

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Николе Росића.

Одлуком Наставно-научног већа бр. 329/8-13 од 2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Николе Росића под насловом:

**НУМЕРИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ОТВОРЕНИХ ТОКОВА
ЗАСНОВАНО НА ПРАЋЕЊУ ФЛУИДНИХ ДЕЛИЋА**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Никола Росић, дипл. грађ. инж., уписао је докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду школске 2007/08 године. Током школске 2012/13, 2013/14 и 2014/15 кандидату је одобрено мировање права и обавеза према члану 56 Статута Грађевинског факултета.

Кандидат је 06.09.2013. поднео молбу Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду за одобрење израде докторске дисертације под насловом „Нумеричко моделирање отворених токова засновано на праћењу флуидних делића“. Одлуком Наставно-научног већа бр. 329/2 од 12.09.2013. именована је Комисија за пријем теме докторске дисертације у саставу: проф. др Љубодраг Савић, проф. др Миодраг Јовановић, в. проф. Радомир Капор и доц. др Дејана Ђорђевић са Грађевинског факултета Универзитета у Београду, и проф. др Никола Младеновић са Машинског факултета Универзитета у Београду. Комисија је поднела извештај 04.10.2013. који је прихваћен на седници Наставно-научног већа 24.10.2013. (одлука бр. 329/4). За ментора је именован проф. др Љубодраг Савић. На основу сагласности већа научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду од 10.12.2013. (одлука бр. 61206-5219/2-13), Наставно-научно веће Грађевинског факултета одобрило је израду ове докторске дисертације.

Кандидат је предао завршену дисертацију Студентској служби Грађевинског факултета 04.07.2016. На седници одржаној 07.07.2016. Наставно-научно веће Грађевинског факултета именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: проф. др Љубодраг Савић, в. проф. др Радомир Капор, в. проф. др Тина Дашић и доц. др Дејана Ђорђевић са Грађевинског Факултета Универзитета у Београду, и проф. др Никола Младеновић са Машинског факултета Универзитета у Београду (одлука бр. 329/8-13).

1.2. Научна област дисертације

Тема дисертације припада научној области техничко-технолошких наука Грађевинарство, односно ужој научној области Хидротехничке грађевине и објекти за коју је матичан Грађевински факултет.

Радови који квалификују ментора проф. др Љубодрага Савића за вођење докторске дисертације, публиковани у међународним часописима су:

1. Kolarevic M., Savic Lj., Kapor R., Mladenovic N., 2015, *Supercritical flow in circular conduit bends*, Journal of Hydraulic Research, vol. 53 br. 1, str. 93-100 (M22)
2. Kuzmanovic V., Savic Lj., Mladenovic N., 2013, *Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams*, Journal of Thermal Stresses, vol. 36 br.2, str. 112-134 (M23)
3. Savic Lj., Kapor R., Kuzmanovic V., Milovanovic B., 2013, *Shaft spillway with deflector downstream of vertical bend*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management vol. 167 br. 5, str. 269-278 (M23)
4. V.Stevanovic, A.Gajic, Lj.Savic, V.Kuzmanovic, D.Arnautovic, T.Dasic, B. Maslovaric, S.Prica and B.Milovanovic, 2011, *Hydro energy potential of cooling water at the thermal power plant*, Applied Energy, Vol. 88, br. 11, str. 4005–4013. (M21)
5. Kuzmanovic V., Savic Lj., Stefanakos J., 2010, *Long-term thermal 2D and 3D analysis of RCC dams, supported by monitoring verification*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 37 br. 4, str. 600-610 (M23)
6. Savic Lj., Kuzmanovic V., Milovanovic B., 2010, *Ski jump design*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, vol. 163 br. 10, str. 523-527 (M23)
7. Savic Lj. and Holly F.M.Jr, 1993, *Dambreak Flood Waves Computed by Modified Godunov Method*, Journal of Hydraulic Research, vol. 31 br. 2, str. 187-204 (M21)

1.3. Биографски подаци о кандидату

Никола (Милорада) Росић, рођен је у Земуну 1983. године. Гимназију је завршио у Инђији, на природно-математичком смеру, 2002. године. На Грађевинском факултету у Београду - Модул за хидротехнику и водно еколошко инжењерство, дипломирао је 2008. године, са просечном оценом 8,54. Дипломски рад одбранио је са највишом оценом. Носилац је награде Одсека за хидротехнику и водно еколошко инжењерство за најбољи дипломски рад у школској 2007/2008. години.

Школске 2007/08. године уписао је докторске студије на Грађевинском факултету у Београду, студијски програм Грађевинарство. Испите предвиђене програмом докторских студија положио је просечном оценом 9.75, после чега је, у школској 2012/13 пријавио докторску дисертацију под насловом „Нумеричко моделирање отворених токова засновано на праћењу флуидних делића“.

Запослен је 2009. године на Грађевинском факултету у Београду као асистент за уже научне области Уређење водотока и пловна инфраструктура и Водопривредни и хидроенергетски системи. Учествује у настави на основним академским и мастер студијама. Држао је и наставу на специјалистичким студијама. Као истраживач, учесник је на пројектима које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Нумеричко моделирање отворених токова засновано на праћењу флуидних делића“ садржи 7 поглавља: Увод, Преглед литературе, SPH теорија, Проблем рушења бране, Бурно течење у закривљеној цеви, Течење у речној кривини и Закључци и препоруке. Дисертација садржи и резиме (на српском и на енглеском језику), списак коришћене литературе, графичке и табеларне прилоге као и биографију кандидата. Текст дисертације је написан на 160 страна.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У дисертацији је, прво, описан предмет и значај истраживања, затим су представљене методе за решавање анализираних проблема као и резултати примене предложених поступака, да би се, на крају, дали закључци и препоруке за даље истраживање.

У првом, уводном, поглављу објашњен је значај коришћења нумеричких модела у решавању хидротехничких проблема. Како би се објаснио мотив истраживања објашњене су компаративне предности коришћене нумеричке методе која се заснива на праћењу флуидних делића без фиксне повезаности у виду рачунске мреже, у односу на конвенцијалне методе у којима се користе рачунске мреже. На крају уводног поглавља описани су хидротехнички проблеми који су решавани у дисертацији.

Преглед литературе је подељен на два дела. У првом делу су наведени радови у којима су представљени различити математички модели који се користе у нумеричком моделирању отворених токова помоћу SPH методе. У другом делу, наведени су радови у којима су анализирани различити поступци за унапређење нумеричких аспеката SPH методе, као што су проблеми тачности, стабилности и задавање граничних услова. Сва три проблема, анализирана су у нумеричким огледима који су обављени у дисертацији.

Треће поглавље садржи опис два различита SPH модела у оквиру којег су представљени оригинални поступци који су омогућили постизање одговарајуће тачности у разматраним рачунским примерима. Помоћу једног модела решавани су проблеми просторног струјања и струјања у вертикалној равни, док је помоћу другог, решаван проблем струјања у хоризонталној равни.

Струјање у вертикалној равни анализирано је у четвртном поглављу. У овом поглављу се приказују резултати примене SPH модела у решавању проблема рушења бране. Оцена тачности анализираних рачунских модела обављена је поређењем резултата нумеричких огледа са лабораторијским мерењима. Уз оцену тачности, представљена је и анализа осетљивости резултата на промену вредности различитих параметара рачунског модела.

У петом поглављу, представљена је примена просторног SPH модела у прорачуну устаљеног бурног течења у закривљеним цевима. Као и у претходном поглављу, приказана је анализа осетљивости параметара рачунског модела и оцењена је тачност SPH методе поређењем са мерењима на физичком моделу. Уз наведено, анализирана је стабилност методе, праћењем промена временски осредњених вредности физичких величина у нумеричким симулацијама. Такође, процењен је утицај релативног положаја честица флуида у односу на границу струјања, као и утицај промене међусобног растојања између честица флуида, на нумеричке осцилације зависно променљивих величина модела.

Резултати примене SPH методе у моделирању струјања у хоризонталној равни приказани су у шестом поглављу. Представљене су могућности примене SPH методе у прорачуну устаљеног течења на физичком моделу речне кривине. При томе су разматрани исти утицаји као и приликом анализа обављених за просторна струјања.

У последњем поглављу су сумирани закључци претходних поглавља и дате препоруке за даља истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

С обзиром на рачунску захтевност, SPH метода је почела значајније да се развија тек у последње време, заједно са убрзаним развојем рачунарске технике. Ова метода, како се често наводи, услед нерешених проблема који се везују за тачност, стабилност и задавање граничних услова, још увек није доживела пуну зрелост. Разлог за то се може наћи у неизводљивости теоријских испитивања нумеричких аспеката, која је последица унапред непознатог положаја рачунских тачака у току прорачуна. Ипак, основна предност методе, која се огледа у томе да не захтева формирање рачунске мреже, и даље привлачи велики број истраживача, што потврђује значајан број објављених радова у последње време, као и скорашње формирање посебне групе у научној заједници за решавање претходно наведених проблема (SPHERIC Grand Challenge Working Group). У овој дисертацији, проблематични аспекти методе анализирани су нумеричким огледима, у примерима који су значајни за хидротехничку праксу, чиме је проширена база сазнања о применљивости SPH методе.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Већину радова који су наведени у дисертацији чине они у којима су анализирани нумерички аспекти стандардног SPH модела који је дефинисао Monaghan, а на ком су засновани и рачунски модели коришћени у дисертацији. Како би се стекла шира слика о применљивости SPH методе, коришћени су и радови у којима су представљени алтернативни облици SPH методе, као што је на пример ISPH модел који су развили Cummins и Rudman. Основни принципи SPH методе су објашњени коришћењем приступа који су представили Liu и Liu.

Међу цитираним радовима налази се велики број оних који су објављени у водећим иностраним часописима као што су *Journal of Computational Physics*, *Computers and structures*, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, *Journal of fluid mechanics* и *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Услед ограничења које SPH метода има у погледу обављања одговарајућих теоријских анализа за оцену тачности, кандидат је у три различита примера течења, тачност методе анализирао поређењем резултата нумеричких огледа и мерења на физичким моделима. При томе су за оцену тачности коришћене стандардни поступци који се користе у статистици.

Припрема података потребних за нумеричке симулације и визуелизација резултата обављани су помоћу више програмских алата који су развијени за потребе ове дисертације. При томе су коришћене различите интерполационе технике, као што су линеарна и кубна интерполација, односно интерполација помоћу SPH теорије.

3.4. Применљивост остварених резултата

Коришћење SPH методе постаје све популарнији нумерички алат за инжењере, с обзиром да омогућава моделирање течења без утрошка времена на дефинисање рачунских мрежа. Унапређења рачунских модела која су предложена у дисертацији омогућавају боље предвиђање вредности величина које, у случајевима различитих типова струјања, утичу на пројектна решења у хидротехници.

Предложеним поступцима у дисертацији омогућава се, у случају просторног струјања или струјања у вертикалној равни, веома добро предвиђање притисака који се јављају приликом интеракције флуида и чврстих граница, као и једнаставно задавање граничног услова на отвореној граници у случају бурног струјања. Код примене SPH модела струјања у хоризонталној равни, предложени поступци омогућавају

боље предвиђање енергетских губитака и задавање граничних услова у случају неправилне геометрије речних корита.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Иspoљене способности током израде ове дисертације показују да кандидат Никола Росић поседује квалитете потребне за самостални научни рад. Кандидат је савладао стандардне научне методе, развио критичку мисао која је потребна код анализе резултата и извођења закључака, и уз то показао оригиналност у решавању анализираних проблема из одговарајуће научне области.

Кандидат Никола Росић је током израде дисертације, овладао различитим техникама за припрему и визуелизацију података, чије је познавање неопходно за ефикасан научни рад. При томе је користио различите програмске језике, укључујући и модерну екстензију програмског језика C++, која омогућава паралелизацију у извођењу рачунских алгоритама.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У дисертацији Николе Росића анализира се применљивост SPH методе у различитим примерима значајним за хидротехничку праксу. У току израде дисертације предложене су допуне два стандардна SPH рачунска модела и анализирана је осетљивост промене вредности различитих параметара модела на резултате нумеричких прорачуна. На основу приказаних резултата у дисертацији, могу се издвојити следећи научни доприноси:

- Кандидат је за конкретне примере течења, значајне за хидротехничку праксу, нумеричким огледима доказао стабилност SPH методе и дао препоруке за избор вредности параметра рачунског модела. При томе је потврђен утицај укупног броја честица, релативног положаја честица у односу на границу струјања, као и коришћења рачунских филтера на вредности нумеричких осцилација.
- Показано је да се са SPH методом могу проценити утицаји брзине подизања уставе на кретање таласа са стрмим челом код проблема рушења бране, односно, да се може проценити карактер струјања у кривини закривљених проводника у случају течења у бурном режиму.
- Развијен је оригинални поступак за једноставно задавање граничних услова на отвореној граници у случају устаљеног течења у бурном режиму, при чему се користи рачунски најједноставнији тип честица за представљање чврсте границе.
- У случају раванског струјања у хоризонталној равни, предложен је поступак за задавање граничног услова на отвореним границама, који је применљив у моделирању устаљеног струјања у мирном режиму у речним коритима неправилног облика.
- Представљен је оригинални начин за поправљање тачности прорачуна, одговарајућом модификацијом изворног члана у динамичкој једначини, односно моделирањем турбулентних напона.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Научни доприноси наведени у претходној тачки омогућавају ефикасније прорачуне помоћу SPH методе. У конкретним примерима дате су препоруке за избор вредности параметара које зависе од типа течења које се испитује.

У случају симулације струјања насталог услед „рушења бране”, показано је како се тачност методе повећава узимањем у обзир брзине подизања уставе (уклањања бране). Ову анализу тачности омогућила су новија лабораторијска испитивања проблема рушења бране. У истом примеру показано је како се тачност у процени притисака приликом интеракције флуида и чврсте границе, може повећати променом параметара стишљивости честица граница. Уколико се ова корекција не користи, прорачунате вредности притисака значајно одступају од измерених.

Предложеним поступком за задавање граничног услова на отвореној граници у случају просторног SPH модела, у којем се користе тзв. динамичке честице, омогућава се смањивање броја рачунских операција, у односу на стандардни поступак са коришћењем резервоара честица, у којем се гранични услови не задају директно. У случају раванског модела, предложеним поступком за задавање граничних услова на отвореној граници омогућава се моделирање течења у речним коритима неправилног облика, што није могуће у случају стандардног поступка.

Модификација изворног члана преко којег се рачуна утицај трења у моделу струјања у хоризонталној равни, омогућила је вернију репродукцију брзина у близини обала. Ова модификација се не може користити заједно са вештачком вискозношћу која се стандардно користи у SPH методи. Зато је, уместо члана са вештачком вискозношћу, коришћен члан преко којег се моделирају турбулентни напони. За ту сврху је предложена употреба концепта Bussinesq-а и коришћење израза Elder-а за срачунавање турбулентне вискозности.

4.3. Верификација научних доприноса

У оквиру овог истраживања кандидату је прихваћен један рад у часопису са SCI листе, као и радови у часописима од националног значаја и на међународним и националним научним скуповима:

Рад у међународном часопису (M23):

Rosić, N., Kolarević, M., Savić, Lj., Đorđević, D., Kapor, R.: Numerical modelling of supercritical flow in circular conduit bends using SPH method , *Journal of Hydrodynamics*, 2016 (prihvaćen rad) (IF=0.776) (ISSN 1001-6058).

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

Rosic, N., Horvat, Z., Horvat, M., and Zindovic, B.: Evaluation of the SPH Method in Two Dimensional Open Channel Flow Modeling. *In Proceedings of the 7th IWA Eastern European Young Water Professional Conference*, Belgrade, Serbia, 2015., pp. 194–198.

Рад у водећем часопису од националног значаја (M51):

Rosić, N., Savić, Lj., Đorđević, D.: Rešavanje jednačina kretanja fluida metodom zasnovanom na praćenju fluidnih delića (SPH metoda), *Vodoprivreda*, 46 (267-272), pp. 187-197, 2014 (ISSN: 0350-0519)

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63):

Rosić, N., Kolarević, M.: Procena karaktera strujanja u krivini zatvorenog provodnika pomoću SPH metode, *17. Savetovanje SDHI i SDH*, Vršac, Srbija, 2015., 77-86.

Rosić, N., Kolarević, M.: Numeričko modeliranje tečenja sa slobodnom površinom pomoću metode SPH, *16. Savetovanje SDHI i SDH*, Donji Milanovac, Srbija, 2012., 814-823

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У докторској дисертацији под насловом „Нумеричко моделирање отворених токова засновано на праћењу флуидних делића” анализирани су, помоћу нумеричких огледа, стабилност и тачност SPH нумеричке методе. Нумеричким огледима обухваћено је неколико примера из хидротехничке праксе. Кандидат је две стандардне варијанте методе које се користе за моделирање просторног и раванског струјања, допунио оригиналним поступцима како би се у разматраним примерима обезбедило задовољавајуће слагање резултата прорачуна са мерењима на физичким моделима. Поред тога, у сваком конкретном примеру спроведена је анализа осетљивости резултата прорачуна на промену вредности параметара модела и дате су и препоруке за усвајање њихових вредности. Тако су приказаним истраживањем допуњена сазнања о могућностима примене SPH методе у решавању проблема из хидраулике отворених токова.

Имајући у виду све што је речено у вези са актуелношћу теме и резултатима до којих је кандидат дошао у свом раду, констатујемо да ова дисертација представља вредан научни допринос у области примене нумеричких метода у хидротехници. Стога предлажемо да се докторска дисертација под насловом: „Нумеричко моделирање отворених токова засновано на праћењу флуидних делића” прихвати и закаже њена јавна одбрана.

У Београду, 14.07.2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Љубодраг Савић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

проф. др Никола Младеновић, дипл. маш. инж.
Универзитет у Београду, Машински факултет

в. проф. др Радомир Капор, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

в. проф. др Тина Дашић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

доц. др Дејана Ђорђевић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет