

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Ање Ранђеловић, дипл. инж. грађ.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 519/11-13 од 22.04.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Ање Ранђеловић, дипл. инж. грађ. под насловом

МОДЕЛИРАЊЕ ТРАНСПОРТА МИКРОПОЛУТАНАТА У БИОФИЛТЕРСКИМ СИСТЕМИМА ЗА ТРЕТМАН КИШНИХ ВОДА

Наслов на енглеском језику:

MODELLING TRANSPORT OF MICROPOLLUTANTS IN BIOFILTRATION SYSTEMS FOR STORMWATER TREATMENT

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

Докторска дисертација кандидата Ање Ранђеловић, дипл. инж. грађ., пријављена је 13.12.2013. године на Грађевинском факултету Универзитета у Београду под насловом „Моделирање транспорта микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода“ (на енг. „Modelling transport of micropollutants in biofiltration systems for stormwater treatment“). На седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 20.12.2013. именована је Комисија за писање извештаја о оцени подобности теме и кандидата (одлука 519/2 од 23.12.2013). Позитиван извештај Комисије за пријем теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 6.02.2014. (одлука 519/4-13 од 7.02.2014), а за ментора је именован доц. др Ненад Јаћимовић, дипл. инж. грађ. са Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 4.03.2014.

године дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Ање Ранђеловић, дипл. инж. грађ. (одлука 61206-752/2-14 од 4.03.2014.).

Кандидат Ања Ранђеловић, дипл. инж. грађ., уписала је докторске студије на Грађевинском факултету, Универзитета у Београду, школске 2007./08. године. Током школске 2012./13. кандидату је одобрено мировање права и обавеза према члану 87 Статута Грађевинског факултета. Одлукама Наставно-научног већа Грађевинског факултета број 22/83-2 од 12.09.2014. и 22/141-5 од 30.09.2015. године кандидату је одобрене продужење рока за завршетак докторских студија за школску 2014./15., одн. 2015./16., у укупном трајању од две године.

1.2. Научна област дисертације

Тема дисертације је из научног поља техничко-технолошких наука. Научна област је Грађевинарство, а уже научне области су Еколошко инжењерство, Механика флуида и Хидраулика, и Транспортни процеси у хидротехници, за које је матичан Грађевински факултет Универзитета у Београду.

Ментор је доц. др Ненад Јаћимовић, дипл инж. грађ. са Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Именовани ментор испуњава важеће критеријуме Универзитета у Београду, а референце су као што следи:

1. Randelovic A., Zhang K., **Jacimovic N.**, McCarthy D., Deletic A. (2016) Stormwater treatment model (MPiRe) for selected micro-pollutants. Water Research, vol. 89, pp. 180-191
2. **Jacimovic, N.**, T. Hosoda, M. Ivetic and K. Kishida (2007), A novel approach in numerical simulation of contaminant removal by air sparging, Water Science and Technology: Water supply Vol. 7(3), pp. 163-170.
3. **Jacimovic, N.**, T. Hosoda, K. Kishida and M. Ivetic (2007), Numerical simulation of contaminant removal during air sparging, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.51, pp. 13-18.
4. Onda, S., T. Hosoda, **N. Jacimovic**, I. Kimura (2013), Numerical simulation of dike erosion process due to overtopping flow, Journal of Japan Society of Civil Engineers, , Vol.69, No. 4, pp. 1207- 1212.
5. **Jacimovic, N.**, T. Hosoda, K. Kishida and M. Ivetic (2006), Two-phase numerical model for air sparging simulation with modeling of acceleration terms, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.9, pp. 765-771.
6. **Jacimovic, N.**, T. Hosoda, K. Kishida and M. Ivetic (2005), Numerical solution of the Navier-Stokes equations for incompressible flow in porous media with free surface boundary, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.8, pp. 225-231.
7. Despotovic J., J. Petrovic and **N. Jacimovic** (2002), Measurement, calibration of rainfall-runoff models and assessment of the return period of flooding events at urban catchment Kumodraz in Belgrade, Water Science and Technology, Vol. 45(2), pp. 127-133.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ања Ранђеловић је рођена 11. октобра 1983. године у Београду. Основну школу и гимназију је похађала у Србији, Перуу, и Сједињеним Америчким Државама, због чега одлично влада енглеским и шпанским језиком. 2007. године је дипломирала на Грађевинском факултету, Универзитета у Београду, као студент генерације са просечном оценом 9,51. Добитник је бројних стипендија и признања током школовања и студија.

После завршене четврте године студија, радила је на више пројеката Тексашке Агенције за заштиту животне средине, који су за циљ имали успостављање доброг водног статуса мерењем и контролом садржаја патогених индикатора у атмосферском отицају. Дипломски рад је радила на Институту за водопривреду „Јарослав Черни“, где је учествовала и на пројектима анализе хаварија на депонијама пепела и на студији о Београдском изворишту.

Уписивањем докторских студија на Грађевинском факултету постаје асистент на предметима из области Механика флуида и хидраулика и Еколошко инжењерство, на основним, мастер и међународним специјалистичким студијама. Уједно, као сарадник на Институту за хидротехнику, Грађевинског факултета, учествује у разним пројектима, студијама и експертизама (водовод, канализација, заштита животне средине, санитарне депоније, рударски пројекти итд.) Стручни испит положила је 2011. године.

Истраживачки рад на њеној докторској дисертацији је део научног пројекта ТР 37010 „Системи за одвођење кишних вода као део урбане и саобраћајне инфраструктуре“. Лабораторијске и теренске експерименте је урадила 2012./13. године током једногодишњег студијског боравка на Универзитету Monash, у Мелбурну, у сарадњи са истраживачком групом проф. Ане Делетић у оквиру центра „Water Sensitive Cities“. Аутор и коаутор је четири рада на SCI листи, као и већег броја радова у домаћим часописима, на међународним и домаћим конференцијама.

Активан је члан неколико струковних удружења:

- Српског друштва за хидрауличка истраживања
- Удружења за технологију воде и санитарно инжењерство
- The International Water Association

Поред напред наведених, служи се и француским језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Моделирање транспорта микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода“ написана је на енглеском језику под насловом: “Modelling transport of micropollutants in biofiltration systems for stormwater treatment”. Дисертација садржи 7 поглавља:

1. Увод (Introduction)
2. Преглед литературе (Literature Review)
3. Експериментални подаци (Experimental Data)
4. Развој модела (Model Development)
5. Тестирање модела (Model Testing)
6. Анализа неодређености модела (Model Uncertainty Analysis)
7. Закључци и даља истраживања (Conclusions and Further Research)

Дисертација садржи и резиме (на српском и на енглеском језику), списак коришћене литературе, прилоге и биографију кандидата. Текст дисертације је написан на 174 стране. Дисертација садржи 68 слика и 34 табеле. Списак литературе има 187 наслова.

Структура дисертације и текст су у потпуности обликовани према упутству Сената Универзитета у Београду од 14.12.2012. године, и према посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије дисертације.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом уводном поглављу је укратко представљен предмет истраживања. У наставку је постављен циљ и дефинисани задаци истраживања.

Друго поглавље дисертације садржи преглед литературе, који је закључен идентификацијом главних непознаница о теми истраживања. Преглед литературе је подељен у четири главна одељка:

- квалитет кишног отицаја и идентификација кључних микрополутаната у кишном отицају
- карактеристике биофилтерских система,
- преглед постојећих модела и техника моделирања, и
- извори неодређености и анализа неодређености модела квалитета кишног отицаја.

У оквиру одељка о квалитету кишног отицаја је прво дато разграничење и преклапање различитих дефиниција микрополутаната, приоритетних и емергентних загађивача; затим је дат преглед најсвеобухватнији студија о квалитету кишног отицаја широм планете почев од 1960-их до данас; на крају су идентификовани кључни микрополутанти према могућности за детектовање у кишном отицају и потенцијалном хазарду за људе и/или животну средину. Одељак о моделирању садржи преглед највише примењиваних модела за кишни отицај и критички осврт према могућностима њиховог коришћења за биофилтерске системе. Затим су издвојени модели који су специјално направљени за биофилтерске системе, а да при том немају могућности симулирања микрополутаната, као и они који симулирају микрополутанте, али су развијени за друге врсте постројења (нпр. конвенционалне системе за третман вода, конструисане мочваре итд.). Потом је дат преглед могућих процеса трансформације који су релевантни за одабране органске микрополутанте, као и метода њиховог моделирања. Одељак се завршава синтезом информација о потенцијалним микрополутантима који су присутни у кишном отицају и представљају хазард за животну средину, као и очекиваним процесима трансформације у биофилтерским системима. Одељак о анализи неодређености представља више начина анализа неодређености у моделима, са

њиховим предностима и манама. Преглед литературе указује на недостатак модела којим може успешно да се моделира понашање микрополутаната у биофилтерским системима, и управо на ту тему поставља истраживачки циљ. На крају прегледа литературе се налазе и јасно дефинисане полазне хипотезе:

1. Микрополутанти се могу груписати према хемијској структури и специфичној природи, тако да се може издвојити „репрезентативни“ микрополутант чији се модел транспорта и трансформације може „пренети на“ тј. биће валидан за сваког члана групе (напомена: само микрополутанти који су кључни за кишни отицај су разматрани).
2. Комплексно понашање микрополутаната у систему за третман се може предвидети релативно једноставним моделом који се састоји из модула који описује хидродинамику и модула који описује транспорт микрополутаната.
 - a. *Хидродинамика система*: комплексна хидродинамика биофилтерских система се може представити системом линеарних резервоара – проблем се може свести на једнодимензионалан и то у вертикалном правцу.
 - b. *Третман кроз систем*: транспорт микрополутаната кроз систем се може предвидети линеарном адвективно-дисперзивном транспортном једначином, са првим и другим редом реакција које описују физичке и био-хемијске процесе уклањања микрополутаната из воде (као што су таложење, филтрација, волатилизација, фотодеградација, хидролиза, аеробна/анаеробна биоразградња, адсорпција, десорпција итд.)
3. Анализа неодређености модела ће показати осетљиве параметре модела и обезбедити вредне информације о самим процесима, што ће омогућити додатно поједностављење и генерализацију модела.

Треће поглавље садржи резултате спроведених теренских и лабораторијских опита. Прво је дат опис система и мерне опреме, одн. методологије, како су прикупљани подаци са два биофилтерска система изграђена на паркингу Универзитета Монаш. Затим је дата опис тестова оптерећења биофилтерских системима синтетичком кишницом богатом одабраним микрополутантима, као и трасерских опита са конзервативним и неконзервативним супстанцама. Подаци експеримената су о триазинима (атразин, прометрин, симазин), глифосату, и хлороформу. Подаци обухватају оперативне услове који су варијабилни и изазовни: варијабилне запремине воде на улазу у биофилтер, различиту динамику сушних и кишних периода и варијабилне концентрације загађивача у кишној води. Описана је методологија електро-резистивне томографије, чији су резултати заједно са резултатима трасера коришћени за закључивање о размери проблема и потенцијалним преференцијалним токовима у оквиру биофилтерских медија. У оквиру овог поглавља урађена је анализа о перформансама биофилтерских система у погледу пречишћавања кишног отицаја од микрополутаната. Такође је дата и упрошћена квантификација неодређености мерења у количинама воде транспортоване кроз биофилтерски систем, али и микрополутаната. У самом поглављу је описана методологија којом су спроведени опити у лабораторији: batch тестови и тестови на биофилтерским колонама, а њихов приказ заједно са анализом је дат у петом поглављу.

Четврто поглавље садржи математички формулацију развијеног MPiRe (MicroPollutants In RaingardEns) модела квалитета који садржи два модула: (1) којим се описује ток воде и (2) којим се описује транспорт и трансформација микрополутаната. Код модела је написан у Python програмском језику и то у форми која је компатибилна са CityDrain© интегралним моделом урбаног отицаја направљеним у Matlab/Simulink окружењу. Ток воде описан је помоћу три резервоара, који представљају три различите зоне биофилтра: базен воде у контакту са слободном површином, варијабилно засићен филтерски медијум и увек засићен доњи део тзв. потоњеном зону (ако постоји). Флуксеви међу резервоарима и према околном тлу и атмосфери се решавају помоћу физички заснованих релација. Транспорт и трансформација микрополутаната су описани у сваком од три резервоара посебно, са јасно дефинисаним међурезервоарским флуксевима. Транспорт је описан помоћу детерминистичке адвективно-дисперзивне транспортне једначине у вертикалном правцу. Транспортна једначина садржи и модел за хемијски неуравнотежену двостепену сорпцију, биоразградњу по реакцији првог реда, и волатилизацију, и тако представља компромис између ограничених података (о микрополутантима у кишном отицају) и неопходне сложености да се опише природа феномена.

Пето поглавље приказује тестирање MPiRe модела. Прво су дефинисани гранични услови модела, затим је дат опис аутоматске калибрационе процедуре PEST, као и опис усвојених индикатора перформанси модела. Резултати тестирања су приказани као временске серије мерених и моделираних излазних протока, концентрација полутаната и флукса масе полутаната, али и као скетер-плотови (scatter-plot) мерених и моделираних средњих концентрација полутаната и укупних маса полутаната. Модел је калибрисан на једном делу теренских података, и успешно верификован на другом делу. MPiRe модел је успешно симулирао ток воде, са разликама у мереним и симулираним вредностима протока уочљивим у периодима после дугих суша, када је земљиште испуцало. Слагање између симулираних и мерених полутограма је било углавном добро. Као и са протоцима, дуги сушни периоди су представљали проблем и за симулације квалитета воде (нпр. симазин и прометрин нису најбоље моделирани у периоду маловодних кишних епизода које су уследиле после дугог сушног периода). Међутим, параметри модела за транспорт полутаната оцењени путем калибрације су у сагласности са вредностима у литератури. Ово даје назнаке да би модел могао да се користи и за симулирање понашања других микрополутаната (полицикличних угљоводоница, фенола, фталата, итд.) у биофилтерима. MPiRe модел би, дакле, могао да се примени и у пракси за димензионисање биофилтерских система и валидациони мониторинг. MPiRe модел је испробан и са лабораторијским подацима са batch тестова (флуоресцеин као референтни микрополутант) и са колона (хербициди: атразин, прометрин, симазин и глифосат). Развијена је процедура за процену параметера модела коришћењем података са batch тестова, а подаци са колона су коришћени за калибрацију модела. Параметри модела који описују сорпцију и биоразградњу одређени помоћу batch тестова су били мало потцењени. Сматра се да је узрок томе различит однос земљиште-вода који је примењен у тестовима у односу на онај који се налазио на терену. Сорпциони параметри одређени са колона су такође били мало потцењени, и давали су веће излазне концентрације микрополутаната. Ово је посебно случај са глифосатом, и мало мање са триазинима. Подаци са колона су показали да се у њима одвија процес сорпције који има далеко мање карактеристику кинетике, него оно што су показали подаци са терена. Сматра се да је кинетика сорпције на терену вероватно привидна, и да је последица претпоставке да је ток

воде кроз биофилтер једнодимензионалан. Такође се сматра да је један од разлога за привидне кинетичке карактеристике сорпције на терену структурална хетерогеност биофилтерског материјала, а не хемијска (што је претпоставка модела). Ова комбинована примена, одн. одређивање параметара модела помоћу лабораторијских опита, и тестирање на терену, је изведена са образложењем да се сматра веома корисном са становишта практичне примене (далеко мањи утрошак ресурса је неопходан за лабораторијске експерименте, када се упореде са теренским мерењима).

Шесто поглавље представља анализу неодређености модела и то услед одабира калибрационог периода и генералне анализе неодређености параметара модела. Анализа неодређености је спроведена коришћењем GLUE методологије која је указала на најосетљивије параметре модела: коефицијент партиције и проценат сорпционих места која су склона инстант сорпцији. Додатно, направљен је 95% интервал поверења, који је показао да је већина мерења добро обухваћена моделом.

Завршно, седмо поглавље, представља синтезу закључака свих претходних поглавља, и дат је критички осврт на испуњење постављених истраживачких задатака. Приказано је да су спроведени опити делимично потврдили прву хипотезу, према којој је могуће наћи репрезентативни полутант за сваку групу микрополутаната, чији се модел транспорта и трансформације може пренети на остале чланове групе (због расположивих података је било могуће потврдити ову хипотезу само за триазине). Резултатима истраживања је потврђена хипотеза према којој је комплексно хидродинамичко понашање кишнице у биофилтерским системима могуће описати помоћу вертикално постављених резервоара, затим хипотеза да се транспорт и трансформација микрополутаната може представити помоћу једнодимензионе адвективно-дисперзивне једначине са процесима у облику кинетике првог и другог реда, и хипотеза да је анализом неодређености могуће утврдити најосетљивије параметре модела. Такође је дата дискусија о развијеном моделу, у ком се додатно образлаже изабрани формат модела, као и применљивост у практичним проблемима. На крају седмог поглавља су дати и предлози даљих истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Микрополутанти као приоритетни и као емергентни полутанти су у жижи интересовања стручне и научне јавности због доказаних лоших ефеката на људско здравље и остали живи свет. Посебно негативни ефекти се срећу у урбаним срединама, где је због повећане густине насељености увећано испуштање ових полутаната у животну средину. Иако прве студије о микрополутантима датирају још из 1950.-их година, највећи број истраживања је новијег датума. Овај тренд истраживања има везе са побољшаним методама за детекцију микрополутаната, али и увећаним количинама које се испуштају захваљујући њиховој све већој примени у разним индустријама, њиховој синтези од нових материјала, и све уверљивијим доказима о штетности при дугорочном излагању чак и малим количинама.

Најбоље решење проблема микрополутаната је контрола испуштања на извору, али због специфичности микрополутанта, који су заправо уско повезани са високим квалитетом

живота (синтетички материјали, адитиви, лекови, пестициди и сл.), потребно је тражити и погодна решења којим се њихове концентрације могу макар мало умањити. Са те стране се сматра изузетно вредним прикупљање информација о могућностима децентрализованих система за њихово третирање.

Биофилтерски системи се често користе у развијеним земљама као системи за третман атмосферских вода у урбаним срединама и до сада су се показали као веома ефикасни у смањењу количине нутријената, седимената и неких метала. Пре ове студије није било познато колико су биофилтри успешни у отклањању микрополутаната – те је било потребно допунити ово знање прикупљањем и анализом експерименталних резултата. Поред тога, развијен је и оригинални математички модел који верно симулира понашање микрополутаната у биофилтерским системима.

Савременост истраживања се огледа у могућностима примене експерименталних резултата и развијеног модела као алата у систему за евалуацију стратегија доброг управљања водним ресурсима. Поред тога, промовисањем резултата ове дисертације скреће се пажња на неопходност усклађивања домаће регулативе са Европском директивом о водама, која ће такође захтевати опсежан мониторинг акватичних средина због оцењивања њиховог водног статуса, па ће и у том контексту овај модел наћи своју примену.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове дисертације цитирано је укупно 187 библиографских јединица, од чега је највећи број новијег датума: 143 цитираних референци настало је после 2000. године, одн. 59 после 2010. године. Кандидат је кроз преглед литературе обухватио најважније ауторе и публикације из области загађења кишних вода микрополутантима (*Makepeace D.K., Zgheib S.*), биофилтерских система (*Hatt B., Deletic A., Davis A.P.*), моделирања (*Šimunek J., Langergraber G., Vezzaro L.*) и анализа неодређености (*Beven K.J., Kleidorfer M., Dotto C.B.S.*). Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима, пре свега у *Environmental Science and Technology, Ecological Engineering, Science of the Total Environment, Water Research, Journal of Hydrology, Water Resources Research, Journal of Contaminant Hydrology, Water Science and Technology, Environmental Modelling and Software* и *Vadose zone journal*.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За потребе овог истраживања спроведени су теренски и лабораторијски опити који су обухватили: трасерске тестове, електро-резистивну томографију, и тестове са синтетичком кишницом. Неки од ових тестова су били стандардни, док су неки захтевали развој нових методологија од стране кандидата и сарадника. Узорци су тестирани у акредитованој лабораторији на присуство микрополутаната, док је већину осталих параметера квалитета воде кандидат сам утврђивао.

У оквиру истраживања је развијен модел транспорта. Концепт модела је базиран на критичкој анализи досадашњих сазнања о теми, и анализи резултата изведених теренских и лабораторијских истраживања. Установљена је размера проблема, и постављене су теоријске основе за његово моделирање. Модел је калибрисан помоћу метода аутоматске калибрације према подацима прикупљених у опитима. Анализа неодређености је урађена према неформалној Бајесовој методологији.

Будући да адекватан модел којим је могуће симулирање понашања микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода није раније постојао, сматра се да су добри резултати примене наведених научних метода показали успех истраживања.

3.4. Применљивост остварених резултата

Приказана методологија спровођења опита садржи иновативне поступке, који до сада нису примењивани у пракси или се тек почело са њиховим коришћењем у истраживачким студијама. Ту се, пре свега, издваја методологија тестова оптерећења која укључује одабир оперативних услова у погледу климе, хидраулике и квалитета кишног отицаја. Тестови оптерећења могу да буду корисни у погледу контроле функционисања биофилтера, захваљујући чијим резултатима је могуће и унашредити постојеће системе. Уједно су и резултати спроведених опита корисни у погледу развијања оваквог и сличних модела квалитета. Посебно корисни могу да буду лабораторијски опити изведени у строго контролисаним условима, који се могу користити као нека врста бенчмарк-тестова у различитим студијама са сличном тематиком.

Развијен MPiRe модел је успешно симулирао ток воде и излазне концентрације микрополутаната. Будући да су параметри модел за транспорт полутаната оцењени путем калибрације били у сагласности са вредностима у литератури, сматра се да би модел могао да се користи и за симулирање понашања других микрополутаната (полицикличних угљоводоница, фенола, фталата, итд.) у биофилтерима. MPiRe модел би, дакле, могао да се примени и у пракси за димензионисање биофилтерских система и валидациони мониторинг. Аутоматска калибрација примењена у оквиру истраживања је стандардна метода која се користи код хидролошких модела. Хистограми расподеле параметара модела, као и графици крос-корелације добијени као резултати овог истраживања, показали су да успешно квантификују неодређеност параметара и код модела квалитета.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат се у оквиру своје докторске дисертације бавио изучавањем и критичком анализом доступне референтне литературе, експерименталним радом, моделирањем сложеног проблема методом линеарних резервоара и коначних разлика, и статистичким анализама одн. анализом неодређености развијеног модела. Кандидат је успешно критички усвојио нова знања и, кроз самостални научни рад, показао способност сагледавања проблема и формулисања хипотеза, затим осмишљавања поступка за тестирање постављених хипотеза, као и одабира адекватних метода и техника које би при томе требало користити.

Евидентно је да је кандидат Ања Ранђеловић, 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

Ова докторска дисертација је поставила оригинална истраживачка питања на која претходно није био познат одговор. Вредност овог истраживања се огледа и у обезбеђењу следећих резултата:

- Систематизација досадашњих знања о предмету истраживања
- Реални/теренски резултати испитивања понашања микрополутаната у биофилтрима/ увећање досадашње базе података што може служити осталим истраживачима у истраживању других концепата
- Лабораторијски резултати испитивања микрополутаната на биофилтерским колонама и у batch-тестовима који могу послужити осталим истраживачима за фине модификације будућих модела
- Први пут спроведена електро-резистивна томографија на биофилтерским системима за третман кишних вода
- Развој MPiRe модела транспорта, који се може користити за друге намене (други полутанти или друга средина), одн. развој методологије за прављење модела квалитета
- Примена анализе неодређености у комплексном новом моделу квалитета кишног отицаја у биофилтерским системима

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру поглавља са прегледом литературе је веома јасно и свеобухватно објашњен предмет истраживања, какав се не среће у другим студијама са сличном тематиком. Иако је главна тема истраживања моделирање квалитета воде, допринос је дат и у синтези података о микрополутантима који се могу наћи у кишном отицају. Синтеза методологија за анализу неодређености није свеобухватна, али је и више него довољна за потребе анализе развијеног модела.

У циљу прикупљања података неопходних за развој модела, спроведени су теренски опити чији су резултати први пут показали понашање неких микрополутаната (триазини, глифосат, хлороформ) у различитим типовима биофилтерских система. Уједно је било могуће направити прве закључке о могућим механизмима транспорта и трансформације, што је од изузетне важности у примени оваквих децентрализованих система за контролу прилива микрополутаната путем кишног отицаја у водна тела.

Лабораторијски експерименти, који су обухватили дозирање микрополутаната у биофилтерске колоне и batch тестове за одређивање параметара сорпције и биохемијске разградње, су резултирали у полутограмима резолуције довољне за тестирање модела. Неке врсте оваквих експеримената су већ спровођени, али је ово истраживање допунило сазнања о понашању у биофилтерским колонама и са хлороформом.

Електро-резистивна томографија (ЕРТ) као алат за визуелизацију засићености биофилтерског медија није коришћена у ранијим истраживањима. Примена методе у овом истраживању се показала као веома успешна. Резултати добијени ЕРТ-ом (у комбинацији са трасерским

тестовима) су потврдили хипотезу да је доминантно течење кроз биофилтерске медије вертикално, и да се у веома кратком периоду (од 15-20 минута) успоставља устаљено течење. Прегледом литературе је указано да постоји пар модела који би потенцијално могли да се прилагоде да симулирају понашање микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода. Најуспешнији од њих, STUMP, се одликује далеко једноставнијим моделом за ток воде, којим није могуће у потпуности симулирати варијабилну засићеност биофилтерског система. Други недостатак STUMP модела, који је узет у обзир при развијању MPiRe модела у овом истраживању, јесте што се укупан третман микрополутаната блиско повезује са третманом укупних суспендованих честица. Наиме, за случај испитаних микрополутаната је показано да се они пре свега налазе у раствореној фази, а не сорбовани на партикуларне одн. суспендоване честице.

MPiRe модел, који је развијен оквиру овог истраживања, успешно је симулирао ток воде, са разликама у мереним и симулираним вредностима протока уочљивим у периодима после дугих суша, када је земљиште испуцало. Слагање између симулираних и мерених полутограма је било углавном добро. Као и са протоцима, дуги сушни периоди су представљали проблем и за симулације квалитета воде (нпр. симазин и прометрин нису најбоље моделирани у периоду маловодних кишних епизода које су уследиле после дугог сушног периода). Међутим, параметри модела за транспорт полутаната оцењени путем калибрације били су у сагласности са вредностима у литератури. Ово даје назнаке да би MPiRe модел могао да се користи и за симулирање понашања других микрополутаната (полицикличних угљоводоница, фенола, фталата, итд.) у биофилтерима.

У оквиру истраживања је примењена GLUE методологија за анализу неодређености параметара модела. Примена анализе неодређености је до сада успешно примењен у више истраживачких студија са моделима којима се симулира урбани отицај. Ниједан од модела који су направљени за моделирање понашање органских микрополутаната у биофилтерским системима није (до сада) спроведен кроз такву анализу.

4.3. Верификација научних доприноса

У оквиру овог истраживања кандидат је објавио четири рада у часописима са SCI листе и неколико радова у часописима од националног значаја и на међународним научним скуповима:

Категорија M21:

1. **Randelovic A.**, Zhang K., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2016) Stormwater treatment model (MPiRe) for selected micro-pollutants. *Water Research*, vol. 89, pp. 180-191 (**IF = 6.279**)
2. Zhang K., **Randelovic A.**, Deletic A., Page D., McCarthy D. (2016) Stormwater biofilters: A new validation modelling tool. *Ecological Engineering*, vol. 87, pp. 53-61 (**IF = 3.231**)
3. Zhang K., **Randelovic A.**, Aguiar L.M., Page D., McCarthy D., Deletic A. (2015) Methodologies for Pre-Validation of Biofilters and Wetlands for Stormwater Treatment. *PLoS ONE* 10(5): e0125979. (**IF = 3.702**)

4. Zhang K., **Randelovic A.**, Page D., McCarthy D., Deletic A., (2014) The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in-situ challenge tests. *Ecological Engineering*, vol. 67(1), pp. 1-10 (IF= 3.231)

Категорија M33:

1. **Randelovic A.** Prodanovic V., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2015, September 17-19) Assessing uncertainty of a water quality model for a stormwater biofiltration treatment system. *Paper presented at the 7th IWA Young Water Professional Conference "East meets West"*, Belgrade, Serbia
2. **Randelovic A.**, Zhang K., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2014, September 7-11) Development of a transport and fate model for organic micropollutants at a stormwater biofilter site. *Paper presented at the 13th International Conference on Urban Drainage*, Sarawak, Malaysia
3. **Randelovic A.**, Zhang K., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2014, May 28-30) Preliminary study on transport and fate of selected pesticides at a stormwater biofilter site. *Paper presented at the 6th IWA Young Water Professional Conference "East meets West"*, Istanbul, Turkey
4. **Randelovic A.**, Zhang L., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2013, 22.-24. maja) Eksperimentalno istraživanje transformacije mikropolutanta u biofilterima (raingardens). *13-a Međunarodna konferencija „Vodovodni i kanalizacioni sistemi“*, Jahorina, Pale, BiH

Категорија M51:

1. **Randelovic A.**, Zhang L., Jacimovic N., McCarthy D., Deletic A. (2013) Eksperimentalno istraživanje transformacije mikropolutanta u biofilterima (raingardens). *Voda i sanitarna tehnika*, vol. 2/2013, pp. 9-16

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У докторској дисертацији под насловом „Моделирање транспорта микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода“ (на енг. „Modelling transport of micropollutants in biofiltration systems for stormwater treatment“) развијен је оригинални математички модел за симулацију понашања микрополутаната присутних у кишном отицају при проласку кроз биофилтерске системе. За потребе развоја, калибрације и верификације модела било је неопходно направити серију експеримената, у лабораторијским и теренским условима, који су унапредили досадашња сазнања о одабраним микрополутантима. Такође су примењене и напредне технике анализе неодређености резултата модела, којима се употпуњују сазнања о параметрима модела, као и о квалитету прикупљених података, одн. које параметре је могуће са одређеном сигурношћу одредити на основу изведених опита. Сва три дела истраживања (експериментални рад, развој модела и анализа неодређености) представљају веома вредан научни допринос у области еколошког инжењерства, а делови у областима механике флуида и хидраулике, и транспортних процеса. Модел и методологија развијена у оквиру овог истраживања директно су применљиво код решавања практичних хидротехничких проблема, међу којима се посебно издваја валидација биофилтерских система за хватање воде за различите намене. Научна вредност рада је доказана и кроз

публиковање 4 рада категорије M21, 4 рада на међународним конференцијама и једног рада у домаћем часопису. Способности кандидата Ање Ранђеловић испољене током израде ове дисертације показују да она поседује квалитете потребне за самостални научни рад, пре свега способност критичког сагледавања објављених истраживања, и синтезе њихових резултата на јасан, систематичан и концизан начин.

На основу изнетог, Комисија констатује да докторска дисертацији под насловом „Моделирање транспорта микрополутаната у биофилтерским системима за третман кишних вода“ (на енг. „Modelling transport of micropollutants in biofiltration systems for stormwater treatment“) представља оригиналан и значајан научни допринос у областима еколошког инжењерства, механике флуида и хидраулике и транспортних процеса. Услед напред наведеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати позитивну оцену докторске дисертације кандидата Ање Ранђеловић, дипл. грађ. инж., и да, сходно томе, упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности са јавну одбрану дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Доц. др Ненад Јаћимовић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
Проф. др Ана Делетић, дипл. грађ. инж.
Monash University, Faculty of Civil Engineering

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

.....
В. проф. др Зорана Науновић, дипл. инж. техн.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

.....
Доц. др Бранислава Лекић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет