

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Љуба Дивца

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 292/11-25 од 04.07.2025. године именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Љуба Дивца, маг. инж. грађ, под насловом:

**ПРИЛОГ АНАЛИЗИ КРИТЕРИЈУМА И МЕТОДА ЗА ОЦЕНУ СИГУРНОСТИ
НАСУТИХ БРАНА УЗ ИНТЕГРАЦИЈУ ПОДАТАКА ОСМАТРАЊА**

Докторска дисертација је написана на српском језику. Наслов дисертације на енглеском језику гласи:

**CONTRIBUTION TO THE CRITERIA AND METHODS FOR THE EMBANKMENT DAMS
SAFETY EVALUATION INCLUDING THE INTEGRATION OF MONITORING DATA**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1 ХРОНОЛОГИЈА ОДОБРАВАЊА И ИЗРАДЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

- 01.10.2015. године кандидат је уписао Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Грађевинарство.
- 15.12.2023. године на седници Катедре за грађевинску геотехнику кандидат је изложио предложену тему докторске дисертације под насловом "Прилог анализи критеријума и метода за оцену сигурности постојећих насутих брана уз интеграцију података осматрања из периода експлоатације". Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила је тему докторске дисертације и предложила кандидату да тему пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду.
- 18.12.2023. године кандидат је пријавио тему докторске дисертације Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду.
- 21.12.2023. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду именovalo је Комисију за писање извештаја о оцени научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: доц. др Милош Марјановић, доц. др Сања Јоцковић, проф. др Мирослав Живковић (Одлука бр. 292/3 од 25.12.2023).
- 01.02.2024. године Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду прихватило је извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације и своју одлуку доставило Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на давање сагласности (Одлука бр. 292/5-23 од 02.02.2024.).
- 06.02.2024. године Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом "Прилог анализи критеријума и метода за оцену сигурности насутих брана уз интеграцију података осматрања" (Одлука бр. 61206-425/2-24 од 06.02.2024.).

- 20.06.2025. кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.
- На седници одржаној 03.07.2025. године (Одлука бр. 292/11-25 од 04.07.2025), Наставно-научно веће Грађевинског факултета Универзитета у Београду именovalo је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:
 - о др Владан Кузмановић, редовни професор, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - о др Милош Марјановић, доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду,
 - о др Мирослав Живковић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

1.2. НАУЧНА ОБЛАСТ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Тема докторске дисертације припада научној области Грађевинарство и ужој научној области Механика тла, фундирање и геоеколошко инжењерство, које су дефинисане Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређена је др Сања Јоцковић, доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Љубо Д. Дивац рођен је 27. априла 1990. године у Београду, где је завршио основну школу „Бранко Радичевић“ као носилац дипломе „Вук Караџић“, а потом и IX београдску гимназију „Михаило Петровић Алас“. Током школовања је постигао запажене резултате на такмичењима из математике и историје, укључујући учешћа на републичким нивоима. Завршио је основне (2009–2014) и мастер студије (2014–2015) на смеру за конструкције Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Докторске академске студије на истом факултету уписао је школске 2015/16. године. Током докторских студија објавио је више стручних и научних радова, укључујући шест публикација на домаћим и међународним конференцијама, као и један рад категорије M21 у међународном часопису са SCI листе.

Од јануара 2016. године запослен је у компанији Gruner Stucky Ltd, која је специјализована за пројектовање и пружање консултантских услуга у области хидротехничких система, са посебним фокусом на бране и хидроелектране. У свом досадашњем ангажману континуирано се бави анализом понашања и проценом сигурности геотехничких система, пре свега насутих и бетонских брана, али и других конструкција као што су тунели и потпорни зидови. Бавио се решавањем великог броја различитих инжењерских проблема као што су: филтрациони и напонско-деформацијски прорачуни насутих брана, прорачуни стабилности насутих брана, прорачуни стабилности бетонских гравитационих брана, димензионисање примарне и секундарне подграде различитих врста тунела, прорачуни потпорних конструкција (стабилност и димензионисање арматуре), прорачуни стабилности косина (од грануларних или стенских материјала). Истраживачки рад у оквиру докторских студија уско је повезан са професионалном праксом и усмерен на област сигурности постојећих насутих брана у условима реалне експлоатације.

Стручни испит у Републици Србији положио је у августу 2019. године. Поседује лиценцу 310 за одговорног пројектанта грађевинских конструкција објеката високоградње, нискоградње и хидроградње. У мају 2023. године положио је стручни испит у Републици Српској (Босна и Херцеговина). Члан је Инжењерске коморе Србије.

Паралелно са општим образовањем стекао је основно и средње музичко образовање, свирајући клавир у музичким школама „Станислав Бинички“ и „Коста Манојловић“. Од 2012. године студира клавир на Факултету музичке уметности у Београду, на одсеку за клавир, где је завршио основне (2016), мастер (2018) и специјалистичке студије (2020), а тренутно је студент докторских студија. Као пијаниста наступао је у реномираним концертним салама у Београду као што су велика сала Коларчеве задужбине, свечана сала Скупштине града Београда, сала Београдске филхармоније и галерија Српске академије наука и уметности. Освојио је бројне награде на домаћим и међународним такмичењима, међу којима се издвајају прве награде на

међународним такмичењима у Шапцу, Сремској Митровици, Бону, Салцбургу и Загребу. Године 2019. наступио је као солиста у Гершвиновој „Рапсодији у Плавом“ са оркестром Млади Симфоничари, а 2020. године добио је награду „Невена Поповић“ за најзначајније уметничко остварење на Факултету музичке уметности.

Ожењен је, отац једног детета. Живи и ради у Београду.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. САДРЖАЈ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација је написана на српском језику. Садржи 197 страна, од којих је основни текст на 161 страни. Дисертација садржи 157 слика и 18 табела. На почетку су дате изјаве захвалности, посвета, резиме на српском и енглеском језику, као и садржај дисертације са листама слика и табела.

Основни текст дисертације је подељен у седам поглавља:

1. Увод
2. Основне поставке о сигурности насутих брана
3. Сажет приказ прорачунских метода потребних за анализу сигурности
4. Предлог методе за пробабилистички прорачун сигурности бране уз интеграцију података осматрања
5. Демонстрација предложене методологије на једноставним примерима
6. Студија случаја: Брана Првонек
7. Завршна разматрања

У списку коришћене литературе налазе се 122 референце. Након листе референци приложена су три анекса у којима су изложене теоријске основе моделирања физичких процеса, преглед основних појмова теорије вероватноће, као и оригинални рачунарски програми које је кандидат написао и користио за нумеричку анализу у оквиру дисертације. Након тога изложена је кратка биографија кандидата.

Дисертација је технички обликована према упутствима Сената Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије дисертације. На крају дисертације налазе се обавезни обрасци: изјава о ауторству, изјава о истоветности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу.

2.2. КРАТАК ПРИКАЗ ПОЈЕДИНАЧНИХ ПОГЛАВЉА

Дисертација се састоји од седам поглавља и три прилога.

У првом, уводном поглављу, приказани су предмет, циљеви, задаци и садржај истраживања.

У другом поглављу разматрају се узроци и механизми рушења насутих брана, а затим се уводи појам сигурности уз дефинисање критеријума за њену процену. Посебан нагласак стављен је на значај техничког осматрања као саставног дела управљања ризиком, као и на формулацију граничних стања која ће бити примењена у каснијим анализама.

У трећем поглављу представљен је скуп нумеричких алата неопходних за анализу сигурности. Први део обрађује физички засноване моделе и прорачуне методом коначних елемената, док се други део бави методама поузданости коришћеним у истраживању.

У четвртном поглављу изложена је методологија за пробабилистичку процену сигурности насуте бране уз интеграцију података осматрања. Ово је централно поглавље дисертације. Дате су све потребне математичке формулације праћене дискусијом која се односи на практичну примену предложеног приступа. Предложено је девет различитих агрегатора који обједињују парцијалне тежинске коефицијенте, при чему су анализирани утицаји избора агрегатора на конвергенцију резултата анализе.

У петом поглављу, предложена методологија је проверена на два једноставна примера. Први се односи на процену сигурности референтног узорка у консолидованом дренажном триаксијалном тесту заустављеном пре достизања вршне чврстоће узорка. Други пример разматра хидрауличку нестабилност тла услед појаве флуидизације настале вертикалним кретањем воде кроз хоризонтално услојено тло.

У шестом поглављу приказана је студија случаја на насутују брани Првонек ради потврде методологије у реалним условима. Најпре су дате основне карактеристике бране, преглед података осматрања и опис модела заснованог на методи коначних елемената (МКЕ), након чега су представљени карактеристични резултати МКЕ анализа. Представљен је поступак којим је трениран сурогат модел и урађена је његова верификација. Затим је урађена глобална анализа осетљивости методом Соболева. Коначно, спроведена је пробабилистичка анализа која узима у обзир утицај варијабилности улазних параметара и података осматрања. Анализа осетљивости и пробабилистичке анализе рађене су на сурогат моделу.

У седмом поглављу донети су закључци који сумирају основне налазе целокупног истраживања, као и смернице за примену предложене методологије. Поред тога, предложени су правци будућих истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. САВРЕМЕНОСТ И ОРИГИНАЛНОСТ

Докторска дисертација „Прилог анализи критеријума и метода за оцену сигурности насутих брана уз интеграцију података осматрања” представља значајан допринос веома актуелној области управљања и одржавања постојећих хидротехничких објеката од насутих материјала. Оригиналност рада огледа се првенствено у развоју и примени методологије која интегрише податке осматрања (мониторинга) брана у стохастички оквир процене сигурности. Кандидат је предложио иновативан приступ заснован на квази-бајесијанској Монте Карло анализи, где се резултати великог броја симулација пондеришу на основу сличности са стварним понашањем брана забележеним путем осматрања. На тај начин је класична Монте Карло метода унапређена оригиналном техником ажурирања исхода, што омогућава директно укључивање стохастички третираних података осматрања у анализу и тиме повећава поузданост и информативну вредност процене сигурности.

Поред тога, у оквиру рада се обједињује употреба тродимензионалног МКЕ модела са нелинеарним конститутивним понашањем материјала и сурогат моделирања заснованог на машинском учењу, као и различитих нумеричких техника заснованих на теорији поузданости у један синтетизован оквир. Такође, кандидат је развио веома ефикасне рачунарске програме за аутоматизацију целокупне процедуре прорачуна. Овако свеобухватан приступ резултирао је методологијом усаглашеном са најсавременијим инжењерским тенденцијама, која значајно унапређује постојеће приступе у процени сигурности насутих брана.

3.2. ОСВРТ НА РЕФЕРЕНТНУ И КОРИШЋЕНУ ЛИТЕРАТУРУ

Током израде докторске дисертације кандидат је проучио релевантну литературу и навео 122 референце које су релевантне за област дисертације. Цитиране референце обухватају широк дијапазон тема обрађених у дисертацији и чине одличну основу за будући рад у области дисертације. Кандидат се адекватно позивао на постојећу литературу током израде рада.

3.3. ОПИС И АДЕКВАТНОСТ ПРИМЕЊЕНИХ НАУЧНИХ МЕТОДА

Коришћени научни приступ базиран на концепту "нумеричког експеримента" је веома иновативан и свеобухватан и самим тим у потпуности испуњава захтеве докторске дисертације. У дисертацији је примењен низ савремених научних метода, адекватно одабраних за испуњење постављених циљева истраживања. Основу поступка чине пробабилистичка Монте Карло анализа и физички заснован МКЕ тродимензионални модел који описује филтрационо и напонско-деформацијско понашање у телу бране. Да би се убрзао прорачун и омогућило

извођење великог броја симулација, коришћени су сурогат модели засновани на XGBoost алгоритму машинског учења. Конкретно, обучен је сурогат модел који апроксимира резултате тродимензионалне МКЕ анализе са високим степеном тачности, што је омогућило драстично смањење рачунарских захтева без великог губитка прецизности. Сурогат модел је трениран на основу резултата пажљиво одабраних 2000 симулација (улазни простор узоркован методом Latin Hypercube Sampling) на основном МКЕ моделу, при чему је за сваки узоркован скуп параметара спроведена процена сигурности бране коришћењем МКЕ модела и методе редукције смичуће чврстоће (SSR метода).

Монте Карло пробабилистичка анализа рађена је на сурогат моделу са 107 симулација. Добијени излазни резултати свих симулација даље су статистички обрађени ради процене вероватноће отказа и других мера поузданости конструкције. Поред тога, спроведена је и глобална анализа осетљивости методом Собоља, којом је квантификован утицај појединачних улазних параметара (и њихових интеракција) на варијабилност резултата. Ова анализа је омогућила идентификацију најзначајнијих фактора који утичу на сигурност бране. Коначно, интеграција података осматрања у оквир пробабилистичке анализе реализована је путем предложеног приступа ажурирања, где су симулације пондерисане у складу са поклапањем њихових резултата са стварним осмотреним понашањем бране.

Наведене методе су међусобно конзистентно повезане и омогућиле су да се на научно утемељен и систематичан начин квантификује ниво сигурности бране уз истовремено уважавање и варијабилности улазних параметара и информација добијених техничким осматрањем конструкције.

3.4. ПРИМЕНЉИВОСТ ОСТВАРЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Предложена методологија има потенцијалну практичну вредност и применљивост у инжењерској пракси управљања сигурношћу брана. Методологија се може користити за оптимизацију програма одржавања, техничког осматрања и управљања сигурношћу насутих брана. У савременим условима, када је потенцијал за изградњу нових брана у западном свету готово исцрпљен (нарочито у Европи), а све већи број постојећих објеката захтева систематско одржавање, од пресудне је важности унапредити методе и критеријуме који се односе на осматрање, управљање и очување постојеће хидротехничке инфраструктуре. Предложени оквир омогућава инжењерима да, кроз оквир пробабилистичких анализа на физички заснованим моделима уз интеграцију података осматрања, реалније оцене тренутно стање сигурности насутих брана и квантитативно изразе ниво ризика. Ово има директну примену при планирању интервенција и санација, добијају се поузданији индикатори сигурности на основу којих се могу благовремено предузети мере за унапређење безбедности објекта. На тај начин, резултати дисертације доприносе успостављању савременијег, проактивног система управљања сигурношћу брана, у којем се одлуке доносе на основу поузданих квантитативних показатеља добијених интеграцијом теоријских модела и реалних података. Предложени приступ је довољно флексибилан да се уклопи у постојеће инжењерске оквире за процену ризика, али може послужити и као основа за развој унапређених стандарда и норматива у области сигурности насутих брана.

3.5. ОЦЕНА ДОСТИГНУТИХ СПОСОБНОСТИ КАНДИДАТА ЗА САМОСТАЛНИ НАУЧНИ РАД

Чланови Комисије сматрају да је кандидат стекао значајну самосталност у научном раду кроз процес припреме и израде докторске дисертације, полагањем испита на докторским академским студијама и објављивањем научних радова. Кандидат је радио у међународној научној заједници, одабрао је савремене методе, унапредио ове методе и значајно допринео напретку заједнице. Кандидат је кроз свој рад такође показао способност за критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у поређењу са постојећим. Све наведено потврђује научну зрелост и изузетан истраживачки потенцијал кандидата у области грађевинске геотехнике.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС ДИСЕРТАЦИЈЕ

4.1. ПРИКАЗ ОСТВАРЕНИХ НАУЧНИХ ДОПРИНОСА

Основни научни доприноси у дисертацији су:

1. Предложена је методологија за интеграцију података осматрања у оквиру Монте Карло анализе која подразумева ажурирање исхода појединачних симулација, чиме се резултати анализе прилагођавају стварно осмотреном понашању конструкције.
2. Развијен је комплетан нумерички оквир за стохастичку процену сигурности насутих брана, који обједињује напредне нумеричке методе из теорије поузданости, МКЕ моделе и статистички обрађене податке осматрања у јединствен процес.
3. Предложена методологија потврђена је применом 3Д МКЕ модела са нелинеарним конститутивним моделима материјала, који је способан да реално симулира понашање насуте бране до достизања граничних стања.
4. Примењени су XGBoost сурогат модели ради убрзања прорачуна, при чему је машинским учењем изграђен сурогат модел који верно апроксимира резултате сложених МКЕ анализа, омогућивши ефикасно извођење великог броја симулација.
5. Развијени су алати у програмском језику Python за аутоматизацију комплетног поступка анализе, укључујући повезивање генератора узорака, сурогат модела, статистичке обраде резултата и ажурирања исхода на основу података осматрања.

4.2. КРИТИЧКА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Кључни резултати спроведеног истраживања показују да укључивање података осматрања може значајно да промени и побољша оцену сигурности бране у односу на традиционалне приступе. Применом предложене пондерисане анализе, добијени су показатељи поузданости који боље одражавају стварно стање конструкције на терену, уз смањену статистичку распрострањеност резултата. Конкретно, у студији случаја насуте бране Првонек забележено је значајно повећање индекса поузданости конструкције након интеграције података осматрања у анализу (са вредности ~ 2.7 на ~ 9.7), чиме је јасно указано да је брана у посматраном периоду знатно безбеднија него што би класичне пробабилистичке анализе сугерисале. Овај метод омогућио је да рачунско понашање бране (порни притисци) буде усаглашеније са измереним вредностима, што даје поузданију основу за инжењерске закључке о стању објекта. Поред тога, анализе осетљивости су идентификовале факторе који највише утичу на стабилност, чиме је потврђено да предложени модел исправно препознаје критичне параметре и процесе у систему. Свеукупно, у дисертацији је приказан један целовит, интегрисан и ефикасан оквир за процену сигурности брана, који спаја теоријске принципе и емпиријске податке, доприносећи и развоју науке и унапређењу праксе у овој области. Истовремено, резултати истраживања отварају нове правце за даљи рад. Потребно је додатно истражити оптималне приступе за одређивање статистичких расподела које описују појединачне податке осматрања, водећи рачуна о просторном положају инструмената у телу бране. Такође, требало би истражити појединости везане за применљивост методологије на прорачунске ситуације за које не постоје подаци осматрања. На тај начин би се надоградио предложени приступ и омогућила његова шира примена у савременој пракси управљања ризиком код хидротехничких објеката.

4.3. ВЕРИФИКАЦИЈА НАУЧНИХ ДОПРИНОСА

Током свог истраживања, кандидат је објавио следеће радове из области сигурности брана:

Категорија M21:

1. **Divac, L.**, Pujević, V., Divac, D., & Marjanović, M. (2025). Methodology for Implementing Monitoring Data into Probabilistic Analysis of Existing Embankment Dams. *Applied Sciences*, 15(12), 6786. <https://doi.org/10.3390/app15126786>

Категорија М33:

1. **Divac, L.**, Radovanović, S., & Mirković, N. (2017). Theoretical basis of the substructure method for the dynamic earthquake analysis of arch dams. *Proceedings of the 17th International Symposium of the Macedonian Association of Structural Engineers (MASE)*, Ohrid, North Macedonia, 387-396
2. **Divac, L.**, Radovanović, S., & Mitković, P. (2017). Analysis of hydrodynamic pressures on arch dams using the substructure method. *Proceedings of the 17th International Symposium of the Macedonian Association of Structural Engineers (MASE)*, Ohrid, North Macedonia, 397–406

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и анализе приложене докторске дисертације, испуњености задатака и циљева истраживања, примењене методологије, научног доприноса и добијених резултата, може се констатовати да докторска дисертација под насловом ПРИЛОГ АНАЛИЗИ КРИТЕРИЈУМА И МЕТОДА ЗА ОЦЕНУ СИГУРНОСТИ НАСУТИХ БРАНА УЗ ИНТЕГРАЦИЈУ ПОДАТАКА ОСМАТРАЊА представља значајан и оригинални научни допринос и потврду да је кандидат **Љубо Дивац, маг. инж. грађ.** способан за самостални научно-истраживачки рад.

На основу напред изнетог, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација ПРИЛОГ АНАЛИЗИ КРИТЕРИЈУМА И МЕТОДА ЗА ОЦЕНУ СИГУРНОСТИ НАСУТИХ БРАНА УЗ ИНТЕГРАЦИЈУ ПОДАТАКА ОСМАТРАЊА кандидата Љуба Дивца, маг. инж. грађ. прихвати, изложи на увид јавности и упути Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање сагласности за јавну одбрану докторске дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Владан Кузмановић, редовни професор
Грађевински факултет Универзитета у Београду

.....
др Милош Марјановић, доцент
Грађевински факултет Универзитета у Београду

.....
др Мирослав Живковић, редовни професор
Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу