

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ГРАЂЕВИНСКОГ ФАКУЛТЕТА  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ**

**ПРЕДМЕТ:** Извештај о оцени докторске дисертације кандидаткиње Жане Топаловић

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета Универзитета у Београду бр. 22/45-2 од 28.04.2020. именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Жане Топаловић, дипл. грађ. инж., под насловом:

**РОБУСНА ЕВАЛУАЦИЈА И КАЛИБРАЦИЈА БИЛАНСНИХ ХИДРОЛОШКИХ МОДЕЛА У  
ПРОМЈЕНЉИВИМ КЛИМАТСКИМ УСЛОВИМА**

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

**ИЗВЕШТАЈ**

**1. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ И ДИСЕРТАЦИЈИ**

**1.1 Подаци о процедури одобравања и израде дисертације**

Кандидаткиња Жана Топаловић, дипл. грађ. инж., уписала је докторске студије на Грађевинском факултету Универзитета у Београду школске 2010/11 године. Током школске 2012/2013, 2017/2018 и 2018/2019 кандидаткињи је одобрено мировање права и обавеза због породилског одсуства а према члану 56. став 1. тачка 3. Статута Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

Кандидаткиња је 15.9.2016. поднела молбу Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду за одобрење израде докторске дисертације под насловом „Робусна евалуација и калибрација билансних хидролошких модела у промјенљивим климатским условима“. Одлуком Наставно-научног већа бр. 415/4 од 30.9.2016. именована је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: в. проф. др Јасна Плавшић и доц. др Андријана Тодоровић са Грађевинског факултета у Београду и доц. др Борислава Благојевић са Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу. Комисија је поднела извештај 20.10.2016. који је прихваћен на седници Наставно-научног већа 27.10.2016. За ментора је именована в. проф. др Јасна Плавшић. На основу сагласности већа научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду од 15.11.2016. (одлука бр. 61206-5684/2-16), Наставно-научно веће Грађевинског факултета одобрило је израду ове докторске дисертације на седници од 29.12.2016.

Кандидаткиња је предала завршену дисертацију Студентској служби Грађевинског факултета 16.3.2020. На седници одржаној 23.4.2020. Наставно-научно веће Грађевинског факултета именовало је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: проф. др Јасна Плавшић, в. проф. др Милош Станић и доц. др Андријана Тодоровић са Грађевинског Факултета у Београду, и доц. др Борислава Благојевић са Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу.

## 1.2 Научна област дисертације

Тема дисертације припада научној области техничко-технолошких наука Грађевинарство, односно ужој научној области Хидрологија која је дефинисана Статутом Грађевинског факултета у Београду.

## 1.3 Биографски подаци о кандидату

Жана Топаловић (девојачко презиме Рајковић) рођена је 24. јануара 1980. године у Мостару, где је завршила део основне школе до почетка грађанског рата 1992. године. Остатак основног образовања је завршила у Бањој Луци као и средњу Грађевинску школу у генерацији 1995-1999. Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањој Луци уписала је 1999. године и дипломирала на Грађевинском одсеку 2006. године са просечном оценом 8,5.

На Грађевинском факултету Универзитета у Београду 2007. године уписала је академске специјалистичке студије EDUCATE! из области водних ресурса и водног еколошког инжењерства које је успешно завршила 2009. године са просечном оценом 8,83. Докторске студије на програму Грађевинарство на Грађевинском факултету уписала је школске 2010/2011 године. До краја школске 2013/2014 положила је испите са просечном оценом 9,25, после чега је пријавила и завршила докторску дисертацију под називом „Робусна евалуација и калибрација билансних хидролошких модела у променљивим климатским условима“.

Од маја 2006. године запослена је на Архитектонско-грађевинско-геодетском факултету Универзитета у Бањој Луци у звању асистента-сарадника у настави. У новембру 2012. изабрана је у звање вишег асистента. Ангажована је на више предмета на основним и мастер академским студијама из области хидротехнике. Аутор је једног рада у међународном часопису са SCI листе, више радова у часописима од националног значаја и на научним скуповима, као и поглавља књиге која представља компилацију прегледних радова из области интегралног урбаног планирања а која је резултат међународног ERASMUS+ пројекта. Ангажована је на стручним и међународним пројектима у својству консултанта за хидрологију.

Влада енглеским и служи се француским и немачким језиком. Удата је и мајка је троје деце.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Робусна евалуација и калибрација билансних хидролошких модела у променљивим климатским условима“ садржи седам поглавља: Увод, Преглед литературе о хидролошком моделирању у контексту месечних билансних хидролошких модела, Методологија истраживања, Слинови и подаци коришћени за моделирање, Резултати, Сумарни преглед резултата и дискусија и Закључци и препоруке. На почетку дисертације дати су резимеи на српском и енглеском језику, садржај дисертације и спискови слика и табела. Основни текст дисертације је написан на 210 страна и садржи 98 слика и 58 табела, као и списак цитиране литературе са 335 библиографских јединица (на 20 страна). Укупно 16 прилога је приказано на 145 страна са посебним списком литературе. На крају дисертације дати су обавезни прилози и обрасци (биографија, изјава о ауторству, изјава о истоветности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу).

Структура дисертације и текст су у потпуности обликовани према упутству Сената Универзитета у Београду од 13.11.2019. године, и према посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије дисертације.

### 2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дат је општи увод у проблематику као и мотивација за бављење овом темом, затим су дефинисани проблеми и циљеви, хипотезе и задаци истраживања. На крају првог поглавља дат је преглед структуре докторске дисертације.

У другом поглављу дат је преглед релевантне литературе подељен у 10 потпоглавља која се односе на специфичне теме у хидролошком моделирању са посебним освртом на месечне билансне моделе. Кратко је описан хидролошки циклус и моделирање, концептуализација хидролошких модела са описима појединих компоненти водног биланса, калибрација и евалуација модела. Након тога, дат је преглед месечних билансних хидролошких модела, преглед литературе о моделирању у променљивим климатским условима и побољшању структура модела, и о методама вишемоделског осредњавања.

Треће поглавље дисертације садржи приказ методологије истраживања и обухвата пет потпоглавља:

- 1) *Преглед методологије истраживања.* У овом потпоглављу описани су приступи моделирању који су коришћени у дисертацији, у смислу поделе на периоде за калибрацију и валидацију, као и њихова примена у комбинацији са једно- или вишекритеријумском оптимизацијом.
- 2) *Структуре тестираних месечних билансних модела.* Овде је детаљно описано шест коришћених месечних билансних модела, шематски су приказане њихове структуре и дате једначине за прорачун. Потпоглавље се завршава поређењем структура одабраних модела.
- 3) *Калибрација месечних билансних хидролошких модела.* Описан је коришћени оптимизациони алгоритам AMALGAM, а затим је дат приказ изабраних циљних функција у калибрацији модела. Примењене су једнокритеријумска и вишекритеријумска калибрација. У вишекритеријумској калибрацији комбиноване су две циљне функције из реда статистичких показатеља (које циљају на тачност симулације динамике и запремине отицаја) са циљном функцијом из реда хидролошких потписа. У овом потпоглављу дате су почетне комбинације циљних функција за вишекритеријумску оптимизацију, које су у каснијим поглављима филтриране на основу добијених резултата. На крају потпоглавља описана је провера конзистентности резултата оптимизације применом алгоритма AMALGAM са датим обимом популације и бројем генерација.
- 4) *Евалуација ефикасности модела.* У овом потпоглављу изложен је евалуациони оквир који је развијен у склопу ове дисертације и представља главни алат који је послужио да се истраже питања којима се дисертација бави. Евалуациони оквир тестира робусност месечних билансних модела за примену у климатски променљивим условима провером конзистентности: у ефикасности модела, параметара модела и симулираних компоненти водног биланса. У том циљу евалуациони оквир обухвата четири корака: 1) калибрација модела на једном и валидација на преосталим потпериодима, 2) евалуација трансферабилности испитивањем конзистентности у ефикасности модела, оценама параметара модела и симулираних компоненти водног биланса као и визуелним прегледом резултата, 3) рангирање модела према одабраним критеријумима који се наслањају на резултате евалуације из претходног корака и 4) дијагностичка евалуација структура модела која проистиче из ефикасности модела према хидролошким потписима, варијабилности симулираних компонента водног биланса и оцена параметара модела. Евалуациони оквир је дефинисан за једнокритеријумску оптимизацију а затим је прилагођен за вишекритеријумску.
- 5) *Вишемоделско осредњавање резултата модела.* Овде је описано шест метода за вишемоделско осредњавање резултата симулација које су коришћене за проверу последње хипотезе: метод једнаких тежина, Гренцер-Бејтс метода, метода информационог критеријума, Гренцер-Раманатан метода, Бајесов и Малоузов метод осредњавања.

У четвртном поглављу детаљно су описана три слива која су коришћена као примери за моделирање. Дата је подела периода расположивих података на потпериоде за калибрацију и валидацију за оба приступа моделирању (Тирелов и *DSST* протокол) и хидроклиматски показатељи за сваки од периода. За сваки приступ моделирању дефинисани су водни и сушни периоди.

У петом поглављу дисертације приказани су резултати моделирања три слива и различитих примењених приступа моделирању и калибрационих стратегија. Сви резултати су изложени према корацима дефинисаним у евалуационом оквиру. Ово поглавље се састоји из четири потпоглавља:

- 1) *Евалуација модела Тиреловим протоколом за једнокритеријумску оптимизацију модела.* Овде су приказани резултати једнокритеријумске калибрације и крос-валидације на шест потпериода и за три слива.

- 2) *Евалуација модела DSST протоколом за једнокритеријумску оптимизацију модела.* У овом одељку су приказани резултати једнокритеријумске оптимизације три слива за приступ моделирању са два потпериода, сушни и водни.
- 3) *Евалуација модела Тиреловим протоколом за вишекритеријумску оптимизацију.* У овом потпоглављу приказани су резултати вишекритеријумске оптимизације за шест различитих комбинација циљних функција. Коришћене су три комбинације са по две циљне функције из реда статистичких показатеља, од којих су формиране још три комбинације са трећом циљном функцијом из реда хидролошких потписа. Приказани су резултати добијени помоћу једног модела који се показао као најбољи на основу претходних резултата, и на сливу са најизраженијим хидроклиматским променама за који су претходно добијени најлошији резултати.
- 4) *Поређење ефикасности вишемоделског осредњавања и појединачних МБХМ-а.* Овде су приказани резултати вишемоделског осредњавања једног доброг (трансфер мешовити-водни период) и једног лошег трансфера (трансфер водни-сушни период) на примеру једног слива за који су добијени најлошији резултати. Вишемоделско осредњавање је урађено са резултатима симулација шест модела (једнокритеријумска оптимизација спроведена на шест потпериода). Вишемоделско осредњавање је примењено и на резултате симулације дојених применом једног модела са различитим комбинацијама у вишекритеријумској оптимизацији.

У шестом поглављу укратко су резимирани резултати истраживања према дефинисаним хипотезама уз дискусију и образложења разлога за неприхватање појединих хипотеза истраживања.

У последњем, седмом поглављу дати су закључци сведени за сваку појединачну хипотезу истраживања, препоруке о примени месечних билансних хидролошких модела у условима променљиве климе и препоруке за даља истраживања.

Након последњег поглавља и списка цитиране литературе, у прилозима су графички и табеларно детаљно приказани резултати анализа спроведених у оквиру дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1 Савременост и оригиналност

Промене у хидролошком циклусу и у друштву су последњих година постале изузетно важна тема. Нестационарност хидролошких процеса, која може да настане услед климатских промена, начина коришћења земљишта и сл., мора се узети у обзир у процесу хидролошког моделирања. Од хидролошких модела се очекује да дају веродостојне резултате симулација без обзира на карактеристике периода симулације. Досадашња истраживања показују да постојећи хидролошки модели нису у стању да ефикасно симулирају утицај у периодима са различитим хидролошким и климатолошким карактеристикама у односу на калибрациони период. То практично значи да се модел калибрисан у периоду са одређеним карактеристикама може поуздано користити само у периодима са сличним карактеристикама.

Овај закључак не погодује примени хидролошких модела, нпр. у анализи утицаја климатских промена на водне ресурсе, јер се у таквим задацима од модела управо траже поуздани резултати симулација у климатски различитим условима. Из тог разлога, у последњој деценији је развијено неколико протокола за калибрацију и евалуацију модела у циљу бољег разумевања њиховог понашања у нестационарним условима. У тим истраживањима ретки су примери у којима су месечни билансни хидролошки модели (МБХМ) тестирани, иако су они често примењивани у пракси (нпр. за попуњавање низова средњих месечних отицаја, анализу водног биланса на сливу или региону за водопривредне потребе, процену утицаја климатских промена, као алат за процену појединих хидролошких компоненти од интереса). Свеобухватни преглед литературе у овој дисертацији указује да:

- за ову врсту модела недовољно је истражен утицај калибрационе стратегије на резултате модела и на трансферабилност модела на различите периоде;
- недовољно су истражени идентификабилност и временска стабилност параметара ових

модела, њихова ефикасност модела у репродуковању компоненти водног биланса као и методе за дијагностику њихове структуре;

- погодност појединих показатеља ефикасности ових модела није довољно истражена, а нарочито су ретко за оцену ефикасности коришћени хидролошки потписи; поред тога, информативност хидролошких потписа у погледу оцене ефикасности модела није позната нити је познато да ли је она независна од избора слива;
- утицај структуре МБХМ-а на њихову ефикасност у променљивим климатским условима није довољно изучавана;
- нису пронађени радови у којима је испитивана конзистентност симулација компоненти водног биланса при трансферима на периоде са различитим хидроклиматским показатељима;
- не постоји усвојена методологија за евалуацију концептуалних хидролошких модела уопште, а посебно не за МБХМ-е који су посебан изазов због кратких серија података.

Искораци који су направљени у овом истраживању у односу на досадашња која су се бавила овом проблематиком потврђују његову оригиналност. У овој дисертацији по први пут су МБХМ-и калибрисани путем оптимизационог алгоритма AMALGAM. Такође, први пут су примењене комбинације циљних функција са грешком хидролошког потписа који је одабран као најрелевантнији, унутаргодишња варијабилност протока у вишекритеријумској калибрацији. Највећа оригиналност и допринос ове дисертације састоји се у развијеном евалуационом оквиру. Тај оквир детаљно дефинише протокол за евалуацију МБХМ-а, и обухвата многе аспекте ефикасности модела који су у претходним радовима испитивани углавном појединачно, ако су испитивани уопште. Оваква детаљна евалуација која тежи да издвоји робусне моделе за примену у променљивим климатским условима није дефинисана у претходним истраживањима. Посебна специфичност предложеног оквира за евалуацију МБХМ-а је примена већег броја хидролошких потписа чија се (не)информативност истиче у процесу евалуације, као и конзистентност симулација компоненти водног биланса. Коначан резултат развоја и примене предложеног евалуационог оквира су конкретне препоруке о МБХМ-а и њиховој примени у условима променљиве климе, које представљају значајан допринос научној заједници и практичној примени МБХМ-а у различитим водопривредним анализама. Закључено је да класична евалуација МБХМ-а кроз једну или неколико мера ефикасности није довољна, већ де је неопходно проверити конзистентност компоненти водног биланса, што је нарочито значајно ако се модели користе за процену расположивих водних ресурса. Добра ефикасност модела по питању отицаја не гарантује добру ефикасност по питању симулација појединих компоненти водног биланса. Показано да задовољавајућа ефикасност модела током дугачког целог периода не значи да модел добро репродукује понашање слива и током краћих, климатски екстремнијих потпериода, па је предложен је ригорознији приступ моделирању са више потпериода. Такође је показано да моделе треба калибрисати применом вишекритеријумске оптимизације, уз обавезно укључивање хидролошких потписа да би оцене параметара осликавале хидролошке процесе на сливу и да би се смањила параметарска осетљивост на хидроклиматске карактеристике калибрационог периода. Ниједан појединачан модел није трансферабилан на екстремно сушне периоде, али је у овој дисертацији показано да вишемоделско осредњавање представља добар начин да се ублажи смањење ефикасности модела при трансферима на екстремније периоде, превентивно сушне. Такође, дате су и препоруке којој од тестираних шест метода треба дати предност. Сви ови закључци су значајан део одговора на савремена питања и проблеме у хидролошком моделирању и доприносе оригиналности ове докторске дисертације.

### 3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

У оквиру ове дисертације цитирано је 335 библиографских јединица, а свеобухватност коришћене литературе и њена анализа посебно дају значај овој дисертацији. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима (*Water Resources Research, Journal of Hydrology, Hydrology and Earth System Sciences, Hydrological Processes, Hydrological Sciences Journal* и *Advances in Water Resources*), а највећи број референци је новијег датума. Кандидаткиња је кроз преглед литературе у дисертацији обухватила најважније ауторе и публикације из области развоја хидролошког моделирања, хидролошких процеса, оцена тј. мера ефикасности модела, као и савремене радове на развоју протокола за робусну калибрацију модела.

### 3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

Рад у дисертацији је реализован хипотетичко-дедуктивним приступом типичним за хидролошко моделирање, које се не ослања у целини на физичке законе. На почетку рада постављене су хипотезе, затим је формирана методологија (протокол за вредновање модела), а затим су спроведени опсежни нумерички експерименти и њихова анализа у циљу доношења закључака о хипотезама.

Бројне нумеричке симулације процеса падавине-отицај су спроведене на изабрана три слива који се разликују по карактеристикама (у Аустралији, Аустрији и Србији), а за симулације је коришћено шест хидролошких модела. Параметри модела су идентификовани (калибрисани, оптимизовани) на изабраном периоду применом савременог оптимизационог алгорита AMALGAM из коришћење различитих критеријумских функција. Варирањем калибрационог периода, као и критеријумских функција, добијени су различити оптимизовани скупови параметара. Кандидаткиња је самостално израдила MATLAB скрипте са једначинама прорачуна компоненти водног биланса, скрипте за повезивање модела са AMALGAM за оптимизацију и крос-валидацију модела, скрипте за прорачун статистичких показатеља и хидролошких потписа, као и за обраду обимних резултата симулација.

Обрада веома обимних резултата нумеричких симулација захтевала је и примену статистичке анализе, укључујући и методу непараметарске линеарне регресије за детекцију повезаности између хидрометеоролошких карактеристика периода калибрације и оцена параметара модела. За потребе вишемоделског осредњавања коришћене су најпознатије методе које се могу наћи у литератури. Анализа осетљивости параметара модела је извршена применом Собол методе базиране на варијанси.

Све методе које су коришћене у оквиру овог истраживања су адекватне и примењене су сврсисходно у циљу тестирања постављених хипотеза.

### 3.4 Применљивост остварених резултата

Методологија која је приказана у овој дисертацији може се применити са другим хидролошким моделима, другим оптимизационим алгоритмима и на различитим сливовима. Уз мање измене, методологија може да се користи за евалуацију других хидролошких модела (нпр. Модела са дневним рачунским кораком). Коришћењем евалуационог оквира, моделар може да препозна моделе који су робуснији у односу на остале, као и мањкаве делове структуре појединачних модела.

Развијена методологија може да послужи за даља истраживања погодне калибрационе стратегије симулацијама са различитим комбинацијама критеријумских функција. У вези са овим, дат је и предлог нове калибрационе стратегије, која би омогућила трансферабилност модела и на најсушније периоде.

Применом предложене методологије за евалуацију модела долази се до јасних смерница које моделе треба користити у променљивим климатским условима и како их калибрисати. Такође, препорука за превазилажење проблема лоше ефикасности модела у екстремно сувим периодима која се односи на примену препоручене методе вишемоделског осредњавања је веома корисна за практичну примену у анализама утицаја климатских промена на водне ресурсе. Примена ове методологије може да упути и на жељене правце побољшања структуре модела и формирање алтернативних, нових структура модела.

У дисертацији су дате бројне смернице за даљи развој приказане методологије у циљу примене и даљег развоја МБХМ-а, и добијања поузданијих симулација у променљивим климатским условима.

### 3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је током израде дисертације показала да поседује квалитете потребне за самостални научни рад. У прегледу литературе, критички је анализирила не само радове директно везане за тему дисертације, већ и на проблеме у примени концептуалних хидролошких модела уопште са аспекта хидролошке нестационарности. Кроз самостални рад на развоју евалуационог оквира за хидролошке моделе, кандидаткиња је показала способност сагледавања проблема и формулисања хипотеза, затим осмишљавања поступка за тестирање постављених хипотеза, избора адекватних метода и техника, као

и непристрасне анализе добијених резултата и извођења закључака. Кандидаткиња је показала способност организације истраживања и систематичност у приказу и анализи добијених резултата.

## 4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1 Приказ остварених научних доприноса

Дисертација Жане Топаловић се бави актуелним проблемом квалитета хидролошких симулација месечним билансним хидролошким моделима (МБХМ-а) у променљивим климатским условима и даје оригиналан допринос кроз предложену методологију за калибрацију и евалуацију ових модела. Имајући у виду приказане резултате, оригиналан и вредан научни допринос овог истраживања обухвата:

- Систематизацију досадашњих знања о калибрационим стратегијама и евалуацији хидролошких модела и генерално о моделирању у променљивим климатским условима, као и потенцијала за побољшање структура хидролошких модела.
- Развој евалуационог оквира за робусно тестирање трансферабилности МБХМ-а у условима променљиве климе.
- Конкретне препоруке за моделирање у условима променљиве климе: који модел користити, коју калибрациону стратегију и коју методу вишемоделског осредњавања у случају да појединачни модели не постигну задовољавајућу ефикасност при трансферима.
- Препоруке за даљи развој МБХМ-а и њихову калибрацију, како би се добиле што поузданије симулације компоненти водног биланса у променљивим климатским условима.

### 4.2 Основне хипотезе дисертације

Основне хипотезе које су тестиране у дисертацији су следеће:

- 1) МБХМ могу да репродукују осмотрени водни биланс у променљивим климатским условима.
- 2) Ефикасност МБХМ-а зависи од њихове структуре (начина прорачуна хидролошких компоненти) и та веза је конзистентна на више различитих сливова.
- 3) Ефикасност МБХМ-а зависи од примењене калибрационе стратегије. Вишекритеријумска даје боље резултате од једнокритеријумске калибрације. Вишекритеријумска калибрација са укљученим хидролошким потписима као оптимизационим функцијама даје боље резултате него кад су оптимизационе функције само из реда статистичких показатеља.
- 4) Резултати вишемоделских осредњавања су бољи од резултата (сваког) појединачног анализираниог модела.

Хипотеза 1) је потврђена уз назнаку да постоје одређена ограничења у репродуковању осмотреног водног биланса. При валидацији на периодима са променом количине падавина већом од 15% модели не репродукују добро осмотрени водни биланс као ни на екстремно сувим периодима уопште. Хипотеза 2) није у потпуности потврђена, обзиром да да веза структуре модела и његове ефикасности није у потпуности конзистентна на више различитих сливова. Хипотезе 3) и 4) су у потпуности потврђене.

### 4.3 Критичка анализа резултата истраживања

У овој дисертацији анализирани су МБХМ-и и њихова примена у условима променљиве климе. Основни проблем који се јавља је лоша ефикасност у примени модела у периодима са различитим хидроклиматским карактеристикама у односу на калибрациони. Истраживана су два приступа моделирању са краћим и дужим временским серијама, калибрација са једном, две и три циљне функције уз додатак циљних функција из реда хидролошких потписа. Развијена је методологија за евалуацију модела намењена за идентификацију робусних МБХМ-а за примену у променљивим климатским условима. Важан део овог евалуационог оквира је дијагностичка евалуација која омогућава препознавање делова структуре модела који нису добро концептуализовани. Испитан је утицај примене метода вишемоделског осредњавања на трансферабилност модела.

Закључено је да МБХМ могу репродуковати осмотрени водни биланс у променљивим климатским условима уз одређена ограничења. Ефикасност модела је углавном добра у трансферима на водније периоде и углавном лоша у трансферима на сушније периоде. У општем случају, модели су трансферабилни на периоде у којима је разлика у падавинама до 15% у односу на калибрациони период.

Ефикасност модела зависи од његове структуре али и од слива и показатеља ефикасности, те није у потпуности конзистентна. Сви анализирани модели имају бољу ефикасност на воднијим сливовима, док се на сушном сливу поједине структуре модела издвајају као поузданије. За симулацију месечних отицаја предност имају структуре са 2-4 параметра и са два резервоара (резервоар влажности тла и подземни резервоар). Показано је да нису сви хидролошки потписи подједнако информативни у погледу ефикасности модела на различитим сливовима. Највећи број потписа модели лоше репродукују на сушном сливу. На свим сливовима само три потписа су увек информативна: унутаргодишња расподела месечних отицаја, стандардна девијација и 95% перцентил (велике воде). Потписи који су неинформативни су базни отицај, 5% перцентил (мале воде) и еластичност водотока. Компоненте модела везане за резервоар подземних вода и базног отицаја су проблематичне код свих анализираних модела, што је показано на свим разматраним сливовима. Истовремено, параметри модела везани за ове компоненте су најмање конзистентни, што није могло да се припише хидроклиматским карактеристикама ни параметарској осетљивости процењеној анализама осетљивости. Вудуко модел се истиче као најпоузданији по питању симулација свих компоненти водног биланса, што се може објаснити његовом јединственом структуром у виду „понуде“ и „потражње“ базиране на концепту познатог руског научника Михаила Будика.

Ефикасност модела зависи од примењене калибрационе стратегије, али не једнако на свим сливовима и према свим показатељима ефикасности. На сушном сливу не примећују се побољшања ефикасности са променом приступа моделирању (са краћих на дуже периоде калибрације и валидације). На водним сливовима, ефикасност је боља у приступу са дужим периодима, нарочито по питању хидролошких потписа који су бољи за 15% у односу на приступ са краћим периодима. Вишекритеријумска калибрација побољшава ефикасност модела, посебно ефикасност у репродуковању хидролошких потписа, која се повећава за 20%. Из анализираних комбинација циљних функција за вишекритеријумску оптимизацију издваја се комбинација у којој фигуришу количник средње квадратне грешке и стандардне девијације, грешка водног биланса и унутаргодишња расподела месечних отицаја. Ипак, у овој дисертацији није пронађена калибрациона стратегија са којом модели испуњавају постављене критеријуме о робусности у условима променљиве климе. Проблем је трансфер модела на екстремно сушни период, који може успешно да се превазиђе коришћењем метода вишемоделског осредњавања резултата. Такође, стечен је и увид у површину одговора свих модела на свим сливовима у циљу тражења објашњења зашто модели нису трансферабилни на сушне периоде: због калибрационе стратегије или због своје структуре. Из овога је проистекао закључак да само два модела, abcd и Вудуко, имају такве скупове параметара са којима имају задовољавајућу ефикасност на свим потпериодима, укључујући и екстремно сушни период. Овим је показано да је проблем у калибрационој стратегији, и дате су препоруке за даљи развој калибрационих стратегија за МБХМ.

Вишемоделско осредњавање даје значајно боље резултате од сваког појединачног модела јер се овим методом добијају симулације са којима се обезбеђује трансферабилност на сушни период. Најпогоднија од шест тестираних метода за вишемоделско осредњавање је метода Гранцер-Раманатан. Важан закључак ове анализе је да методе вишемоделског осредњавања дају боље резултате осредњавањем симулација више различитих модела него осредњавањем симулација једног модела добијених из више различитих вишекритеријумских оптимизација (са различитим комбинацијама циљних функција). Ово упућује на то да је у симулацијама различитих модела садржано више корисних информација различитог карактера (нпр. из појединих компоненти водног биланса).

Коначни резултати ове дисертације су препоруке да евалуација модела који ће се примењивати у условима променљиве климе треба да садржи проверу конзистентности компоненти водног биланса, те да се ефикасност оцењује са хидролошким потписима уз класичне статистичке показатеље. Приступ моделирању са краћим периодима се показао као робуснији, јер код дугачких периода долази до упросечавања хидроклиматских карактеристика. Тиме ови периоди не могу бити довољно водни или сушни да би обезбедили робусну евалуацију трансферабилности модела. У дисертацији је показано да задовољавајућа ефикасност током дугачког периода не значи да модел добро репродукује понашање



слива и током краћих, екстремнијих потпериода. Препоручена је вишекритеријумска калибрација са хидролошким потписом јер се у том случају губе раније примећене зависности параметара модела од хидроклиматских показатеља калибрационог периода. Са хидролошким потписом у комбинацији циљних функција, оптималне вредности параметара реалније осликавају хидролошке процесе на сливу. За симулације месечних компоненти водног биланса препоручује се Vudyko модел, уз евентуално побољшање његове структуре тако да максимални капацитет влажности тла буде променљива функција, а не константа. Очекује се да би се овом изменом ефикасност модела на сушном сливу побољшала. За моделирање на сливовима умереног климата, препоручује се увођење модула снега.

С обзиром на значај конзистентности хидролошких симулација за њихову примену и поузданост у различитим практичним проблемима, горе изнети резултати и конкретне препоруке за калибрацију и даљи развој МБХМ-а представљају значајан допринос у области примене модела падавине-отицај и солидан основ за даља истраживања.

#### 4.4 Верификација научних доприноса

У оквиру 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 (M22):**

**Topalović Ž.**, Todorović A., Plavšić J. (2020) Estimation of transferability of monthly water balance models in changing climate conditions, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 65, Issue 6, pp. 928-950, doi: 10.1080/02626667.2020.1725238 (IF = 2.18).

##### **Рад у водећем часопису од националног значаја (M51):**

Праштало П., **Топаловић Ж.**, Благојевић Б. (2017), Калибрација и верификација HEC-HMS модела неизученог слива помоћу кривих трајања протока, *Наука+Пракса* бр. 20, Часопис Института за грађевинарство и архитектуру, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу, Србија, 20-27.

**Топаловић Ж.**, Благојевић В., Судар Н. (2018), Одређивање хидрограма великих вода за потребе израде мапа опасности и ризика од поплава на примјеру слива ријеке Врбас, БиХ, *Водопривреда* 50 (291-293), 69-85.

Благојевић В., Судар Н., **Топаловић Ж.**, Бибовић А., Ђорђевић Б. (2018), Мапе опасности и мапе ризика од поплава на сливу ријеке Врбас у БиХ као подлога за израду планова управљања поплавним ризиком, *Водопривреда* 50 (291-293), 87-97.

##### **Прегледни радови у књигама:**

**Topalović Ž.**, Marković Đ. (2018) Integrated approach to flood management, In: *Integrated urban planning: directions, resources and territories*, Enrico Anguillari and Branka Dimitrijević Eds., TU Delft Open, 143-169.

Marković Đ., **Topalović Ž.** (2018) Spatial dimension of flood risk, In: *Integrated urban planning: directions, resources and territories*, Enrico Anguillari and Branka Dimitrijević Eds., TU Delft Open, 125-141.

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

Kondić N. and **Topalović Ž.** (2018) Flood frequency estimation uncertainty in practice: Case study of Sremska Mitrovica, Sava River, STEPGRAD Scientific conference with international participation, Banja Luka.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Имајући у виду савремене тенденције у области хидролошког моделирања, изучавање робусности билансних хидролошких модела са месечним временским кораком за примену у променљивим климатским условима унапређује сазнања о овој групи хидролошких модела, а истовремено је од значаја за унапређење хидролошког моделирања у пракси. У овој докторској дисертацији развијена је

оригинална методологија за евалуацију модела која комбинује савремене приступе, од којих су неке први пут нашле примену у области концептуалних хидролошких модела. Методологија приказана у овој дисертацији и препоруке за калибрацију и даљи развој овог типа хидролошких модела представљају вредан научни допринос у области хидрологије.

На основу свега изнетог, Комисија констатује да докторска дисертација Жане Топаловић под насловом „Робусна евалуација и калибрација билансних хидролошких модела у променљивим климатским условима“ представља оригиналан и значајан научни допринос у области развоја и примене хидролошких модела за континуалне хидролошке симулације. Стога Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да прихвати извештај Комисије и да упути захтев Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду за давање сагласности за јавну одбрану дисертације.

Београд, 29.04.2020.

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

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

---

доц. др Андријана Тодоровић, дипл. грађ. инж.  
Универзитет у Београду, Грађевински факултет

---

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