

Утицај избора калибрационе стратегије на трансферабилност мјесечних билансних хидролошких модела

Жана Топаловић¹

Андријана Тодоровић²

Јасна Плавшић³

РЕЗИМЕ: Хидролошки модели су незамјенљив алат у многим анализама потребим за испуњење задатака хидротехнике и водопривреде. Процјена утицаја климатских промјена на водне ресурсе је једна од типичних таквих анализа. Врло често се врши са хидролошким моделима који раде на мјесечном кораку јер та временска резолуција одговара резолуцији резултата из климатских модела. Трансферабилност хидролошких модела подразумијева добру ефикасност у периоду валидације односно ван периода калибрације модела који је по климатским карактеристикама доста различит од калибрационог периода (нпр. изразито сувљи или воднији период), што је веома битно за њихову примјену у климатски промјенљивим условима. Истраживања показују да ефикасност модела углавном знатно опада у валидационом периоду. У овом раду испитује се утицај различитих калибрационих стратегија на трансферабилност мјесечних билансних хидролошких модела (МБХМ). Под калибрационим стратегијама овдје се мисли на различит број и врсту циљних функција које се користе при оптимизацији модела. Период осматрања хидролошких величина на сливу ријеке Вимера у Аустралији је подијељен на пет непреклапајућих потпериода једнаке дужине. Обзиром да се показало да климатски модели предвиђају сушне услове и на сливовима Западног Балкана, овај слив је веома интересантан за анализу примјенљивости модела за симулације оваквих хидролошких услова. Међу многим МБХМа одабран је Будико модел као најпозданији у симулацијама на изразито сувим сливовима. Будико модел је калибрисан на сваком од дефинисаних потпериода и валидован на преосталим. Коришћене су различите калибрационе комбинације циљних функција у вишекритеријумској оптимизацији и то комбинације са 2 или 3 циљне функције из реда статистичких показатеља и хидролошких потписа. Резултати су упоређени са једнокритеријумском оптимизацијом са KGE циљном функцијом као базном калибрационом методом. Вредновање ефикасности модела је извршено уз помоћ модификованог евалуационог протокола развијеног специјално за случај оцјене ефикасности и трансферабилности МБХМ-а. У овом протоколу фигуришу не само статистички показатељи већ и показатељи ефикасности из реда хидролошких потписа као и ефикасност репродукције компоненти водног биланса.

Кључне ријечи: мјесечни билансни хидролошки модели, трансферабилност модела, калибрација модела, ефикасност модела, евалуација модела

Impact of the Calibration Strategy on Transferability of Monthly Water Balance Models

ABSTRACT: Hydrological models represent an indispensable tool needed to fulfil the tasks of hydraulic engineering and water management. Assessing the impact of climate change on water resources is one of the typical examples, in which monthly water balance models (MWBM) are often used, because they ran at the time steps that correspond to the resolution of the results from climate models. Transferability of hydrological models implies good efficiency in an independent validation period (i.e., outside the calibration period), which can be quite different from the calibration period in terms of climatic characteristics (e.g., extremely drier or wetter period). Good model performance in such periods is very important for their applications for climate change impact studies. Research shows that the efficiency of

¹ Доц. др Жана Топаловић, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци; zana.topalovic@aggf.unibl.org

² Доц. др Андријана Тодоровић, Грађевински факултет Универзитета у Београду; Uppsala University, Department of Earth Sciences; atodorovic@grf.bg.ac.rs

³ Проф др Јасна Плавшић, Грађевински факултет Универзитета у Београду; jplavsic@grf.bg.ac.rs

the models generally decreases during the validation period, especially if they differ significantly from the calibration one. In this paper, the influence of different calibration strategies on the transferability of monthly water balance models (MWBMs) is examined. Various calibration strategies imply different number and type of objective functions used for parameter optimization. The record period in the Wimmera River basin in Australia is divided into five nonoverlapping subperiods of equal length. Since climate models predict dry periods in Western Balkan countries in the future, this catchment is very interesting for analysis of model's applicability in such conditions. Amongst many MWBMs, Budyko is chosen as one of the most reliable for use in extremely dry catchments. The Budyko model was calibrated in each of the subperiods, and validated in the remaining ones. Different combinations of objective functions in multicriteria optimization were used, namely, combinations with 2 or 3 objective functions selected from the statistical performance measures and hydrological signatures group. The results were compared with the single-criteria optimization with the *KGE* objective function as the basic calibration method. The models are evaluated with the modified evaluation protocol developed specifically for evaluating the efficiency and transferability of MWBMs. This protocol includes not only statistical performance measures but also hydrological signatures, as well as the efficiency of reproduction of water balance components.

Keywords: monthly water balance models, model transferability, calibration, model efficiency, model evaluation

1 Увод

Нестационарност у хидролошким процесима, која може да настане услед климатских промјена или промјене начина коришћења земљишта, треба бити укључена у процес анализе и употребе хидролошких модела. Идеално, модели би требали да дају вјеродостојне резултате симулација без обзира на карактеристике периода симулације. Ово својство модела назива се трансферабилност. Досадашња истраживања показују да тренутне генерације хидролошких модела нису у стању поуздано симулирати отицаје у периодима са различитим хидроклиматским карактеристикама у односу на калибрациони период [1]–[3]. Другим ријечима, модел калибрисан у периоду са одређеним карактеристикама треба користити само за симулације током периода са сличним карактеристикама. Ту је посебно изражен проблем симулација модела у сушном периоду ако је модел калибрисан у водном, али већина модела не даје вјеродостојне симулације ни у обратном случају.

Овај закључак не погодује примјени хидролошких модела за анализе утицаја климатских промјена на водне ресурсе, које захтјевају поуздане резултате симулација у различитим климатским условима. Из тог разлога, у посљедњој деценији је произашло неколико протокола за калибрацију и евалуацију модела а у циљу бољег разумијевања њиховог понашања у нестационарним условима и евентуалног проналазак рјешења овог проблема [4]–[7]. Ипак, ријетки су примјери радова гдје су мјесечни билансни хидролошки модели (МБХМ) тестирани у овом контексту (осим нпр. [8], [9]), иако је њихова употреба у пракси веома широка (нпр. за попуњавање низова средњих мјесечних отицаја, анализу водног биланса на сливу или региону за водопривредне потребе, процјену утицаја климатских промјена, као алат за процјену појединих хидролошких компоненти од интереса). Поред тога што раде са мјесечним рачунским кораком, ове моделе карактеришу једноставне структуре са малим бројем параметара које је потребно оптимизовати.

Као један од начина да се побољша ефикасност и трансферабилност модела примјењује се вишекритеријумска калибрација, која подразумијева оптимизацију параметара модела тако да се симултано постигне добра ефикасност према више критеријума (нпр., тачност у симулацији запремине и динамике отицаја). Међутим, вишекритеријумска калибрација је ријетко примењивана са МБХМ-а, а посебно су ријетка истраживања на тему утицаја калибрационе стратегије на резултате модела, нпр. броја и врсте циљних функција које се користе при калибрацији. Иако постоји много истраживања на ову тему на моделима са већом резолуцијом (дневне, часовне), не може се са сигурношћу тврдити да закључци изведени за овакве моделе важе и за мјесечне.

У овом раду истражен је утицај различитих калибрационих стратегија на трансферабилност МБХМа, односно његову примјенљивост на периоде са различитим хидроклиматским карактеристикама у односу на калибрациони период. Под калибрационом

стратегијом се овде подразумева број и врста циљних функција (из реда статистичких показатеља или хидролошких потписа) за оптимизацију параметара модела. Анализе су вршене са моделом Будико, који је унакрсно калибрисан и тестиран у различитим потпериодима на сливу Вимера. Поред ефикасности модела, анализирана је и конзистентност у симулираним компонентама водног биланса. Слив, модел и поступак калибрације и евалуације модела детаљно су приказани у поглављу 2. Резултати свих анализа приказани су и дискутовани у поглављу 3, док су препоруке за калибрацију модела дате у закључном поглављу 4.

2 Методологија

Циљ овог рада је да се пронађе калибрациона стратегија која резултује трансферабилношћу мјесечних биланских хидролошких модела у условима екстремно различитих хидроклиматских услова. Анализе су урађене за слив Вимере (поглавље 2.1), који је био погођен Миленијумском сушом, и како такав је веома погодан за тестирање трансферабилности. Коришћен је модел Будико (поглавље 2.2), који је давао најпрецизније резултате симулација на сушним сливовима од неколико тестираних модела [10].

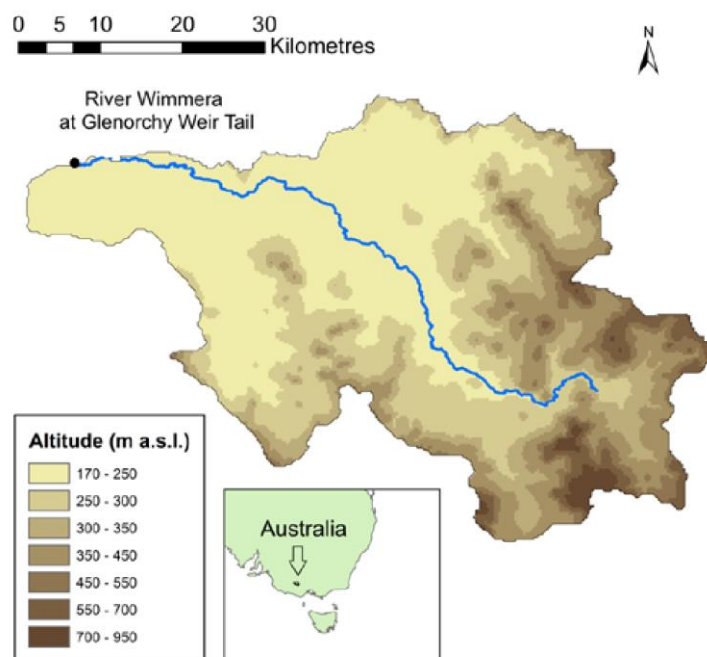
За потребе анализа, комплетан период је подијељен на неколико непреклапајућих потпериода, и извршена је крос-валидација модела. Примјењене су једно- и вишекритеријумска калибрација модела, при чему су у вишекритеријумској калибрацији (ВКК) варирани и број и врста циљних функција (поглавље 2.3). Након калибрације модела, анализирани су показатељи његове ефикасности у валидационим периодима. На основу ове анализе, издвојено је неколико комбинација циљних функција за које је урађена детаљна евалуација трансферабилности, која обухвата анализе ефикасности и конзистентности у симулираним компонентама водног биланса (поглавље 2.4).

2.1 Слив Вимера

Подручје Вимера покрива 3% слива Murray-Darling у западној Викторији у Аустралији. Слив ријеке Вимера се налази на самом југу овог подручја и има површину од 1999.5 km². Просјечне годишње падавине су 560 mm са израженим опадајућим трендом. Просјечан годишњи отицај је 42 mm (2.6 m³/s) што значи да само 7.4% укупних падавина отече, и то указује на веома сув слив. Највећи отицаји су током хладне сезоне од јуна до октобра. Отицај се драстично смањило од 1997 до 2008, када су се падавине смањиле за 18%, а отицај за чак 85% у односу на вишегодишње просјечне вриједности, те је коефицијент отицаја у том периоду био само 0.02. Овај феномен који се дешавао на многим аустралијским ријекама је описан као Миленијумска суша [11] и сматра се да је последица дуготрајне повећане евапотранспирације изазваног повећаним температурама а смањеним падавинама што је промијенило „меморију“ слива (нпр. ниво подземних вода је значајно опао, што је драматично утицало на формирање отицаја).

За потребе моделирања коришћени су подаци о дневним падавинама, температурама и протицајима у периоду од 01.01.1965. до 31.07.2009. Потенцијална евапотранспирација (*PET*) је срачуната према Мортон методи [12].

Да би се тестирале различите калибрационе стратегије (поглавље 2.3), 40 година осматрања је подијељено на пет непреклапајућих потпериода дужине по 8 година, чије су карактеристике дате у табели 1. Поред вриједности индекса суше (*AR*), у загради су дате класификације потпериода према приједлогу из литературе [13]. Слика 2 приказује унутаргодишњу расподјелу мјесечних отицаја на сливу гдје се уочава значајно смањење у периодима P4 и нарочито у P5, током којих је осматрена Миленијумска суша.



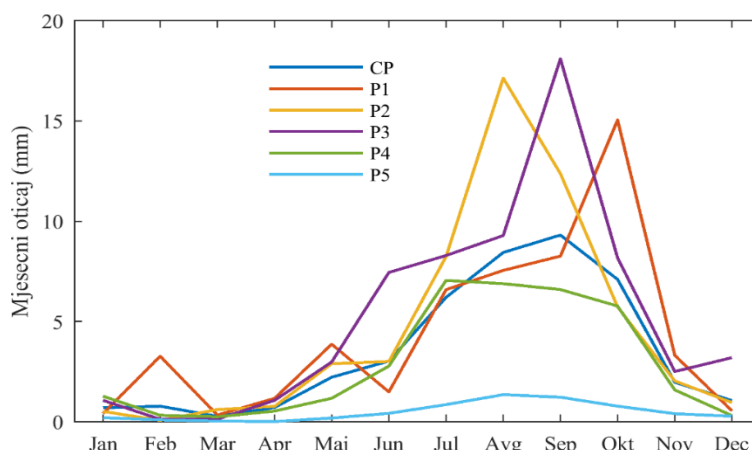
Слика 1. Слив ријеке Вимера до станице Glenorchy Weir Tail. (Извор: [5])

Figure 1. Wimmera catchment at Glenorchy Weir Tail. (Source: [5])

Табела 1. Основне хидроклиматске карактеристике за ријеку Вимера по калибрационим потпериодима према Тиреловом протоколу

Table 1. Hydroclimatic characteristics for Wimmera River in calibration sub-periods in Thirel protocol

	Комплетан период, СР	Потпериоди				
		P1	P2	P3	P4	P5
Датум од-до (мјесец/година)	01/1969 – 12/2008	01/1969 – 12/1976	01/1977 – 12/1984	01/1985 – 12/1992	01/1993 – 12/2000	01/2001 – 12/2008
Средње темп. (°C)	13.5	13.3	13.5	13.4	13.3	13.7
Средње годишње падавине P (mm/god)	561	621	557	620	539	465
Средња годишња PET (mm/ god)	1157	1137	1155	1149	1161	1183
Средњи протицај Q_{avg} (m ³ /s)	2.61	3.27	3.25	3.42	2.88	0.42
Средњи годишњи отицај V_0 (mm/god)	41.7	51.8	54.3	62.3	34.5	5.8
Индекс суше $AR = PET/P(-)$ (полусув)	2.06	1.83 (умјерен)	2.08 (полусув)	1.85 (умјерен)	2.15 (полусув)	2.54 (сув)
Коефицијент отицаја V_0/P (%)	7.4	8.3	9.8	10	6.4	1.2



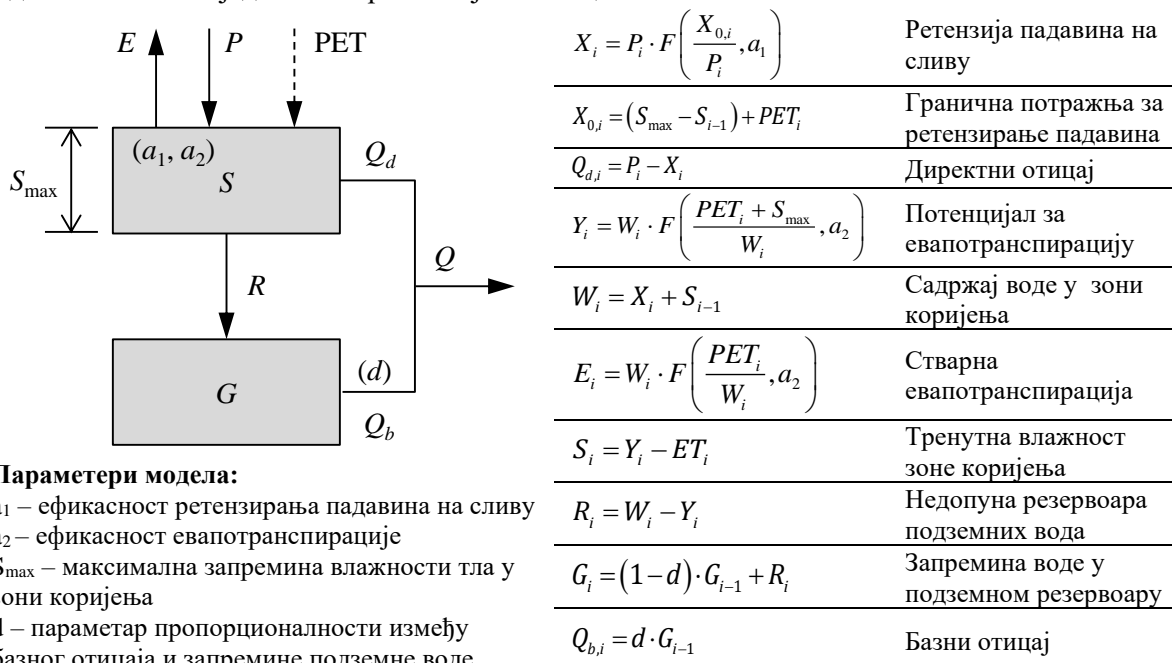
Слика 2. Унутаргодишња расподјела мјесечних отицаја на сливу Вимера у различитим потпериодима (P1-P5) и током цјелокупног периода осматрања (CP)

Figure 2. Inter-annual monthly flow distribution on Wimmera catchment in various sub-periods (P1-P5) and during complete period of observation (CP)

2.2 Будико модел

Будико модел је развио Занг са сарадницима [14] на основу Будико концепта о средњем годишњем водном билансу [15]. Будико претпоставља да је водни биланс контролисан односом расположиве воде (нпр. падавине) и атмосферске потражње (односно потенцијала за испаравање) који се најчешће поистовјеђује са *PET*.

Будико модел има 4 параметра и концептуализован је као систем од два резервоара: резервоар зоне коријења (горњи слој тла) и подземних вода. Шематски приказ структуре Будико модела и основних једначина приказан је на слици 3.



Слика 3. Шематски приказ структуре Будико модела са основним једначинама и параметрима.

Figure 3. Budyko model structure with basic equations and parameters.

Функција у појединим једначинама представља Фуов [16] емпиријски израз који су Занг и сарадници [14] генерализовали следећи облик:

$$F(\varphi, \alpha) = 1 + \varphi - (1 + \varphi^{1-\alpha})^{1-\alpha} \quad (2.1)$$

гдје је φ однос граничне потражње и понуде а α је параметар модела скалиран да узима вриједности између 0-1.

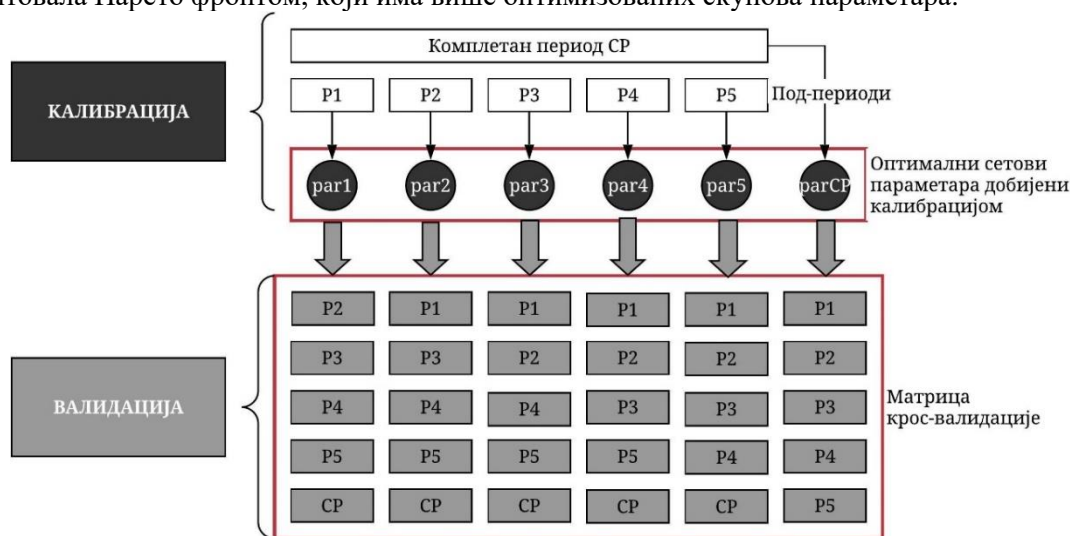
2.3 Калибрационе стратегије

2.3.1 Референтна калибрација и протокол моделирања

Као референтна калибрациона стратегија одабрана је једнокритеријумска калибрација (ЈКК) са *KGE* циљном функцијом (ЦФ) дефинисаном као [17]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (2.2)$$

гдје су r , σ и μ Пирсонов коефицијент корелације, стандардна девијација и средња вриједност, редом, од осмотреног Q_o и симулираног проточија Q_s . Шема унакрсне калибрације и валидације модела (Тирелов протокол [5]) је приказана на слици 4.0, која показује да је модел калибрисан на комплетном периоду, а затим и на потпериодима P1 до P5. На овај начин добијено је 6 скупова оптимизованих параметара у ЈКК, који су тестиран на свим преосталим периодима (валидација модела). Иста шема је коришћена и у ВКК, при чему је свака калибрација резултовала Парето фронтом, који има више оптимизованих скупова параметара.



Слика 4. Шема калибрације и крос-валидације модела (Тирелов протокол).

Figure 4. Calibration and cross-validation scheme (Thirel protocol).

2.3.2 Вишекритеријумска калибрација

Да би се анализирано како ВКК утиче на трансферабилност модела, формирано је више комбинација ЦФ на следећи начин:

1. Креиране су комбинације од двије ЦФ из реда статистичких показатеља.
2. Урађена је прелиминарна анализа трансферабилности модела, и издвојене су најбоље комбинације ЦФ из реда статистичких показатеља.
3. Издвојеним комбинацијама од двије ЦФ из реда статистичких показатеља је додата још једна ЦФ из реда хидролошких потписа.

Комбинације од двије ЦФ су формиране комбиновањем ЦФ који циљају на општу динамику хидрограма (нпр. *NSE*, *RSR*, *IoA*, итд.) са ЦФ који циљају на запреминску грешку (нпр. *BIAS* и *WBE*). Ове комбинације приказане су у табели 2. Како би се класична варијанта *KGE* задржала као контролни показатељ у евалуацији модела (поглавље 2.4, Табела 3), она није укључена у ове комбинације. Уместо класичне варијанте *KGE* у комбинацијама је коришћена њена модификована непараметарска верзија *KGE_{np}* [18].

ВКК даје скуп од неколико тзв. Парето-оптималних скупова параметара, при чему неки од њих могу давати веома добре вриједности једне ЦФ, али уједно и веома лоше вриједности друге ЦФ. Како би се издвојили они скупови параметара који дају прихватљиве вриједности обје ЦФ, постављене су границе. У анализи су задржани само они скупови параметара који дају вриједности веће од 0.5 за прву ЦФ, и вриједности веће од 0.75 (грешка у запремини отицаја је мања од 25%) за другу (запреминску) ЦФ.

Да би се одабрале најбоље комбинације ЦФ од наведених осам, извршена је прелиминарна анализа ефикасности модела у крос-валидацији. У овој анализи, ефикасност модела је оцјењивана са контролним показатељима ефикасности, који обухватају контролни статистички показатељ *KGE*, и два показатеља из реда хидролошких потписа ϵ_{IAFD} и ϵ_{σ} (Табела 4). Задржавају се оне комбинације са којима је модел најуспјешнији у трансферима по питању ових показатеља.

Комбинације са три ЦФ креиране су тако што је трећа ЦФ из реда хидролошких потписа додавана на претходно одабране комбинације од двије статистичке ЦФ. Хидролошки потписи који су укључени у ове комбинације одабрани су на основу прелиминарних анализа. Нпр., потписи за које је показано да су неинформативни (потписи који су једнако добри или лоши при калибрацији и трансферима на друге периоде тј. крос-валидацији) неће допринијети у проналажењу оптималног скупа параметара, па нису укључени у комбинације. Тако су коришћени сљедећи потписи у анализи: аутокорељација, коефицијент асиметрије, коефицијент варијације, перцентили, ϵ_{IAFD} и ϵ_{D20} . Сваки од ових потписа је додаван на претходно одабране најбоље комбинације са двије статистичке ЦФ и резултати су оцјењивани са истим показатељима као у случају двокритеријумске калибрације. Филтрација Парето-фронта је спроведена на исти начин као код двокритеријумске калибрације уз додаток услова да грешка одабраног потписа (трећа ЦФ) буде мања од 0.25.

За све скупове параметара који су добијени калибрацијом са одабраним комбинацијама са 2 ЦФ из реда статистичких показатеља, и са 3 ЦФ урађена је детаљна евалуација, која је приказана у наредном поглављу.

Табела 2. Комбинације циљних функција из реда статистичких показатеља коришћене при вишекритеријумској калибрацији.

Table 2. Combinations of statistical indicators as optimisation functions in multicriteria calibration.

Ознака комбинације	Циљне функције	Референца
<i>a</i>	<i>NSE+BIAS</i>	[19], [20]
<i>b</i>	<i>KGE_{np}+WBE</i>	[18]
<i>c</i>	<i>RSR+WBE</i>	[21]
<i>d</i>	<i>MSE+BIAS</i>	[22]
<i>e</i>	<i>IoA+BIAS</i>	[23]
<i>f</i>	<i>R²+BIAS</i>	[24]
<i>g</i>	<i>SP+WBE</i>	[25]
<i>h</i>	<i>NSE_{sqr}+WBE</i>	[26]

2.4 Евалуација трансферабилности модела

За анализу трансферабилности модела коришћена је методологија специјално сачињена за мјесечне билансне моделе, која је детаљно описана у раду Топаловић и сарадници [27]. Обзиром на екстензивност оригиналне верзије ове методологије, неки њени елементи су изостављени у овом раду, а за вредновање модела су анализирани:

- (a) конзистентност ефикасности модела у различитим периодима уз помоћ статистичких показатеља и хидролошких потписа,
- (b) конзистентност у симулираним компонентама водног биланса.

2.4.1 Конзистентност у ефикасности модела

Ефикасност модела је оцењена помоћу (1) неколико контролних статистичких показатеља (Табела 3) и (2) грешака у хидролошким потписима (Табела 4). За све контролне показатеље ефикасности дате су једначине, као и граничне вриједности прихватљиве ефикасности (Табела 3 и Табела 4).

Умјесто оригиналне верзије, NSE је рачунат са корјенованим протицајима (даље ће се означавати са NSE_{sqrt}) како би се боље показале грешке у средњим протицајима и у стандардној девијацији [28]. Уместо $RMSE$, овде је коришћена његова бездимензионална варијанта RSR због лакше интерпретације (у складу са препорукама Moriasi и остали, 2007).

Хидролошки потписи коришћени при евалуацији одабрани су имајући на уму мјесечни временски корак са којим модели раде, расположивости осмотрених података за њихов прорачун (протицаји, падавине) и према процјени о њиховој информативности приказаној у претходним истраживањима [10], [27]. Релативне или апсолутне разлике између симулираних и осмотрених потписа су постављене као показатељ ефикасности. Граничне вриједности ових показатеља усвојене су произвољно или према препорукама из литературе, и углавном се крећу између 10 или 25 % (Табела 4). Уколико модел даје вриједности ових показатеља ван ових граница у валидацији, сматра се да модел није трансферабилан.

Табела 3. Контролни статистички показатељи ефикасности модела у евалуацији.

Table 3. Control statistical indicators of model efficiency used in evaluation.

Показатељ ефикасности	Једначина	Опсег вриједности	Граница прихватљиве ефикасности
Клинг-Гупта коефицијент ефикасности	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2}$	$(-\infty, 1]$	> 0.5
Nash-Sutcliffe коефицијент ефикасности са корјенованим протицајима	$NSE_{\text{sqrt}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i}^{1/2} - Q_{o,i}^{1/2})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i}^{1/2} - Q_{o,i}^{1/2})^2}$	$(-\infty, 1]$	> 0.5
Корјен средње квадратне грешке нормализован са стандардном девијацијом осмотрених протицаја	$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}}{\sigma_o}$	$[0, \infty)$	$< 0.7^*$
Запреминска ефикасност	$VE = 1 - \frac{\left \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i}) \right }{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}} = 1 - \frac{ \mu_s - \mu_o }{\mu_o}$	$(-\infty, 1]$	> 0.75

*Moriasi и остали, 2007

Табела 4. Грешке хидролошких потписа као показатељи ефикасности модела при евалуацији.
Table 4. Simulated hydrological signature errors as model efficiency indicators used in evaluation.

Хидролошки потпис	Дефиниција грешке хидролошког потписа	Опсег вриједности	Граница прихватљиве ефикасности
Велике воде (95-и перцентил, Q_{95})	$\varepsilon_{Q95} = \frac{Q_{95,s} - Q_{95,o}}{Q_{95,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Унутаргодишња расподела протицаја (IAFD)	$\varepsilon_{IAFD} = \frac{\sum_{m=1}^{12} Q_{m,s} - Q_{m,o} }{12 \cdot \mu_o}$	$[0, \infty)$	< 0.25
Стандардна девијација, σ	$\varepsilon_{\sigma} = \left 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \right $	$[0, \infty)$	< 0.25
Трајање (у мјесецима) 20-ог перцентила (Q_{20}) срачунатог из комплетног низа података, D20	$\varepsilon_{DQ20} = \left \frac{DQ20_s - DQ20_o}{n} \right $	$[0, 1]$	< 0.1

2.4.2 Конзистентност у симулираним компонентама водног биланса

При ЖКК анализира се конзистентност компоненти водног биланса (ВБ) симулираних са шест различитих скупова оптималних параметара добијених у различитим калибрационим периодима. Трансферабилност модела у овом смислу подразумијева да разлике између низова компоненти ВБ симулираних са различитим скупом оптималних параметара буду у разумним оквирима. Сличан услов важи и за симулиране протицаје: очекујемо да ефикасност модела не варира много ван калибрационог периода, односно да се низови симулираних протицаја слажу са осмотреним без обзира на период. Као мјера конзистентности одабрана је релативна средња апсолутна девијација (*RMAD*), која се рачуна из израза:

$$RMAD = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |WBC_{val,i} - WBC_{cal,i}|}{0.5 \cdot \sigma_{WBC,cal}} \quad (2.3)$$

гдје су WBC_i симулиране компоненте ВБ у мјесецу i , n је број мјесеци симулације у анализираном периоду. Ознаке у индексу *val* и *cal* се односе на период валидације и калибрације, респективно. Ова бездимензионална мјера може узети вриједности од 0 до $+\infty$, гдје се вриједности мање од 1 сматрају прихватљивим (према препорукама Legates и McCabe [29]).

ВКК даје више скупова оптималних параметара, па је конзистентност симулација компоненти водног биланса оцијењена анализом медијана симулираних низова. Приликом калибрације у датом периоду добијена је медијана низова компоненти ВБ (из симулација компоненте са Парето-оптималним скуповима параметара који су оптимизовани у том периоду) која је поређена са интервалом симулираних низова у периоду валидације те компоненте (трансфер на други период са истим тим Парето-оптималним скупом параметара). Ефикасност модела у овом смислу квантификује се преко релативног броја рачунских корака (мјесеци) током који се ова медијана налази унутар 95% интервала симулираних компоненти у валидационом периоду [30]:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n m_{95\%}}{n} \quad (2.4)$$

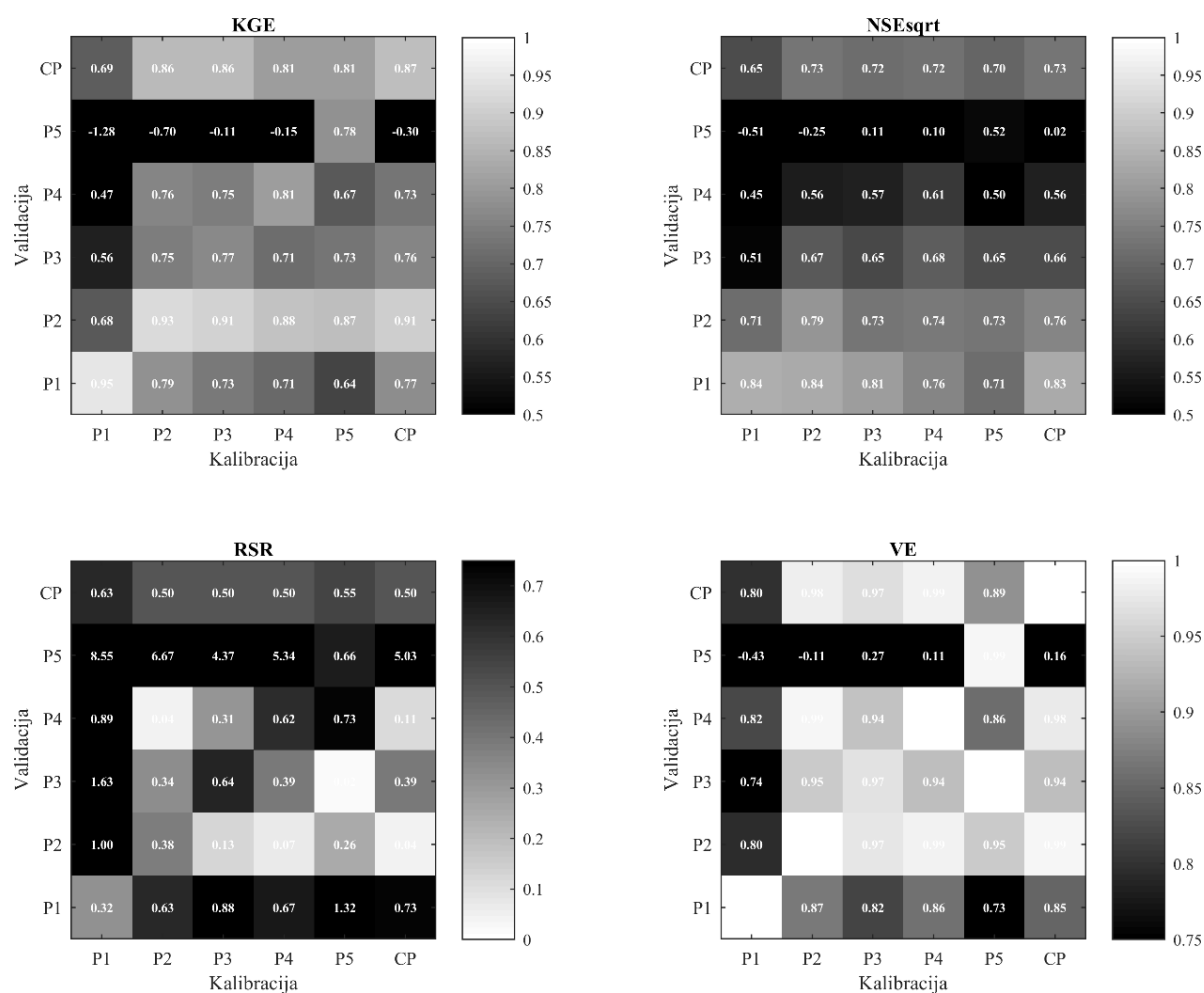
гдје $m_{95\%}$ означава број корака (мјесеци) кад се медијана компоненте ВБ из калибрационог периода налази у распону 95% (између 97.5 и 2.5 перцентила) симулираних вриједности које су добијене у валидационом периоду.

3 Резултати и дискусија

3.1 Једнокритеријумска калибрација

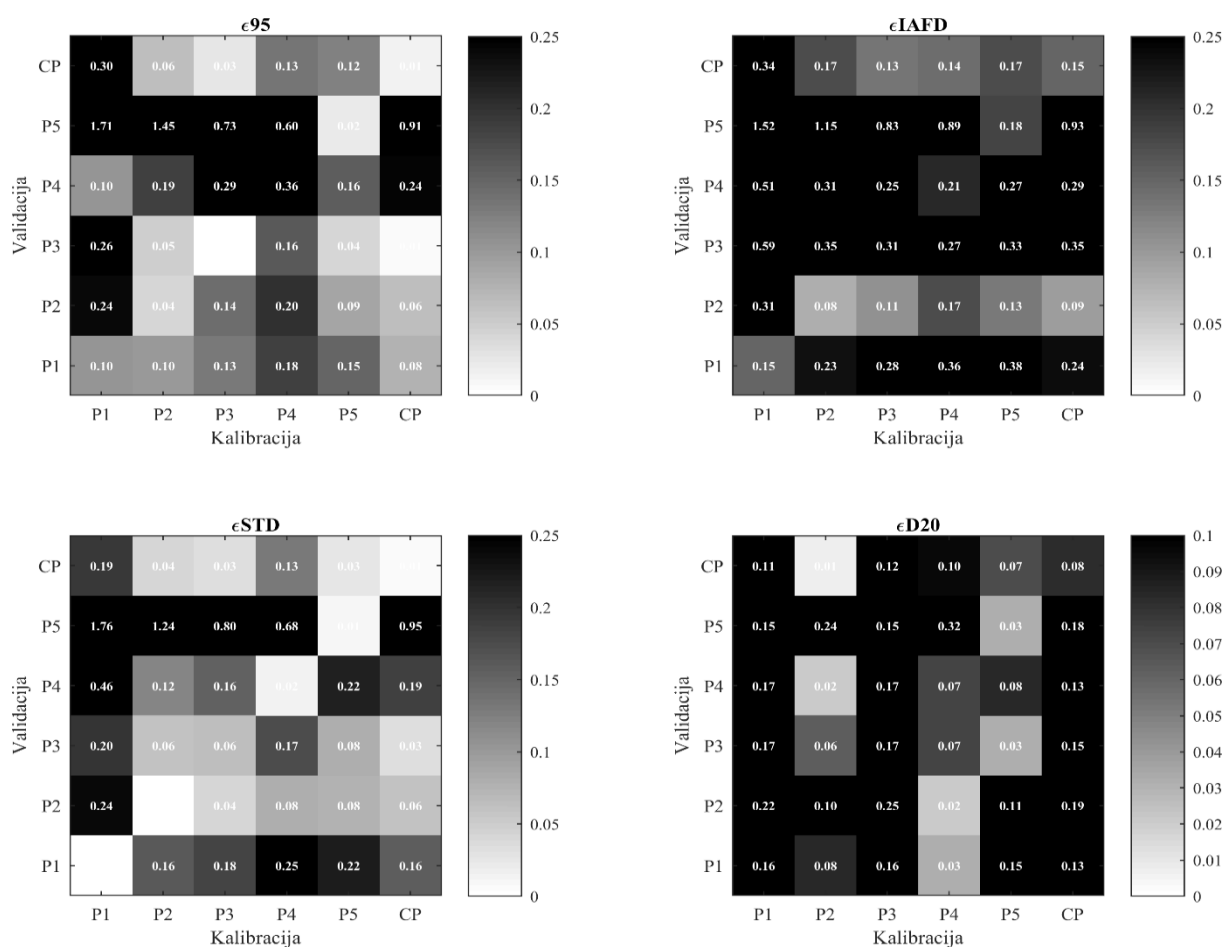
3.1.1 Конзистентност ефикасности модела

Будико модел калибрисан са *KGE* циљном функцијом је неуспјешан при трансферу на суви период P5 према свим статистичким показатељима (Слика 5). У трансферу P1/P4 (калибрација на водном периоду P1, валидација на сувом P4) сви показатељи, осим *VE*, су изван постављених граница прихватљиве ефикасности (Табела 3), као и за трансфер P5/P1 (*VE*, *RSR*) и P3/P1 (*RSR*).



Слика 5. Вриједност статистичких показатеља у крос-валидацији

Figure 5. Statistical indicators in cross-validation.



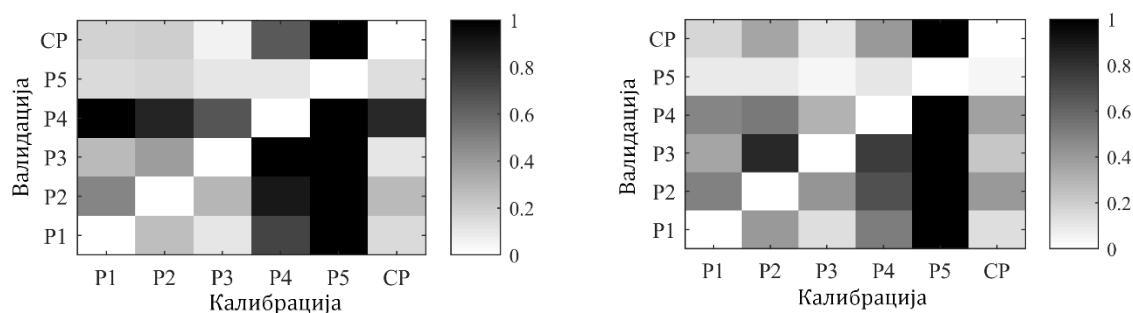
Слика 6. Вриједности грешака у хидролошким потписима у крос-валидацији

Figure 6. Values of hydrological signatures errors in cross-validation.

Хидролошки потписи ϵ_{95} и ϵ_{σ} потврђују закључке добијене са статистичким показатељима, док друга два потписа показују незадовољавајућу ефикасност модела у скоро свим трансферима укључујући и саме периоде калибрације (Слика 6). Добра ефикасност модела према статистичким показатељима не гарантује способност модела да репродукује поједине хидролошке потписе, што може имати везе са чињеницом да ови нису укључени у процес калибрације модела [10].

3.1.2 Конзистентност симулираних компоненти водног биланса

Компоненте водног биланса су углавном конзистентне у крос-валидацији, у свим трансферима. Симулиране вриједности запремине подземних вода, директног и базног отицаја нису конзистентне при трансферу са P5 периода односно ако је модел калибрисан на P5 периоду а валидован на осталим (Слика 7). Ово је нешто другачији закључак у односу на резултате испитивања конзистентности ефикасности гдје већи проблем представља трансфер на суви период а не обрнуто.



Слика 7. *RMAD* вриједности за компоненту запремине подземних вода (лијево) и базни отицај (десно)

Figure 7. *RMAD* values for groundwater storage (left) and baseflow (right).

3.2 Претходна анализа различитих комбинација у вишекритеријумској калибрацији

3.2.1 Анализа ефикасности модела са комбинацијама од двије циљне функције из реда статистичких показатеља

У периоду калибрације, комбинације d , f и g (са коефицијентима детерминације и MSE) немају задовољавајуће вриједности KGE ни у једном периоду. Комбинације d , f и g дају највеће грешке ϵ_{IAFD} у свим калибрационим периодима а за f и g највећу грешку ϵ_{STD} .

Према KGE , модел је трансферабилан у трансферу CP/P5 ако је калибрисан комбинацијом d , и у трансферу P2/P5 ако је калибрисан комбинацијом c . У осталим трансферима на сушни период, модел није трансферабилан али најбоље резултате дају комбинације b за трансфер P3/P5 и e за P4/P5. У трансферу P1/P5 све комбинације су лоше.

Грешка у унутаргодишњој расподели протока ϵ_{IAFD} је задовољавајућа у неколико трансфера, углавном на водни P1 и мјешовите P2, P4 и CP. Резултати су нешто бољи за ϵ_{STD} у односу на ϵ_{IAFD} , па је модел трансферабилан са свим комбинацијама (осим наведених d , f и g) осим на сушни период P5.

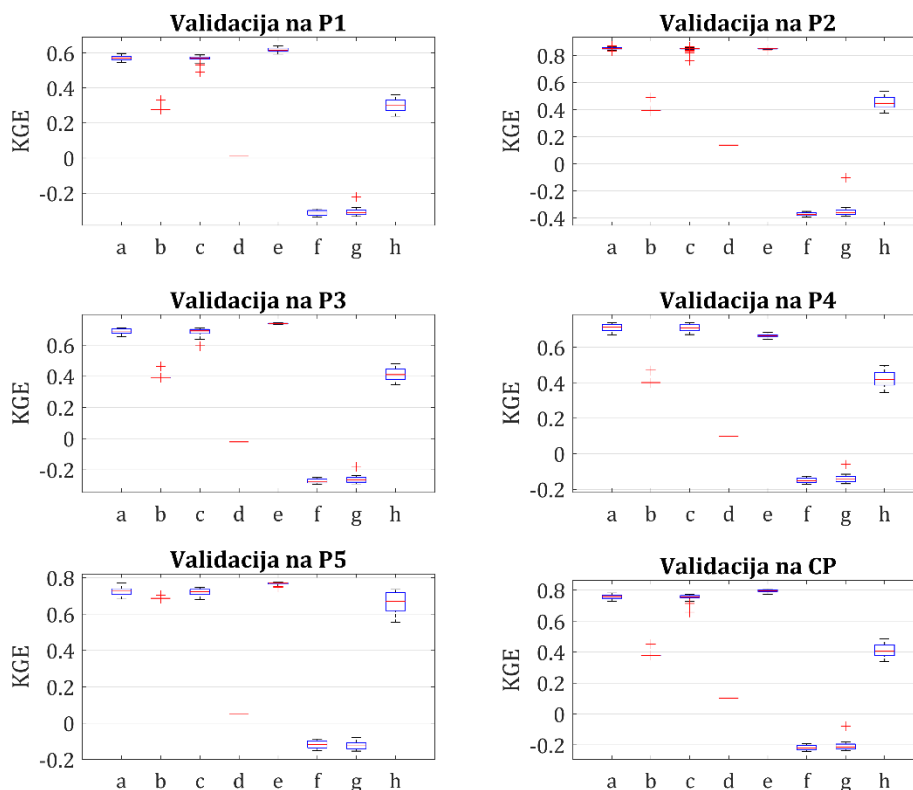
Модел има задовољавајућу KGE у трансферу са сушног периода P5 на све остале само за комбинације a , c и e (Слика 8, комбинације a , c и e). Према ϵ_{IAFD} резултати су нешто другачији. Тако нпр. модел није трансферабилан на P1 и P3 уопште док на остале периоде јесте, уколико је калибрисан са неком од a , c или e комбинација. Према ϵ_{STD} , са истим овим комбинацијама ЦФ-ја модел је трансферабилан са сушног P5 периода на периоде P2, P3, P4 и CP док је трансфер P5/P1 задовољавајући само са комбинацијом e .

Према овим прелиминарним резултатима, показује се да коефицијенти детерминације нису добри за калибрацију јер иако се том приликом остварују високе вриједности корелације моделираних и осмотрених протицаја (изнад 0.9 или 0.95), али сви остали показатељи имају веома лоше вриједности. Резултати са комбинацијом d су доста лошији од осталих, те ова комбинација може да се одбаци. Комбинације b и h (прва мало боља од друге) дају доста сличне резултате и углавном лошије од горе наведене три. Према овим резултатима, одабране су три задовољавајуће комбинације, a , c и e које су даље комбиноване са хидролошким потписима.

3.2.2 Анализа ефикасности модела при калибрацији са три циљне функције од којих је трећа из реда хидролошких потписа

Због обимности резултата, овдје се не приказују за све анализиране комбинације одабраних двокритеријумских комбинација a , c и e уз додатак једног од наведених потписа који су коришћени у трокритеријумској калибрацији. Од свих анализираних хидролошких потписа као трећа ЦФ само ϵ_{IAFD} утиче на побољшање резултата у односу на двокритеријумску калибрацију. Остали анализирани потписи немају значајног утицаја у смислу побољшања трансферабилности (обично супротно, резултати су лошији) изузев чињенице да тај потпис постаје информативан по

питању трансферабилности и са мањим грешкама иако раније (нпр. у ЖКК) то није био случај. Нпр. са комбинацијом $IoA+BIAS+\varepsilon_{D20}$ у трансферу P5/P4 KGE износи 0.57 (средња вриједност од свих рјешења са Парето-фронта) односно 0.66 са комбинацијом $IoA+BIAS+\varepsilon_{IAFD}$. У обрнутом трансферу P4/P5 ове вриједности су 0.2 и -0.2, у корист комбинације са ε_{IAFD} .



Слика 8. Вриједности контролног показатеља ефикасности KGE за различите комбинације циљних функција (Табела 2) у крос-валидацији са параметрима калибрисаним на сувом периоду P5.

Figure 8. KGE values for various combinations of optimisation functions (Table 2) in cross-validation with parameters optimised in dry period P5.

3.3 Вишекритеријумска калибрација

На основу претходних резултата, упоредна евалуација трансферабилности модела је урађена за следећих шест вишекритеријумских комбинација за калибрацију модела:

1. $NSE+BIAS$
2. $NSE+BIAS+\varepsilon_{IAFD}$
3. $RSR+WBE$
4. $RSR+WBE+\varepsilon_{IAFD}$
5. $IoA+BIAS$
6. $IoA+BIAS+\varepsilon_{IAFD}$.

Са сваком од ових комбинација, просјечне вриједности KGE са Парето фронта у периоду калибрације су веће или једнаке од вриједности добијених у ЖКК. Према хидролошким потписима, у калибрационим периодима ε_{IAFD} је увијек у границама прихватљивости ако је модел калибрисан са комбинацијама у којима је $IAFD$ једна од циљних функција. Потписи ε_{STD} и ε_{95} су једнако добри или лоши у калибрационим периодима као у случају ЖКК. Вриједност ε_{D20} је увијек мања од 10% у периодима калибрације ако је модел калибрисан са неком од прве четири комбинације што је значајно побољшање у односу на ЖКК кад је грешка овог потписа увијек изнад постављене границе (има вриједности 16-17%).

3.3.1 Конзистентност у ефикасности модела

У крос-валидацији Будико модел не остварује значајно боље резултате са вишекритеријумским комбинацијама. И даље су сви трансфери на сушни Р5 период неуспјешни према постављеним критеријумима, док су остали трансфери једнако успјешни или успјешнији у односу на ЖКК за максимално 15%.

Са различитим комбинацијама циљних функција постиже се прилично изједначена успјешност модела при трансферима на периоде ван калибрационог. Мало већу успјешност (а ради се о неколико процената) имају комбинације $NSE+BIAS$ и $RSR+WBE$ по питању хидролошких потписа, док према статистичким показатељима, комбинација $IoA+BIAS+ \epsilon_{IAFD}$ је успјешнија за 1-2% у односу на остале.

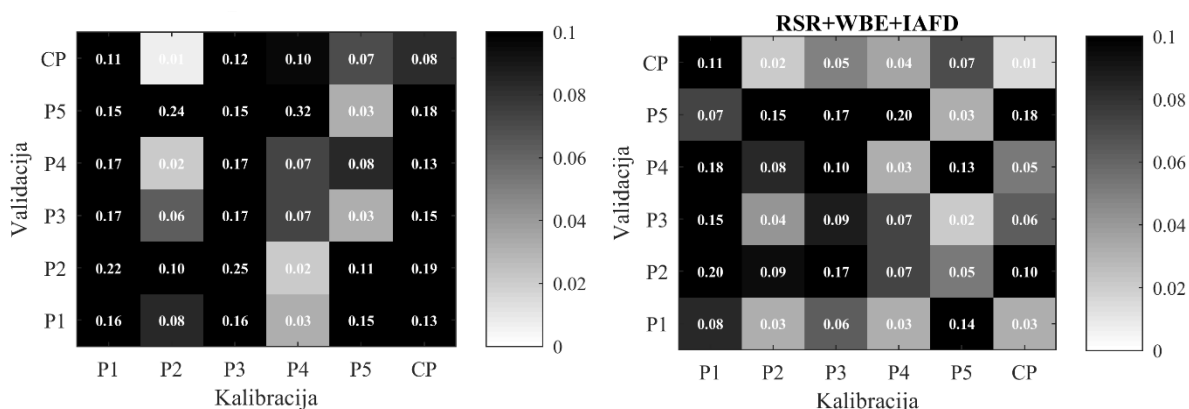
Табела 5 приказује проценте успјешних трансфера за све комбинације срачунате на основу медијане показатеља ефикасности срачунатих из симулација са Парето-оптималним параметрима. Средња вриједност најбољих резултата приказана у табели представља максималне/минималне вриједности показатеља и потписа односно њихове најбоље вриједности са Парето фронта (нпр. макс. KGE , мин. ϵ_{IAFD} и сл.). Уочава се да је успјешност модела боља, нарочито према грешкама хидролошких потписа, али и даље модел није трансферабилан на сушни период по питању статистичких показатеља, док је према потписима трансферабилан максимално 37% (са комбинацијом $IoA+BIAS+ \epsilon_{IAFD}$, трансфер водни на суви период).

Табела 5. Процентуална успјешност Будико модела у различитим трансферима са различитим комбинацијама циљних функција коришћених у калибрацији. У ознакама трансфера v је водни период, m мјешовити и c је суви период.

Table 5. Efficiency of Budyko model in percents in various transfers and various combinations of optimisation functions used in calibration. In transfer notes, v is wet period, m is mixed and c is dry period.

Трансфер	В-В	В-М	В-С	М-В	М-М	М-С	С-В	С-М
Број трансфера	2	6	2	6	6	3	2	3
Комбинација	Статистички показатељи							
NSE+BIAS	75	92	0	92	100	0	75	92
NSE+BIAS+ ϵ_{IAFD}	75	88	0	100	100	0	75	83
RSR+WBE	75	92	0	92	100	0	75	92
RSR+WBE+ ϵ_{IAFD}	75	88	0	96	100	0	75	83
IoA+BIAS	75	100	0	88	100	0	75	83
IoA+BIAS+ ϵ_{IAFD}	75	100	0	92	100	0	75	83
Ср.вриједност	75	93	0	93	100	0	75	86
Ср. вриједност најбољих резултата	81	98	0	99	100	0	79	96
Вриједн. из 1-крит.	63	83	0	96	100	0	75	83
Комбинација	Хидролошки потписи							
NSE+BIAS	61	57	22	70	65	15	61	70
NSE+BIAS+ ϵ_{IAFD}	61	46	22	69	70	19	61	63
RSR+WBE	61	57	22	70	65	15	61	67
RSR+WBE+ ϵ_{IAFD}	61	44	28	69	72	19	61	63
IoA+BIAS	67	52	22	57	52	33	44	59
IoA+BIAS+ ϵ_{IAFD}	61	52	22	56	56	37	50	56
Ср.вриједност	62	52	23	65	63	23	56	63
Ср. вриједност најбољих резултата	69	64	37	77	75	33	72	83
Вриједн. из 1-критеријумске калибрације	50	49	29	69	63	26	68	60

Од потписа, у крос-валидацији значајно су смањене вриједности грешке ϵ_{D20} . Слика 9 приказује упоредо вриједности из ЖКК и ВКК, гдје су приказане средње вриједности свих резултата са Парето-фронта и то за комбинацију за коју је грешка овог потписа најмања. Генерално, при ВКК симулације хидролошких потписа су много више побољшане у односу на ЖКК него статистички показатељи, посебно ако се симулације раде са параметрима оптимизованим са ЦФ у које је укључен управо тај хидролошки потпис.



Слика 9. Поређење вриједности ϵ_{D20} из једнокритеријумске калибрације (лијево) и вишекритеријумске калибрације – средње вриједности са Парето-фронта (десно)

Figure 9. Comparison of ϵ_{D20} values from single-criteria (left) and multi-criteria calibration – mean values from Pareto front (right)

3.3.2 Конзистентност у низовима компоненти водног биланса симулираних са Парето-оптималним параметрима

Најконзистентније компоненте водног биланса за све комбинације су ET и S док је најваријабилнија запремина подземне воде G , што је случај и код ЖКК. У периодима калибрације, све компоненте су конзистентне. Комбинација са најмањим распонем симулираних свих компоненти водног биланса (највеће вриједности PC) је комбинација $IoA+BIAS+\epsilon_{IAFD}$. Према PC вриједностима, најмање 80% времена опсег симулираних компоненти садржи медијану симулација добијених калибрацијом са комбинацијом $IoA+BIAS+\epsilon_{IAFD}$. У случају осталих комбинација, проценат је нешто мањи (65-80%). Једина боља комбинација је $NSE+BIAS+\epsilon_{IAFD}$ и то само по питању конзистентности компоненте допуне подземног резервоара R .

Будико модел је трансферабилан по питању свих симулираних компоненти водног биланса осим базног и директног отицаја и запремине подземне воде чије симулације нису конзистентне у трансферима са сувог $P5$ периода, што одговара резултатима из ЖКК.

4 Закључци и препоруке

У овом раду истражен је утицај броја и врсте циљних функција (ЦФ) на трансферабилност Будико мјесечног билансног модела. Трансферабилност модела је анализирана на примјеру слива Вимере у Аустралији на коме се већ пар деценија осјећају последице Миленијумске суше. Испитане су различите комбинације са двије ЦФ из реда статистичких показатеља, и са три ЦФ које су формиране тако што је одабраним комбинацијама са 2 ЦФ додата још једна из реда хидролошких потписа. У овом раду разматрана је само грешка у унутаргодишњој расподјели протицаја (ϵ_{IAFD}), за коју су прелиминарне анализе показале да је најинформативнија о трансферабилности модела. Из свих разматраних комбинација, издвојено је шест комбинација за које је урађена детаљна евалуација трансферабилности. За ове комбинације испитана је конзистентност у ефикасности мјерена статистичким показатељима и у хидролошким потписима, као и конзистентност у симулираним низовима компоненти водног биланса. Сви резултати су упоређени са референтном једнокритеријумском калибрацијом (ЖКК).

Вишекритеријумска калибрација (ВКК) даје бољу ефикасност модела, нарочито уколико се укључе ЦФ из реда хидролошких потписа. Модел боље репродукује хидролошке потписе ако је калибрисан са више циљних функција, посебно ако је једна од њих управо грешка у том потпису. У просјеку, ефикасност модела у репродуковању хидролошких потписа се повећава и до 20%. Иако вриједности статистичких показатеља нису значајно боље, више трансфера је

успјешно у односу на ЖКК. Ово упућује да је за добру репродукцију хидролошких потписа неопходно укључити више различитих циљних функција, нарочито из реда потписа. Посебно у овом смислу се издваја комбинација циљних функција $RSR+WBE+\epsilon_{IAFD}$ према којој је значајно побољшана репродукција унутаргодишњих расподела протицаја, великих вода и трајања 20-ог перцентила протока (Q_{20}), што је изузетно важан показатељ ефикасности модела у екстремно сушним периодима. Конзистентност симулираних низова компоненти ВБ није значајно побољшана са ВКК. Другим ријечима, модел и даље није трансферабилан на остале периоде ако је калибрисан на сувом периоду по питању запремине подземних вода, директног и базног отицаја. Остале компоненте су конзистентне у сваком случају.

Без обзира на велики број испробаних комбинација и врста циљних функција, није пронађена калибрациона стратегија која би омогућила да модел у потпуности испуни све постављене критеријуме и буде трансферабилан у климатски промјенљивим условима. Проблем је критичан трансфер модела на екстремно суви период P5, односно са сувог периода на остале, кад су у питању компоненте водног биланса. Да би се овај проблем превазишао неопходно је испитати да ли модел уопште има рјешења са Парето-фронта са којима ће валидација бити успјешна на осталим одабраним потпериодима (ван калибрационог). Под претпоставком да је то случај, неопходно је осмислити нову калибрациону стратегију са којом се при калибрацији издвајају управо та рјешења са Парето-фронта. Међутим, ово није једноставно уколико се од модела захтијева да буде успјешан по питању и статистичких показатеља, хидролошких потписа и симулација компоненти ВБ. Имајући у виду важност трансферабилности модела, рјешавању овог питања треба посветити даља истраживања.

Иако проблем трансферабилности Будико модела на суви период није ријешен вишекритеријумском калибрацијом, иста се препоручује и то да је бар једна циљна функција из реда хидролошких потписа. Предлаже се комбинација $RSR+WBE+\epsilon_{IAFD}$, са којом се значајно побољшава ефикасност модела квантификована грешкама хидролошких потписа, или $NSE+BIAS+\epsilon_{IAFD}$ као слједећа најбоља са којом су најконзистентније симулације компоненти водног биланса.

Литература

- [1] V. Klemeš, "Operational testing of hydrological simulation models," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 31, no. 1, pp. 13–24, 1986, doi: 10.1080/02626668609491024.
- [2] V. Andréassian *et al.*, "Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models," *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, vol. 6, no. 3, pp. 3669–3685, 2009, doi: 10.5194/hessd-6-3669-2009.
- [3] A. Todorovic and J. Plavsic, "The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment," *J. Water Clim. Chang.*, vol. 7, no. 1, pp. 16–28, 2016, doi: 10.2166/wcc.2015.086.
- [4] L. Coron *et al.*, "Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments," *Water Resour. Res.*, vol. 48, no. 5, pp. 1–17, May 2012, doi: 10.1029/2011WR011721.
- [5] G. Thirel *et al.*, "Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 60, no. 7–8, pp. 1184–1199, 2015, doi: 10.1080/02626667.2014.967248.
- [6] J. K. A. Fowler, M. C. Peel, A. W. Western, L. Zhang, and T. J. Peterson, "Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models," *Water Resour. Res.*, vol. 52, pp. 1820–1846, 2016, doi: 10.1002/2016WR018704.Received.
- [7] J. K. A. Fowler *et al.*, "Simulating runoff under changing climatic conditions: a framework for model improvement," *Water Resour. Res.*, vol. 54, pp. 1–21, 2018, doi: 10.1029/2018WR023989.
- [8] C. Xu, "Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 98–99, pp. 295–304, 1999.
- [9] D. A. Hughes, "Simulating temporal variability in catchment response using a monthly rainfall–runoff model," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 60, no. 7–8, pp. 1286–1298, 2015, doi: 10.1080/02626667.2014.909598.
- [10] Ž. Topalović, A. Todorović, and J. Plavšić, "Evaluating the transferability of monthly water balance models under changing climate conditions," *Hydrol. Sci. J.*, pp. 1–23, 2020, doi:

- 10.1080/02626667.2020.1725238.
- [11] C. Petheram, N. J. Potter, J. Vaze, F. H. S. Chiew, and L. Zhang, "Towards better understanding of changes in rainfall- runoff relationships during the recent drought in south- eastern Australia," *Proc. 19th Int. Congr. Model. Simul.*, no. December, pp. 12–16, 2011.
- [12] F. I. Morton, "Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology," *J. Hydrol.*, vol. 66, no. 1, pp. 1–76, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90177-4).
- [13] A. Sankarasubramanian and R. M. Vogel, "Hydroclimatology of the continental United States," *Water Resour. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 1083–1095, 2002, doi: 10.1029/2002GL015937.
- [14] L. Zhang, N. J. Potter, K. Hickel, Y. Zhang, and Q. Shao, "Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing," *J. Hydrol.*, vol. 360, no. 1–4, pp. 117–131, 2008, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.021.
- [15] M. I. Budyko, "The heat balance of the Earth's surface." U.S. Department of Commerce, Washington D.C., 1958.
- [16] B. P. Fu, "On the Calculation of the Evaporation from Land Surface," *Sci. Atmos. Sin.*, vol. 5, pp. 23–31, 1981.
- [17] H. V. Gupta, T. Wagener, and Y. Liu, "Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation," *Hydrol. Process.*, vol. 22, pp. 3802–3813, 2008, doi: 10.1002/hyp.6989.
- [18] S. Pool, M. Vis, and J. Seibert, "Evaluating model performance: a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 63, no. 13–14, pp. 1941–1953, 2018, doi: 10.1080/02626667.2018.1552002.
- [19] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles," *J. Hydrol.*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290, 1970, doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- [20] D. L. Otis, K. P. Burnham, G. C. White, and D. R. Anderson, "Statistical inference from capture data on closed animal populations," *Wildl. Monogr.*, vol. 62, pp. 1–135, 1978, doi: 10.2307/2287873.
- [21] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Trans. Asabe*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007.
- [22] M. Dekking, "A modern introduction to probability and statistics : understanding why and how." Springer, London, 2005, [Online]. Available: <http://site.ebrary.com/id/10228809>.
- [23] C. J. Willmott *et al.*, "Statistics for the evaluation and comparison of models," *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. C5, pp. 8995–9005, 1985, doi: 10.1029/JC090iC05p08995.
- [24] K. Pearson, "Notes on regression and inheritance in the case of two parents," *Proc. R. Soc. London*, vol. 58, pp. 240–242, 1895.
- [25] C. Spearman, "The proof and measurement of association between two things," *Am. J. Psychol.*, vol. 15, no. 1, pp. 72–101, 1904, doi: 10.1037/h0065390.
- [26] G. L. Vandewiele, C.-Y. Xu, and Ni-Lar-Win, "Methodology and comparative study of monthly water balance models in Belgium, China and Burma," *J. Hydrol.*, vol. 134, no. 1–4, pp. 315–347, 1992, doi: 10.1016/0022-1694(92)90041-S.
- [27] Ž. Topalović, A. Todorović, and J. Plavšić, "Primjenljivost mjesečnih bilansnih hidroloških modela u promjenljivim klimatskim uslovima," *Vodoprivreda*, vol. 52, no. 306–308, pp. 155–170, 2020.
- [28] G. F. Martinez and H. V. Gupta, "Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the 'abcd' monthly water balance model for the conterminous United States," *Water Resour. Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 1–21, 2010, doi: 10.1029/2009WR008294.
- [29] D. R. Legates and G. J. McCabe, "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation," *Water Resour. Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, 1999, doi: 10.1029/1998WR900018.
- [30] S. Bastola, C. Murphy, and J. Sweeney, "The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish River catchments," *Adv. Water Resour.*, vol. 34, no. 5, pp. 562–576, 2011.