće (stanovništvo i industrija) i korisnike vode za navodnjavanje (kako velikih državnih, tako i manjih privatnih perimetara).

## 2 Metodologija

### 2.1 Korišćeni softver

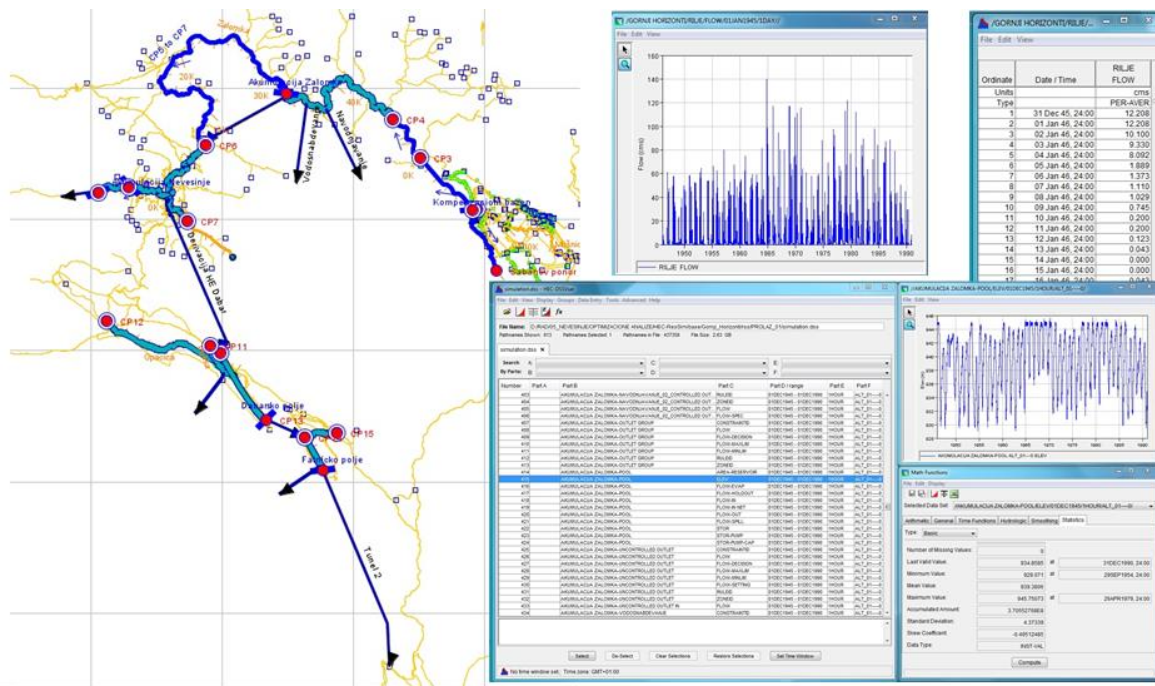
HEC-ResSim (Reservoir System Simulation) je softverski paket namenjen za simulaciju rada vodoprivrednih sistema proizvoljne složenosti. Ovaj softverski paket je razvijen u okviru Hydrologic Engineering Center, inženjerskog korpusa američke vojske (US Army Corps of Engineers) gde su kreirani i drugi paketi koji su našli svoju široku primenu u različitim sferama projektovanja hidrotehničkih i vodoprivrednih objekata i sistema.

Osnovni objekat sistema na kome se u cilju određivanja performansi sistema sprovodi bilansni proračun jeste rezervoar, odnosno akumulacija. Svaki rezervoar koji je modeliran ima svoju poziciju na prethodno definisanoj rečnoj mreži. Da bi se omogućila simulacija rada proizvoljnog vodoprivrednog sistema, unutar softvera se mogu modelirati i najrazličitiji hidrotehnički objekti kao što su brane koje formiraju akumulaciju sa svojim pribranskim objektima, hidroelektrane, pumpne stanice, derivacije, transportni kanali, rečne diverzije, zahvati za korisnike itd.

Glavne odlike rada u HEC ResSim paketu jesu:

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 1: Izgled kompleksnog vodoprivrednog sistema modeliranog u paketu HEC ResSim

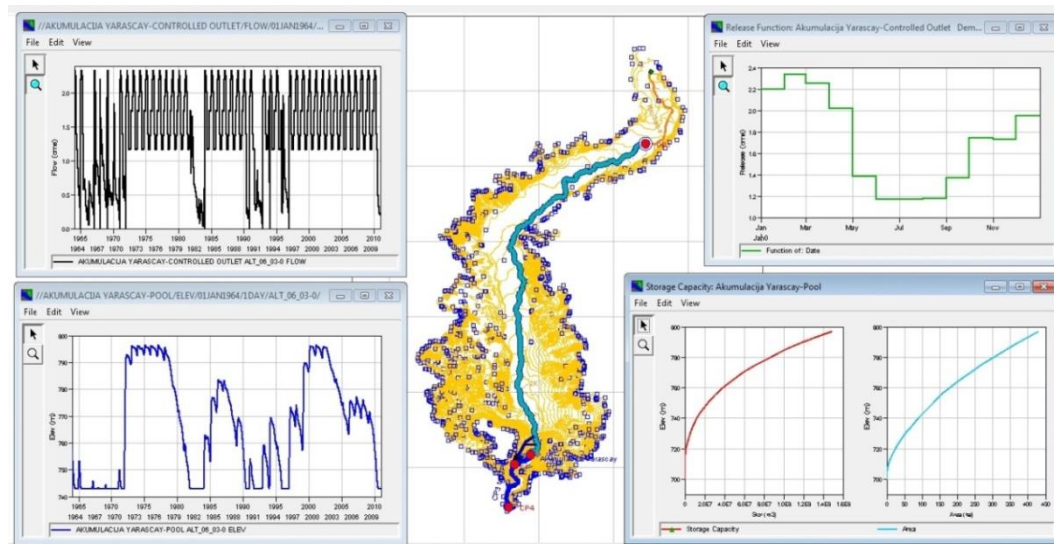
Figure 1: The appearance of a complex water management system modeled in the HEC ResSim package

- Softverski paket se može slobodno preuzeti sa zvaničnog USACE sajta i koristiti u komercijalne svrhe. Indirektno posmatrano, uz poznavanje zadatih upravljačkih mehanizama rezultati programa su proverljivi;
- Može se kreirati proizvoljan broj vodoprivrednih sistema na proizvoljnom broju hidroloških slivova pri čemu sistemi mogu ali i ne moraju biti međusobno povezani (primer je dat na Slika 1);
- Velika mogućnost modeliranja najrazličitijih objekata koji se sreću u hidrotehničkoj praksi (jednonamenske i višenamenske akumulacije, brane, pribranski objekti, kanali, tuneli, crpne stanice, prekidne komore, hidroelektrane i dr.)
- Postupak unosa, manipulacije i modifikacije podataka je relativno jednostavan (topografski planovi – mape, hidrološki nizovi, karakteristike akumulacija, brana, pumpnih postrojenja, derivacija i dr.), kao i pregled unetih podataka, kao što je prikazano primerom na Slika 2, a postoji i mogućnost jednostavnog uvoženja geometrijskih i numeričkih podataka iz prostornih baza podataka – ArcGIS;
- Dijapazon mogućnosti zadavanja upravljačkih mehanizama je veoma širok, može se reći neograničen. Na raspolaganju su: predefinisani načini ispuštanja, IF-ELSEIF-ELSE blokovi i script file-ovi u okviru kojih je moguće kreirati proizvoljna pravila ispuštanja ili manipulisanja sa objektima sistema. Izgled prozora u kome se definišu pravila upravljanja prikazan je na Slika 3.
- Kreirani vodoprivredni sistem lako se može nadograđivati ili redukovati ako je potrebno.
- Moguće je izvršiti više različitih simulacija jednog sistema formiranjem setova upravljanja;
- Trajanje simulacije zavisi od složenosti modela i zadatog računskog koraka koji je promenljiv (5 min minimalno);
- Svi izlazni parametri modela svrstani su po objektima u jedinstvenu HEC-DSSVue bazu tako da su njihov pregled, kontrola i uporedna analiza olakšani;
- Programski paket daje mogućnost uvida u osnovne statističke parametre izlaznih nizova

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

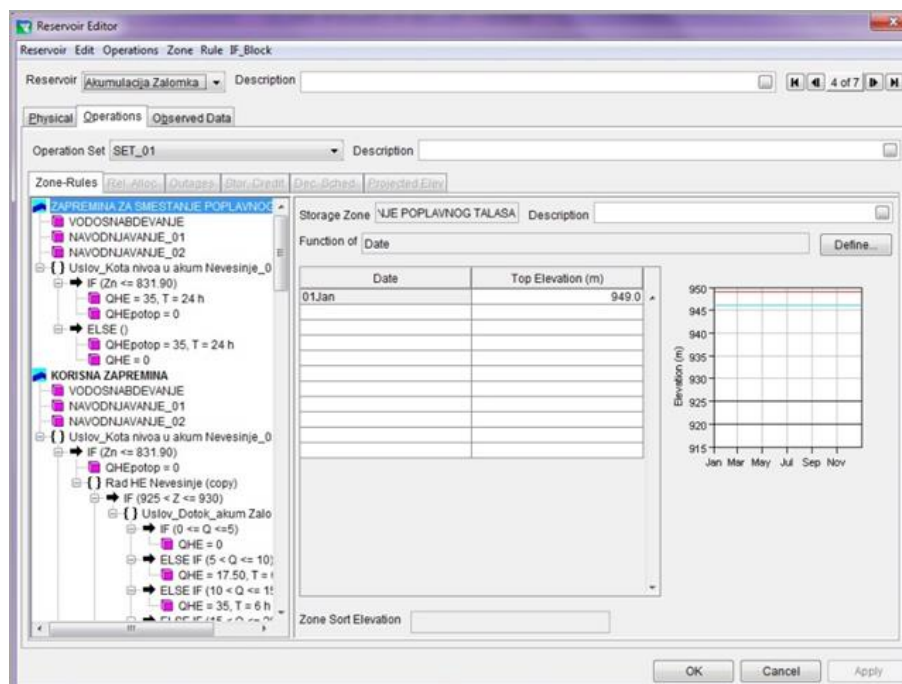
- Izlazne parametre HEC-ResSim modela moguće je izvesti u druge softvere koji se danas često koriste za obradu rezultata i kreiranje baze podataka (ArcGIS, Microsoft Access, Microsoft Exel i dr.).

Rad unutar softvera, odnosno proces implementacije ulaznih parametara, upravljačkih paketa, realizacija proračuna i pregled rezultata su kocipirani u tri modula:



Slika 2: Mogućnosti grafičkog pregleda unetih podataka

Figure 2: Graphical overview of data entered



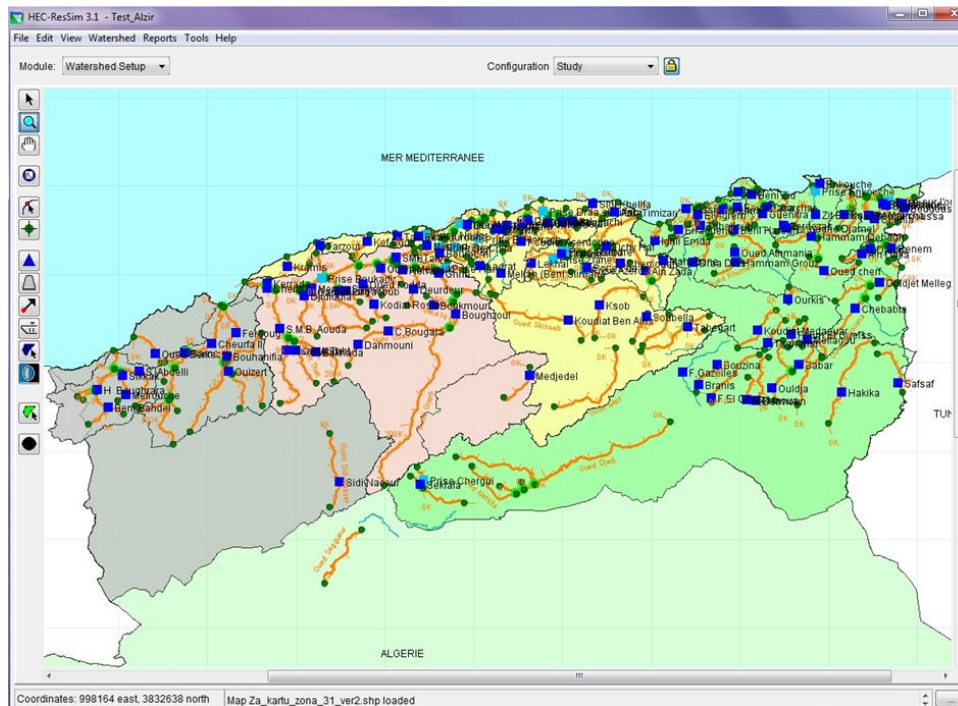
Slika 3: Pregled upravljačkog modela proizvoljne akumulacije

Figure 3: Overview of the control model of arbitrary accumulation

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

1. *Watershed Setup modul* – Rad u ovom modulu podrazumeva kreiranje mreže vodotoka sa čvorištima na spojevima rečnih deonica i računskim čvorovima koji se mogu proizvoljno zadavati zavisno od potreba ubacivanja ulaznih parametara i očitavanja rezultata (Slika 4). U ovom modulu se nalaze i alatke koje omogućuju definisanje položaja akumulacija (Reservoir Tool), transfera i objekata kao što su derivacije (Diversion Tool). Celokupna mrežna struktura, pozadinska mapa, kao i granice slivnih područja sa naznačenim lokalitetima i nazivima hidrotehničkih objekata (brane, vodozahvati, transferi) mogu se uvesti kao shp file iz interaktivnog programskog paketa ArcGIS. Skup vodotokova (stream alignment), čvorova (node), računskih tačaka (computation point), akumulacija (reservoir) i transfera (diversion) čine jednu konfiguraciju koja se kreira u okviru ovog modula.

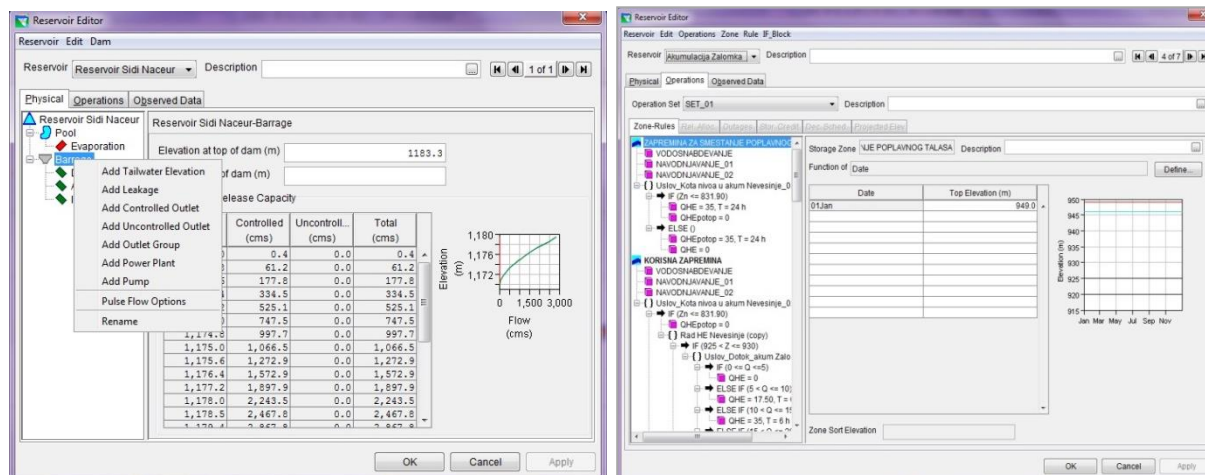


Slika 4: Izgled formirane konfiguracije unutar Watershed Setup modul

Figure 4: Appearance of formed configuration within the Watershed Setup module

2. *Network Setup modul* – Rad u ovom modulu podrazumeva definisanje ulaznih parametara modela i upravljačkih komandi. U ovom modulu se kreiraju baze vremenskih serija dotoka i međudotoka upotrebom HEC-DSSVue, nominuju računске tačke kojima će biti dodeljene vremenske serije dotoka, definišu fizički parametri hidrotehničkih objekata (brane, pribanski objekti, hidroelektrane, derivacije i dr.) i definišu upravljački setovi čiji će rad biti analiziran simulacijama (izgled prozora dat je na Slika 5). Od fizičkih parametara jednog rezervoara moguće je zadati krive zapremine i površine, vrednosti neto evaporacije (kao srednje mesečne ili niz) i različite zavisnosti gubitaka vode na procurivanje. Svako akumulaciji se dodeljuje pripadajuća brana kojoj se dalje mogu dodeliti donja voda, gubici na procurivanje kroz telo brane, kontrolisani (temeljni ispusi i zahvati za korisnike) i nekontrolisani (prelivi) ispusti sa svojim performansama (krive proticaja, zakonitosti otvaranja ispusta i priraštaja kapaciteta i sl.), hidroelektrane i pumpna postrojenja. Na pripadajućoj HE definišu se karakteristike kao što su broj agregata u mašinskoj zgradi, instalisani protok jednog agregata, maksimalna snaga elektrane, koeficijent korisnog dejstva i hidraulički gubici na dovodu vode do mašinske zgrade u funkciji protoka. Za pumpno postrojenje definiše se broj pumpi, minimalni nivo u donjem rezervoaru, maksimalna visina pumpanja, zavisnost kapaciteta pumpe od visine pumpanja. Karakteristike objekata interkonekcije se takođe mogu zadati u zavisnosti od različitih promenljivih parametara unutar modela. Upravljački setovi se formiraju definisanjem pravila rada

pojedinih objekata i hijerarhije između ovih pravila. Sva pravila se pripisuju određenim zonama unutar akumulacionog prostora kojih može biti proizvoljno mnogo, a minimalno tri zone koje predstavljaju mrtav (nema pravila upravljanja), koristan i prostor za smeštaj poplavnog talasa. Pravila rada pojedinih objekata mogu biti u funkciji datuma i/ili bilo koje vremenski promenljive unutar modela (nivo, datum, vreme, predefinisani zahtevi korisnika, ispustanja na drugim objektima i sl.)



Slika 5: Izgled prozora za definisanje ulaznih parametara brane i pribrinskih objekata (levo) i prozora za definisanje upravljačkih komandi (desno)

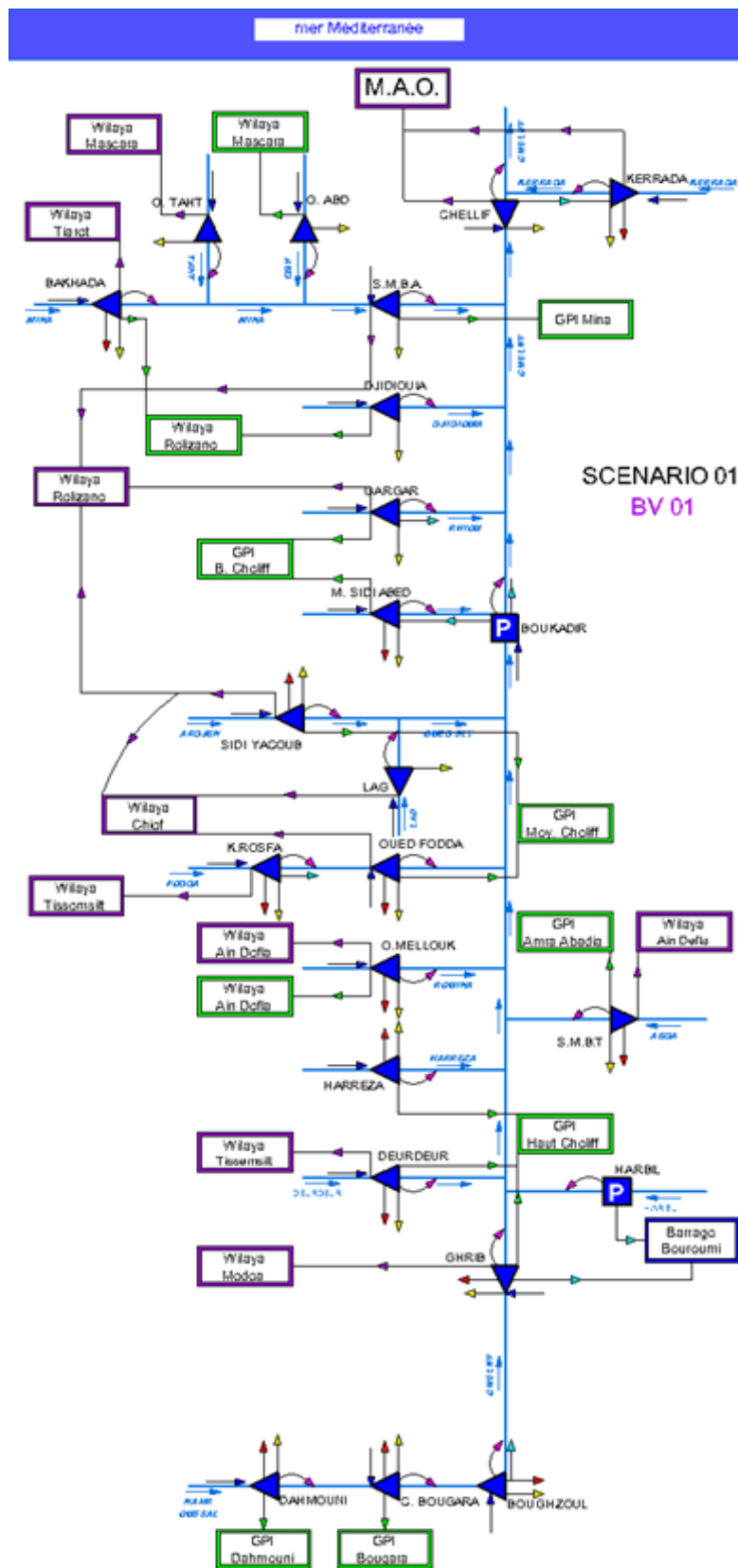
Figure 5: Window appearance for defining the input parameters of the dam and adjacent objects (left) and windows for defining control commands (right)

Završetak rada na zadavanju skupova upravljačkih komandi po zonama za svaku od akumulacija pretstavlja ujedno i početak definisanja alternativa. To je proces objedinjavanja ključnih ulaznih parametara za buduću simulaciju sistema. Među ovim parametrima su jedinstven naziv, pripadajuća mreža rezervoara, računski korak i numerički model proračuna, pripadajući set upravljačkih komandi svake akumulacije, početni uslov u vidu stanja i ispuštanja i dodeljivanje vremenskih serija podataka nominovanim tačkama unutar sistema

3. *Simulation modul* – Postupak simulacije u programskom paketu ResSim zasniva se praktično na izboru odgovarajuće alternative i definisanju vremena početka i kraja simulacije. Vreme trajanja proračuna zavisi od izabranog računskog koraka i kompleksnosti upravljačkih komandi rezervoara i njihovih međusobnih veza. Izlazni parametri simulacije svrstani su u HEC-DSSVue bazu u okviru koje se čuvaju nizovi vrenskih serija najrazličitijih podataka za svaku od akumulacija (mahom stanja i proticaji). Svi ovi podaci imaju mogućnosti tabelarne i grafičke interpretacije unutar programa, kao i statističkih analiza vremenskih serija (maksimalni i minimalni ostvareni nivoi, srednji proticaj, kumulativno proizvedena energija i sl.). Takođe izvoz ovih nizova u srodne programske pakete ArcGIS, Microsoft Exel, Microsoft Access veoma je jednostavan gde se svaki od nizova može dalje tretirati i pripremati za dalje analize ili konačno prezentovanje.

## 2.2 Logički model sistema u nultom scenariju

U okviru ovog scenarija simuliran je rad brana koje su u eksploataciji i brana čije se puštanje u rad predviđa u kratkoročnom periodu (do 2020-e godine). Ulazni parametri za ovaj scenario, predstavljaju aktuelno stanje elemenata razmatranog sistema. Ovo obuhvata krive zapremine i površine akumulacija, kapacitete ispusta i vodotransfera, radne nivoe akumulacija, kao i potrebe korisnika koji se snabdevaju vodom za piće, navodnjavanje i industriju iz akumulacija koje čine ovaj sistem. Logički model sistema dat je šematski na Slika 6 i on predstavlja polazni model sistema, prema kome su razvijene sve varijante za Scenarije 01, 02 i 03.



Slika 6: Logički model sistema Cheliff u nultom scenariju  
 Figure 6: Logical model of the Cheliff system in the zero scenario

## 2.3 Logički model sistema za Scenario 01

Polazne smernice za posatvljanje ovog Scenarija, proizilaze iz rezultata Nultog scenarija. Izmene koje se unose Scenario 01, u odnosu na Nulti scenario, odnose se na pravila upravljanja isporukama vode, u cilju poboljšanja količinske i vremenske obezbeđenosti prioritetnog korisnika, a to je AEP. Kod brana kod kojih nije zadovoljena obezbeđenost prioritetnog korisnika, a koje se koriste za AEP i IRR, cilj je, ukoliko je to moguće, redukcijom količine isporuke vode za IRR postići bolju obezbeđenost korisnika AEP. Ovo se postiže postavljanjem graničnog uslova za isporuku vode prema korisnicima IRR, u vidu kote pri kojoj se obustavlja isporuka vode za navodnjavanje. Ova kota mora biti takva da se ne remeti obezbeđenost korisnika AEP, a da se pri tome isporuči maksimalna moguća količina vode rema korisniku IRR.

Osim količinske obezbeđenosti, koja se postiže postavljanjem vodosnabdevanja kao prioritetnog koprisknika nad navodnjavanjem, potrebno je postići i što bolju vremensku obezbeđenost. Ovome se teži postavljanjem granične kote, ispod koje se vrši redukcija mesečne isporuke za AEP na min 50% usvojenih mesečnih potreba, čime se u deficitnom periodu raspoloživa količina vode raspoređuje na duži vremenski period. Redukcija količine isporučene vode dozvoljena je u maksimalno 5% meseci za ceo period simulacije, a da pri tome isporuka ni u jednom mesecu ne bude manja od usvojenih minimalnih 50% potreba.

## 2.4 Logički model sistema za Scenario 02

Zadatak Scenarija 02 jeste da pokaže uticaj zasipanja akumulacija na obezbeđenost korisnika. Razmatran je period zasipanja od 10 godina, pri čemu je zasipanje svake akumulacije računato na osnovu stope zasipanja usvojene za svaku branu pojedinačno. Za brane koje su u eksploataciji duži niz godina, prilikom određivanja stope zasipanja korišćeni su podaci dobijeni analizom krivih zapremine i ovršine akumulacija, dobijenih batimetrijskim merenjima koja su sprovedena na ovim akumulacijama sa određenim vremenskim rastojanjem, za ceo period eksploatacije. Kod brana koje su u izgradnji i u okviru ovog rada posmatrane su kao brane koje ulaze u rad u godini Nultog scenarija, za procenu zasipanja korišćeni su projektom usvojeni koeficijenti zasipanja akumulacija.

U Tabela 1 su date vrednosti aktuelne i procenjene zapremine akumulacionog prostora nakon deset narednih godina eksploatacije, za svaku branu iz sistema. Potrebe korisnika ostale su nepromenjene u odnosu na prethodne scenarije.

## 2.5 Logički model sistema za Scenario 03

Scenario 03 predstavlja analizu uticaja uvođenja u rad novih objekata, na iskorišćenje vodnih potencijala i poboljšanje isporuke prema korisnicima. Ključna promena u Scenariju 03, u odnosu na prethodne scenarije, predstavlja uvođenje u rad postrojenja za desalinizaciju MACTA. Ovo postrojenje obezbeđuje značajan deo projektovanih potreba korisnika sistema MAO. Resursi vode sa sistema Cheliff-Kerrada na ovaj način mogu biti preusmereni na druge korisnike u regionu.

Shodno tome, u okviru Scenarija 03, razmatra se mogućnost iskorišćenja suficita vode na sistemu Cheliff-Kerrada do koga se dolazi smanjenjem isporuke vode trenutnim korisnicima ovog sistema, sa 155 hm<sup>3</sup>/god na 49.64 hm<sup>3</sup>/god, usled uvođenja u rad sistema za desalinizaciju, čije se puštanje u rad očekuje u nekoliko narednih godina.

Zahvaljujući ovome, stiće se mogućnost zadovoljenja potreba novih korisnika, odnosno vodosnabdevanje novih vilaja i navodnjavanje novih perimetara.

Kako bi se omogućio dodatni akumulacioni prostor, ali i postiglo što racionalnije iskorišćenje ove vode, predviđa se povezivanje brana Kerrada i Gargar dvosmernim transferom, Kapacitet ovog transfera je 5 m<sup>3</sup>/s.

Zahtevi za dodatne isporuke vode sa sistema MAO, usvojeni su na osnovu planiranog razvoja perimetara na ovom području za naredni period i iznose 70 hm<sup>3</sup>/god (15 000 ha površine za navodnjavanje) iz akumulacije Kerrada, kao i dodatnih 35 hm<sup>3</sup>/god za navodnjavanje iz akumulacije Gargar.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Tabela 1: Zapremine akumulacija u inicijalnom stanju i nakon narednih 10 godina eksploatacije

Table 1: Accumulation volume in the initial state and after the next 10 years of exploitation

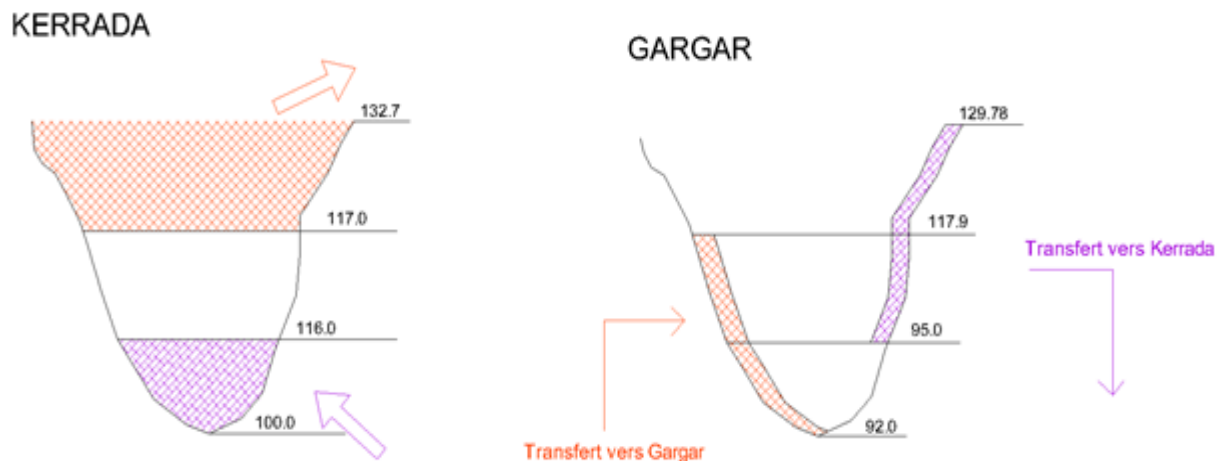
BRANA	ZAPREMINA [hm <sup>3</sup> ]	
	2020	2030
Dahmouni	38.29	37.46
Colonel Bougara	9.82	8.82
Boughzoul	13.45	8.90
Ghrib	64.28	32.16
Deurdeur	98.10	93.42
Herraza	72.63	69.95
SMBT	67.03	61.72
Ouled Mellouk	81.89	55.36
Kodiat Rosfa	61.86	57.90
Oued Fodda	90.67	83.00
Lag	67.12	64.00
Sidi Yacoub	223.55	205.24
M S abed	42.99	39.88
Gargar	266.56	209.24
Djidiouia	90.90	76.90
Bakhada	34.20	30.38
Oued That	5.14	4.09
Oued Abd	3.43	0.56
SMBA	71.49	54.86
Prise Cheliff	45.80	43.37
Kerrada	69.45	69.40

Dodatno pitanje na koje treba dati odgovor prilikom analize rezultata ovog scenarija, biće postoji li mogućnost za dodatnim povećanjem isporuke vode za piće iz akumulacije Gargar i, ukoliko postoji, koja je maksimalna količina vode koja bi dodatno bila isporučena ovom korisniku, sa zadovoljavajućom vremenskom i količinskom obezbeđenošću, bez da se time ugrozi obezbeđenost bilo kog od postojećih korisnika sistema.

Logički model dela sistema Cheliff, u okviru ovog Scenarija, čine brane Gargar, Kerrada i Cheliff. Pravila upravljanja za predmetne tri akumulacije prilagođena su novim zahtevima za isporuku, kako bi se dobila što racionalnija potrošnja raspoložive vode. Princip funkcionisanja novog transfera, prikazan je šematski na Slika 7 i algoritamski u nastavku:

Ako je  $Z(\text{Kerrada}) < 116.0$ , onda  
 Ako je  $Z(\text{Gargar}) > 95.0$ ,  
     Transfert vers Kerrada = 5 cms  
 U suprotnom, Transfert = 0  
 Ako je  $Z(\text{Kerrada}) > 117.0$ , onda  
     Ako je  $Z(\text{Gargar}) < 117.9$ ,  
         Transfert vers Gargar = 5 cms,  
     U suprotnom, Transfert = 0  
 Ako je  $Z(\text{Gargar}) < 94.0$ , onda je  
     AEP = 50% AEPdem





Slika 7: Shema transferta Kerrada-Gargar – Scenario 03

Figure 7: Scheme of transfer Kerrada-Gargar

Pravila upravljanja usvojena u Scenariju 03 ostaju ista za sve brane osim za brane na koje direktno utiče puštanje u rad postrojenja za desalinizaciju, te su prema tome, prilikom pravljenja modela koji čine ove tri brane, izuzeti delovi sistema uzvodno od brane Gargar, kao i brane Djidiouia i SMBA, sa uzvodnim pritokama. Uticaj ovih delova sliva implementiran je u vidu dotoka u sistem, dobijenih kao rezultat simulacije Scenarija 02.

## 2.6 Kriterijum obezbeđenosti korisnika

Obezbeđenost korisnika predstavlja glavni faktor u ocenjivanju rešenja predloženog modela sistema. Pojam obezbeđenost odrazumeva odnos količina zahtevane i isporučene vode prema korisniku, prema unapred zadatom kriterijumu. Prilikom raženja optimalnog rešenja problema upravljanja vodom, cilj je maksimizirati isporuku prema svim korisnicima, uz postavljanje prioriteta korisnika vode za piće nad korisnicima vode za vodosnabdevanje.

Kriterijumi obezbeđenosti su različiti zavisno od vrste korisnika i dele se na kriterijume obezbeđenosti korisnika u gradskim zonama (među kojima su stanovništvo i industrije) i korisnike navodnjavanja.

Za prihvatljivu obezbeđenost korisnika AEP i AEI usvojena su dva kriterijuma:

- Vremenska obezbeđenost tokom razmatranog perioda na mesečnom nivou mora biti veća ili jednaka od 95%. Ovo znači da se tokom perioda simulacije rada sistema mogu javiti redukcije garantovane isporuke u najviše 5% meseci od ukupnog broja meseci razmatranog perioda.
- Količinska obezbeđenost u mesecima u kojima dolazi do redukcija mora biti veća ili jednaka 50%. Ovo znači da se isporuka korisniku AEP (ili AEI) ni u jednom mesecu ne sme redukovati više od 50% zagantovanih isporuka.
- Kada su u pitanju korisnici navodnjavanja, za definisanje garantovanih količina vode usvojena su sledeća dva kriterijuma:
- Vremenska obezbeđenost tokom razmatranog perioda na godišnjem nivou mora biti veća ili jednaka od 80%. Ovo znači da se tokom perioda simulacije rada sistema mogu javiti redukcije garantovane isporuke u najviše 20% godina od ukupnog broja godina razmatranog perioda.
- Količinska obezbeđenost tokom perioda simulacije je u skladu sa FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) kriterijumom po kome kumulativni deficit ne sme da bude veći od 150% godišnjih garantovanih isporuka vode tokom 25-godišnjeg hidrološkog perioda. Ovo znači da se tokom celokupnog hidrološkog perioda mora isporučiti količina vode koja je veća ili jednaka 94% garantovanih količina.

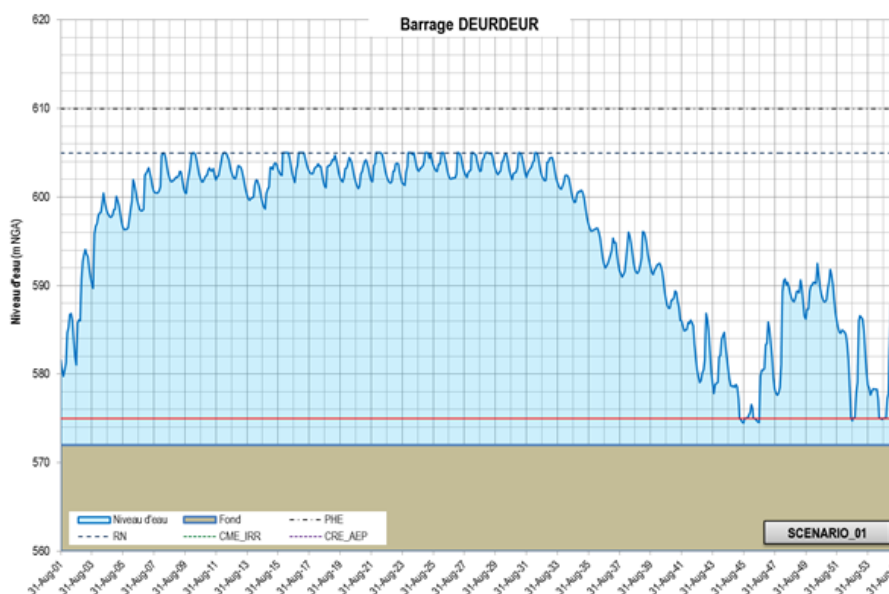


### 3.1 Nulti scenario

Implementacijom ulaznih parametara i logičkog modela u simulacioni model, dobijeni su rezultati prikazani na Slika 8. Iz prikazanih rezultata, jasno je uočljivo koje brane iz sistema isporučuju vodu uz zadovoljenje potrebne obezbeđenosti korisnika, kako za AEP tako i za IRR. Ove količine isporuke uokvirene su zelenom bojom.

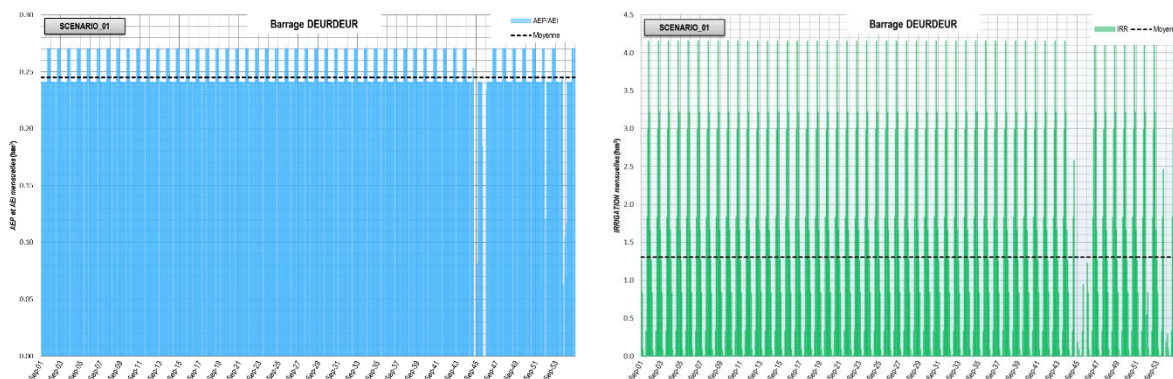
Brane Dahmouni, Ghrib, Ouled Mellouk, Merdja Sidi Abed, Gargar, Bakhada i Oued Abd, u potpunosti zadovoljavaju usvojene potrebe korisnika prema kojima isporučuju vodu. Kod svih ostalih brana, dolazi do kraćih ili dužih kritičnih perioda u kojima se javlja značajan deficit vode, koji ugrožava višegodišnju obezbeđenost korisnika. Ovo je najbolje uočljivo na Slika 9, gde je dat primer nivograma u akumulaciji tokom simulacionog perioda, koji se odnosi na branu Deurdeur dok se na Slika 10 vidi isporuka vode prema korisnicima.

Na osnovu dijagrama nivoa, naslućuje se da bi se, pravilnim upravljanjem rada brana moglo postići racionalnije iskorišćenje vodnih resursa u deficitnim periodima i izbeći prekid isporuke prema korisnicima za AEP, što će biti zadatak Scenarija 01.



Slika 9: Nivogram akumulacije Deurdeur tokom simulacionog perioda – Nulti scenario

Figure 9: Deurdeur accumulation level during the simulation period - Zero scenario



Slika 10: Dijagram isporuke vode za vodosnabdevanje (levo) i navodnjavanje (desno)

Figure 10: Water supply diagram for drinking water (left) and irrigation (right)

## 3.2 Scenario 01

U sistemu Cheliff-Zahrez, prema opštim pravilima Scenarija 01, razmatrane su brane Deurdeur, SMBT, Oued Fodda, Sidi Yacoub, Oued Taht i SMBA. Detaljnom analizom rada svake od brana ponaosob, kao i sistema brana koje su u sprezi, dobijena su optimalna pravila upravljanja za sve brane kod kojih je samo upravljanjem bilo moguće poboljšati učinak

Prema već opisanom postupku, postavljene su granične kote nivoa vode u akumulaciji, koje predstavljaju donju granicu isporuke vode za potrebe navodnjavanja, odnosno granicu prelaska na redukovanu isporuku vode za vodosnabdevanje stanovništva. Ove kote dobijene su iterativnim postupkom, u cilju optimizacije isporuke vode. Algoritam upravljanja ispuštanjima korišćen u modelu, prikazan je na primeru upravljanja radom brane SMBT.

Ako je  $Z(\text{SMBT}) > \min \text{RN}$ , onda  
Ako je  $Z(\text{SMBT}) > 296.4$ , onda je  
IRR = IRRdem  
U suprotnom, IRR = 0,  
Ako je  $Z(\text{SMBT}) > 292.7$ , onda je  
AEP = AEPdem  
U suprotnom, AEP = 50% AEPdem  
U suprotnom,  
IRR = 0  
AEP = 0.

Količina vode koja se isporučuje iz akumulacije Oued Fodda uslovljena je, osim prirodnim dotokom i prelivanjima uzvodne brane Kodiat Rosfa, takođe i količinom transferisane vode iz Kodiat Rosfe. Ove dve brane, posmatraju se kao sistem i, u okviru Scenarija 01, cilj je bio postaviti pravila upravljanja tako da se po potrebi redukuju isporuke za irigaciju i smanji količina transferisane vode, a da se zadovolje korisnici AEP za obe brane. Sa ovim ciljem, postavlja se granična kota za isporuku vode za IRR iz akumulacije Oued Fodda, čime je prioritet za isporuku iz ove akumulacije dat ispuštanjima vode prema brani Kodiat Rosfa, a u cilju povećanja isporuke vode prema korisnicima vode za piće sa ove akumulacije.

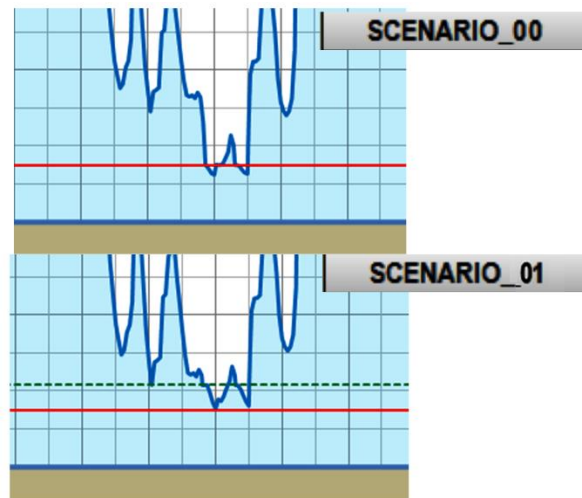
Takodje, kontrolisanim ispuštanjima iz uzvodnih brana, u ovom slučaju ispuštanjima iz brane Gargar, koja u potpunosti zadovoljava isporuku sopstvenih korisnika, teži se poboljšanju obezbeđenosti vode za korisnike MAO sistema, pri čemu su primarni korisnici prilikom isporuke vode, lični korisnici za svaku branu.

Kontrolisanim ispuštanjem vode iz Gargara, kroz temeljni ispust, a dalje nizvodno koritom reke, cilj je poboljšati obezbeđenost isporuke vode za AEP sistema MAO. Iz akumulacije Gargar ispušta se količina vode potrebna za vodosnabdevanje sistema MAO, u zavisnosti od nivoa vode u akumulacijama Kerrada i Chelif.

Sve granične kote, dobijene su iterativnim postupkom, pri čemu su usvojene optimalne vrednosti, sa tačnošću od 10 cm.

Simulacijom ovako postavljenog modela sistema, u slučaju svih brana, izuzev brane Lag, postignuto je zadovoljenje obezbeđenosti isporuke vode prema prioritetnim korisnicima, odnosno vode za vodosnabdevanje, samo primenom definisanih pravila upravljanja ispuštanjima iz brana. Ovo ukazuje na to da je, za zadovoljenje potreba prema korisnicima ove brane, neophodno uključiti dodatne vodne resurse.

Detalj nivograma, na kome se vidi uticaj postavljanja graničnih uslova za redukciju isporuke vode za AEP, dat je na primeru brane Deurdeur na Slika 11. Ovde je jasno da postavljanje graničnih uslova dovodi do izbegavanja situacije u kojoj nivo u akumulaciji pada ispod radnog nivoa akumulacije, tako da korisnici vode za vodosnabdevanje nisu ugroženi ni u deficitnim mesecima sušne godine.



Slika 11: Primer popravljene slike nivograma akumulacije, primenom postavljanja pravila upravljanja

Figure 11: An example of a corrected image of the level of accumulation, applying the rules of management

Kod određenih brana, postavljanje graničnih nivoa za isporuku vode za IRR ugrozilo je višegodišnju obezbeđenost korisnika IRR ali je postignuto zadovoljenje isporuka prema korisnicima AEP, što je prioritet ovog Scenarija.

U slučaju brane Lag, na osnovu analize srednjih višegodišnjih vrednosti, izveden je zaključak da je srednji dotok u branu Lag, sa pripadajućeg sliva, značajno manji od zahtevanih količina za isporuku iz ove akumulacije. Ovakvi slučajevi nesumnjiv su indikator da je za zadovoljenje potreba korisnika na ovim područjima neophodno razmotriti uvođenje u sistem novih izvora vode.

### 3.3 Scenario 02

Upravljanja isporukama vode u ovom Scenariju zasnivaju se na usvojenim pravilima upravljanja u okviru Scenarija 01, uz minimalne korekcije graničnih uslova, neophodne zbog nenarušavanja obezbeđenosti isporuke, a izazvane promenom krivih zapremina akumulacija.

Detaljnijom analizom rezultata ovog Scenarija, mogu se primetiti uticaji zasipanja akumulacija, za period od 10 godina, kroz višegodišnje prosečne vrednosti isporučene vode. Međutim, prilagođavanjem kota graničnih uslova upravljanja novonastalim uslovima zapremine, postignuta je potpuna obezbeđenost korisnika kao u Scenariju 01, kako vremenska tako i količinska.

### 3.4 Scenario 03

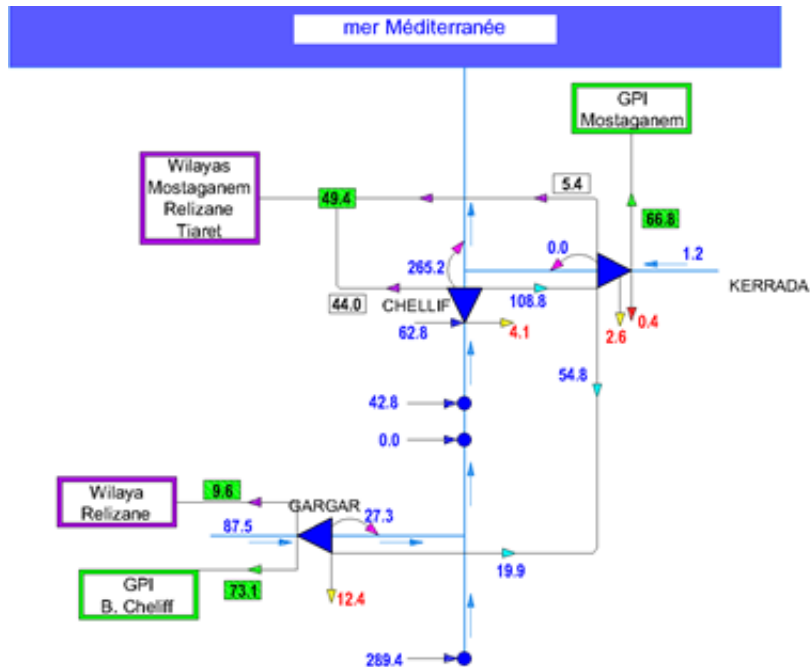
Scenario 03, predstavljao je najkompleksniji Scenario analiziran u okviru rada, jer je pri njegovom postavljanju bilo neophodno uzeti u obzir rezultate svih prethodnih scenarija i uklopiti nove zahteve dobijene uvođenjem novih objekata u sistem sa već postojećim.

Povezivanjem brana Kerrada i Gargar, omogućeno je povećanje isporuke prema korisnicima vode za navodnjavanje koji se snabdevaju iz akumulacije Gargar, kao i zadovoljenje potreba za IRR perimetara koji se snabdevaju vodom iz akumulacije Kerrada. Ukupna količina transferisane vode iz akumulacije Cheliff iznosi 108.8 hm<sup>3</sup>/god, od čega se u akumulaciju Gargar transferiše 54.8 hm<sup>3</sup>/god. Prema brani Kerrada, iz akumulacije Gargar, transferiše se prosečno 19.9 hm<sup>3</sup>/god. Na Slika 12 dat je šematski prikaz sistema kao i prosečne godišnje vrednosti na višegodišnjem nivou.

Naknadno je ispitana mogućnost povećanja isporuke vode prema korisniku AEP brane Gargar i pokazano je kako je, uz uslov nenarušavanja prethodno postignutih obezbeđenosti isporuke prema prioritarnim korisnicima, iz brane Gargar moguće isporučiti dodatnih 15.0 hm<sup>3</sup>/an, uz zadovoljenje vremenske i količinske obezbeđenosti korisnika AEP. Evidentno je da ovo iziskuje nešto veće količine

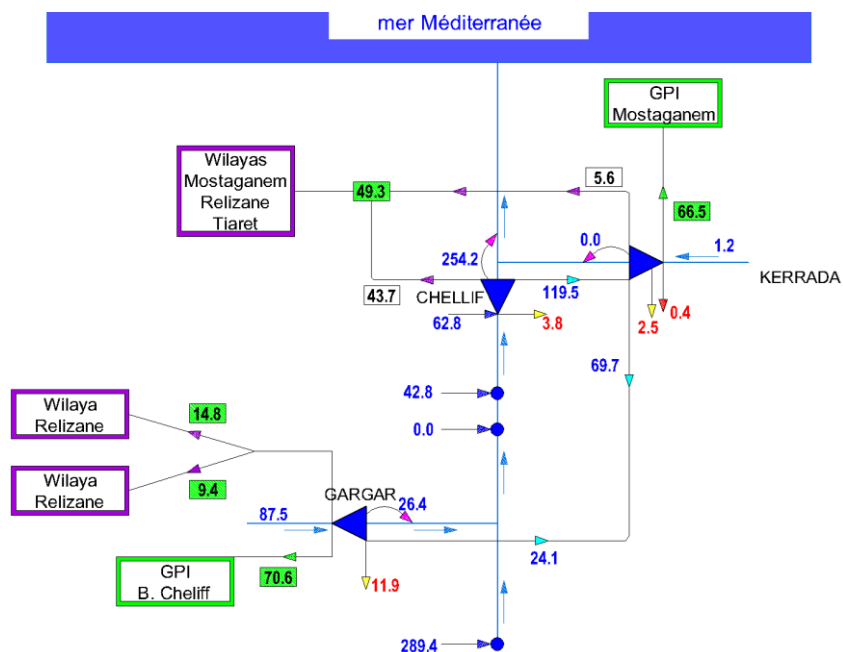
# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

vode koja se transferiše iz sistema Cheliff-Kerrada prema brani Gargar, ali i to da su preliivanja smanjena, što ukazuje na bolje iskorišćenje vode u sistemu, što je i bio polazni cilj. Rezultati Scenarija sa povećanim zahtevima za isporukom vode iz Brane Gargar, dati su na Slika 13.



Slika 12: Rezultati simulacije Scenarija 03

Figure 12: Results of simulation Scenario 03



Slika 13: Rezultati simulacije Scenarija 03 sa povećanim potrebama brane Gargar

Figure 13: Results of simulation Scenario 03 with the increased needs of the Gargar

## 4 Zaključak

Kontinualno praćenje i analiza rada sistema, ključan je faktor u borbi protiv problema nedostatka vode na ugroženim područjima. Imajući u vidu stalne promene uslova u kojima sistem radi, kao i stanja i funkcionalnosti elemenata sistema, modeliranje sistema, u mnogome može olakšati i ubrzati proces donošenja odluka u slučajevima kada je neophodno male količine vode preraspodeliti tako da se ne ugroze prioritetni korisnici.

Upoređivanje različitih varijanti, koje je na ovaj način moguće simulirati, omogućava optimizaciju u iskorišćavanju raspoloživih vodnih resursa, ali pruža i bolji uvid u potencijale sistema, gde se, pod potencijalom sistema, prvenstveno misli na povoljne lokacije za izgradnju novih objekata i unapređenje ili nadogradnju postojećih.

Severni Alžir je područje koje je problemu deficita vode pristupilo veoma ozbiljno, te se sve više pažnje posvećuje monitoringu postojećih sistema, ali i modeliranju budućih eventualnih elemenata sistema u cilju što racionalnijeg i bržeg napretka prema rešavanju ovog problema.

## Literatura

1. Đorđević B. (1990) Vodoprivredni sistemi.
2. Opricović S. (1995) Optimizacija sistema – zadaci iz vodoprivrede i hidrotehnike
3. US Army Corps of Engineers (2013) HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual
4. Energoprojekt-Hidroinžinjering (2018) Etude de Sécurisation de la ressource en eau

## The Nile Water, Food and Energy Nexus Model

Hamdy Elsayed<sup>1</sup>, Slobodan Djordjević<sup>2</sup>, Dragan Savić<sup>3</sup>

**ABSTRACT:** The Water, Food and Energy (WFE) Nexus is a useful concept to address the interlinkages among these resources on which we depend to achieve socio-economic and environmental goals in a sustainable way. WFE are interconnected in different ways and an action in one sector would not only affect that but could have significant impacts on the other sectors. The Nile basin is a transboundary river which is currently challenged by rapid population and economic growth that sparked development plans aimed at meeting growing demands for WFE. Currently, water, food and energy are still managed separately and there is a little attention given to the interactions between the WFE and socio-economic drivers and the potential for a transboundary cooperation on WFE matters in the Nile basin. A System Dynamics Modelling (SDM) approach is proposed for this study as it: (a) provides a unique framework to address the interlinkages among subsystems in a complex dynamic system, and (b) has the ability to capture the dynamic feedback between system components. A water balance for the entire Nile basin is integrated with the food, energy, population and economic sectors in Egypt. The underlying structure of each submodel was presented. The calibration and the model simulations results were presented, and the model showed a satisfactory performance.

**Keywords:** Nile River, System Dynamics Modelling, Water, Food and Energy Nexus

## „Neksus“ vode, energije i hrane u slivu reke Nil

**APSTRAKT:** Voda, energija i hrana su resursi od kojih zavisi u kojoj meri su društveno-ekonomski ciljevi i zaštita okoline u skladu sa principima održivog razvoja. „Neksus“ – *engl. water, food and energy (WFE) nexus* – je koncept koji proučava složene veze između ovih resursa. One se ogledaju u tome što mere preduzete u jednom od ova tri sektora imaju direktan uticaj na druga dva. U ovom radu se razmatra reka Nil koja prolazi kroz jedanaest zemalja, i u čijem slivu je u poslednjih nekoliko decenija došlo do znatnog porasta stanovništva i do ubrzanih ekonomskih aktivnosti. Zbog toga je neophodno da se planovi razvoja usklade sa rastućim potrebama. Međutim, upravljanje vodama i proizvodnja, distribucija i potrošnja energije i hrane u ovom slivu u praksi se razmatraju zasebno i nedovoljna pažnja se posvećuje međunarodnoj saradnji i proučavanju interakcija između ovih resursa i sa njima povezanim društveno-ekonomskim procesima. Modeliranje dinamike sistema – *engl. System Dynamics Modelling* – je pristup koji omogućava razmatranje veza između podistema u okviru jednog složenog dinamičkog sistema, uz obuhvatanje povratnih sprega između različitih komponenti. Vodni bilans celog sliva reke Nil je u ovom radu integrisan sa informacijama o hrani, energiji, stanovništvu i ekonomskim sektorima u Egiptu i opisana je struktura svih elemenata sistema. Prikazani su rezultati kalibracije i simulacije, koji su zadovoljavajući.

**Ključne reči:** reka Nil, modeliranje dinamike sistema, neksus vode, energije i hrane

<sup>1</sup> Hamdy Elsayed, PhD student, University of Exeter, United Kingdom, [ha351@exeter.ac.uk](mailto:ha351@exeter.ac.uk); Teaching Assistant, Menoufia University, Egypt, [hamdy.abdelwahed@sh-eng.menofia.edu.eg](mailto:hamdy.abdelwahed@sh-eng.menofia.edu.eg)

<sup>2</sup> Slobodan Djordjević, Professor of Hydraulic Engineering, University of Exeter, United Kingdom, [s.djordjevic@exeter.ac.uk](mailto:s.djordjevic@exeter.ac.uk)

<sup>3</sup> Dragan Savić, Professor of Hydroinformatics, University of Exeter, United Kingdom, [d.savic@exeter.ac.uk](mailto:d.savic@exeter.ac.uk); CEO, KWR Water Cycle Research Institute, The Netherlands, [dragan.savic@kwrwater.nl](mailto:dragan.savic@kwrwater.nl)



## 1 Introduction

The Water, Food, Energy (WFE) Nexus approach considered a useful concept to address the interrelated human activities and the natural resources e.g. river basins. The interlinkages among water, food and energy seem clear in many ways. From food production perspective, the water and energy are inputs, from an energy perspective, water and biomass (e.g. biofuels) are resources requirements. It is clear that the nexus resources are interdependent in many ways and the action in one sector would not only affect that sector but can have significant impacts on the other sectors. The WFE Nexus is challenging in transboundary rivers. Due rapid population and economic growth in riparian countries, each riparian country continues to utilize its own natural resources to meet the growing demand for water, food, and energy. This might lead to tensions among countries that share the same resource. That makes a nexus approach is an appropriate approach for addressing the water management over a transboundary river as it can reveal the potential for a win-win situation and ease the conflict by mobilizing other resource potentials to meet the growing resource needs [1]. The Nile basin is a transboundary river, spreads across 11 countries (Tanzania, Uganda, Rwanda, Burundi, Congo (Kinshasa), Kenya, Ethiopia, Eritria, South Sudan, Sudan and Egypt), Figure 1. The river is one of the most complex rivers in the world because of its transboundary nature, i.e., its size, a variety of climates and topographies, and the high system evaporation losses [2]. The basin is confronted by a rapid population increase and economic growth in turn, a number of developments (e.g. Hydropower, irrigation projects, etc.) have been planned by the riparian countries to meet their growing demands for water, food and energy [3]. The nexus approach is relevant for Transboundary Rivers as it provides a policy framework for riparian countries to coordinate their plans, manage their measures in water, food and energy and reveal the tradeoffs and synergies from their actions [4].

The dual interactions between sectors e.g. (water, and food), or (water and energy) were examined in various studies for example (Zhuang, Yilin [5]), Kotir et al. [6], and Susnik et al., [7]). Extensive studies have been conducted to investigate the water resources management in the Nile basin e.g (Georgakakos [8]; Abdelhaleem and Helal [9]; Wheeler et al. [10]; Guariso and Whittington [11]; McCartney, et al. [12]; and Blackmore and Whittington [13]). The previous studies provided various frameworks to evaluate the tradeoff and synergies from new developments across the basin under different management scenarios, some of them could include the socio-economic drivers to the water system and provide an integrated framework to evaluate their impacts on the water system. However, these studies explicitly focusing on water and the WFE interdependency were not addressed in most of these studies, and most some of them are deterministic models. There are few studies considered the WFE nexus in the Nile basin recently. Tan et al. [14], studied the water, food and energy in the Blue Nile basin in the context of different operating policies for the Grand Renaissance Dam. They linked an optimization module to a System Dynamics model to investigate the different operating policies of GERD. However, the food production were not considered in their research. Al-Riffai et al. [15], employed a framework for the WFE nexus and its impacts on the economies of the Eastern Nile countries (Egypt, Ethiopia, and Sudan). Basheer et al. [15] studied the cooperation and



Figure 1. The Nile basin.

Slika 1. Sliv reke Nil.

is  
to

the economic gains in the Blue Nile basin in the context of water, food and energy. Elgafy et al. [16] developed a system dynamics model for the water, food, and energy model (SD-WFEN) and applied it for Egypt and focused on the crop production and consumption. However, the causal feedbacks, the interactions among the WFE, and the socio-economic dynamics were not considered in most of these studies. To address the interactions among the WFE there is a need to address them equally and recognize their interdependency in an integrated analysis, [17, 18]. The current paper investigates the WFE interactions and socio-economic dynamics in the Nile basin and the policy implications and different management scenarios on the WEF in the Nile basin. For this purpose, a water balance model for the entire Nile basin was linked to the food, energy with the socio-economic sectors in Egypt.

## 2 Modelling framework

The interactions among socioeconomic and the WFE interlinkages are shown in Figure 2. A water balance model for the entire Nile basin is linked to the food production system and the energy sector in Egypt. The socio-economic drivers were added to the WFE Nexus to complete the framework and allow investigating the policy implications and the different management scenarios from a broader nexus perspective. System Dynamics Modelling (SDM) was chosen for this study because of its ability to; (a) combine the socio-economic dynamics, and WFE Nexus without any additional software packages, (b) capture the interdependency and the feedback processes among the WFE and the socio-economic sectors, (c) evaluate different policy and management options in the different sectors.

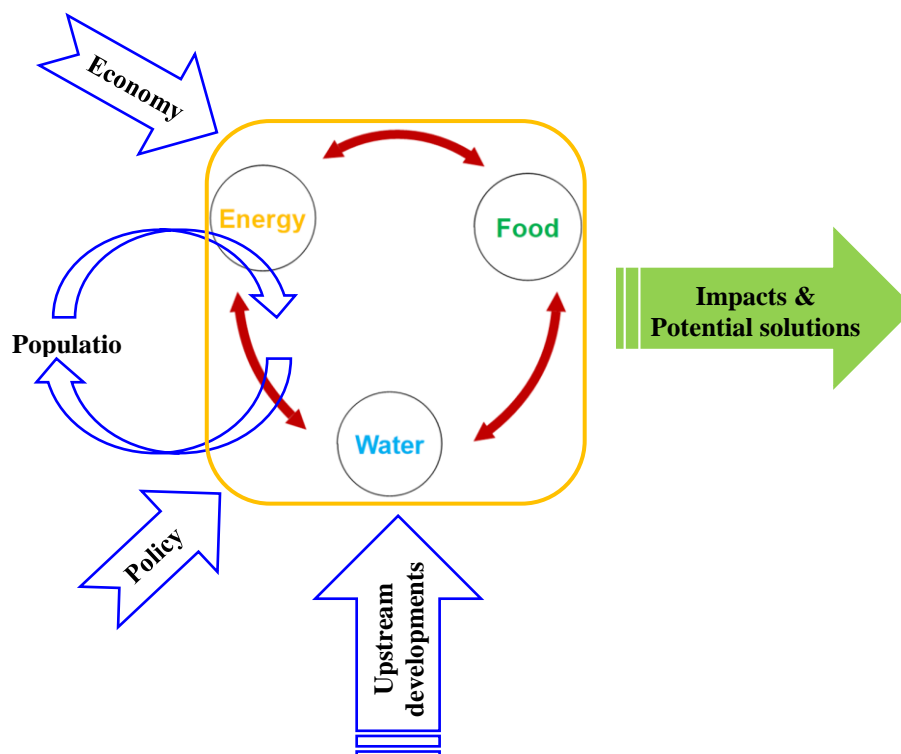


Figure 2. Water, Food, Energy Nexus modelling framework.

Slika 2. Modeliranje u okviru „nexusa“ vode, hrane i energije.

SDM is based on nonlinear dynamics theory and feedback control and has been widely applied to business and strategy [19] and environmental studies globally and regionally [20, 21]. It is a system-level modelling approach and can be applied to any dynamic system at various temporal and spatial scales [19]. These advantages favour the conventional modelling approaches and make SDM appropriate for modelling the interdependency among water, food and energy and the socio-economic dynamics. SDM starts with qualitative conceptual modelling, where the causal relationships and the feedback structure among key system variables are captured in the form of Causal Loop Diagrams (CLDs). Then, CLDs are quantified through Stock and Flow Diagrams (SFDs), where the system is represented by a network of connected stocks and flows. The CLDs composed of variables connected by arrows headed with a positive or negative sign, which reflects the causal relationship among the system variables (i.e. positive sign means positive relationship while a negative sign means negative relationship). The combination of positive and negative causal relationships might form two types of feedback loops [22]: (a) reinforcing feedback loop, and (b) balancing feedback loop. A reinforcing feedback loop is characterized by the continuation of increase or decline in the system state, while a balancing loop tries to reduce the difference between the current state and the desired state of the system. System Dynamics (SD) components are: (a) Stocks, which represent anything that accumulates (e.g., reservoir), (b) Flows, which are activities that fill or deplete stocks (e.g., inflow and outflow), (c) Connectors, which link model elements and transfer information among model elements,



Figure 3. Causal loop diagram of the Water, Food and Energy interactions with the socio-economic drivers. A positive sign represents a positive causal relationship, and a negative sign represents a negative causal relationship. A link with a two-line bar in the middle represents a time delay.

Slika 3. Dijagram uzročno-posledičnih veza u interakcijama između vode, hrane i energije i društveno-ekonomskih uticaja. Znak „+“ predstavlja pozitivnu vezu i znak „-“ je negativna veza. Veza sa znakom „=“ označava uticaj sa zakašnjenjem.

and (d) Converters, which include arithmetic operations that can be performed on flows and logical functions that operate the system (e.g., operating rules for a reservoir). The CLDs are shown in Figure 3.

### 3 Model structure

The CLDs are quantified by SFDs for the Water, Food, Energy, Population and Economic sectors. The integrated model was implemented with Simile software [23]. Simile has an SD heart like other SDM software packages. It has a graphical user-friendly interface allowing to draw the model elements, their relationships easily and allows for breaking the system into sub-models, a feature was exploited in the current research. The underlying structure of the integrated model submodels are described below.

#### 3.1 Water balance submodel

A water balance model for the entire Nile basin was developed to simulate the key hydrological features and different activities that affect the surface water availability (e.g., water withdrawals) and management of water infrastructures (e.g., dams and diversions). A description of the water balance is described here [24]. The water sub model showed a satisfactory performance and was able to simulate the dynamic behaviour of the Nile river flows.

#### 3.2 Food submodel

The food sub-model represents the food production and consumption at the national level, Egypt. It is composed of three sub-models; (a) agriculture water demand sub model, (b) food production sub-model, and (c) food demand sub model. The interaction between the food production system and the water sector is captured through the agricultural sector in the model. The agricultural sector is represented by the agricultural land and the cropping patterns and used to estimate the agricultural water demands at the national level. The monthly crop water requirements ( $ET_c$ ) were calculated based on the FAO guidelines stated in the Irrigation and Drainage Paper No. 56, [25] as follows;

$$ET_c = K_c * E_o \quad (1)$$

where:

$ET_c$ : crop evapotranspiration (mm/month),

$K_c$ : crop factor

$E_o$ : reference evapotranspiration (mm/month)

The food production considered here is the output from the cropland (domestic food production), fish and livestock can be omitted since it represents a small portion of the food consumption [20]. The domestic food production is estimated by multiplying the cropland by the crop yield, equation (2). In case of water shortage occurred, the reduction in crop yield due to water shortage can be calculated from equation (3), based on FAO guidelines for crop yield response to water shortage [26].

$$\text{Crop production} = A * Y_a \quad (2)$$

$$Y_a = Y_m * (1 - K_y * (1 - (ET_a / ET_c))) \quad (3)$$

where:

A: crop area (in feddan=1.038 Acres),

$Y_a$ : actual crop yield (ton/feddan)

$Y_m$ : maximum possible yield (ton/feddan),

$ET_a$ : actual svapotranspiration

$ET_c$ : maximum evapotranspiration, and

$K_y$ : yield response factor

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

The food demand sub-model represents the food demand from the population, and other food uses (e.g. animal feed and seeds). The average food consumption per capita depends on per capita Gross Domestic Product (GDP). Therefore, the Total Food Demand (TFD) can be estimated from the total population and average per capita food demand, equation (4). The food available for humans can be considered as a fraction of the total domestic food production i.e. after omitting the food waste, seeds, food exports and animal feed. If the local food available is not enough for meeting the food demands from populations the required food to be imported is called and can be estimated based on the food deficit, equation (5).

$$\text{TFD} = \text{Per capita Food Demand} \times \text{Total Population} \quad (4)$$

$$\text{Food Imports} = \begin{cases} (\text{TFD} - \text{Human Food Available}) & \text{If } (\text{TFD} - \text{Human Food Available}) > 0 \\ 0 & \text{If } (\text{TFD} - \text{Human Food Available}) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

### 3.3 The energy submodel

The energy submodel represents the energy sector in Egypt at the national level. It can be simply divided into two main parts; (a) energy supply and (b) energy demand. The energy supply represents the different energy supplies e.g. Natural gas, Crude oil, Hydropower, and Coal in the form of tone of oil equivalent (toe). While the energy demand represents the different sectoral energy demands e.g. Residential, Industrial, and Agricultural sectors in the form of (toe) as well. The model is under development and has not finished yet, the results from that sub-model or the underlying structure will not be presented here.

### 3.4 The population submodel

The population submodel represents the population dynamics for Egypt. The sub model is divided into fourteen age-specific groups; each age group represents a five-year span, except the elderly age group (65 and above). The population increased by the new births and they enter through the first age group (0-4), while the other age groups increased through ageing of the younger age groups (i.e maturation) equation (6). The delay in maturation from each age-specific group to the next age group is assumed as a first-order delay, by assuming the delay will be equal to the average number of years each person will stay in that group i.e. 5 years. On the other hand, the population is decreased by deaths and the ageing from younger age group to the next elder age group, equation (7).

$$\text{Maturation}_{\text{agegroup}} = \text{Population}_{\text{agegroup}} \times (1 - \text{Mortality rate}_{\text{agegroup}}) / 5 \quad (6)$$

$$\text{Deaths}_{\text{agegroup}} = \text{Population}_{\text{agegroup}} \times \text{Mortality rate}_{\text{agegroup}} \quad (7)$$

### 3.5 The economic submodel

The sub model models the GDP for Egypt at an aggregated level. It uses a simple first order accumulation on GDP through a reinforced loop (growth rate in GDP). The per capita GDP is then estimated by dividing the total GDP by the total population.

$$\text{GDP}_{t+1} = \text{GDP}_t \times (1 + r_{\text{gdp}}) \quad (8)$$

where:

$\text{GDP}_{t+1}$ : GDP at time (t+1)

$\text{GDP}_t$ : GDP at time (t)

$r_{\text{gdp}}$ : Annual GDP growth rate

$$\text{GDP per capita} = \text{GDP} / \text{Total population} \quad (9)$$

#### 4 Data sources

The available basin-wide hydrologic inputs, current and historical irrigation abstractions and diversions for the period (1950-2014), reservoir operating rules were available from MIKE HYDRO BASIN model that is linked to the Nile Basin Decision Support System (NB-DSS) [27]. Different water uses (e.g. Agricultural, domestic, industrial, open water evaporation, etc.), and water resources (e.g. groundwater, agricultural drainage reuse, rainfall data) in Egypt were obtained from Annual Bulletin of Irrigation and Water Resources Statistics, Central Agency for Public Mobilization and Statistics (CAPMAS) [28] and the available data from literature [29-34]. Data for agricultural land, crops yield, and cropping patterns were available from Annual Bulletin of Statistical Crop Area and Plant Production, CAPMAS, Egypt [35] and FAOSTAT Database, FAO [36]. Food domestic production, food exports, food imports and different food uses (e.g. human consumption, seeds, loses, etc.) were available from Food Balance Sheets, FAOSTAT, FAO [36]. Different energy sources and consumptions were available from Energy balance from the International Energy Agency (IEA), [37]. Demographic data were obtained from the Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations (UN) [38]. Economic data (e.g. GDP, GDP growth rates) were obtained from the World Bank Open Data, The World Bank [39].

#### 5 Model calibration and simulation results

The above-described submodels are interconnected and communicate with each other via links. The model defines a set of differential equations that have to be solved by numerical integration methods available in Simile. The model runs at a monthly time step from (1980-2014), based on the available data for all sectors. The software allows for visualization of the simulation results using tables and graphs. The model simulation results were graphically compared to the historical data records as shown in Figures (4-7). It is shown that the model simulation results follows the historical data trend, and there is a clear agreement between the simulated and observed data. The water balance submodel was calibrated at the key hydrological sites across the basin and the model showed a satisfactory performance based on guidelines provided by Moriasi et al [40].

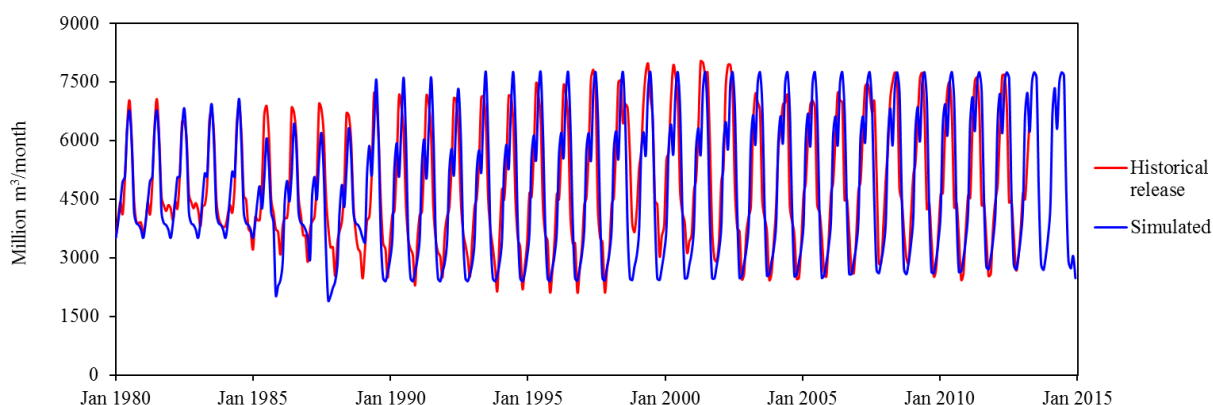


Figure 4. Model simulation results vs historical downstream release from High Aswan Dam.

Slika 4. Poređenje rezultata simulacije i izmerenih proticaja nizvodno of Nove asuanske brane.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

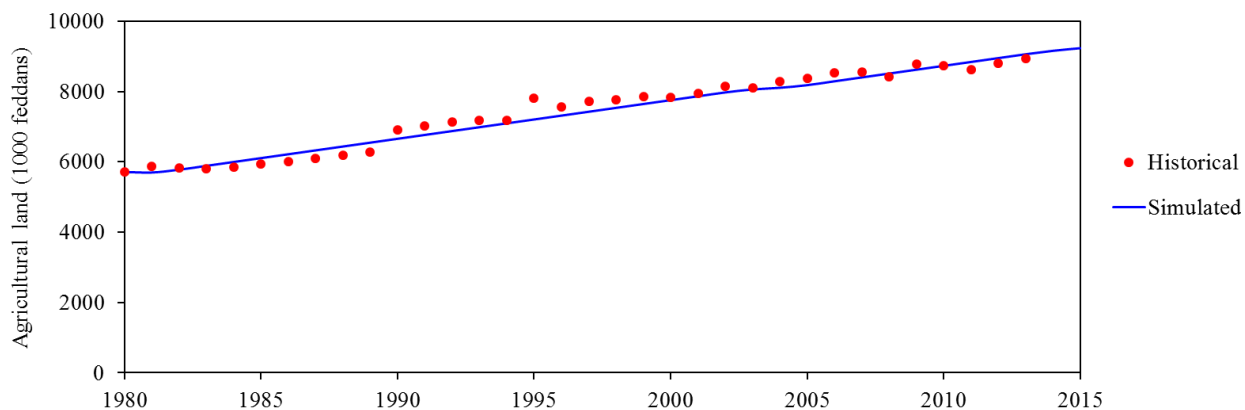


Figure 5. Model simulation results vs historical records of agricultural land.

Slika 5. Poređenje registrovanih poljoprivrednih površina sa rezultatima simulacije.

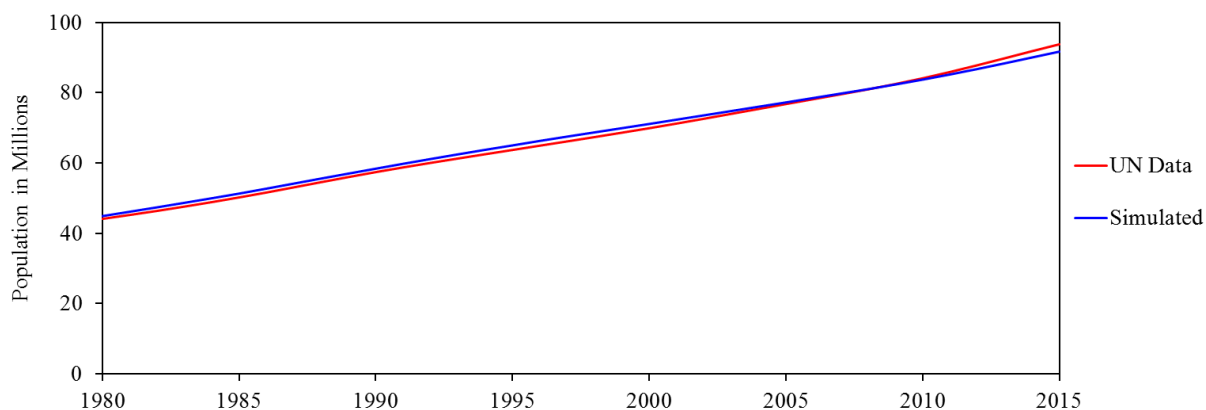


Figure 6. Model simulation results vs UN Population data.

Slika 6. Poređenje ukupnog stanovništva prema podacima Ujedinjenih nacija i na osnovu rezultata simulacije.

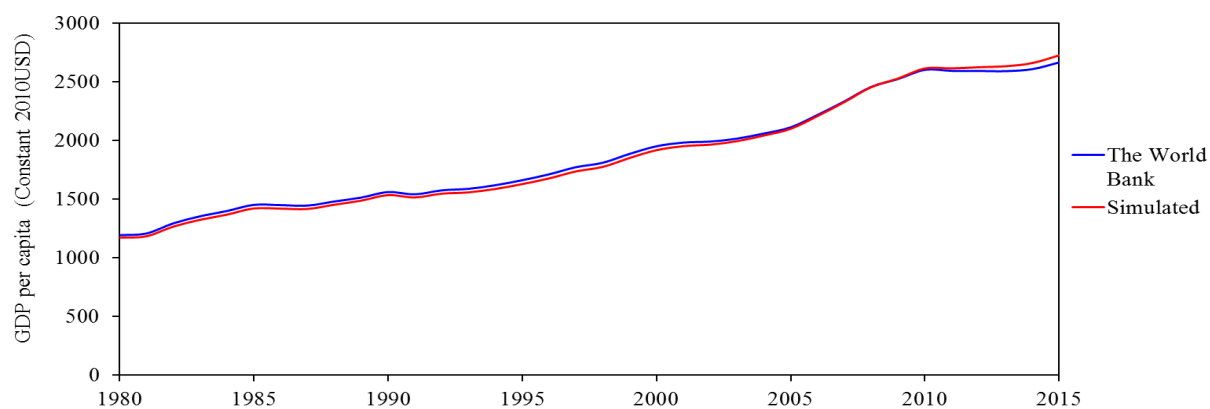


Figure 7. GDP per capita simulated vs The World Bank data.

Slika 7. Poređenje bruto nacionalnog dohotka po stanovniku prema podacima Svetske banke i na osnovu rezultata simulacije.

The performance of other submodels was evaluated with the following statistical measures; Root Mean Square Percent Error (RMSE), Theil Inequality Coefficient test (TIC), and Theil Statistics test that measures the sources of error in terms of bias (UM), variance (US), and covariance (UC) between simulated and historical data [19]. The statistical tests results are shown in Table 1. The statistical tests showed that the RMSE is small and less than 10%, and the unsystematic errors are concentrated in US and UC, [19]. This shows the developed model has a clear agreement with the observed data and fits for the model purpose. To that point, the model showed a satisfactory performance for the developed sectors. The integrated model will be calibrated to evaluate the overall performance and its ability to capture interactions among WFE Nexus and socio-economic dynamics. Sensitivity and uncertainty analysis for the model predictions (e.g., model structure, model parameter values) will be conducted to assess the model robustness and its validity for its purpose.

Table 1. Statistical parameters of the model tests.

Tabela 1. Statistički parametri testiranja modela.

Variable	RMSE (%)	TIC	Theil Inequality Statistics		
			U <sup>M</sup>	U <sup>S</sup>	U <sup>C</sup>
Population	0.017	0.008	0.28	0.42	0.30
Agricultural land	0.029	0.014	0.09	0.04	0.87
GDP per capita	0.017	0.008	0.25	0.50	0.25
Note: $0 \leq \text{TIC} \leq 1.0$ (0 perfect prediction, 1.0 worst prediction) $U^M + U^S + U^C = 1.0$					

## 6 Conclusions

The current paper described a methodology for integrating the WFE interactions with the socio-economic dynamics in the Nile basin by focusing on the last downstream country in the basin, Egypt. A System Dynamics Model was built for investigating the policy implications on the WFE in the Nile basin. The developed model showed a satisfactory performance and reflected the SDM ability to capture the interactions and the feedbacks among the WFE and the socio-economic dynamics in Egypt. The completion of the integrated model will be followed by formal calibration, sensitivity and uncertainty analysis to ensure the model robustness, validity and fits for its purpose. The model will be used to explore different policy options and management scenarios for the WFE and socio-economics in the Nile basin. For example population growth, changing crop patterns, improving the irrigation efficiency, upstream water developments, e.g., new reservoirs and agricultural projects.

## Acknowledgements

The first author would like to express his gratitude to the Ministry of Higher Education (MoHE), Egypt and College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, UK for the financial support for this research (PhD Scholarship) and to the University of Exeter for providing the tools and facilities to execute this work, and also to DHI Group for providing free licenses of MIKE HYDRO BASIN and MIKE HYDRO RIVER.



### References

1. Jalilov, S. M., Keskinen, M., Varis, O., Amer, S., Ward, F. A. (2016). Managing the water–energy–food nexus: Gains and losses from new water development in Amu Darya River Basin. *Journal of Hydrology*, 539, 648-661.
2. Sutcliffe, J. V., Parks, Y. P. (1999). *The hydrology of the Nile: International Association of Hydrological Sciences Wallingford, Oxfordshire, UK.*
3. Awulachew, S. B. (2012). *The Nile River Basin: water, agriculture, governance and livelihoods: Routledge.*
4. Kibaroglu, A., Gürsoy, S. I. (2015). Water–energy–food nexus in a transboundary context: the Euphrates–Tigris river basin as a case study. *Water international*, 40(5-6), 824-838.
5. Zhuang, Y. (2014). *A system dynamics approach to integrated water and energy resources management. (PhD Thesis), University of South Florida*
6. Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 573, 444-457.
7. Sušnik, J., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Savić, D., and Kapelan, Z. (2013). Integrated modelling of a coupled water-agricultural system using system dynamics. *Journal of Water and Climate Change*, 4(3), 209-231.
8. Georgakakos, A. (2006). *Decision Support Systems for water resources management: Nile Basin applications and further needs. Paper presented at the CPWF: Proceedings of the Working conference January.*
9. Abdelhaleem, F. S., Helal, E. Y. (2015). Impacts of Grand Ethiopian Renaissance Dam on Different Water Usages in Upper Egypt. *British Journal of Applied Science & Technology*, 8(5), 461-483. doi:DOI: 10.9734/BJAST/2015/17252
10. Wheeler, K. G., Basheer, M., Mekonnen, Z. T., Eltoum, S. O., Mersha, A., Abdo, G. M., Zagona, E. A., Hall, J. W., Dadson, S. J. (2016). Cooperative filling approaches for the Grand Ethiopian Renaissance Dam. *Water international*, 1-24.
11. Guariso, G., Whittington, D. (1987). Implications of ethiopian water development for Egypt and Sudan. *International Journal of Water Resources Development*, 3(2), 105-114. doi:10.1080/07900628708722338.
12. McCartney, M., Alemayehu, T., Easton, Z. M., Awulachew, S. B. (2012). Simulating current and future water resources development in the Blue Nile River Basin. *The Nile River Basin: water, agriculture, governance and livelihoods. Routledge-Earthscan, Abingdon*, 269-291.
13. Blackmore, D., Whittington, D. (2008). *Opportunities for cooperative water resources development on the Eastern Nile: risks and rewards. Report to the Eastern Nile Council of Ministers, Nile Basin Initiative, Entebbe.*
14. Tan, C. C., Erfani, T., Erfani, R. (2017). Water for Energy and Food: A System Modelling Approach for Blue Nile River Basin. *Environments*, 4(1), 15.
15. Al-Riffai, P., Breisinger, C., Mondal, M., Alam, H., Ringler, C., Wiebelt, M., Zhu, T. (2017). *Linking the economics of water, energy, and food: A nexus modeling approach (Vol. 4): Intl Food Policy Res Inst.*
16. El Gafy, I., Grigg, N., Reagan, W. (2017). Dynamic behaviour of the water–food–energy Nexus: focus on crop production and consumption. *Irrigation and Drainage*, 66(1), 19-33.
17. Albrecht, T. R., Crootof, A., Scott, C. A. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002.
18. FAO. (2014). *The Water-Energy-Food Nexus. A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture.*
19. Sterman, J. D. J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.*
20. Meadows, D. L., Behrens, W. W., Meadows, D. H., Naill, R. F., Randers, J., Zahn, E. (1974). *Dynamics of growth in a finite world: Wright-Allen Press Cambridge, MA.*
21. Ahmad, S., Prashar, D. (2010). Evaluating municipal water conservation policies using a dynamic simulation model. *Water Resources Management*, 24(13), 3371-3395.
22. Mirchi, A., Madani, K., Watkins, D., Ahmad, S. (2012). Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management*, 26(9), 2421-2442.
23. Simulistics Ltd. (2017). Retrieved from <http://www.simulistics.com/>
24. Elasyed, H., Djordjevic, S., Savić, D. (2018). The Nile system dynamics model for water-food-energy Nexus assessment. Paper presented at the 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018), Palermo, Italy.
25. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56(97), e156.
26. Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Raes, D. (2012). *Crop yield response to water: FAO Rome.*

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

27. NBI. (2016). Nile Basin Decision Support System. In. Entebbe, Ughanda: Nile Basin Initiative.
28. CAPMAS. Annual Bulletin of Irrigation and Water Resources Statistics. Cairo, Egypt: Central Agency for Public Mobilization and Statistics Retrieved from <http://www.capmas.gov.eg>.
29. Abu-Zeid, M. (1992). Water resources assessment for Egypt. Canadian Journal of Development Studies/Revue canadienne d'études du développement, 13(4), 173-194.
30. Allam, M. N., Allam, G. I. (2007). Water Resources In Egypt: Future Challenges and Opportunities. Water international, 32(2), 205-218.
31. MWRI. (2005). Integrated Water Resources Management Plan. Cairo, Egypt: Ministry of Water Resources and Irrigation.
32. Omar, M., Moussa, A. (2016). Water management in Egypt for facing the future challenges. Journal of Advanced Research, 7(3), 403-412. doi:10.1016/j.jare.2016.02.005.
33. Elarabawy, M., Attia, B., Tosswell, P. (1998). Water resources in Egypt: strategies for the next century. Journal of water resources planning and management, 124(6), 310-319.
34. Abdin, A., Gaafar, I. (2009). Rational water use in Egypt. Technological perspectives for rational use of water resources in the Mediterranean region, 88, 11-27.
35. CAPMAS. Annual Bulletin of Statistical Crop Area and Plant Production. Cairo, Egypt: Central Agency for Public Mobilization and Statistics Retrieved from <http://www.capmas.gov.eg>.
36. FAO. (2018). FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
37. IEA. Energy balances: Egypt. Retrieved from <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=Egypt&product=balances>
38. UN. (2017). Revision of World Population Prospects. from United Nations.
39. The World Bank. The World Bank Open Data. Retrieved from <https://data.worldbank.org/>
40. 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.
41. Djordjević, B. (1994). Cybernetics in Water Resources Management, Water Resources Publications.

## Експериментално одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова

Филип Станић<sup>1</sup>, Pierre Delage<sup>2</sup>, Yu-Jun Cui<sup>3</sup>

**АПСТРАКТ:** Зелени кровови, осим ублажавања екстремних температура у градским срединама, имају значајан утицај и на смањивање урбаног отицаја. За процену њиховог значаја са хидролошког аспекта неопходно је одредити ретензионе и транспортне карактеристике супстрата коришћеног за покривање кровне површине. Ове карактеристике су описане уз помоћ две криве: криве влажности и криве водопродљивости за незасићену средину, које се најчешће одређују тзв. инверзном анализом, односно калибрисањем неких од добро познатих аналитичких модела. Имајући у виду да се за изградњу зелених кровова користе лаки, неконвенционални супстрати који не оптерећују значајно кровну конструкцију, поману аналитичке криве веома често не могу поуздано да апроксимирају њихове хидрауличке карактеристике. Због тога је неопходно експериментално одређивање криве влажности и криве водопродљивости. С обзиром на то да овакви експерименти изискују много времена и различитих технологија, ово истраживање је засновано на идеји да се уз помоћ само једног експеримента одреде обе криве. Како би се то извело специјална апаратура базирана на принципу тенезиометра је дизајнирана. Крива влажности се директно одређује применом “Multi-step outflow” теста, док се за одређивање криве водопродљивости користе детаљна мерења истицања из узорка током теста. Ова мерења су затим анализирана коришћењем неколико инверзних метода за одређивање криве водопродљивости. Описана методологија је коришћена за одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног у случају таласастог зеленог крова који се налази у предграђу Париза, Шан на Марни.

Кључне речи: Крива влажности, Крива водопродљивости, Зелени кров, Незасићена порозна средина

## Experimental determination of the hydraulic characteristics of the substrate used for covering green roof

**ABSTRACT:** Besides reducing extreme temperatures in urban areas, green roofs have significant influence on mitigation of the urban runoff. To estimate the importance of green roofs from the hydrological aspect, it is necessary to determine the retention and transportation characteristics of the substrate used for covering the roof surface. These characteristics are described using two curves: water retention and hydraulic conductivity curves of unsaturated media, usually determined using back analysis where some of the well-known analytical models are calibrated. Since the substrates used for green roofs are unconventional materials that are very light in order not to load roof construction significantly, the mentioned analytical models are often inappropriate for their soil characteristics curves. For that reason it is necessary to experimentally determine water retention and hydraulic conductivity curves of the substrate. Since such experiments are time consuming and require application of different technologies, this research is based on the idea that only one experiment is applied for determination of both curves. This is accomplished by designing special apparatus based on tensiometry principle. Water retention curve is determined directly by applying “Multi-step outflow” test and detailed outflow measurements collected during the test are used for determination of the hydraulic conductivity curve. The measurements are analysed using several inverse methods. Described methodology is used for determination of the hydraulic characteristics of the substrate used for covering wavy shape green roof in suburb of Paris, Champs-sur-Marne.

Keywords: Water retention curve, Hydraulic conductivity curve, Green roof, Unsaturated porous medium

<sup>1</sup> Докторант Филип Станић, Ecole des Ponts ParisTech, [fstanic991@gmail.com](mailto:fstanic991@gmail.com)

<sup>2</sup> Професор Pierre Delage, Ecole des Ponts ParisTech, Navier/CERMES, [pierre.delage@enpc.fr](mailto:pierre.delage@enpc.fr)

<sup>3</sup> Професор Yu-Jun Cui, Ecole des Ponts ParisTech, Navier/CERMES, [yu-jun.cui@enpc.fr](mailto:yu-jun.cui@enpc.fr)

## 1 Увод

Са становишта урбане хидрологије, главна функција зелених кровова је ублажавање отицаја са кровних површина. Како би се одредиле карактеристике једног зеленог крова са аспекта водопроводљивости и вододрживости, неопходно је одредити хидрауличке карактеристике супстрата од којег је зелени кров сачињен. За изградњу зелених кровова се веома често користе неконвенционална земљишта која садрже органске материје и имају малу густину како би што мање оптерећивали кровну конструкцију. Хидрауличке карактеристике (крива влажности и крива водопроводљивости) таквих атипичних супстрата се веома често не могу апроксимирати често коришћеним аналитичким кривама као што су van Genuchten [22], Brooks & Corey [2], Fredlund & Xing [8], већ је неопходно њихово лабораторијско одређивање. Најчешће коришћене методе за одређивање криве влажности су методе базиране на контролисању капиларног потенцијала [1], [6], [9], [23], међу којима се као најзаступљеније истичу „висећа колона“ [3] и „аксијална транслација“ [18], [19]. Обе поменуте технике су базиране на довођењу и контролисању одређеног капиларног потенцијала, што се може учинити на два начина:

- стварањем висинске разлике између врха узорка и нивоа воде у цевчици чији је један крај слободан док је другим повезана са дном узорка („висећа колона“).

- довођењем ваздуха под притиском са горње стране узорка, при чему је вредност ваздушног притиска аналогна доведеном капиларном потенцијалу („аксијална транслација“).

Коришћењем неке од поменутих метода крива влажности се може лако одредити. Међутим, одређивање криве водопроводљивости је нешто сложеније и може се обавити на више начина. Такозване директне методе за одређивање криве водопроводљивости [4], [11], [17] захтевају додатни експеримент за чије спровођење је често неопходна додатна опрема и специфична апаратура. У том случају је време неопходно за одређивање хидрауличких карактеристика супстрата значајно дуже, имајући у виду да су неопходна два независна експеримента. Због тога се често користе такозване инверзне методе [10], [12], [13] где се једна величина држи под контролом (у овом случају капиларни потенцијал), док се друга величина мери (истицање из узорка у овом случају) а затим се одређени физички заснован аналитички / нумерички модел калибрише подешавајући одговарајући параметар који утиче на мерену величину. Користећи овај тип метода за одређивање криве водопроводљивости, једним експериментом је могуће одредити хидрауличке карактеристике супстрата.

„Multi-step outflow“ тест [7], [14] је поступак који се примењује за одређивање криве влажности где се довођење одређеног капиларног потенцијала и континуално мерење истицања из узорка понавља неколико пута за различите вредности капиларних потенцијала. Повезивањем различитих вредности капиларних потенцијала са одговарајућим влажностима срачунатим на основу финалне запремине воде извучене из узорка при сваком доведеном капиларном потенцијалу, добија се крива влажности. Анализом континуалних мерења истекле запремине при сваком доведеном капиларном потенцијалу, добија се крива водопропустљивости. Ова анализа се може спровести применом Гарднерове физички засноване аналитичке методе [10] која је базирана на Терцагијевој теорији консолидације [21]. Иако згодна, Гарднерова метода није применљива за све типове граничних услова који су диктирани експерименталном апаратом, због чега је често неопходно комбиновање ове методе са неким комплекснијим и мање поузданим графичким методама као што је Кунзе и Киркхамова метода [12].

У овом раду је приказано експериментално одређивања криве влажности и водопропустљивости супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова „Green Wave“ [24] који се налази у предграђу Париза, Шан на Марни (Champs-sur-Marne). У ту сврху је коришћена специјално дизајнирана апаратура базирана на методама „висећа колона“ и „аксијална транслација“, у комбинацији са „унапређеном“ Гарднеровом методом адаптираном на различите граничне услове диктиране експерименталном апаратом.

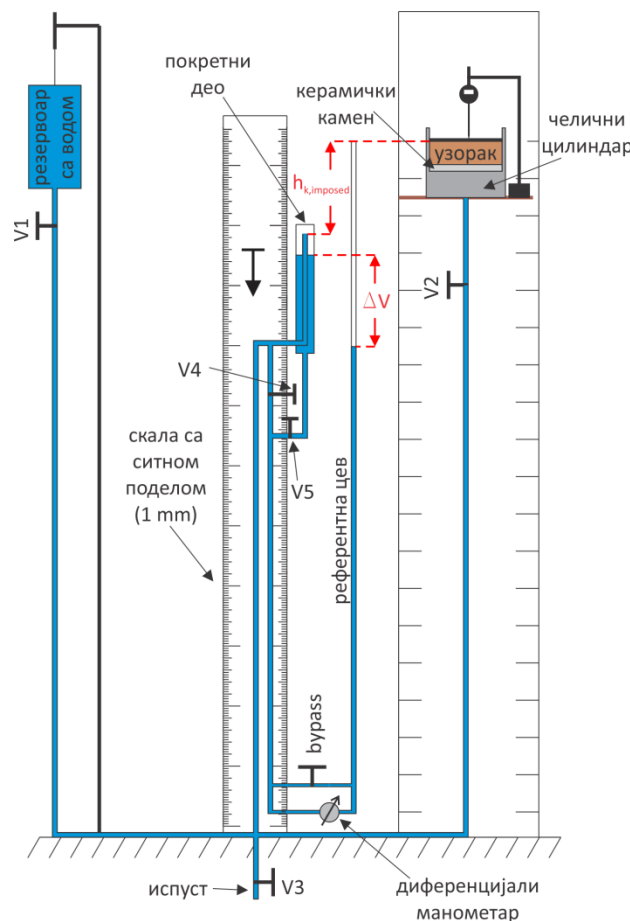
## 2 Методологија

У наредних неколико потпоглавља је представљена методологија коришћена за одређивање криве влажности и криве водопропустљивости супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова Green Wave. Прво су представљени апаратура и методе коришћене за одређивање криве влажности, а затим су описане инверзне методе (већ постојеће и новоразвијене) за одређивање криве водопродљивости супстрата.

### 2.1 Крива влажности

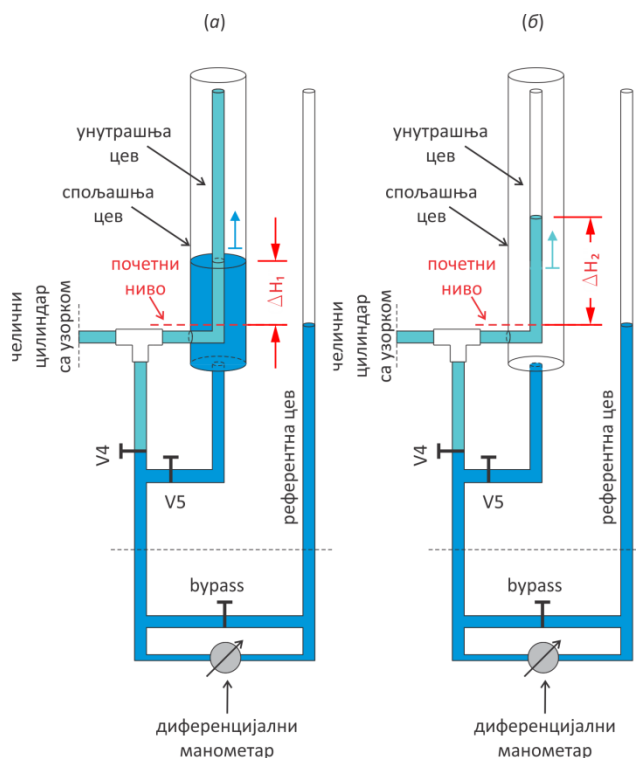
Крива влажности при сушењу је одређена применом „Multi-step outflow“ теста, при чему је капиларни потенцијал контролисан методама „висећа колона“ и „аксијална транслација“. Апаратура за одређивање хидрауличких карактеристика супстрата је приказана на Слика 1.

Иста апаратура се може користити и за одређивање криве влажности при влажењу што је описано у [20]. Апаратура се састоји од покретног дела, челичног цилиндра у којем је смештен узорак (висине 2,4 cm и пречника 7 cm) испод којег се налази ситно-порзни керамички камен (дебљине 0,5 cm и пречника 7 cm), резервоара и диференцијаног манометра. Сви ови делови су међусобно повезани крутим пластичним цревима и затварачима. Покретни део сачињавају



Слика 1. Апаратура коришћена за одређивање хидрауличких карактеристика супстрата – метода „висећа колона“ (преузето из [20])

Figure 1. Apparatus used for determination of the soil water characteristic curves – “hanging column” technique (taken from [20])



Слика 2. Покретни део апаратуре (преузето из [20]): а) Затварач V4 је затворен, док је затварач V5 отворен (вода дренирана из узорка се прикупља у спољашњој цеви преливањем преко ивице унутрашње цеви); б) Затварач V4 је отворен, док је затварач V5 затворен (вода дренирана из узорка се прикупља у унутрашњој цеви)

Figure 2. Mobile part of the apparatus (taken from [20]): а) valve V4 is closed and V5 is open (water drained from the sample is collected in the outer tube by overflowing from the inner tube); б) Valve V4 is open and valve V5 is closed (water drained from the sample is collected in the inner tube)

унутрашња / спољашња стаклена цев која је повезана на један крај диференцијалног манометра, док је референтна цев повезана на његов други крај. Отварањем затварача V4, диференцијални манометар региструје разлику у нивоу воде између унутрашње и референтне цеви (Слика 2а), док се отварањем затварача V5 региструје промена нивоа између спољашње и референтне цеви (Слика 2б). Улога поменутог керамичког камена је да обезбеди континуални ток воде на контакту са узорком, што је обезбеђено карактеристиком камена да остане zasiћен при сваком доведеном капиларном потенцијалу мањем од тзв. „тачке увлачења ваздуха“ (карактеристика одређеног типа порозног камена). На узорак се наслања и игла сензора који мери евентуално тоњење узорка током теста, док резервоар приказан на Слика 1 служи првенствено да се узорак засити.

### 2.1.1 „Висећа колона“

Стварањем висинске разлике између нивоа воде у унутрашњој цеви и врха узорка, ствара се одговарајући капиларни потенцијал који одговара управо тој разлици ( $h_{k,imposed}$  на Слика 1). Као последица створеног капиларног потенцијала, вода почиње да истиче кроз дно узорка и сакупља се у унутрашњој / спољашњој цеви зависно од затварача који се користи (V4 или V5 на Слика 2 – објашњено у наставку). Ова метода је веома прецизна и згодна за мале вредности капиларног за које није неопходно стварање велике висинске разлике између врха узорка и нивоа воде у унутрашњој цеви.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

У овом истраживању је „висећа колона“ коришћена за мање капиларне потенцијале (до 3 m) док је „аксијална транслација“ коришћена за капиларне потенцијале (3 – 5 m). Капиларни потенцијал од 5 m је гранична вредност до које керамички камен коришћен у овом експерименту остаје засићен. Процедура за одређивање криве влажности се може поделити у неколико корака који су описани у наставку.

- i. Засићење узорка. Резервоар се поставља на висинску коту мало вишу од коте на којој је узорак. Сви затварачи су отворени како би де-аерисана, дестилована вода из резервоара протицала кроз све делове апаратуре при чему се засићује и узорак кроз керамички камен. Треба напоменути да је керамички камен пре постављања у челични цилиндар засићен. Када се на врху узорка створи танак слој воде, може се претпоставити да је узорак засићен и танак слој воде се може уклонити.
- ii. Провера засићеног стања. Затворити затварач V5 и пустити пар тренутака да вода из резервоара прелива преко ивице унутрашње цеви и спољашњу. Затим затворити затвараче V1 и V2 и поставити покретни део тако да врх унутрашње цеви (ниво воде) буде у висини врха узорка. Уколико након отварања затварача V2 нема снижења нивоа воде у унутрашњој цеви, значи да је узорак засићен и може се почети са експериментом. Уколико то није случај треба поновити корак 1.
- iii. Довођење капиларног потенцијала. Када је узорак засићен затварач V2 се затвара и покретни део се спушта на одговарајућу висину како би се довео одговарајући капиларни потенцијал  $h_{k,imposed}$  (Слика 1). Пре него што се отвори затварач V2 и вода почне да се дренажа са доње стране узорка, треба одлучити која цев (унутрашња или спољашња) ће се користити за прикупљање истекле воде из узорка. Покретни део је специјално дизајниран како би се веће количине воде (влажан узорак) могле прикупљати у већу спољашњу цев, а мање количине воде (сув узорак) у мању унутрашњу цев. На тај начин се оптимално користе опсег и тачност диференцијалног манометра који мери разлику у нивоима између унутрашње / спољашње и референтне цеви.

*Фаза 1.* Вода дренирана из узорка се сакупља у спољашњу цев, преливањем из унутрашње цеви (Слика 2а). Да би се то обезбедило, почетни ниво воде у унутрашњој цеви мора бити у висини са њеним врхом. Затварањем затварача V4 и отварањем затварача V5 и bypass-a, нивои у спољашњој и референтној цеви се изједначавају што значи да диференцијални манометар показује вредност 0. Затим се затварачи V5 и bypass затварају, а затварач V4 отвара како би се остварила веза са узорком. Отварањем затварача V2 вода почиње да истиче из узорка, преливајући се при томе преко горње ивице унутрашње цеви у спољашњу цев. На тај начин се доведени капиларни потенцијал одржава константним ( $h_{k,imposed}$  на Слика 1), док се количина прикупљене воде сакупља у спољашњој цеви и мери помоћу диференцијалног манометра ( $\Delta H_1$  на Слика 2а).

*Фаза 2.* Вода дренирана из узорка се сакупља у унутрашњој цеви (Слика 2б). У овом случају се доведени капиларни потенцијал не одржава константним, већ се постепено смањује под утицајем воде која истиче из узорка (ниво воде у унутрашњој цеви расте – доведени капиларни потенцијал опада). Да би се обезбедило мерење у унутрашњој цеви затварач V5 се затвара, а отварају се затварачи V4 и bypass. Када се нивои у унутрашњој и референтној цеви изједначе, bypass се затвара и тест започиње отварањем затварача V2. Треба напоменути да почетни нивои у унутрашњој и референтној цеви морају бити близу дна унутрашње цеви, како би се оставило довољно простора да ниво воде расте. Почетна позиција нивоа воде у цевима се може подесити помоћу затварача V1 и V3.

- iv. Достизање равнотежног стања. Дренирана вода се сакупља у унутрашњој / спољашњој цеви (зависно да ли је примењена *Фаза 1* или *Фаза 2* експеримента) и пораст нивоа воде се мери помоћу диференцијалног манометра. Када истицање из узорка постане једнако нули, равнотежно стање је достигнуто и добија се пар вредности (запреминска влажност  $\theta$ , капиларни потенцијал  $h_k = h_{k,imposed}$ ) на кривој влажности. Капиларни потенцијал одго-

вара финалној разлици између нивоа воде у унутрашњој цеви и коте врха узорка (за Фазу I ова вредност је константна), док се одговарајућа вредност  $\theta$  може срачунати као:

$$\theta_i = \theta_{i-1} - V_{\infty,i}/V_{sample,(i-\frac{1}{2})} \quad (1)$$

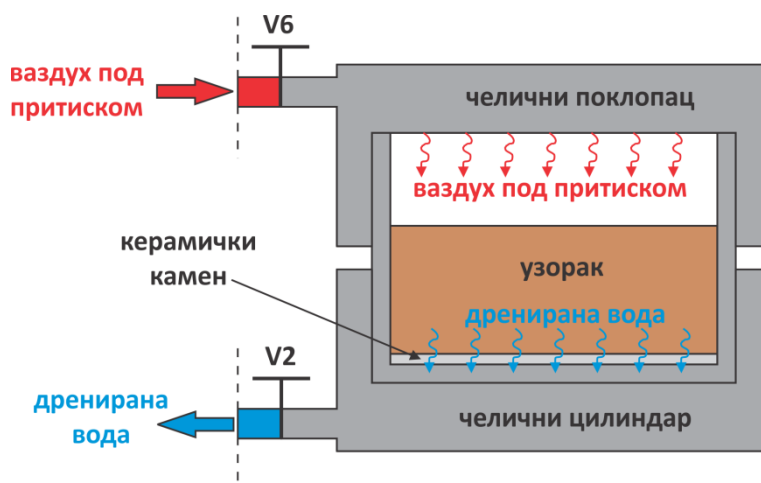
где индекс  $i$  означава редни број корака („step“) у „Multi-step outflow“ тесту,  $V_{sample,(i-\frac{1}{2})}$  је средња вредност запремина узорка између два корака (уколико је досло до слегања узорка), а  $V_{\infty,i}$  укупна запремина воде дренарана из узорка. С обзиром да у овом експерименту није дошло до слегања узорка,  $V_{sample,(i-\frac{1}{2})} = V_{sample}$ .

### 2.1.2 „Аксијална транслација“

„Аксијална транслација“ је метода која се користи за веће вредности капиларних потенцијала. Уместо стварања висинске разлике, капиларни потенцијал се у овом случају обезбеђује довођењем ваздуха под притиском са горње стране узорка (Слика 3). На тај начин је могуће држати на истом нивоу покретни део и челични цилиндар са узорком, с обзиром да капиларни потенцијал одговара вредности доведеног ваздушног притиска. Ова метода се примењује само за веће капиларне због значајније грешке коју прави сензор за контролу ваздушног притиска.

У овом случају „аксијална транслација“ се примењује за капиларне потенцијале веће од 3 m висине воденог стуба, што се сврстава у Фазу 2 експеримента. Са Слика 3 се види да се ова метода примењује једноставним стављањем додатног челичног цилиндра (челични поклопац) на већ постојећи у коме се налази узорак. У овом случају покретни део инсталације се одржава на истој висини са узорком, а капиларни потенцијал се доводи удувавањем ваздуха под притиском који улази кроз челични поклопац (отварањем затварача V6 на Слика 3). Положај свих затварача је исти као што је описано у Фазу 2 експеримента и отварањем затварача V2 почиње дренарање воде из узорка. С обзиром да се дренарана вода скупља у унутрашњој цеви, финална вредност капиларног потенцијала је једнака разлици између доведеног ваздушног притиска и финалне промене нивоа воде у унутрашњој цеви, док се одговарајућа влажност рачуна према једначини (1).

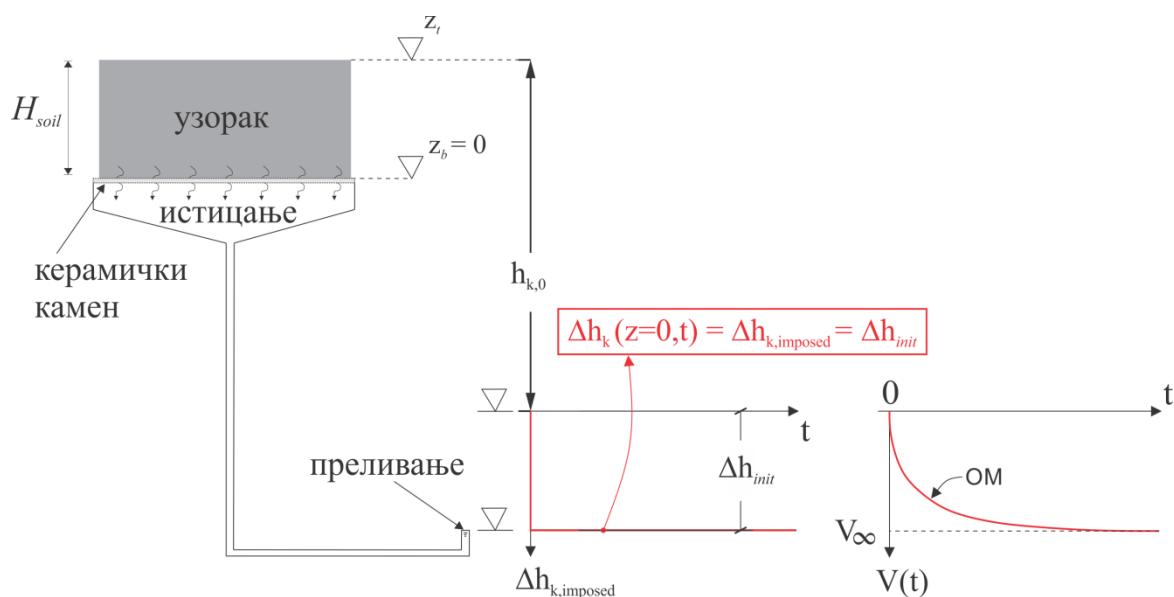
Након успостављања равнотежног стања затварач V2 се затвара и покретни део се спушта на нижу коту („висећа колона“) или се притисак ваздуха повећава („аксијална транслација“), а затим се процедура понавља на већ описан начин почевши од корака iii.



Слика 3. Метода за контролисање капиларног потенцијала „аксијална транслација“ (преузето из [20])

Figure 3. Technique for controlling suction “axis translation” (taken from [20])





Слика 4. Оригинална Гарднерова метода (ОМ)

Figure 4. Original Gardner's method

## 2.2 Крива водопродљивости

За одређивање криве водопродљивости супстрата искоришћеног за изградњу зеленог крова Green Wave, примењено је неколико инверзних метода представљених у овом раду. Међу њима су Оригинална Гарднерова метода [10], Кунзе и Киркхамова метода [12], као и две „Модификоване“ Гарднерове методе развијене током истраживања. Две последње методе представљају унапређене верзије Оригиналне Гарднерове методе које су адаптиране на различите граничне услове диктиране експериментом.

### 2.2.1 Оригинална Гарднерова метода (ОМ)

Оригинална Гарднерова метода [10] је једна од инверзних аналитичких метода за одређивање криве водопродљивости, заснована на аналогiji са Терцагијевом теоријом консолидације [21]. Гарднерово аналитичко решење се може лако извести, имајући у виду да се ради о одређивању водопродљивости узорка при сушењу, када се вода дренира са доње стране узорка услед повећања капиларног потенцијала за вредност  $\Delta h_{init}$  у односу на претходно равнотежно стање  $h_{k,0}$  (Слика 4).

У том случају се запремина воде дрениране кроз дно узорка  $V [L^3]$  може изразити као интеграл истицања у времену помножен са површином попречног пресека узорка  $A [L^2]$ . Ако се истицање кроз дно узорка опише Дарсијевом једначином, добија се следећа једначина:

$$V(t) = -A \int_0^t K(h_k) \left( \frac{\partial h_k}{\partial z} \Big|_{z_b=0} + 1 \right) dt \quad (2)$$

где је  $K(h_k)$  водопродљивост узорка  $[L/T]$  при капиларном потенцијалу  $h_k [L]$ . Капиларни потенцијал  $h_k(z, t)$  се може изразити на следећи начин:

$$h_k(z, t) = h_k(z, t = 0) + \Delta h_k(z, t) \quad (3)$$

где  $h_k(z, t = 0)$  представља почетну вредност капиларног потенцијала  $[L]$  (хидростатички распоред капиларног потенцијала по висини узорка), док  $\Delta h_k(z, t)$  представља промену капиларног потенцијала  $[L]$  по висини узорка и у времену настале услед нагле промене капи-

ларног потенцијала на дну узорка  $\Delta h(z=0, t) = \Delta h_{init}$  [L] (Слика 4). По аналогији са Терцагијевом теоријом консолидације,  $\Delta h_k(z, t)$  се може изразити на следећи начин:

$$\Delta h_k(z, t) = \Delta h_{init} \left( 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-(n/2)^2 \pi^2 \frac{t}{T}} \sin \frac{n\pi z}{H_{soil}} \right) \quad (4)$$

$$T = \frac{H_{soil}^2}{D} \quad (5)$$

Једначина (4) заправо представља аналитичко решење једначине дифузије које важи у случају константних вредности  $\Delta h_{init}$  и коефицијента дифузије  $D$  [L<sup>2</sup>/T]. Када се срачуна извод на дну узорка  $\left. \frac{\partial h_k}{\partial z} \right|_{z_b=0}$  и замени у једначину (2) добија се коначна форма Гарднерове аналитичке методе:

$$V_{OM}(t) = V_{\infty} \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-(n/2)^2 \pi^2 \frac{t}{T}} \right) \quad (6)$$

При чему је  $V_{\infty}$  укупна запремина воде [L<sup>3</sup>] дренирана из узорка при повећању капиларног потенцијала за константну вредност  $\Delta h_{init}$ :

$$V_{\infty} = \frac{T \Delta h_{init} K(h_k) A}{H_{soil}} = H_{soil} \Delta \theta A \quad (7)$$

Ознака  $OM$  у једначини (6) означава Оригиналну Гарднерову методу.  $OM$  (6) се калибрише подешавањем параметра  $D$  тако да се обезбеди што боље слагање са мереним запреминама  $V(t)$ . Знајући вредност коефицијента дифузије  $D$ , лако се може срачунати  $K(h_k) = D \Delta h_{init} / \Delta \theta$ . С обзиром да је за криву водопроводљивости неопходан један пар вредности  $(h_k, K(h_k))$ , хидростатички распоред капиларног потенцијала се занемарује и за вредност  $h_k$  се усваја вредност  $h_{k,0} + \Delta h_{init}$  (односно  $h_{k,imposed}$  са Слика 1), што је прихватљиво јер је  $h_k \gg H_{soil}$ .

На Слици 4 је приказана зависност  $V(t)$  услед довођења тренутне промене капиларног потенцијала  $\Delta h_{init}$ . Овде треба напоменути претпоставке под којима је изведена Гарднерова метода:

- $D = K(h_k) / C(h_k) = const$ . Ова претпоставка је оправдана за мале вредности запреминске влажности узорка (велики капиларни потенцијали), с обзиром да у тим условима нелинеарност криве влажности и водопропустљивости није толико изражена. Претпоставка је такође прихватљива и за веће влажности уколико су у питању мале вредности промене капиларног потенцијала  $\Delta h_{init}$ , с обзиром да се на малом интервалу и нагиб криве влажности  $C(h_k)$  и вредност водопроводљивости  $K(h_k)$  могу сматрати константним.
- $\Delta h_{init} = const$ .
- $K(h_k) < K_{cs}$ , где је  $K_{cs}$  коефицијент филтрације [L/T] керамичког камена у засићеним условима.

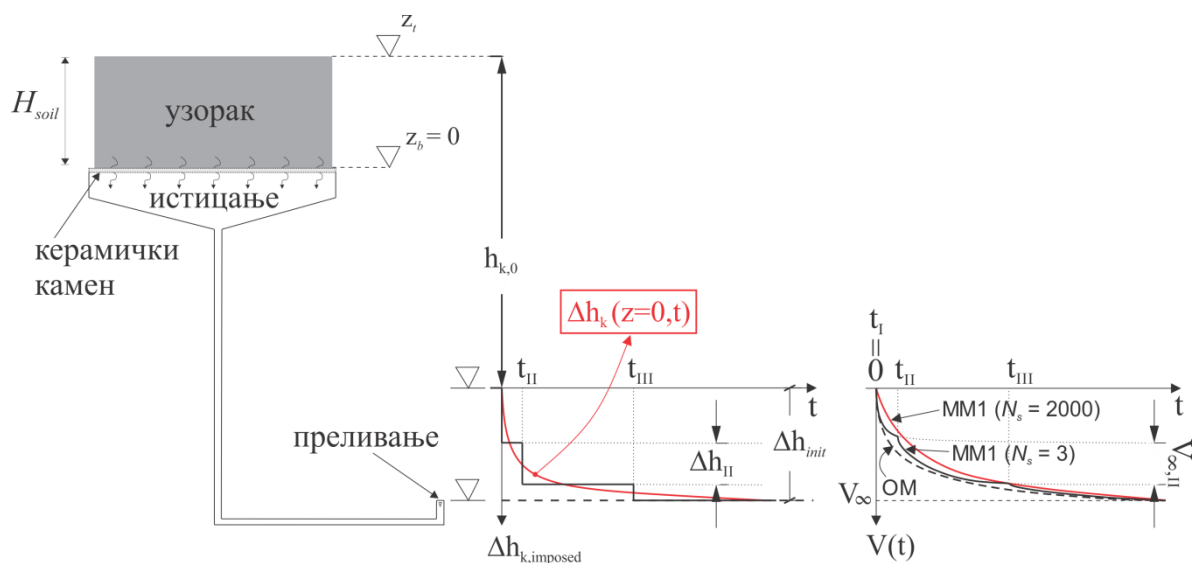
Осим прво поменуте претпоставке која је неопходна да би се користило аналитичко решење једначине дифузије, друге две претпоставке често нису испуњене у лабораторијским условима што значајно ограничава употребу ове методе. У наставку су описане две „Модификоване“ Гарднерове методе које се могу користити у случају када ове две претпоставке нису задовољене.

## 2.2.2 Прва модификована Гарднерова метода (ММ1)

Када је коефицијент филтрације керамичког камена мањи од водопроводљивости узорка (при одређеном капиларном потенцијалу),  $OM$  (6) се не може применити и често се прибегава употреби методе коју су развили Кунзе и Киркхам [12]. Ово је физички заснована метода базирана на аналитичком решењу једначине дифузије за двослојну средину са различитим водопроводљивостима. С обзиром да се керамички камен може сматрати као доњи слој супстрата са мањом водопроводљивошћу, ова метода се може адекватно применити. Метода се примењује графички, уклапањем мерених вредности са неком од теоретских кривих које одговарају различитим односима водопроводљивости између два слоја. Слагање мерених вредности

са одређеном теоретском кривом се врши транслирањем мерених вредности кроз време, на основу чега се одређује неколико параметара неопходних за срачунавање коефицијента дифузије  $D$ , а самим тим и водопроводљивости  $K(h_k)$  (детаљније о овој методи у радовима [5], [12], [20]). Главни недостатак ове методе је то што је одабир адекватне теоретске криве која одговара мерењима заснован на индивидуалној процени, што може умногоме утицати на вредност водопроводљивости.

Да би се избегло коришћење компликованих и непоузданих метода у случају када керамички камен ствара отпор при истицању, дошло се на идеју да се ОМ (6) унапреди како би се утицај слабо пропусног камена узео у обзир. Проблем који настаје када је керамички камен слабо пропустан је тај што се капиларни потенцијал доведен са његове доње стране не преноси моментално, већ са закашњењем на његову горњу страну, што утиче на динамику дренарања воде из узорка (Слика 5).



Слика 5. Прва „Модификована“ Гарднерова метода

Figure 5. The first “Modified” Gardner’s method

Знајући да је керамички камен увек засићен, применом Дарсијевог закона између горње и доње ивице камена (занемаривањем дебљине камена) могуће је срачунати промену капиларног потенцијала на његовој горњој ивици (дну узорка).

$$\Delta h_k(z = 0, t) = \Delta h_{k,imposed} - \Delta z_s \frac{Q(t)}{AK_{cs}} \quad (8)$$

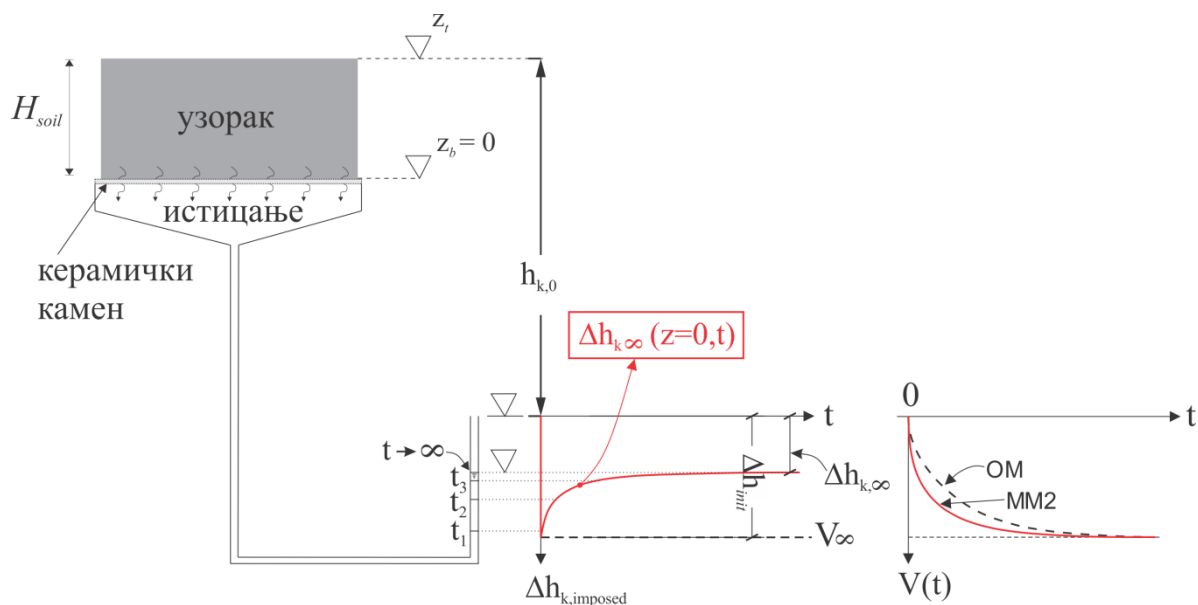
где је  $\Delta h_{k,imposed}$  промена капиларног потенцијала (у односу на претходно равнотежно стање  $h_{k,0}$ ) на доњој страни камена [L],  $\Delta z_s$  је дебљина керамичког камена [L], а  $Q(t)$  је истицање са доње стране камена [ $L^3/T$ ] срачунато као промена мерене запремине у времену. У овом случају је  $\Delta h_k(z = 0, t)$  функција времена и достиже вредност  $\Delta h_{k,imposed} = \Delta h_{init}$  тек када истицање из узорка постане једнако нули (Слика 5). Коришћењем принципа суперпозиције, крива  $\Delta h_k(z = 0, t)$  се може трансформисати у дискретну функцију (приказано на Слика 5). Величина  $\Delta h_m$  представља малу промену капиларног потенцијала која је настала у тренутку  $t_m$ , а  $N_s$  је одабран број интервала на који је функција  $\Delta h_k(z = 0, t)$  издељена. Претпостављајући да је свака промена  $\Delta h_m$ , која је константна на интервалу  $\Delta t_m = t_m - t_{m-1}$ , одговорна за дренарање запремине  $V_{\infty,m} = V_{\infty} \frac{\Delta h_m}{\Delta h_{init}}$  после времена  $t_{\infty} - t_m$ , прва модификована Гарднерова метода (ММ1) се може представити у следећем облику:

$$V_{MM1}(t) = \sum_{m=0}^{N_s} V_{\infty,m} \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{(n/2)^2 \pi^2 t - t_m}{T}} \right) \quad (10)$$

Метода ММ1 се калибрише на исти начин као ОМ. На Слика 5 је упоређена динамика дренарања запремине воде из узорка када камен не ствара отпор при истицању (ОМ (6) – испрекидана линија) и када отпор постоји (ММ1 (10) – пуна линија). Може се уочити да обе методе теже  $V_{\infty}$  после  $t = t_{\infty}$ , при чему ММ1 (10) показује ублажене вредности  $V(t)$  у односу на ОМ (6) управо због присуства слабо пропусног керамичког камена. На истој слици су приказане и криве када је  $N_s = 3$  и када је  $N_s = 2000$ , из чега се може закључити да велики број интервала  $N_s$  обезбеђује глатку криву.

### 2.2.3 Друга модификована Гарднерова метода (ММ2)

Оригинална Гарднерова метода није валидна када се услед истицања из узорка смањује капиларни потенцијал (Слика 6, Фаза 2 експеримента за одређивање криве влажности). Друга модификована Гарднерова метода (ММ2) представља аналитичко решење за овакав гранични услов, при чему се претпоставља да керамички камен не ствара отпор при истицању ( $K(h_k) < K_{cs}$ ), већ да вода несметано истиче из узорка.



Слика 6. Друга „Модификована“ Гарднерова метода (ММ2)

Figure 6. The second “Modified” Gardner’s method

Имајући у виду да пораст нивоа воде у цеви аутоматски смањује вредност капиларног потенцијала, важи следећа једначина:

$$-\frac{d\Delta h_k(z=0,t)}{dt} a = Q(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (11)$$

где је  $a$  површина попречног пресека цеви [ $L^2$ ]. С обзиром да керамички камен не ствара отпор при истицању,  $V(t)$  се може описати једначином (6). Такође, у једначини (7) уместо константне вредности  $\Delta h_{ini}$  фигурише величина  $\Delta h_k(z=0,t)$  јер се капиларни потенцијал на дну узорка мења у времену услед прикупљања дренаране воде из узорка. Након раздвајања променљивих, једначина (11) се може приказати на следећи начин:

$$-\int_{\Delta h_{init}}^{\Delta h(t)} \frac{d\Delta h_k(z=0,t)}{\Delta h_k(z=0,t)} = \int_0^t \frac{F'(t) \frac{TK(h_k)A}{H_{soil}}}{a+F(t) \frac{TK(h_k)A}{H_{soil}}} dt \quad (12)$$

Где је  $F(t) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{(n/2)^2 \pi^2 t}{T}}$ , док је  $F'(t) = \frac{dF}{dt}$ . Интеграљењем обе стране једначине (12) добија се аналитичка функција која описује промену капиларног потенцијала на дну узорка  $\Delta h_k(z=0,t)$ :

$$\Delta h_k(z=0,t) = \frac{\Delta h_{init}}{1+F(t) \frac{TK(h_k)A}{aH_{soil}}} = \frac{\Delta h_{init}}{1+F(t) \frac{V_{\infty}}{a\Delta h_{k,\infty}}} = \frac{\Delta h_{init}}{1+F(t) \left( \frac{\Delta h_{init}}{\Delta h_{k,\infty}} - 1 \right)} \quad (13)$$

Где је  $\Delta h_{k,\infty}$  финална вредност доведене промене капиларног потенцијала [L] (Слика 6). С обзиром да промена капиларног потенцијала на дну узорка истовремено описује и динамику истицања из узорка, функција  $V(t)$  се може представити на следећи начин:

$$V_{MM2}(t) = a\Delta h_{init} \left( 1 - \frac{1}{1+F(t) \left( \frac{\Delta h_{init}}{\Delta h_{k,\infty}} - 1 \right)} \right) = a(\Delta h_{init} - \Delta h_k(z=0,t)) \quad (14)$$

На Слика 6 су упоређене методе ОМ (6) и ММ2 (14) при чему се може уочити да обе методе теже  $V_{\infty}$  у неком временском тренутку  $t_{\infty}$ , с тим да ММ2 (14) даје веће вредности  $V(t)$  (поготову у почетним тренуцима), услед великог трнутаг пораста капиларног потенцијала  $\Delta h_{init}$  који затим постепено опада до финалне вредности  $\Delta h_{k,\infty}$ .

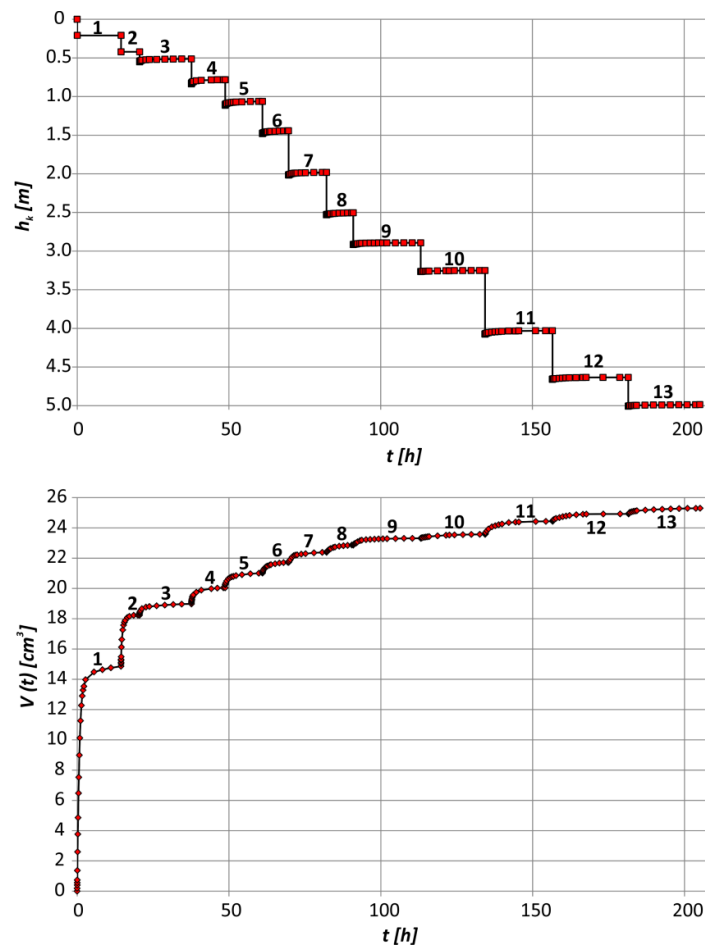
## 3 Резултати

Супстрат коришћен у овом истраживању је вулканског порекла чија се величина зрна креће у јако широком опсегу. Скоро 15 % од укупне масе узорка припада зрнима ситнијим од 80  $\mu\text{m}$ , док је најкрупније зрно величине 20 mm. За одређивање гранулометрије коришћене су метода сувог просејавања [15] (заступљеност крупнијих честица пречника > 80  $\mu\text{m}$ ) и метода седиментације [16] (заступљеност ситнијих честица пречника < 80  $\mu\text{m}$ ). Карактеристична зрна овог супстрата су  $D_{10} = 0.05 \text{ mm}$ ,  $D_{30} = 0.55 \text{ mm}$  и  $D_{60} = 3 \text{ mm}$ . Густина сувог узорка је 1100  $\text{kg/m}^3$ , порозност је 0.45, док је заступљеност органских материја 4 % (одређен према стандарду [25]).

### 3.1 Крива влажности

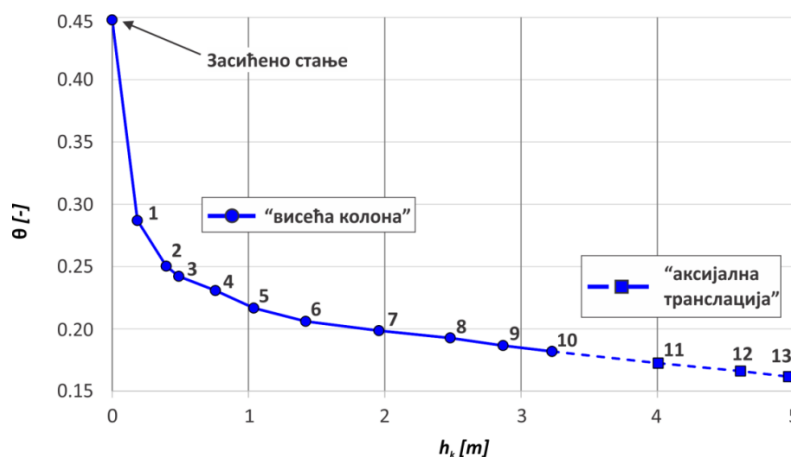
Као што је већ напоменуто, за одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова Green Wave примењен је „Multi-step outflow“ тест, при чему је 13 узастопних „корака“ спроведено. У првих 10 корака за контролу капиларног потенцијала је коришћена метода „висећа колона“, док је за кораке 11, 12 и 13 коришћена метода „аксијална translација“. Процењено је да ће се у прва два корака дренирати значајније количине воде због чега је примењена *Фаза 1* експеримента (воде се сакупља у спољашњој цеви - Слика 2а). За све остале кораке је примењена *Фаза 2* експеримента (Слика 2б). На Слика 7 (горе) је приказана промена капиларног потенцијала током поменутих 13 корака, док је на Слика 7 (доле) приказана промена дрениране запремине током истог временског периода.

Удруживањем финалних вредности капиларних потенцијала за сваки корак  $h_{k,i}$  са одговарајућим вредностима запреминских влажности  $\theta$ , срачунатим на основу једначине (1), добија се крива влажности представљена на Слика 8. Пуна линија означава вредности добијене применом методе „висећа колона“, док испрекидана линија одговара методи „аксијална translација“.



Слика 7. Горе – промена доведеног капиларног потенцијала током 13 корака “Multi-step outflow” теста (преузето из [20]); Доле – запремина воде дренажна из узорка током 13 корака “Multi-step outflow” теста

Figure 7. Top – Change of the imposed suction during 13 steps of “Multi-step outflow” test (taken from [20]); Bottom – evolution of the water volume drained during the 13 steps of “Multi-step outflow” test



Слика 8. Крива влажности супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова „Green Wave“ (преузето из [20])

Figure 8. Water retention curve of the substrate used for covering green roof called “Green Wave” (taken from [20])

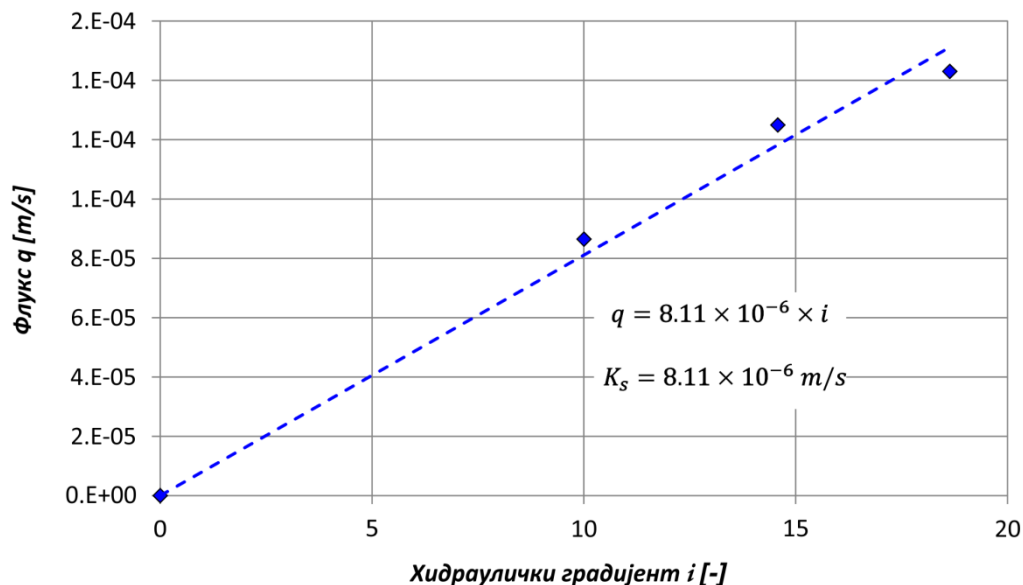
### 3.2 Крива водопродљивости

#### 3.2.1 Засићено стање

Пре спровођења „Multi-step outflow“ теста одређен је коефицијент филтрације узорка за засићено стање применом Дарсијевог експеримента са константним протоком. Константан проток је обезбеђен коришћењем Мариотове боце чија је сврха одржавање константне  $\Pi$  коте у боци. Танка цевчица која пролази кроз Мариотову боцу спроводи у њу атмосферски притисак на кату дна цевчице, при чему се обезбеђује константна  $\Pi$  кота у Мариотовој боци која је једнака висинској разлици између коте дна цевчице и врха узорка који је засићен. Све док је ниво воде у Мариотовој боци изнад коте дна цевчице, проток који излази из боце (пролази кроз узорак) је константан. Овај тест је спроведен за 3 различите  $\Pi$  коте обезбеђене вертикалним померањем положаја цевчице. Коефицијент филтрације се рачуна на следећи начин:

$$K_{s,n} = \frac{\Delta H_n}{\Delta t_n} \frac{A_{mariotte}}{A} \frac{H_{soil}}{\Delta \Pi_n} \quad n = 1, 2, 3 \quad (15)$$

Где је  $\Delta H_n$  промена нивоа [L] у Мариотовој боци,  $A_{mariotte}$  је површина попречног пресека [L<sup>2</sup>] Мариотове боце, а  $\frac{H_{soil}}{\Delta \Pi_n}$  хидраулички градијент [-]. Одређивање коефицијента филтрације на основу 3 различите вредности  $\Pi$  коте је приказано на Слика 9. Добијена вредност коефицијента филтрације супстрата је  $K_s = 8.11 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ .

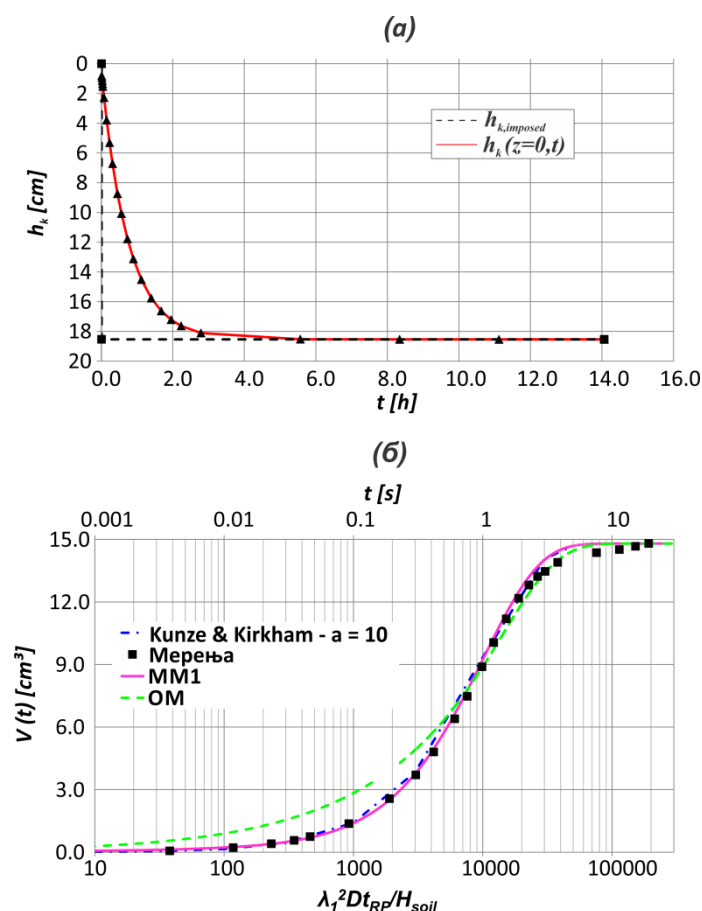


Слика 9. Резултати Дарсијевог теста са константним протоком за одређивање коефицијента филтрације супстрата (преузето из [20])

Figure 9. Results of the constant head permeability test used for determination of the substrate's saturated hydraulic conductivity (taken from [20])

#### 3.2.2 Незасићено стање

Пре одређивања криве водопродљивости супстрата, неопходно је одредити коефицијент филтрације керамичког камена  $K_{cs}$ , што је такође учињено применом Дарсијевог експеримента са константним протоком. У овом случају процедура је обављена само за једну вредност  $\Pi$  коте, при чему је добијена вредност  $K_{cs} = 4.02 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ .



Слика 10. Корак 1: а) капиларни потенцијал на дну (испрекидана линија) и на врху керамичког камена (пуна линија); б) поређење различитих инверзних метода за одређивање водопроводљивости у незасићеној средини (Кунзе и Киркхам – тачка линија, оригинална Гарднерова метода – испрекидана линија, прва „Модификована“ Гарднерова метода – пуна линија) са мереним вредностима дренаране запремине воде

Figure 10. Step 1: a) suction on the bottom (dashed line) and the top side (solid line) of the ceramic stone; b) comparison between the different inverse methods for determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soil (Kunze & Kirkham – dash-dot line, original Gardner’s method – dashed line, the first “Modified” Gardner’s method – solid line) with measured values of the drained water volume

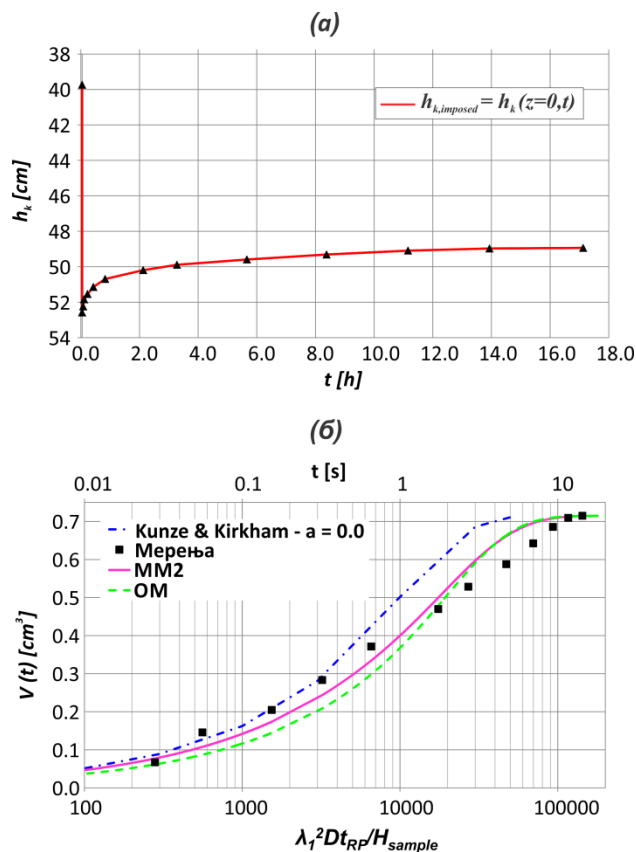
Одређивање криве водопроводљивости је спроведено користећи три методе које су у овом раду упоређене: Оригинална Гарднерова метода – OM (6), графичка метода Кунзе и Киркхама, као и две модификоване Гарднерове методе - MM1 (10) / MM2 (14). За одређивање криве водопроводљивости нису анализирани сви кораци “Multi-step outflow” теста, већ само њих 7 (кораци 1, 2, 3, 4, 8, 11, 12), с обзиром да за преосталих 6 корака диференцијални манометар није обезбедио поуздана мерења. Без обзира на то, сви кораци су коришћени за одређивање криве влажности, јер се финалне вредности капиларних потенцијала и дренараних запремина могу проверити и визуелним читавањем. Према начину спровођења експеримента, одређивање криве водопроводљивости се може поделити у 3 групе:

- i. „Близу-засићено“ стање. Овој групи припадају кораци 1 и 2, који припадају *Фази 1* експеримента, где вода дренарана из узорка прелива преко ивице унутрашње цеви у спољашњу (Слика 2а). Применом једначине (8) срачуната је промена капиларног потенцијала на врху керамичког камена (дну узорка), помоћу мерених вредности дренаране запремине  $V(t)$  и коефицијента филтрације камена  $K_{cs}$ . Затим је тако добијена крива  $\Delta h_k(z=0,t)$  трансформисана у дискретну форму која је искоришћена за примену методе MM1 (10). На Слика 10а је приказана промена  $\Delta h_k(z=0,t)$  за корак 1, док је на



Слика 10б приказано слагање 3 различите методе (ММ1 (10), ОМ (6) и Кунзе и Киркхамова метода) са мерењима добијеним током корака 1. С обзиром да Кунзе и Киркхамова графичка метода подразумева приказивање у  $\log(t)$  размери, и остале коришћене методе су приказане на исти начин.

- ii. *Значајано смањење капиларног потенцијала услед дренаране воде из узорка.* Овој групи припадају кораци 3 и 4 који уједно припадају и Фази 2 експеримента (дренирана вода се сакупља у унутрашњој цеви услед чега капиларни потенцијал опада – Слика 2б). Опадање капиларног потенцијала у овом случају је значајно (30 % у кораку 1, 15 % у кораку 2), што је веома погодно за тестирање методе ММ2. Метода ММ2 је применљива у овом случају под претпоставком да отпор камена при истицању престаје да постоји почевши од корака 3 па на даље, што је оправдана претпоставка имајући у виду да је вредност водопрводљивости за претходни корак (корак 2) веома блиска  $K_{cs}$ . На Слика 11а је приказана промена капиларног потенцијала на дну узорка (на врху камена) током корака 3, док је на Слика 11б упоређено слагање метода ММ2 (14), ОМ (6) и графичке методе Кунзеа и Киркхама.

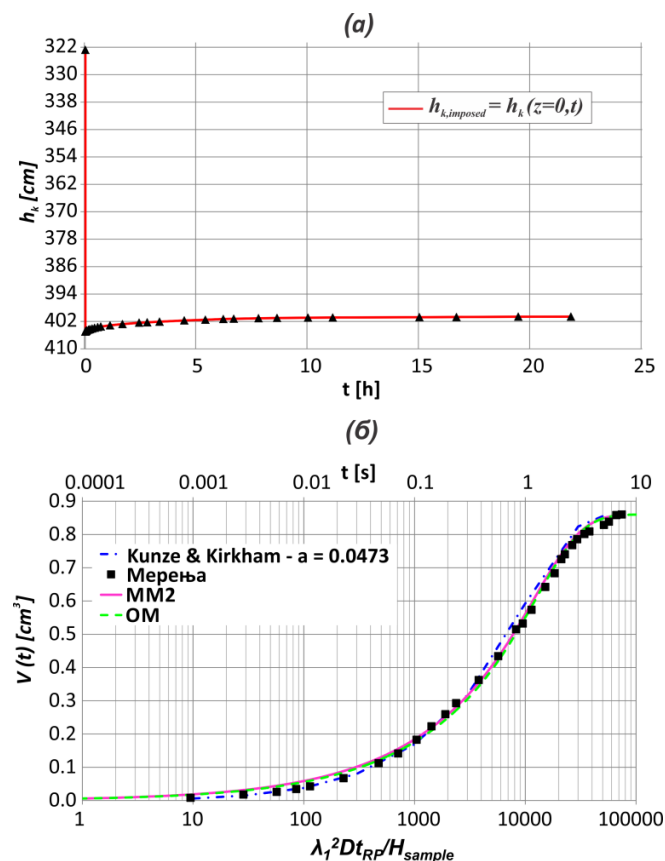


Слика 11. Корак 3: а) капиларни потенцијал на дну и врху керамичког камена је идентичан (пуна линија); б) поређење различитих инверзних метода за одређивање водопрводљивости у незасићеној средини (Кунзе и Киркхам – тачка линија, оригинална Гарднерова метода – испрекидана линија, прва „Модификована“ Гарднерова метода – пуна линија) са мереним вредностима дренаране запремине воде

Figure 11. Step 3: a) suction on the bottom and the top side of the ceramic stone is equal (solid line); b) comparison between the different inverse methods for determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soil (Kunze & Kirkham – dash-dot line, original Gardner’s method – dashed line, the first “Modified” Gardner’s method – solid line) with measured values of the drained water volume

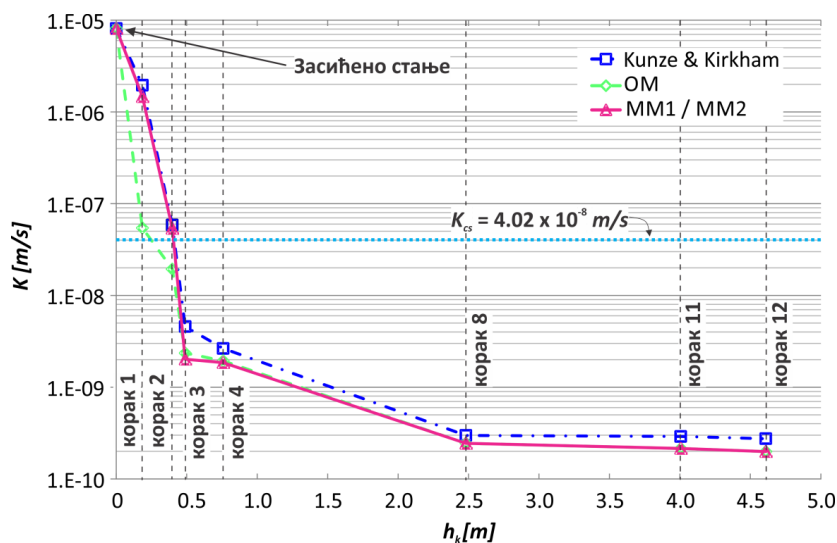
- iii. *Занемарљиво смањење капиларног потенцијала услед дренаже воде из узорка. Овој групи припадају кораци од 5 до 13, при чему су за одређивање криве водопродљивости коришћени само кораци 8, 11 и 12 из већ наведених разлога. Поменути кораци такође припадају Фази 2 експеримента, с тим да је у свим овим случајевима смањење капиларног потенцијала занемарљиво (око 5 % у односу на  $\Delta h_{init}$ ). Коришћене су исте методе као у случају описаном под ii, а резултати су представљени на примеру корака 11 (Слика 12).*

На Слика 13 су приказане 3 финалне криве водопродљивости добијене применом 3 већ поменуте инверзне методе: графичка метода Кунзе и Киркхам, ОМ (6) и ММ1 (10) / ММ2 (14).



Слика 12. Корак 11: а) капиларни потенцијал на дну и врху керамичког камена је идентичан (пуна линија); б) поређење различитих инверзних метода за одређивање водопродљивости у незасићеној средини (Кунзе и Киркхам – тачка линија, оригинална Гарднерова метода – испрекидана линија, прва „Модификована“ Гарднерова метода – пуна линија) са мереним вредностима дренаже запремине воде

Figure 12. Step 11: a) suction on the bottom and the top side of the ceramic stone is equal (solid line); b) comparison between the different inverse methods for determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soil (Kunze & Kirkham – dash-dot line, original Gardner’s method – dashed line, the first “Modified” Gardner’s method – solid line) with measured values of the drained water volume



Слика 13. Крива водопродљивости супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова “Green Wave”

Figure 13. Hydraulic conductivity curve of the substrate used for covering the green roof called “Green Wave”

## 4 Дискусија

Са Слика 8 се може видети да су делови криве влажности добијени применом „висеће колоне“ и „аксијалне транслагације“ компатибилни с обзиром да се на кривој не уочава никакав дисконтинуитет при преласку са једне методе на другу. То доказује да је апаратура добро осмишљена јер се лако адаптира на различите технике за контролесање капиларног потенцијала.

Поређењем различитих метода за одређивање криве водопродљивости, долази се до следећих закључака:

- На Слика 10б се може уочити да се метода ММ1 (10) и Кунзе и Киркхам слажу готово идентично са мереним вредностима  $V(t)$ . Слагање је значајно боље него у случају методе ОМ (6), поготову у почетним временским тренуцима који су од посебног значаја у условима блиским засићеним јер се значајна количина воде дренира управо тада. Такође, Слика 10а указује на значај отпора који керамички камен ствара при истицању из узорка, с обзиром да је отприлике 6 сати неопходно капиларном потенцијалу на дну узорка да достигне капиларни потенцијал доведен са доње стране камена. Дешавања у почетним тренуцима су нарочито битна у случајевима када се ствара отпор при истицању из узорка, јер су разлике у количини дрениране воде најочљивије управо тада.
- Са Слика 11б се може закључити да у случају значајног смањења капиларног потенцијала насталог услед истицања воде из узорка, ММ2 (15) најбоље описује мерења. То је и очекивано с обзиром да је ММ2 (15) једина метода која узима у обзир овакав тип граничног услова.
- У случају када је смањење капиларног потенцијала услед прикупљања дрениране воде у унутрашњој цеви занемарљиво (Слика 12а), може се приметити да ОМ (6) и ММ2 (10) описују мерења готово идентично (Слика 12б).

Анализирањем криве водопродљивости (Слика 13) долази се до сличних закључака. Уочљиво је да се за кораке 1 и 2 вредности водопродљивости за графичку методу Кунзе и Киркхам и ММ1 (10) готово поклапају, док су вредности добијене методом ОМ (6) за исте те кораке значајно мање. Ово је и очекивано с обзиром да ОМ (6) не узима у обзир отпорност керамичког камена. Вредности водопродљивости добијене за кораке 8, 11 и 12 су идентичне за методе ОМ (6) и ММ2 (14), што је разумљиво с обзиром да керамички камен не ствара отпор при истицању а истовремено је смањење капиларног потенцијала током трајања теста занемар-

љиво. У случају значајнијег смањења капиларног потенцијала (кораци 3 и 4) вредности водо-проводљивости добијене методом ММ2 (14) се могу сматрати најверодостојнијим с обзиром да је то једина метода која узима у обзир физику процеса.

## 5 Закључак

За експериментално одређивање хидрауличких карактеристика супстрата коришћеног за изградњу зеленог крова „Green Wave“, примењен је “Multi-step outflow” тест. Том приликом је дизајнирана специјална апаратура која се лако прилагођава различитим методама за контролисање / довођење капиларног потенцијала, тачније методама „висећа колона“ и „аксијална транслација“. Још једна битна карактеристика ове апаратуре је да се мерења количине дренаране воде обављају у различитим цевима зависно од влажности узорка. Када је узорак у влажном стању, дренарана вода се прикупља у спољашњој цеви преливањем из унутрашње чиме се доведени капиларни потенцијал одржава константним. Када је узорак у сувом стању, дренарана вода се прикупља у унутрашњој цеви, што узрокује континуално смањење капиларног потенцијала. Апаратура је дизајнирана да користи две различите цеви (мањег и већег попречног пресека) за прикупљање дренаране воде, како би се максимално искористио мерни опсег диференцијалног манометра и добила прецизнија мерења.

Крива влажности је добијена повезивањем капиларних потенцијала остварених на крају сваког корака „Multi-step outflow“ теста и одговарајућих влажности срачунатих на основу укупне запремине дренаране воде током сваког корака. Анализирањем динамике дренарања воде из узорка током сваког корака одређена је крива водопроводљивости. Ова анализа се може спровести инверзним методама, од којих су најпознатије Гарднерова метода и Кунзе и Киркхамова графичка метода. Имајући у виду да апаратура коришћена у овом експерименту диктира граничне услове у зависности од тога која цев се користи за прикупљање дренаране воде, две нове методе засноване на Гарднеровој методи су развијене (прва и друга „Модификована“ Гарднерова метода). Прва „Модификована“ Гарднерова метода је осмишљена како би се на једноставан начин узео у обзир утицај слабо пропусног керамичког камена и тако избегла употреба Кунзе и Киркхам методе која је компликована и непоуздана. Друга „Модификована“ Гарднерова метода има за циљ да се урачуна утицај континуалног смањења капиларног потенцијала услед дренараног протока. Обе новоразвијене методе су показале добро слагање са мерним вредностима дренараних запремина. Резултати показују да прва „Модификована“ Гарднерова метода даје веома сличне резултате као Кунзе и Киркхам метода (када отпор који ствара керамички камен постоји), док друга метода даје готово идентичне резултате као оригинална Гарднерова метода у случају када смањење капиларног потенцијала није значајно. У случају када је смањење значајно, друга „Модификована“ метода показује најбоље слагање са мерним запреминама дренаране воде.

Целокупна методологија приказана у овом раду омогућава ефикасно и поуздано одређивање хидрауличких карактеристика незасићеног земљишта. Такође, резултати показују да је новоразвијена методологија за одређивање водопроводљивости посебно поуздана у зони блиској засићеној, која је уједно и најзанимљивија са аспекта хидрологије.

## Литература

1. ASTM D2487-00: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
2. Brooks R.H, Corey A. T., (1964) Hydraulic properties of porous media, *Hydrology papers*, No.3.
3. Buckingham E., (1907) Studies on the movement of soil moisture, Bull 38 USDA, Bureau of Soils, Washington DC.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

4. Corey A.T., (1957) Measurement of water and air permeability in unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 21, No. 1, pp. 7–10.
5. Cui Y. J., Delage P., Alzoghbi P., (2003) Retention and transport of a hydrocarbon in a silt, *Géotechnique*, Vol. 53, No. 1, pp. 83-91.
6. Delage P., (2002) Experimental unsaturated soil mechanics: State-of-art-report, 3<sup>rd</sup> International conference on unsaturated soils, Vol. 3, Recife.
7. Eching S. O., Hopmans J. W., and Wendroth O., (1994) Unsaturated Hydraulic Conductivity from Transient Multistep Outflow and Soil Water Pressure Data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 58, pp. 687-695.
8. Fredlund D. G. and Xing A., (1994) Equations for the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, Vol. 31, pp. 521-532.
9. Fredlund D. G., Rahardjo H. and Fredlund M. D., (2012), *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering practice*, Wiley, New York.
10. Gardner W. R., (1956) Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Plate Outflow Data, *Soil Science Society Proceeding*, Vol. 20, pp. 317 - 320.
11. Klute A., (1972) The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils, *Soil Sci.*, Vol. 113, No. 4, pp. 264-276.
12. Kunze R. J. and Kirkham D., (1962) Simplified Accounting for membrane impedance in Capillary Conductivity Determinations, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 26, pp. 421-426.
13. Miller E., Elrick D., (1958) Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 22, pp. 483–486.
14. Nasta P., Huynh S., Hopmans J.W., (2011) Simplified Multistep Outflow Method to Estimate Unsaturated Hydraulic Functions for Coarse-Textured Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 75, No. 2, pp. 418-425.
15. NFP94-056, Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage, French Standard, AFNOR Editions, Paris La Défense Cedex, 1996.
16. NFP94-057, Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation, French Standard, AFNOR Editions, Paris La Défense Cedex, 1992.
17. Olsen H.W., Nichols R.W., Rice T.L., (1985) Low gradient permeability methods in a triaxial system, *Géotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 145–157.
18. Richards L.A., (1941) A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution, *Soil Sci.*, Vol. 51, No. 5, pp. 377–386.
19. Richards L.A., (1947) Pressure-membrane apparatus – construction and use, *Agric. Eng.*, Vol. 28, pp. 451–460.
20. Stanić F., Cui Y.-J., Delage P., De Laure E., Versini P.-A., Schertzer D., Tchiguirinskaia I., (2018) A device for the simultaneous determination of the water retention properties and the hydraulic conductivity function of an unsaturated coarse material; application to a green-roof volcanic substrate, *Geotechnical Testing Journal*, Accepted for publication.
21. Terzaghi K., *Erdbaumechanik auf Boden-physicalischen Grundlagen*, Deuticke, Vienna, 1925.
22. van Genuchten M. Th., (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898.
23. Vanapalli S.K., Sharma R.S., Nicotera M.V., (2008) Axis-translation and negative water column techniques for suction control, *Geotech. Geol. Eng.*, Vol. 26, pp. 645 – 660, doi:[10.1007/s10706-008-9206-3](https://doi.org/10.1007/s10706-008-9206-3).
24. Versini P.A., Gires A., Fitton G., Tchiguirinskaia I., Schertzer D., (2017) La Vague Verte de l'ENPC: un site pilote de Blue Green Dream pour évaluer les variabilité spatio-temporelles du bilan hydrologique d'une infrastructure végétale - ENPC Blue Green Wave: a Blue Green Dream pilot site to assess spatio-temporal variability of hydrological components in green infrastructures, *La Houille Blanche*, Accepted for publication.
25. XPP94-047, "Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau," French Standard, AFNOR Editions, Paris La Défense Cedex, 1998.

**IN MEMORIAM**  
**VOJISLAV VUKMIROVIĆ (1933–2017)**

Dragutin Pavlović<sup>1</sup>



Prof. dr Vojislav Vukmirović bio je jedan od najuglednijih srpskih i jugoslovenskih hidrologa i svetski priznat stručnjak u oblastima psamologije, stohastičke hidrologije i zaštite voda. Radio je u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, a potom na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu gde se u zvanjima od asistenta do redovnog profesora bavio pedagoškim, naučno-istraživačkim i stručnim radom. Bio je dugogodišnji upravnik Instituta za hidrotehniku na Građevinskom fakultetu, a penzionisao se 1999. godine. Bio je član Akademije inženjerskih nauka Srbije od njenog osnivanja.

Objavio je brojne naučne i stručne radove kojima je doprineo razvoju stohastičke hidrologije, posebno u analizi pojave ekstremnih hidroloških veličina, kao i u razvoju parametarske hidrologije, sa naglaskom na oblast regionalnih analiza hidroloških pojava. Zapaženi su njegovi radovi u oblasti izučavanja rečnog nanosa. U tim istraživanjima je saradivao sa Međunarodnom komisijom za atomsku energiju. Vodio je velike projekte, od kojih je najveći bio projekat u Brazilu, a dobijeni rezultati se i danas u svetu citiraju kao bazna istraživanja. Značajne doprinose dao je i u oblasti zaštite voda. Sa grupom saradnika je sredinom 90-tih godina XX veka formirao katastar zagađivača Srbije. Više godina je bio predsednik Jugoslovenskog društva za zaštitu voda. Pred kraj karijere bavio se istraživanjima malovodnih perioda. U ovoj oblasti sa grupom saradnika dao je doprinose koji su našu zemlju svrstali u sam svetski vrh.

Vojislav Vukmirović je rođen 19. avgusta 1933. godine u Velikom Gaju kod Vršca. Osnovnu školu pohađao je u Rači Kragujevačkoj, gimnaziju u Aranđelovcu i Beogradu, gde je maturirao 1952. godine u Četvrtoj muškoj gimnaziji, a na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu diplomirao je 1958. godine. Potom se zaposlio u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, u kome je radio do 1965. godine. Tokom 1964. godine bio je na specijalizaciji u Nacionalnoj hidrauličkoj laboratoriji u Šatuu, Francuska, na Univerzitetu u Liježu i Ganu i u Hidrauličkoj laboratoriji u Anversu, Belgija. Od 1965. prelazi na Građevinski fakultet u Beogradu, na kome ostaje sve do penzionisanja 1999. godine.

---

<sup>1</sup> Doc. dr Dragutin Pavlović, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bul. kralja Aleksandra br. 73, 11000 Beograd, dpavlovic@hikom.grf.bg.ac.rs

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Magistarsku tezu „Proučavanje kretanja vučenog nanosa pomoću radioaktivnih obeleživača” je odbranio je 1967. godine, a doktorsku disertaciju „Analiza kretanja vučenog nanosa pomoću slučajnih procesa” pod mentorstvom prof. Georgija Hajdina odbranio je 1975. godine. Doktorska disertacija prof. Vukmirovića nagrađena je od Fondacije „Jaroslav Černi” i Privredne komore Beograda za 1975. godinu. Na Građevinskom fakultetu držao je predavanja iz predmeta „Osnove hidrotehnike” i „Stohastička hidrologija” na redovnim studijama, a na poslediplomskoj nastavi iz „Kretanja nanosa” i „Stohastičke hidrologije”. Bio je mentor za izradu jednog doktorata i dvadeset magistarskih radova. Pored rada na matičnom fakultetu, držao je i predavanja na Tehničkom fakultetu u Novom Sadu, Građevinskom fakultetu u Subotici i na Arhitektonsko-građevinskom fakultetu u Banja Luci.

Živeo je u Beogradu, sa suprugom Angelinom i sinom Nenadom. Profesor Vojislav Vukmirović je preminuo iznenada, 8. januara 2017. godine, od posledica moždanog udara.

Naučno-istraživački i stručni rad profesora Vukmirovića su najtešnje međusobno isprepleteni. Bavio se raznovrsnom hidrotehničkom delatnošću: postavljao je mrežu privremenih hidroloških stanica u okolini Suve Reke, obavljao je hidrometrijska merenja, snimao profile brana i akumulacionog prostora. Radio je na Vodoprivrednoj osnovi Suve Reke i Vodoprivrednoj osnovi sliva gornjeg Ibra, zatim na projektima navodnjavanja polja u slivu Binačke Morave, polja Grabovac i Zubin potok. Autor je Hidrološke studije sliva reke Topluge, sliva gornjeg Ibra, neposrednih pritoka Velike Morave, Alapinog potoka kod Zaječara. Izradio je prvu kartu specifičnog oticanja za teritoriju SFR Jugoslavije. Za monografiju „Nomogrami za hidrauličko dimenzionisanje objekata” (sa Geza Batom i Slavoljubom Jovanovićem) sračunao je i konstruisao veliki broj nomograma. Na Velikoj Moravi kod Lugovčine sa ekipom realizovao je prva sistematska merenja vučenog nanosa mehaničkim hvatačem 1961-1962. Od 1962. primenjivao je radioaktivne izotope u hidrotehničkim istraživanjima (istraživanje kretanja vode ponornice kod Kopajkošare-Svrljig, kretanja podzemnih voda kod Radinca - Smederevska železara, kretanje vučenog nanosa na Velikoj Moravi), a 1965. sa ekipom Instituta „Jaroslav Černi” i Nuklearnog instituta iz Vinče sproveo je merenja disperzionih karakteristika Dunava na deonici Vinča – Smederevo (24 km).

Međunarodnu afirmaciju prof. Vukmirović je stekao u primeni radioaktivnih izotopa u proučavanju kretanja vučenog nanosa i dinamizma morfologije korita aluvijalnih reka. U toj oblasti je imao pionirsku ulogu te je 70-tih godina tadašnje SFRJ obezbedio ulogu jedne od vodećih zemalja u oblasti nanosa, sa terenskim istraživanjima na Dunavu (za potrebe planiranja HE Đerdap) i na drugim većim rekama. Ne samo da je rukovodio brojnim terenskim merenjima radioaktivnim obeleživačima, već je propagirao primenu složenih stohastičkih analiza za obradu rezultata. Kao vrhunski stručnjak, prof. Vukmirović je izabran za eksperta Međunarodne agencije za atomsku energiju u Beču. Bio je rukovodilac dva međunarodna istraživačka projekta između Međunarodne agencije za atomsku energiju iz Beča i Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, a to su „Korišćenje radioaktivnih obeleživača pri proučavanju kretanja vučenog nanosa” (1963-1966) i „Proučavanje disperzionih karakteristika velikih reka pomoću radioaktivnih obeleživača” (1967-1969).

Brojni njegovi radovi iz oblasti rečnog nanosa bazirani su na rezultatima terenskih merenja, obavljenih na Velikoj Moravi kod Lugovčine i Čuprije, na Vardaru kod Skoplja, Savi kod Krškog, Drini na deonici Bastasi-Višegrad, na Dunavu kod Aljmaša, Beljarice, deonici Vemelj-Petreš, Neštin-Susek, kao i u Brazilu na Lago dos Patos i na reci Ivaí. Primenjivao je standardne metode i metode sa radioaktivnim obeleživačima. Teorijske analize je proveravao i laboratorijskim merenjima u kanalima u Porto Alegreu u Brazilu i u Beogradu. Svi ovi radovi poslužili su prof. Vukmiroviću da psamološka istraživanja fundira na tri temelja: merenja na rekama, merenja u laboratoriji i na interpretaciji rezultata primenom najsloženijeg analitičkog aparata teorije slučajnih procesa. Ova istraživanja poslužila su da se reše značajni inženjerski problemi (istraživanja na Vardaru kod Skoplja - korekcija projekta regulacije reke Vardara i kroz grad Skoplje, merenja na Savi kod Krškog - zahvat vode za hlađenje nuklearne elektrane Krško, merenja na Drini - rešavanje problema plovnog puta). Zahvaljujući nabrojanim istraživanjima, magistarska teza i doktorska disertacija profesora Vukmirovića baziraju se na brojnim realnim podacima dobijenim terenskim merenjima i njihovom stohastičkom obradom, što daje poseban značaj ovim radovima.

U oblasti analize kiša jakog intenziteta uspešno je primenio metodu pikova zasnovanu na slučajnim prekidnim procesima. Metoda je bazirana na stohastičkoj analizi broja javljanja pikova, visini

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

pikova i godišnjih maksimuma. Takođe je razradio metodu sezonske analize kao bazu za složenu metodu pikova i analizirao neravnomernost kiše po vremenu.

Radovi prof. Vukmirovića iz oblasti regionalnih statističkih analiza ekstremnih hidroloških veličina (maksimalne kratkotrajne kiše, velike vode i male vode) proistekli su iz intenzivne obrade rezultata osmatranja na pluviografskim i hidrološkim stanicama u SR Jugoslaviji. Prilikom analize primenjeni su originalni postupci testiranja homogenosti podataka po prostoru i vremenu, definisanja izuzetaka, korekcije parametara funkcija raspodela i definisanja domena primene pojedinih funkcija raspodela.

Prof. Vukmirović je u oblasti zaštite voda od zagađenja dao doprinos metodologiji određivanja očekivanog nivoa zagađenja, ne samo pod lokalnim uticajem jednog zagađivača, već duž celog vodotoka u uslovima zajedničkog dejstva više nepovoljnih uticaja. Ova metodologija proizašla je iz iskustva u izradi Katastra otpadnih voda Srbije (trajala je 4 godine pod njegovim rukovodstvom). Time Katastar nije samo popis zagađivača, već definiše ravnopravne uslove ispuštanja otpadnih voda zagađivača u rečnom slivu i to kroz odgovarajuće izračunate stepene prečišćavanja, a sve u odnosu na zakonom definisane uslove. Uvodi se i uslov da se minimalni proticaj obezbeđenosti 95% mora poznavati za ceo sliv odnosno za celu Srbiju. Primenom savremenih metoda regionalnih stohastičkih analiza i koristeći raspoložive podatke (počev od „Popisa vodnih tokova Kraljevine Srba, Hrvata i Slovenaca” iz 1923. godine) uspešno je završio studiju „Male vode Srbije” 1988. godine. Studija predstavlja izuzetnu vrednost, jer metodološki sistematizovano daje brojne vrednosti za male vode na rekama Srbije i to za karakteristične merne stanice (što predstavlja retkost u praksi i u svetskim okvirima).

Prof. Vukmirović je izučavao i drugi značajan hidrološki fenomen - velike vode, i to sa šireg, regionalnog stanovišta. Ta istraživanja su prikazana 1993. godine u studiji „Velike vode na rekama u SR Jugoslaviji” (kao rezultat naučno-istraživačkog projekta finansiranog od strane Saveznog ministarstva za nauku) kao vredna podloga za izradu strategije zaštite od velikih voda. Studije o malim i velikim vodama, uz Katastar otpadnih voda Srbije, korišćene su kao bazna dokumenta za izradu Vodoprivredne osnove Srbije. Pod rukovodstvom prof. Vukmirovića i njegove metodologije urađen je i Katastar zagađivača Zetske ravnice (Crna Gora), kao bitan dokument pri izradi Vodoprivredne osnove Crne Gore.

Zapažen je istraživački doprinos prof. Vukmirovića u primeni slučajnih prekidnih procesa pri analizi nanosa i pri analizi hidroloških ekstrema. Prof. Vukmirović je definisao analitičke izraze za funkciju raspodele godišnjih ekstrema pri pojavi broja pikova sa indeksom varijabiliteta različitim od jedinice. Ovaj postupak je razrađen za velike vode (maksimumi, vreme porasta, trajanje talasa, zapremina talasa), male vode (minimumi, trajanje, deficit zapremine) i za analizu hronoloških serija protoka vučenog nanosa. Ta sva istraživanja su finalizovana u vidu studije koju je publikovao UNESCO u okviru međunarodnog hidrološkog programa - FRIEND projekat (1998).

Publicistička aktivnost prof. Vukmirovića je bogata. Objavio je oko 120 radova, od kojih 53 rada u inostranim publikacijama, u oblastima stohastičke hidrologije, psamologije, zaštite kvaliteta voda. Objavio je značajnu monografiju „Analiza verovatnoće pojave hidroloških veličina” 1990. godine, a 2005. godine nastavnu publikaciju „Primenjena hidrologija – zbirka zadataka” sa D. Pavlovićem. Za potrebe FRIEND projekta UNESCO-a i godišnjeg sastanka održanog u Beogradu 1998. godine bio je urednik monografije „Low Flows Expert Meeting”. Iznenađna smrt sprečila je prof. Vukmirovića da, kao prvi od tri autora, dočeka štampanje monografije „Hidrološke veličine i verovatnoće pojava” koja je u pripremi za štampu.

Zapažene su njegove aktivnosti u radu nacionalnih strukovnih organizacija. Od 1994. do 1996. godine bio je predsednik Jugoslovenskog društva za zaštitu voda (JDZV). Takođe je bio izabran za Zaslužnog člana JDZV. U dužim razdobljima je bio član najviših rukovodstava Hidrološkog društva Jugoslavije, Društva građevinskih inženjera i tehničara, kao i član redakcionog odbora „Građevinskog kalendara”. Više od 10 godina bio je član Nacionalnog komiteta za hidrologiju i nacionalni koordinator za male vode u okviru FRIEND projekta UNESCO-a. Godine 2000. dobio je visoko priznanje za svoj dugogodišnji svestran rad u oblasti hidrotehnike - izabran je za dopisnog člana Inženjerske akademije Jugoslavije (kasnije Akademije inženjerskih nauka Srbije).

Po odlasku u penziju 1999. godine prof. Vukmirović je nastavio u smanjenom obimu da se i dalje bavi naučnim i stručnim radom. Pružao je podršku svake vrste svojim saradnicima koji su i dalje



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

aktivni na fakultetu. Iznenada je preminuo januara 2017. godine od posledica moždanog udara. Za njim su ostali njegovi supuga Angelina (dipl. građ. inž. - hidrotehničar, penzioner Republičkog hidro-meteorološkog zavoda Srbije) i sin Nenad (dr. elektrotehnike, diplomirani fizičar, naučni savetnik u Institutu za fiziku u Zemunu). Smrt profesora Vukmirovića je veliki gubitak ne samo za porodicu već i struku, fakultetsko obrazovanje i za sve nas koji smo ga poznavali i godinama radili i stvarali sa njim.

## *Izvori:*

- Časopis Vodoprivreda 0350-0519, 36 (2004), p. 313-317
- Arhiva Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
- Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu 1846-1996 (1996), Knjiga 1- ISBN 86-80049-46-8, Knjiga 2 - ISBN 86-80049-47-6
- Internet stranica Akademije inženjerskih nauka Srbije, (na dan 23.7.2018.), [www.ains.rs/clanovi.php?tip=preminuli#133=1&slovo=0](http://www.ains.rs/clanovi.php?tip=preminuli#133=1&slovo=0)

## Indeks autora

- Anđelić, Jovana 666  
Anđelić, Lazar 433  
Anđelić, Mihailo 202  
Anđelić, Nevena 539
- Babić, Branislav 399  
Bartoš-Divac, Vladislava 71  
Batica, Jelena 185  
Batinić, Božidar 147  
Benišek, Miroslav 56  
Blagojević, Borislava 88, 631  
Blagojević, Jovan 75  
Bojović, Mileta 450  
Božić, Ivan 517  
Budinski, Ljubomir 608
- Clemens, François H.L.R. 13  
Cui, Yu-Jun 693  
Cvijanović, Nevena 272  
Cvitkovic, Mile 285
- Ćatović, Samir 71, 75, 215
- Damjanović, Vanja 177  
Dašić, Tina 385  
Delage, Pierre 693  
Despotović, Vida 215
- Đorđević, Slobodan 682  
Đorđević, Dejana 507  
Đorđević, Denisa 417  
Đukić, Aleksandar 399  
Đukić, Vesna 331, 489
- Elsayed, Hamdy 682  
Erić, Ranka 331, 489
- Gabrić, Ognjen 348, 588  
Gligorić, Dragan 576  
Gourbesville, Philippe 185  
Govedarica, Ognjen 399  
Gregorić, Enika 100
- Hadžiahmetović, Sabina 202  
van Heeringen, Klaas-Jan 202  
Hodžić, Imra 202
- Horvat, Mirjana 588  
Horvat, Zoltan 588  
Hovanj, Lajoš 238
- Idrizović, Dženita 100  
Ilić, Aleksandra 71, 166, 303, 631  
Ilić, Jovan 517  
Isić, Biljana 588  
Ivetić, Damjan 259, 285, 357, 433  
Ivetić, Marko 539  
Ivetić, Miloš 666  
Ivković, Marija 215, 507  
Ivljanin, Mira 272
- Jaćimović, Nenad 433, 480, 576  
Jakšić, Milan 576  
Jeftenić, Goran 600  
Jelovac, Milena 71  
Jovanović, Miodrag 1
- Kapor, Radomir 112, 125, 135, 530  
Kolaković, Srđan 600  
Kostić, Mladen 272  
Kovačević, Zlatan 464  
Krstić, Dušan 464  
Kuzmanović, Vladan 553, 564
- Langeveld, Jeroen G. 13  
Ljubičić, Robert 31, 373  
de Louw, Perry G.B. 224  
Lučić, Milena 530
- Marinković, Zoran 464  
Marjanović, Srđan 71, 215  
Marković, Đurica 317  
Matović, Gordana 100  
Milašinović, Miloš 44, 480  
Milovanović, Bojan 553, 564  
Milovanović, Marija 373  
Milutinović, Rade 654  
Mladenović, Dimitrije 112, 125, 135, 272
- Nadeždić, Milica 450
- Ostojić, Aleksandar 464  
Ostojić, Željka 417

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

- Palmar, Bojan 450  
Petković, Aleksandar 517  
Plavšić, Jasna 75, 153, 250, 317, 331, 348,  
373  
Počuća, Vesna 100  
Pokorni, Boris 303  
Praštalo, Petar 88  
Prodanović, Dušan 44, 250, 259, 285, 357,  
433, 480  
Prohaska, Stevan 71, 166, 177, 303, 412
- Radivojević, Dragan 631  
Radović, Goran 643  
Radović, Igor 600  
Randelović, Anja 480  
Rosić, Nikola 44, 272
- Salvai, Andrea 600  
Savić, Dragan 399, 682  
Savić, Ljubodrag 31, 112, 125, 135, 530, 553,  
564  
Schuurmans, Hanneke 202  
Simončić, Victor 202  
Spasojević, Miodrag 450, 464  
Stanić, Filip 693
- Stanić, Nikola 13, 224  
Starinac, Danica 112, 125, 135  
Stipić, Danilo 608  
Stipić, Matija 620  
Stojadinović, Luka 259, 357  
Stojnić, Ivan 507  
Sudar, Tamara 385
- Tanasković, Miroslav 450  
Tašin, Slobodan 620  
Todorović, Andrijana 75, 153, 373  
Topalović, Žana 88
- Vojt, Predrag 112, 125, 135, 250, 272, 553,  
564
- Zindović, Budo 31, 44, 553, 564  
Zlatanović, Nikola 177
- Živadinović, Predrag 215