УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
-ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Бр. 323/10-14
30 JUL 2015 год.
БЕОГРАД
Булевар краља Александра 73

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

ПРЕДМЕТ: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Андријане Тодоровић, дипл. инж. грађ.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 323/9-14 од 10.07.2015. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Андријане Тодоровић, дипл. грађ. инж., под насловом:

УТИЦАЈ ПЕРИОДА КАЛИБРАЦИЈЕ НА ОЦЕНУ ПАРАМЕТАРА КОНЦЕПТУАЛНИХ ХИДРОЛОШКИХ МОДЕЛА РАЗЛИЧИТИХ СТРУКТУРА

Наслов на енглеском језику:

IMPACT OF CALIBRATION PERIOD ON PARAMETER ESTIMATES IN THE CONCEPTUAL HYDROLOGIC MODELS OF VARIOUS STRUCTURES

После прегледа достављене дисертације, Комисија подноси Наставно-научном већу Грађевинског факултета следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Андријана Тодоровић, дипл. грађ. инж., уписала је докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду школске 2008/09 године. Током школске 2012/13 кандидаткињи је одобрено мировање права и обавеза према члану 87 Статута Грађевинског факултета.

Кандидаткиња је 1.9.2014. поднела молбу Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду за одобрење израде докторске дисертације под насловом „Утицај периода калибрације на оцене параметара концептуалних хидролошких модела различитих структура“. Одлуком Наставно-научног већа бр. 323/3 од 12.9.2014. иманована је Комисија за пријем теме докторске дисертације у саставу: доц. др Јасна Плавшић и в. проф Милош Станић са Грађевинског факултета у Београду, и доц. др Борислава Благојевић са Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу. Комисија је поднела извештај 7.10.2014. који је прихваћен на седници Наставно-научног већа 16.10.2014. (одлука бр. 323/4). За ментора је именована доц. др Јасна Плавшић, а за коментора в. проф. Милош Станић. На основу сагласности већа научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду од 10.12.2014. (одлука бр. 61206-4856/2-14), Наставно-научно веће Грађевинског факултета одобрило је израду ове докторске дисертације.

Кандидаткиња је предала завршену дисертацију Студентској служби Грађевинског факултета 3.7.2015. На седници одржаној 9.7.2015. Наставно-научно веће Грађевинског факултета именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: в. проф. др Јасна Плавшић, в. проф. др

Милош Станић, в. проф. др Јован Деспотовић и доц. др Немања Бранисављевић са Грађевинског Факултета у Београду, и доц. др Борислава Благојевић са Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу (одлука бр. 324/9-14).

1.2 Научна област дисертације

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

1.3 Биографија кандидаткиње

Андријана Тодоровић је рођена 20. октобра 1983. године у Београду, где је завршила основну школу и VI Београдску гимназију. Грађевински факултет Универзитета у Београду уписала је 2002. године и дипломирала 2008. године. Њен дипломски рад „Картирање ризика од поплава у долини Топчидерске реке“ оцењен је највишом оценом и награђен од стране Привредне коморе Београда за најбољи дипломски рад у 2008. години.

Школске 2008/09. године уписала је докторске студије на Грађевинском факултету у Београду, студијски програм Грађевинарство. До краја школске 2011/12 године положила је девет испита са просечном оценом 9,89, после чега је пријавила и завршила докторску дисертацију под насловом „Утицај периода калибрације на оцене параметара концептуалних хидролошких модела различитих структура“.

У периоду од маја 2008. до фебруара 2009. године радила је у ЈКП Београдски вододвод и канализација. Од фебруара 2009. године запослена је на Грађевинском факултету Универзитета у Београду као асистент-студент докторских студија. Ангажована је на више предмета на основним-академским, мастер и специјалистичким академским студијама EDUCATE из области хидротехнике и водног еколошког инжењерства.

Поред ангажовања у настави, кандидаткиња је учествовала на три пројекта које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, као и на неколико пројеката реализованих у оквиру Института за хидротехнику и водно-еколошко инжењерство.

Члан је Европске уније за геонауке (European Geosciences Union – *EGU*), Српског друштва за хидрауличка истраживања и Српског друштва за хидрологију. Учествовала је у организацији и уређивању зборника радова са више научних скупова. Рецензент је за часопис „*Journal of Water and Climate Change*“.

Влада енглеским језиком и служи се руским и немачким језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Утицај периода калибрације на оцене параметара концептуалних хидролошких модела различитих структура“ написана је на енглеском језику под насловом: “Impact of calibration period on parameter estimates in the conceptual hydrologic models of various structures”. Садржи 4 поглавља: Увод, Методологија, Резултати и дискусија и Закључна разматрања. Дисертација садржи и резиме (на српском и на енглеском језику), списак коришћене литературе, прилоге и биографију кандидаткиње. Текст дисерације је написан на 230 страна и садржи 112 слика и 28 табела, док су прилози приказани на 102 стране.

Структура дисертације и тескт 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 појединичаних поглавља

Поглавља у дисертацији имају логичан след. Најпре је представљена тема истраживања и образложен њен значај, затим су систематично изложени методологија и резултати, и на крају су изведени закључци и дате препоруке за даље истраживање.

У првом, уводном, поглављу укратко су описани механизми генерисања отицаја, хидролошки модели, приступи и проблеми у оцењивању параметара хидролошких модела, као и неизвесности у континуалним хидролошким симулацијама. Направљен је осврт на различите аспекте аутоматске калибрације концептуалних хидролошких модела, као што су избор критеријумских функција и оптимизационих алгоритама. Приказане су и методе вишекритеријумске калибрације модела и калибрације дистрибуираних хидролошких модела. У овом поглављу дат је и свеобухватни преглед референтне литературе која се бави анализом примене хидролошких модела ван калибрационог модела и зависностима оцена параметара од карактеристика калибрационог периода, и . Приказани су циљеви истраживања и хипотезе и укратко је изложена структура дисертације.

Друго поглавље дисертације састоји се из шест потпоглавља:

1) *Хидролошки модел 3DNet-Catch*. У овом потпоглављу детаљно су описани сви модули овог модела: модул интерцепције, модул за симулацију топљења снега, модул за симулацију влаге у земљишту, и модули за трансформацију отицаја и пропагацију поплавних таласа у водотоцима. За сваки модул су дате једначине, почетни услови и параметри. Приказане су четири верзије модела које су коришћене у овом истраживању.

2) *Вишекритеријумска калибрација хидролошког модела применом алгоритма AMALGAM*. AMALGAM је алгоритам за симултану вишекритеријумску оптимизацију, који се састоји из неколико глобалних оптимизационих алгоритама. Калибрација модела применом AMALGAM-а даје тзв. Парето-оптималне оцене параметара или параметре Парето-фронта. Укратко су описана својства овог алгоритма, као и четири глобална оптимизациона алгортима која су укључена у коришћену верзију AMALGAM-а. За све алгоритме су дати параметри који су усвојени у овом истраживању.

3) *Примена модела 3DNet-Catch за хидролошке симулације.* У овом потпоглављу је описан поступак спровођења хидролошких симулација помоћу модела 3DNet-Catch. Образложени су почетни опсези параметара модела, а приказана је и техника регуларизације које је коришћена за калибрацију дистрибуиране верзије модела. С обзиром да је у овом истраживању написан нови програмски код за модел 3DNet-Catch уз одређена прилагођавања за потребе формулисања различитих структура модела, пре примене модела спроведена је његова верификација и анализа осетљивости параметара. Модел 3DNet-Catch је тестиран применом тестова *SST* (*Split Sample Test*) и *DSST* (*Differential Split Sample Test*), као и поређењем резултата са резултатима модела HBV, који је референтни модел који се користи и за израду хидролошких прогноза у Републичком хидрометеоролошком заводу Србије. За детекцију утицајних параметара модела примењена је анализа осетљивости која се заснива на линеарној регресији. Анализиран је утицај параметара модела на запремину симулираног отицаја и на динамику одзива слива.

4) *Динамичка калибрација модела*. У овом потпоглављу описан је поступак динамичке калибрације модела у различитим калибрационим периодима дужине од 1 до 25 година издвојеним из целокупног периода хидролошких осматрања. Дужина периода калибрације је сукцесивно повећавана за једну хидролошку годину, а сваки период дате дужине почиње и завршава се годину дана касније у односу на претходни.

5) *Анализа консистентности оцена параметара и перформанси модела кроз време*. Приказани су приступи који су коришћени у анализи консистентности Парето-оптималних оцена параметара, затим поступци у анализи корелисаности оцена параметара и хидро-метеоролошких карактеристика током периода калибрације, утицаја избора критеријумских функција и утицаја сложености структуре модела на временску променљивост Парето-оптималних параметара модела.

6) *Сливови разматрани у овом истраживању*. У овом истраживању симулације отицаја вршене су за слив реке Колубаре до водомерне станице (в.с.) Словац, за слив реке Топлице до в.с. Дољевац и за слив реке Млаве до в.с. Велико село. Анализиран је хидролошки режим ова три слива, са посебним освртом на хомогеност осмотрених серија. Приказане су и карактеристике сливова (намена земљишта, педолошке и геолошке карактеристике).

У трећем поглављу дисертације приказани су резултати моделирања три слива и њихова анализа. У првом потпоглављу приказани су резултати анализе осетљивости параметара и тестирања модела. У другом потпоглављу приказани су резултати динамичке калибрације модела. Они су исказани помоћу медијане оцена Парето-оптималних параметара модела и *IC* статистике која квантификује варијабилност параметара на Парето фронту и показује могућност идентификације параметра. Приказани су и показатељи ефикасности модела. Анализирана је повезаност између медијана Парето-оптималних параметара и појединих хидро-метеоролошких величина као што су просечни годишњи протоци, годиње падавине, просечна годишња температура и потенцијална евапотранспирација, просечан број кишних и ледених дана, средња вредност индекса претходних падавина и температура током периода калибрације, итд. Такође су приказани и резултати анализе утицаја различитих критеријумских функција и сложености структуре модела на консистентност оцена параметара модела.

У четвртом поглављу укратко су резимирани резултати истраживања и дати су закључци и препоруке за калибрацију концептуалних хидролошких модела и за даља истраживања.

Након Закључних разматрања дат је списак цитиране литературе са преко 200 библиографских јединица. У 12 прилога на 102 стране детаљно су графички и табеларно приказани резултати свих анализа спроведених у оквиру дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост и оригиналност

Концептуални хидролошки модели имају веома широку примену: користе се за израду хидролошких прогноза и анализу утицаја климатских промена на водне ресурсе, процену меродавних протока на разматраном профилу водотока на основу којих се димензионишу хидротехнички објекти, управља акумулацијама или предвиђају мере заштите од поплава. Међутим, поузданост резултата ових модела у великој мери зависи од оцена параметара модела. У оценама параметара постоје велике неизвесности, које су, између осталог, проузроковане и избором калибрационог периода. Неизвесности параметара хидролошких модела су у фокусу хидролошких истраживања током последњих 20 година, с тим да избор периода калибрације није испрва био препознат као значајан извор неизвесности како у оценама параметара. Иако први радови у којима је анализиран овај проблем датирају из 80-тих година 20. века, већина радова из ове области је објављена током последњих 5 година, чиме се потврђује савременост овог истраживања. Ова тема је постала веома актуелна због очигледних промена у хидролошком режиму река у три домена: промене намене земљишта на сливовима, промене у демографској и социо-економској структури која утиче на однос према водним ресурсима, и климатске промене. Ове промене намећу питање консистентности калибрисаних модела и поузданости хидролошких симулација у променљивим условима.

Свеобухватни преглед литературе у овој дисертацији указује да:

- Не постоји општеприхваћена методологија за квантификацију неодређености параметра модела услед избора периода калибрације модела;
- Није развијен приступ калибрацији модела који би као резултат имао мању неизвесност у оценама параметара услед бољег избора калибрационог периода;
- Утицај периода калибрације на оцене параметара добијене симултаном вишекритеријумском оптимизацијом није довољно изучен, па самим тим није анализиран ни утицај калибрационе

стратегије (тј. комбинације критеријумских функција) на консистентност оцена параметара модела;

- Утицај сложености структуре модела на консистентност оцене параметара није изучаван. Ни једно истраживање се није бавило просторно дистрибуираним хидролошким моделима.

Искораци који су направљени у овом истраживању у односу на досадашња која су се бавила овом проблематиком потврђују његову оригиналност. У овој дисертацији утицај периода калибрације на оцене параметара модела анализиран је калибрацијом модела 3DNet-Catch на све периоде дужине од 1 до 25 узастопних хидролошких година применом оптимизационог алгоритма AMALGAM, чиме су обухваћени сви могући калибрациони периоди из периода осматрања. Овакав начин динамичке калибрације модела није примењен у до сада објављеним радовима. Такође, свега пар радова је базирано на Парето-оптималним параметрима, али ни у једном од радова није примењиван оптимизациони алгоритам AMALGAM. Хидролошки модел 3DNet-Catch који је коришћен у овом истраживању развијен је у Институту за хидротехнику и водно еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду, и није коришћен ни у једном истраживању до сада. Овај модел је знатно сложенији од модела који су коришћени у досадашњим истраживањима из ове области. У дисертацији је испитиван и утицај калибрационе стратегије и сложености структуре модела на консистентност оцена параметара модела, што такође није анализирано до сада. Посебно се истиче и пионирски покушај анлизе консистентности параметара дистрибуираних модела (тзв. „супер-параметара“). У анализи утицаја хидро-метеоролошких карактериситка периода калибрације на оцене параметара модела коришћена је техника машинског учења „random forest”, при чему је утицај карактеристика периода калибрације на оцене параметара квантификован кроз тзв. значајност променљиве (енгл. *variable importance*). Ово је први покушај да се повезаност карактеристика периода калибрације и оцена параметара модела детектује применом техника машинског учења.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

Свеобухватност коришћене литературе и њена анализа посебно издваја ову дисертацију. У оквиру ове дисертације цитирано је 209 библиографских јединица. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима, пре свега *Water Resources Research*, *Journal of Hydrology*, *Hydrology and Earth System Sciences*, *Hydrological Processes*, *Hydrological Sciences Journal* и *Advances in Water Resources*. Највећи број референци је новијег датума: 168 цитираних референци настало је после 2000. године, од чега је 75 настало између 2010. и 2015. године. Кандидаткиња је кроз преглед литературе у дисертацији обухватила најважније ауторе и публикације из области хидролошког моделирања, почевши од целокупног опуса Keitha Bevena, најеминентнијег научника из ове области, преко кључних доприноса у оцени перформанси модела које је дао H.V. Gupta, до савремених радова H.J. Savenije-а и других.

3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

За потребе овог истраживања спроведене су нумеричке симулације отицаја на три разматрана слива у Републици Србији. Ове симулације подразумевале су симултану вишекритеријумску оптимизацију параметара модела применом савременог алгоритма AMALGAM. За калибрацију дистрибуираног модела коришћена је савремена техника регуларизације. Анализа осетљивости параметара модела је извршена применом методе базиране на линеарној регресији, која је делимично модификована за потребе овог истраживања.

Нумеричким симулацијама је претходила обрада улазних података. За обраду просторних података коришћени су ГИС алати, док је за оцену недостајућих података у осмотреним серијама дневних падавина, и средњих дневних температура и протока коришћена вишеструка линеарна регресија. Додатно, тестирана је и хомогеност осмотрених временских серија применом теста значајности нагиба линеарне регресије.

Обрада веома обимних резултата нумеричких симулација захтевала је примену статистичке анализе. За детекцију повезаности између хидро-метеоролошких карактеристика периода калибрације и оцена

параметара модела, поред линеарне регресије коришћена је и техника машинског учења „random forest”. Визуализација добијених резултата динамичке калибрације је била посебно захтевна, имајући у виду димензионалност проблема. За потребе приказа резултата направљени су посебни скрипти у MATLAB-у, а за визуализацију неких резултата коришћени су и ГИС алати.

Све методе које су коришћене у оквиру овог истраживања су адекватне, и примењене су сврсисходно у циљу тестирања постављених хипотеза. Посебно се наглашава савременост примењених метода оптимизације као што је комбиновани оптимизациони алгоритам и техника регуларизације за просторно расподељене параметре.

3.4 Применљивост остварених резултата

Приказана методологија динамичке калибрације модела намењена је побољшању перформанси хидролошких модела. Као таква, може се користити за вредновање структуре постојећих хидролошких модела, односно за детекцију лоше параметризованих компоненти модела, што би омогућило њихов даљи развој. Такође се може кориситити и за тестирање већ калибрисаних модела, чиме би се пружио бољи увид у квалитет модела у односу на традиционално примењиван *SST* тест, уз незнатно више рачунског времена.

Динамичка калибрација модела може се користити за одређивање расподела параметара модела, чиме би се неодређеност параметара услед периода калибрације узела у обзир. Из ових расподела могу се бирати параметри за хидролошке симулације и изван калибрационог периода. На овај начин добили би се модели чији су параметри мање осетљиви на период калибрације, с обзиром да се динамичком калибрацијом модела добија више информација из осмотрених серија. Од овако калибрисаних модела очекују се поузданије симулације за израду хидролошких прогноза, анализу утицаја климатских промена, оцену меродавних протока за димензионисање хидротехничких објеката, итд.

Применом динамичке калибрације са различитим комбинацијама критеријумских функција може се квантификовати и квалитет калибрационе стратегије, а комбинација критеријумских функција која даје консистентније оцене параметара требало би да буде коришћена за калибрацију модела.

Методологија која је приказана у овој дисертацији може се применити са другим хидролошким моделима, другим оптимизационим алгоритмима или, уопште, са другим методама за оцену параметара модела, као и са подацима са различитих сливова.

У дисертацији су, поред свеобухватног прегледа литературе из ове области, који свакако представља добру основу за даља истраживања у овој области, дате и бројне смернице за даљи развој и унапређење приказане методологије у циљу даљег развоја хидролошких модела и постизања поузданијих континуалних хидролошких симулација.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Способности кандидаткиње које су испољене током израде ове дисертације показују да кандидаткиња Андријана Тодоровић поседује квалитете потребне за самостални научни рад. У уводном делу дисертације, кандидаткиња је критички анализирала не само радове директно везане за утицај периода калибрације на оцене параметара модела, већ и на проблеме у примени параметарских хидролошких модела уопште. Тиме је показала способност критичког сагледавања објављених истраживања, и синтезе њихових резултата на јасан, систематичан и концизан начин.

Током израде ове дисертације, кроз самостални научни рад, кандидаткиња је показала 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, и непристрасне анализе добијених резултата и извођења закључака. Кандидаткиња је показала способност организације истраживања и систематичност у прикупљању и обради великог броја улазних података и у приказу и анализи добијених резултата.

Поред наведеног, кандидаткиња је у највећој мери самостално припремала радове који су објављивани током израде дисертације, уз минималне интервенције ментора, коментора и коаутора, чиме је показала завидну научну зрелост.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Дисертација Андријане Тодоровић се бави актуелним проблемом квалитета хидролошких симулација детерминистичким хидролошким моделима и даје оригиналан допринос кроз предложену методологију динамичке калибрације модела. У одељку 3.1 приказани су елементи који нису изучавани у радовима других аутора, а који су предмет ове дисертације. Имајући у виду приказане резултате, научни допринос овог истраживања обухвата:

– Систематизацију досадашњих знања о временској променљивости параметара концептуалних хидролошких модела, односно неодређености параметара услед калибрационог периода.

– Унапређење хидролошког модела 3DNet-Catch у смислу развоја његових алтернативних структура и његовог повезивања са оптимизационим алгоритмом за аутоматску калибрацију модела уз процену неизвесности параметара модела.

– Развој методологије за динамичку калибрацију модела и тестирање консистентности оцена параметара модела и квантификацију неодређености параметара услед избора периода калибрације.

– Препоруке за даљи развој концептаулних хидролошких модела и њихову калибрацију, како би се добиле што консистентније оцене параметара и поузданије хидролошке симулације.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Хидролошки модел 3DNet-Catch, који је развијен у Институту за хидротехнику и водно еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду, повезан је са алгоритмом за једнокритеријумску и симултану вишекритеријумску аутоматску калибрацију, чиме је омогућена његова шира примена. Поред тога, развијене су различите верзије модела у погледу његове структуре (три верзије са хомогеним параметрима, при чему се у једној верзији број линеарних резервоара за симулацију диретног отицаја и број слојва земљишта оптимизују). Такође је написан и програмски код (MATLAB скрипт) намењен калибрацији дистрибуиране верзије модела уз примену савремене методе регуларизације.

У дисертацији је приказана је и модификована метода за анализу осетљивости параметара, базирана на линеарној регресији. Модификација се састоји у томе што је први пут коришћена анализа осетљивости према критеријумским функцијама уместо према запремини отицаја, максималним протоцима и сл. као у претходним радовима.

Консистенстност у оценама параметара модела је кључна за примену модела у условима премене климе. Стога ова дисертација представља значајан научни дорпинос на овом пољу. Поступак динамичке калибрације, који је приказан у овој дисертацији, није раније примењиван. Резултати ове анализе показали су изражену варијабилност Парето-оптималних параметара у времену (у зависности од периода калибрације). Показано је да утицајнији параметри мање варирају са периодом калибрације, с тим да су и оцене неких неутицајних параметара (нрп. температура топљења снега) релативно консистентне. Неодређеност неких параметара услед периода калибрације (нпр. параметара за симулацију базног отицаја) може бити и већа од почетне неодређености параметара модела које се огледа у широким почетним интервалима параметара. Показано је да је код већине параметара модела неодређеност услед калибрационог периода већа од варијабилности параметра у оквиру Парето фронта који је добијен калибрацијом модела на целокупном периоду осматрања. Комбиновањем анализе осетљивости параметара и резултата динамичке калибрације модела показано је да је варијабилност утицајних параметра, иако мала, одговорна за мању лошију ефикасност модела изван калибрационог периода.

На основу Пирсонових и Спирманових коефицијената корелације, и значајности променљиве (техника „random forest”) показано је да не постоји значајна повезаност између хидро-метеоролошких карактеристика периода калибрације и Парето-оптималних параметара представљених медијаном Парето скупа и статистиком *IC* која квантификује варијабилност параметра. На овај начин је доказано да параметри који су калибрисани током једног периода не морају да дају поуздане симулације током другог, независног периода, чак иако су ова два периода слична у смислу хидро-метеоролошких карактеристика.

У овој дисертацији разматран је утицај калибрационе стратегије на консистентност оцене параметара применом динамичке калибрације модела, што је први пут да су са овог становишта разматрани квалитет модела и стабилност критеријумских функција. Показано је да естиматор хетероседастичне максималне веродостојности (*HMLE*) као критеријумска функција даје најуже интервале оптимизованих параметара, а да коефицијент детерминације и корен средње квадратне грешке (*RMSE*) дају лошију ефикасност модела. Потврђено је да укључивање више критеријумских функција у калибрацију модела води ка консистентнијим оценама параметара уз већу ефикасност модела, па је овај приступ калибрацији модела препоручен.

Резултати динамичке калибрације модела коришћени су и за евалуацију различитих структура модела. Показано је да верзије модела са мањим бројем параметра могу давати подједнако поуздане симулације као и верзије модела са више параметара, с тим да се смањење броја параметра који се оптимизују мора оправдати резултатима анализе осетљивости. Такође је показано да просторна дистрибуираност параметара води ка консистентнијим оценама параметара и нешто бољој ефикасности модела, пре свега у смислу репродуковања динамике одзива слива. Стога је препоручена примена модела са што мањим бројем параметара које је потребно оптимизовати, али који би требало да буду просторно дистрибуирани.

С обзиром на значај консистентности оцена параметара хидролошких модела за њихову примену и поузданост резултата симулација, ове препоруке за калибрацију и развој концептуалних хидролошких модела представљају значајан допринос у области примене модела падавине-отицај и солидан основ за даља истраживања.

4.3 Верификација научних доприноса

У оквиру овог истраживања кандидаткиња је објавила један рад у часопису са SCI листе и неколико радова у часописима од националног значаја и на међународним и националним научним скуповима:

Рад у међународном часопису (M23):

Todorović, A., Plavšić, J., The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment, *Journal of Water and Climate Change*, doi:10.2166/wcc.2015.086 ($IF_{2010-2014}$ = 1.214).

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

Todorović, A., Plavšić, J. (2014), Role of Hydrologic Model Calibration at Climate Change Impact on Water Resources Assessment, in: Conference Proceedings IWA 6th Young Water Professionals Conference „East Meets West“, 28-30 May 2014 Istanbul. IWA – International Water Association. p. 303-313.

Todorović, A., Plavšić, J., Despotović, J., Pavlović, D. (2014) Trendovi u pokazateljima režima padavina u Beogradu. Proc. Int. Conf. on Contemporary Achievements in Civil Eng., Faculty of Civil Engineeing Subotica, University of Novi Sad, Subotica, Serbia, 24-25 April 2014, pp. 625-631, doi: 10.14415/konferencijaGFS2014.084; ISSN 0352-6852, eISSN 2334-9573

Plavšić, J., Topalović, Ž., Zlatanović, N., **Todorović, A.**, Vasilić, Ž., Jovanović, D. (2014) Hydrologic model for water and climate adaptation plan for the Sava River basin. Zbornik radova, Međ. kongresa “Brčko district – place for linking science and policy in domain of water management”, Brčko 28.6.2013., Asoc. geofizičara i ekologa Srbije, Komatina S. i Bojat N.Č. (eds.), ISBN 978-86-913953-9-1, pp. 29-37.

Todorović A., Stanić M., Prodanović D., Plavšić J. (2011), Advanced Hydrological Modelling in Urban Areas Using Hydroinformatic Tools, in: Trajkovic S., Arandjelovic D., Vasilevska Lj. (editors): Innovation as a Function of Engineering Development – Conference Proceedings, 25-26 November 2011 Niš. Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Nis., p. 357-362.

Todorović A., Rosić N., Plavšić J. (2010), Non-stationary statistical model for assessment of climate change effect upon river flows in Serbia, in: Dimkić M. (editor): IWA Balkans Regional Young Water Professionals Conference, 29-30 April 2010 Belgrade. Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources. p. 120-126

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (М34):

Todorović, A., Plavšić, J. (2015), Impact of the calibration period on the conceptual rainfall-runoff model parameter estimates, in: Geophysical Research Abstracts vol. 17, EGU2015-968, 12-17. April 2015 Vienna. European Geophysical Union.

Рад у водећем часопису од националног значаја (М51):

Тодоровић А., Плавшић Ј. (2014), Могућности примене софтверског пакета HEC-HMS за континуалне хидролошке симулације, *Водопривреда*, 46 (1-6), 117-128.

Деспотовић Ј., Плавшић Ј., **Тодоровић А**. (2009), Београдски канализациони систем у условима екстремних падавина, *Вода и санитарна техника*, 4 (jul-avgust), 47-55.

Јовановић М., **Тодоровић А.**, Родић М. (2009), Картирање ризика од поплава, *Водопривреда*, 41, (237-239), 31-45.

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (М63):

Todorović A., Pavlović D., Plavšić J., Prodanović D. (2013), Mogućnosti za analizu rada kanalizacionog sistema u uslovima jakih kiša – primer iz Beograda 30.05.2013., Vodovod i Kanalizacija '13 – Zbornik radova, p. 292-301, Savez inženjera i tehničara Srbije.

Despotović, J., Krajnc, U., Plavišić, J., Jaćimović, N., **Todorović, A.**, Živanović, V., Milić, S. (2013), Modeliranje opšteg kanalizacinog sistema u Mariboru za vreme jakih padavina, Vodovod i Kanalizacija '13 – Zbornik radova, p. 302-311, Savez inženjera i tehničara Srbije.

Despotović J., Ćatović S., Marjanović S., Kapor B., **Todorović A.** (2012), Analiza velikih voda na hidrološkim stanicama u Srbiji, 16. Savetovanje Srpskog društvo za hidraulička istraživanja i Srpskog društvo za hidrologiju – Zbornik radova, p. 580-588.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У докторској дисертацији под насловом „Утицај перида калибрације на оцене параметара концептуалних хидролошких модела различитих структура“ (наслов на енглеском језику: “Impact of calibration period on parameter estimates in the conceptual hydrologic models of various structures”) анализирана је консистентност оцена хидролошких модела. За потребе ове анализе развијена је оригинална методологија која је комбинована са савременим методама и техникама, од којих су неке први пут нашле примену у области параметарских хидролошких модела. Методологија приказана у овој дисертацији, укључујући и препоруке за калибрацију и развој хидролошких модела, представљају вредан научни допринос у области хидрологије, посебно у примени концептуалних хидролошких модела за израду континуалних хидролошких симулација. Такође, ова дисертација представља добру основу за даља истраживања у овој области. Широка примена ових модела у пракси и актуелност ове теме, која се огледа у великом броју радова новијег датума, потврђују значај овог истраживања.

На основу свега изнетог, Комисија констатује да докторска дисертација под насловом „Утицај перида калибрације на оцене параметара концептуалних хидролошких модела различитих структура“ (наслов на енглеском језику: “Impact of calibration period on parameter estimates in the conceptual hydrologic models of various structures”) представља оригиналан и значајан научни допринос у области примене хидролошких модела за континуалне хидролошке симулације. Стога Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати позитивну оцену докторске дисертације кандидаткиње Андријане Тодоровић, дипл. грађ. инж., и да сходно томе упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану дисертације.

Београд, 29.7.2015.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

В. проф. др Јасна Плавшић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

В. проф. др Милош Станић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

В. проф. др Јован Деспотовић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Доц. др Борислава Благојевић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет

Доц. др Немања Бранисављевић, дипл. грађ. инж.
Универзитет у Београду, Грађевински факултет