

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Грађевински факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Роберта Љубичића, маг. инж. грађ.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду донетој на седници одржаној 16.09.2021. године (одлука бр. 188/14-19), именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Роберта Љубичића, маг. инж. грађ. под насловом:

СТРУЈАЊЕ У УМИРУЈУЋИМ БАЗЕНИМА СТЕПЕНАСТИХ БРЗОТОКА

Докторска дисертација је написана на српском језику у складу са важећим Правилником о докторским студијама на Универзитету у Београду. Наслов дисертације енглеском језику гласи:

STILLING BASIN FLOW FOR STEPPED SPILLWAYS

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

Кандидат Роберт Љубичић, маг. инж. грађ. уписао је докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду школске 2015/16. године. На седници Катедре за хидротехнику и водно еколошко инжењерство одржаној дана 16.05.2019. године, кандидат Роберт Љубичић, маг. инж. грађ. је пред члановима Катедре јавно изложио предлог теме докторске дисертације под насловом „Струјање у умирујућим базенима степенастих брзотока“ (енгл. „Stilling basin flow for stepped spillways“). Након излагања кандидата и давања одговора на постављена питања, Катедра је једногласно донела одлуку да се Приступни рад прихвати и кандидату омогући пријава теме докторске дисертације.

На седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 27.06.2019. именована је Комисија за писање извештаја о оцени подобности теме и кандидата (одлука 188/3-19 од 28.06.2019.). Позитиван извештај Комисије за пријем теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 12.09.2019. године (одлука 188/5-19 од 16.09.2019.), а за ментора је именован редовни проф. др Љубодраг Савић, дипл. грађ. инж., са Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 30.09.2019. године дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Роберта Љубичића, маг. инж. грађ., (одлука бр. 61206-3722/2-19 од 30.09.2019.). Кандидат је завршену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 10.09.2021. године. Одлуком

Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду донетој на седници одржаној 16.09.2021. године (одлука бр. 188/14-19 од 21.09.2021.), именована је Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Роберта Љубичића, маг. инж. грађ.

1.2. Научна област дисертације

Тема дисертације спада у научно поље техничко-технолошких наука. Научна област је Грађевинарство, а уже научне области су: (1) Механика нестишљивих флуида и хидраулика и (2) Хидротехничке конструкције и објекти, за које је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду. Ментор је редовни проф. др Љубодраг Савић, дипл. грађ. инж., са Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Именовани ментор испуњава важеће критеријуме Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Роберт Љубичић, маг. инж. грађ., рођен је 17.05.1991. године у Ваљеву. Основну школу „Милан Муњас“ завршио је у Убу 2006. године као носилац дипломе „Вук Караџић“. Средње образовање стекао је у гимназији „Бранислав Петронијевић“ у Убу и у XII београдској гимназији, такође као носилац дипломе „Вук Караџић“.

Грађевински факултет Универзитета у Београду уписује школске 2010/2011. године на одсеку за грађевинарство, а након три семестра студије наставља на модулу за хидротехнику и водно еколошко инжењерство. Основне академске студије завршава у току школске 2013/2014. године са највећом просечном оценом на модулу од 9,39/10 (девет и 39/100) и са дипломским радом под називом „Генерални пројекат бране од ваљаног бетона Лопатница на реци Лопатници“, који је одбранио са оценом 10 (десет) и стекао звање дипломирани инжењер грађевинарства. У току похађања основних академских студија кандидат је примао стипендију Министарства просвете Републике Србије.

Магистар академске студије уписао је школске 2014/2015. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду на модулу за хидротехнику и водно еколошко инжењерство. У току магистар студија кандидат је остварио просечну оцену 10/10 (десет и 00/100). Магистар академске студије завршио је 2015. године одбраном магистар рада под називом „Прорачун умирујућих базена степенстих брзотока са примером на брани Ариље“, за који је школске 2014/2015. године награђен од стране Катедре за хидротехнику и водно еколошко инжењерство.

Докторске академске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду започиње школске 2015/2016. године. Све испите предвиђене планом и програмом докторских студија успешно је положио са просечном оценом 10 (десет). У фебруару 2016. године заснива радни однос на Грађевинском факултету у звању асистента-студента докторских студија за уже научне области: (1) Механика нестишљивих флуида и хидраулика и (2) Еколошко инжењерство. Поред обавеза у настави, ангажован је и као истраживач на научном пројекту технолошког развоја TR37010 „Системи за одвођење кишних вода као део урбане и саобраћајне инфраструктуре“ у периоду од 2016. до 2021. године, као и на пројекту COST CA16219 HARMONIOUS – „Harmonization of UAS techniques for agricultural and natural ecosystems monitoring“ у периоду од 2019. године. Као први аутор или коаутор објавио је пет радова у часописима са SCI листе, као и већи број радова у домаћим часописима, на међународним и домаћим научним и стручним скуповима. Течно говори и пише енглески језик.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Струјање у умирујућим базенима степенстих брзотока“ написана је на српском језику. Дисертација садржи 8 (осам) поглавља:

1. Увод;
2. Преглед литературе;
3. Физички хидраулички модел;
4. Методологија;
5. Резултати и дискусија;
6. Закључци;
7. Предлози будућих истраживања;
8. Литература.

Дисертација садржи резиме (на српском и енглеском језику) и биографију кандидата. Текст дисертације написан је на 259 страна. Дисертација садржи 167 слика (145 у главном тексту и 22 у прилозима) и 33 табеле. Списак литературе садржи 194 референце.

Структура дисертације и текст су у потпуности обликовани према важећем Правилнику о докторским студијама на Универзитету у Београду из 2019. године, и према посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије дисертације садржаним у документу „Упутство о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду“.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом, уводном, поглављу је представљен предмет истраживања. У наставку поглавља је јасно представљен основни циљ истраживања – испитивање струјања и дисипације механичке енергије приликом формирања хидрауличног скока у умирујућим базенима који се налазе низводно од степенстих брзотока. Циљ истраживања резимиран је хипотезом да постојеће препоруке за прорачун и димензионисање, базиране на препорукама које су изведене за базене глатких брзотока, не обезбеђују оптималну дисипацију енергије у случају степенстих брзотока. У складу са том хипотезом, поглавље је закључено таксативним дефинисањем циљева истраживања и прегледом садржаја дисертације по поглављима.

Друго поглавље дисертације садржи детаљан преглед литературе, који је закључен идентификацијом уочених непознаница и недостатака у истој, а у вези са темом истраживања. Преглед литературе је подељен у пет главних одељака:

1. Преглед литературе у вези са хидрауличком скоком у умирујућим базенима хоризонталног дна;
2. Преглед литературе у вези са хидрауличком скоком у умирујућим базенима нагнутог дна;
3. Преглед метода у вези са мерењем хидрауличких величина од значаја за истраживање – првенствено дубине и брзине струјања;
4. Преглед литературе у вези са ефектима размере на физичким хидрауличком моделима;
5. Резиме уочених недостатака у вези са темом овог истраживања.

Треће поглавље (*Физички хидраулички модел*) тиче се описа физичког хидрауличног модела и мерне опреме. За потребе истраживања коришћен је физички хидраулички модел у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику и водно еколошко инжењерство. Део модела од највећег значаја за испитивање састоји се од прелива практичног профила, степенстог брзотока и умирујућег базена промењивог нагиба дна. За потребе остваривања циљева истраживања, предвиђено је мерење дубина у хидрауличком каналу и брзина струјања непосредно низводно од ваљка хидрауличног скока, те ово поглавље садржи и описе коришћене мерне опреме. За мерење хидрауличких величина примењене су савремене бесконтактне методе мерења засноване на техникама обраде слика из видео записа експеримента. У току мерења коришћена је дигитална камера комерцијалног квалитета, док је у циљу избора мерне равни приликом мерења брзина коришћен ласер у комбинацији са нарочитим сочивом које линијски

сноп претвара у равански. На крају поглавља дефинисани су протоци и одговарајући гранични услови који су коришћени у наставку дисертације.

У наредном, четвртном, поглављу (*Методологија*) приказани су детаљни описи поступака мерења дубина и брзина течења путем техника обраде слика. Због улоге које у тим поступцима имају дигиталне камере, у поглављу је посебна пажња посвећена одређивању унутрашњих параметара саме камере (у вези са конструкцијом апарата камере) и њених спољашњих параметара (у вези са положајем камере у односу на област мерења). Детаљним анализама параметара камере утврђено је да је она адекватног квалитета израде за овакав тип истраживања. Након тога, детаљно су представљене методе одређивања подужног профила дубина у каналу, и метод за мерење брзина у вертикалном подужном раванском пољу.

Метода за мерење дубина у каналу заснована је на детекцији слободне површине у призматичном хидрауличком каналу, односно границе између воде и зида хидрауличког канала насупрот позицији камере. Сам поступак представља спрегу два поступка: (1) детекције хоризонтално пружајуће линије високих градијената на слици и (2) коришћења резултата сегментације слике путем нарочито конструисане дубоке неуронске мреже. Поменуте методе садејствују на такав начин да омогућавају поуздану и ефикасну процену линије слободне површине дуж зида хидрауличког канала, и то са високом просторном и временском резолуцијом. Описана метода развијена је управо за потребе овог истраживања и представља значајан допринос у области бесконтактног мерења хидрауличких величина.

Поступак за мерење брзина, описан у четвртном поглављу, заснива се на методи „ласер PIV“ (енгл. *particle image velocimetry*), која омогућава мерење брзина на принципу детекције трасерских честица суспендованих у воденој струји, и процени њиховог помераја у интервалу између две узастопне слике. Комбинација ласерског снопа и сочива омогућава формирање танке, ласером осветљене равни, односно избор мерне равни у хидрауличком каналу. Суспендоване честице присутне у воденој струји ефикасно расипају ласерску светлост услед чега је њихова идентификација на сликама знатно олакшана. У овом одељку четвртог поглавља приказане су и анализе у вези са примењивошћу различитих поступака за процену интензитета вртлога на основу резултата мерења брзина путем PIV методе, који су значајни за процену резидуалне количине механичке енергије низводно од хидрауличког скока.

У петом поглављу (*Резултати и дискусија*) представљени су подаци до којих се дошло применом методологија описаних у поглављу четири. Поглавље је подељено на 4 главна одељка: (1) резултати у вези са базенима хоризонталног дна, (2) резултати у вези са базенима дна негативног нагиба, (3) представљање поступка за одређивање основних параметара струјања у базенима негативног нагиба дна и (4) резиме поглавља.

Први одељак поглавља пет представља резултате мерења дубина и брзина у хоризонталним базенима са и без унутрашњих стабилизационих. У истраживању је испитано неколико различитих величина стабилизационих елемента, а анализиран је и утицај положаја и распореда елемената на ефикасност дисипације енергије у базену. Резултати испитивања у вези са хоризонталним базенима недвосмислено указују на бољу дисипацију механичке енергије у случајевима кад се у базену користе стабилизациони елементи чије су димензије веће од оних које препоручује доступна литература (а које су засноване на резултатима испитивања базена глатких брзотока). На основу резултата у овом поглављу, показано је да коришћене мерне методе имају потенцијал за процену и других, секундарних карактеристика струјања у умирујућим базенима (и отвореним токовима уопште): (1) дужине ваљка хидрауличког скока, (2) процене степена аерације млаза, (3) процене интензитета вртлога у пољу брзина и (4) процене протока у хидрауличком каналу.

Базени негативног нагиба дна у знатно мањој мери су истражени од оних са хоризонталним дном. Анализа доступне литературе и прелиминарна мерења на физичком хидрауличком моделу

демонстрирали су потенцијал базена нагнутог дна за формирање хидрауличког скока са мањим односом спрегнутих дубина и мањом дужином његовог ваљка. Истраживање кандидата потврђује закључке из литературе да поједини типови хидрауличког скока (тип Ф) имају високу ефикасност дисипације енергије али да лако могу постати нестабилни. Употребом стабилизационих елемената, чак и у значајно мањим димензијама и у мањем броју од оних које препоручује литература за хоризонталне базене глатких брзотока. Овај део истраживања битно проширује потенцијал примене базена негативног нагиба дна низводно од степенстих брзотока.

Коначно, имајући у виду непостојање модела процене главних параметара струјања у базенима негативног нагиба дна код степенстих брзотока, такав модел развијен је у овом истраживању на бази резултата мерења и закона одржања количине кретања. Предложени модел омогућава процену односа спрегнутих дубина, дужине ваљка хидрауличког скока и коефицијента дисипације енергије. Пример примене предложеног модела на одређивање потребног нагиба дна умирујућег базена такође је приказан у овом (петом) поглављу, за хипотетички случај кад се као критеријуми димензионисања користе узводна и низводна дубина течења.

Поглавља четири (*Методологија*) и пет (*Резултати и дискусија*) завршавају се пригодним резимеима који у кратким цртама осликавају главне теме и битне закључке тих поглавља.

Главни закључци истраживања – у вези са развијеном и примењеном методологијом и резултатима испитивања умирујућих базена – представљени су у шестом поглављу (*Закључци*), а све у контексту циљева представљених у Уводу.

Препоруке у вези будућих испитивања представљене су у поглављу седам, и то у две групе: (1) истраживања у циљу даљег развоја и примене мерних методологија и (2) у вези испитивања умирујућих базена.

Осмо поглавље садржи списак референци које су послужиле за формирање истраживачких задатака, као и избор постојећих и развој нових метода за мерење хидрауличких величина у лабораторијским условима.

На крају дисертације налазе се и графички прилози који су, прегледности ради, изостављени из главног текста дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Суочавање са проблемима непрестано смањујућих резерви воде и фосилних горива намеће коришћење високих брана за превазилажење оба дата проблема. Својим габаритом, високе бране омогућавају поуздано руковање водним ресурсима, али представљају и својеврсну претњу у областима где се налазе – екстремни хидролошки услови могу узроковати појаву количина воде које прекорачују акумулационе капацитете брана, те „вишкови“ воде морају бити безбедно евакуисани низводно. Евакуација воде преко тела бране узрокује претварање потенцијалне енергије воде у кинетичку, која поседује знатну ерозиону способност. Ерозија која због таквих услова може настати непосредно низводно од бране представља опасност за њену краткорочну и дугорочну стабилност, и са инжењерског становишта је неприхватљива. Такође, ерозија низводног речног корита представља опасност за објекте који се у тој области налазе, и такође је неприхватљива.

Поуздана и безбедна дисипација механичке енергије воде (првенствено кинетичког облика) је примарна улога евакуационих органа бране – прелива, брзотока и (у највећем броју случајева) умирујућих базена. Промена парадигме изградње високих брана, покренута 80-их година претходног века, подразумева примену тзв. ваљаног бетона (енгл. *roller-compacted concrete*) који је инвестиционо повољнији од класичног хидротехничког бетона. Међутим, због начина

уградње ваљаног бетона, брзоток таквих брана по правилу формира степенаста контура уместо глатке. Бројна истраживања потврдила су да степенаста контура брзотока омогућава већи интензитет дисипације енергије него глатка. Комбинација таквих инвестиционих и експлоатационих погодности узроковала је експанзију градње степенастих брзотока и брана од ваљаног бетона уопште.

Међутим, дисипациони објекти низводно од степенастих брзотока нису претрпели сличну револуцију. Умирујући базени, као најчешће коришћен тип таквих објеката, детаљно су изучени на примерима класичних, глатких брзотока. На основу тих истраживања изведене су и адекватне препоруке за њихово димензионисање. Такве препоруке „пренете“ су (у највећој мери без измена) и на базене степенастих брзотока. Међутим, испитивања новијег датума истичу да тако димензионисани базени могу показати нижу ефикасност од пројектоване, чему се најчешће као разлог наводи другачији распоред брзина и дубина течења у брзотоку, као и повећан интензитет аерације приликом течења изнад степенастог дна.

Систематска испитивања умирујућих базена степенастих брзотока малобројна су у литератури. При томе, ограничења доступне мерне методологије често не омогућавају формирање „шире слике“ о ефикасности оваквих објеката. Значајан број истраживања посвећен је првенствено механизмима који се одвијају на малим просторима унутар хидрауличког скока у базену – што је често такође последица ограничења доступне мерне опреме. Стога је истраживање кандидата од високог значаја за идентификацију и разумевање макроскопских карактеристика дисипације енергије у умирујућим базенима путем хидрауличког скока. Осим изведених препорука за димензионисање умирујућих базена степенастих брзотока, оригиналност истраживања огледа се и кроз методолошка унапређења мерних поступака.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове дисертације цитиране су укупно 194 библиографске јединице, од чега се приближно 40% односи на резултате истраживања у разматраној области објављене у претходних десет година: 74 цитиране референце настале су током и после 2011. године. Кандидат је кроз преглед литературе обухватио најважније ауторе и публикације из области хидрауличког моделирања и испитивања хидротехничких објеката. Значајан број референци сачињавају радови објављени у истакнутим међународним часописима, пре свега у *Journal of Hydraulic Research*, *Journal of Hydraulic Engineering*, *Experiments in Fluids*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, *International Journal of Multiphase Flow*, и др.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе коришћене у овој дисертацији усвојене су на основу прегледа релевантне литературе и адекватне су за предмет и циљеве истраживања. Кандидат је (имајући у виду да физичка хидрауличка испитивања неретко изискују знатне инвестиционе трошкове за потребе изградње модела, набавке и оспособљавања мерне опреме) одабрао савремене мерне методе које се могу окарактерисати као нискобуџетне. Сва коришћена мерна опрема – камера, ласер и опрема за позиционирање ласера – доступна је у комерцијалној продаји. Осим тога, коришћене методе вишеструко смањују временску захтевност испитивања умирујућих базена – количина прикупљених података је за барем ред величине већа него приликом коришћења традиционалних метода мерења, док је обрада и анализа података у највећем делу поступка аутоматизована.

Метода за мерење дубина у хидрауличком скоку и хидрауличком каналу је – према свом облику и ефикасности – јединствена у области испитивања хидрауличких модела. Томе у прилог сведочи и чланак „Image processing for hydraulic jump free-surface detection: coupled gradient/machine learning model“ објављен у часопису *Measurement Science and Technology* (категорије M22), а на ком је кандидат први аутор. У поменутом чланку приказана је детаљна

анализа тачности и робусности развијене методе. Програмски код методе за мерење дубина путем технике обраде слика, написан у програмском језику *Python*, ауторско је дело кандидата.

Мерење брзина у вези са истраживањима умирујућих базена – и хидротехничких објеката уопште – често карактеришу ограничења инвестиционе или техничке природе. Најчешће коришћени системи за мерење брзина у умирујућим базенима омогућавају искључиво мерења у малом броју тачака, при чему су одређене методе примењиве искључиво у случају двофазног течења (вода и ваздух), а неке искључиво у случају једнофазног (вода). Избор методе PIV, која је у последњој деценији добила широку примену у хидротехничким и еколошким наукама, представља интересантан и јединствен пример о области испитивања умирујућих базена. У комбинацији са системом за избор мерне равни, који је конструисан за ово истраживање, PIV метод омогућава прикупљање знатно већег броја података него традиционалне мерне методе у овој истраживачкој области. При томе, добијени подаци су просторно и временски усклађени јер се мерење обавља истовремено у читавој мерној равни и у правилним временским интервалима. Ова карактеристика омогућила је примену анализа какве нису могуће на основу резултата добијених применом традиционалних мерних метода – нпр. процена интензитета вртлога у пољу брзина.

Критеријуми поређења ефикасности дисипације механичке енергије коришћени у овом истраживању уобичајени су у релевантној литератури из области испитивања умирујућих базена – просторни и временски распоред дубина дуж базена, правци и интензитети вектора брзина у одабраним мерним равнима. Поред тога, кандидат је предложио и увођење додатног критеријума за карактерисање временске неравномерности вертикалног профила брзина. На основу предложених критеријума, омогућено је непосредно поређење ефикасности различитих конфигурација умирујућих базена.

3.4. Примењивост остварених резултата

Развијени поступци мерења могу се ефикасно применити приликом физичких моделских испитивања умирујућих базена. О томе најбоље сведочи податак да је целокупан поступак успешно примењен у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику и водно еколошко инжењерство за моделско испитивање умирујућег базена бране Sidi Naceur чија изградња је планирана у Алжиру. Ранији радови аутора демонстрирали су могућност и шире примене методе мерења дубина.

Закључци и подаци у вези са ефикасношћу дисипације енергије у умирујућим базенима различитих конфигурација могу се непосредно применити приликом њиховог димензионисања. Кандидат је у тесту тезе извео већи број препорука за избор величине, положаја и распореда елемената за умирење у базену, али и препорука у вези са избором нагиба дна базена (за последње је приказан и адекватан пример прорачуна). Текст тезе омогућава идентификацију свих неопходних информација како би изведене препоруке биле успешно примењене.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У току докторских студија кандидат је остварио способност за самосталан научноистраживачки рад кроз полагање испита, публикавање научних радова, учешћа на најзначајнијим међународним конференцијама из области истраживања и припрему и израду дисертације. У току израде дисертације, кандидат је кроз учешће у пројекту COST HARMONIOUS добио прилику да изучава PIV и друге методе засноване на техникама обраде слика приликом „кратких научних мисија“ (енгл. *short-term scientific missions, STSMs*) на Универзитету у Њукаслу, Велика Британија, и на Универзитету Базиликата у Потензи, Италија, али и кроз учешће у радионицама које организује поменути пројекат и кроз писање радова из области примене техника обраде слика из видео записа са беспилотних летелица (са енгл. *unmanned aerial vehicle, UAV*). Кандидат је у току истраживања показао способност критичке анализе информација из литературе и усвајања знања из исте, постављања адекватних истраживачких хипотеза, припреме и

спровођења експеримената на физичком моделу, примене савремених метода за прикупљање и обраду података али и самосталног развоја истих. Евидентно је да је кандидат Роберт Љубичић, приступом истраживачком проблему и начином решавања постављених задатака, показао способност за самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Вредност истраживања приказаног у дисертацији огледа се у обезбеђењу следећих научних доприноса, потврђених приказаним резултатима:

- Систематизација досадашњих знања о предмету истраживања;
- Демонстрација примењивости нискобуџетних бесконтактних система за мерење хидрауличких величина у лабораторијским условима;
- Развој нове бесконтактне методе за мерење дубина у хидрауличком каналу;
- Примена савремене бесконтактне мерне методе (ласер PIV) на одређивање брзине струјања низводно од ваљка хидрауличног скока;
- Одређивање и развој адекватних критеријума критеријума за поређење ефикасности дисипације механичке енергије великог броја различитих конфигурација умирујућих базена;
- Извођење препорука у вези са побољшањем ефикасности дисипације енергије у умирујућем базену степенастог брзотока коришћењем стабилизационих елемената и негативног нагиба дна.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру поглавља са прегледом литературе је веома јасно и свеобухватно објашњен предмет истраживања. Током истраживања изведене су препоруке у вези прорачуна и димензионисања умирујућих базена степенастих брзотока. Методе бесконтактног мерења хидрауличких величина успешно су примењене на примеру овог истраживања, али и у случају хидрауличног моделског испитивања бране Sidi Nasseur у Алжиру.

Резултати добијени у оквиру овог истраживања су веома охрабрујући и потврђују иницијално постављене истраживачке хипотезе. Показан је потенцијал одређених конфигурација за побољшање дисипационих карактеристика умирујућих базена у односу на оне који су пројектовани према постојећим препорукама. Примена изведених препорука може битно побољшати безбедност брана са степенастим брзотоцима и умирујућим базенима, али и морфолошку стабилност речног корита низводно од њих.

У закључном поглављу дисертације јасно је направљен преглед постигнутих научних доприноса. Такође је направљен и критички осврт на недостатке физичког модела, као и развијених и примењених метода, које је потребно отклонити у наставку истраживања.

4.3. Верификација научних доприноса

У оквиру овог истраживања, кандидат је објавио два рада у часописима са SCI листе, један рад у часопису националног значаја, два рада на међународним научним скуповима и један рад на националном научном скупу:

Категорија M22 – Истакнути међународни часописи:

Robert Ljubičić, Ivana Vićanovic, Budo Zindović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić (2020)
Image processing for hydraulic jump free-surface detection: coupled gradient/machine learning model. Measurement Science and Technology. DOI: 10.1088/1361-6501/ab8b22.

Robert Ljubičić, Budo Zindović, Predrag Vojt, Dragutin Pavlović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić (2018) *Hydraulic Jumps in Adverse-Slope Stilling Basins for Stepped Spillways*. Water. 10 (4), pp.460. DOI: 10.3390/w10040460.

Категорија М33 – Међународни научни скупови:

Robert Ljubičić, Ivana Vićanović, Budo Zindović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić (2019) *Image Processing for Hydraulic Jump Free-Surface Detection*.: E-proceedings of the 38th IAHR World Congress.

Robert Ljubičić, Filip Babić, Budo Zindović, Radomir Kapor, Ljubodrag Savić (2017) *Estimation of downstream sequent depth in B-F hydraulic jumps for stilling basins of stepped spillways*. Zbornik radova Građevinskog fakulteta. 33 (30), pp. 635-644. DOI: 10.14415/konferencijagfs2017.068.

Категорија М51 – Врхунски часописи националног значаја:

Dušan Marjanović, Ivana Vićanović, **Robert Ljubičić**, Budo Zindović, Ljubodrag Savić (2019) *Detekcija nivoa u laboratorijskim kanalima primenom tehnike obrade slika*. Vodoprivreda. 51 (300-302), pp. 271-280.

Категорија М63 – Национални научни скупови:

Robert Ljubičić, Budo Zindović, Ljubodrag Savić (2018) *Adverse-slope stilling basins: machine learning approach to estimation of hydraulic jump features*. Zbornik radova 18. savetovanja SDHI/SDH.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У докторској дисертацији под насловом „Струјање у умирујућим базенима степенастих брзотока“ (енгл. „Stilling basin flow for stepped spillways“) приказан је оригиналан приступ анализи ефикасности дисипације механичке енергије у различитим конфигурацијама умирујућих базена степенастих брзотока. Имајући у виду да релевантна литература пружа недовољну количину информација и препорука у вези са овом проблематиком, дисертација кандидата пружа вредан увид у исту. Оригинално истраживање огледа се и кроз примену савремених мерних метода. За потребе спровођења истраживања, кандидат је развио нову бесконтактну методу за мерење дубина у хидрауличком каналу, која омогућава тренутно и аутоматизовано одређивање положаја слободне површине дуж хидрауличког скока и низводно од њега. Мерење брзина, које је од велике важности за процену ефикасности дисипације енергије, такође је спроведено применом савремене бесконтактне методе (ласер PIV). На основу резултата мерења, кандидат је пружио низ релевантних препорука у вези са избором адекватне конфигурације умирујућег базена у циљу обезбеђивања оптималне дисипације. Научна вредност истраживања доказана је и кроз публикавање два чланка у истакнутим међународним часописима категорије М22. Способности Роберта Љубичића, маг. инж. грађ. испољене током израде ове дисертације показују да кандидат поседује квалитете потребне за самостални научни рад, пре свега способност критичког сагледавања обављених истраживања, и синтезе њихових резултата на јасан, систематичан и концизан начин.

На основу изнетог, Комисија констатује да докторска дисертација под насловом „Струјање у умирујућим базенима степенстих брзотока“ (енгл. „Stilling basin flow for stepped spillways“) представља оригиналан и значајан научни допринос у областима: (1) Механике нестишљивих флуида и хидраулике и (2) Хидротехничких конструкција и објеката. Услед напред наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати позитивну оцену докторске дисертације кандидата Роберта Љубичића, маг. инж. грађ., и да, сходно томе, упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Душан Продановић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

проф. др Радомир Капор, дипл. грађ. инж. (у пензији)
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

в. проф. др Ђорђе Чантрак, дипл. маш. инж.
Универзитет у Београду, Машински факултет

доц. др Будо Зиндовић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

доц. др Дамјан Иветић, маг. инж. грађ.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет