

PRIMJENLJIVOST MJESEČNIH BILANSNIH HIDROLOŠKIH MODELA U PROMJENLJIVIM KLIMATSKIM USLOVIMA

Žana TOPALOVIĆ¹⁾, Andrijana TODOROVIĆ²⁾, Jasna PLAVŠIĆ²⁾

¹⁾ Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet

²⁾ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

REZIME

Mjesečni bilansni hidrološki modeli (MBHM) se često koriste u studijama uticaja klimatskih promjena na vodne resurse. Stoga bi ovi modeli trebalo da daju pouzdane rezultate u promjenljivim klimatskim uslovima. Pouzdanost rezultata simulacija MBHM u ovakvim uslovima, odnosno transferabilnost ovih modela (simulacije u periodima koji se po uslovima razlikuju od perioda kalibracije), nije dovoljno istraživana ni u domaćoj ni u svjetskoj literaturi. U ovom radu prikazana je opsežna procedura za ocjenu transferabilnosti, odnosno primjenljivosti MBHM-a u promjenljivim klimatskim uslovima. Procedura se sastoji iz analize konzistentnosti efikasnosti modela, ocjene parametara modela i simuliranih komponenti vodnog bilansa, kao i iz subjektivne ocjene efikasnosti i transferabilnosti modela. Predložena procedura za ocjenu transferabilnosti MBHM-a je u radu primijenjena sa četiri modela: *abcd*, Budyko, GR2M i WASMOD, na slivu Toplice u Srbiji.

Za ovaj sliv, modeli *abcd* i WASMOD su pokazali bolju transferabilnost od ostala dva modela, ali i oni mogu da se koriste samo u periodima koji se malo razlikuju po svojim hidroklimatskim karakteristikama u odnosu na kalibracioni. Svi razmatrani modeli mogu da se primjenjuju u vodnijim ili sušnijim periodima samo ako su padavine do 8% veće ili manje u odnosu na padavine u periodu kalibracije. Međutim, nijedan model ne može da reprodukuje osmotreni oticaj tokom sušnih perioda sa parametrima kalibriranim u nekom drugom periodu. Uočena je velika varijabilnost u simuliranim zapreminama podzemnih voda i baznom oticaju pri transferima modela, kao i u ocjenama parametara koji su relevantni za njihovu simulaciju, što upućuje da za upravo ove komponente treba mijenjati koncept proračuna da bi se došlo do transferabilnijih struktura modela.

Ključne riječi: mjesečni bilansni hidrološki modeli, uslovi promjenljive klime, transferabilnost modela, efikasnost modela, hidrološki potpisi, komponente vodnog bilansa

UVOD

Posljednju deceniju izuzetno važnu temu u hidrološkoj nauci predstavljaju uočene promjene koje se dešavaju u hidrologiji i društvu. Međunarodno udruženje za hidrološke nauke (engl. *International Association for Hydrological Sciences*, IAHS) je period 2013-2022 posvetio upravo ovoj temi, nazivajući ga dekadom „Panta Rhei – Everything flows“ (Montanari *i saradnici*, 2013) odnosno „sve teče“. Cilj ove inicijative je poboljšanje pouzdanosti prognoza i predviđanja budućih količina voda u uslovima promjenljive klime i antropogenih uticaja na vodne resurse. Da bi se ovaj cilj ostvario, potrebno je da se nestacionarnost u hidrološkim procesima, nastala uslijed klimatske varijabilnosti, promjena načina korišćenja zemljišta i sl., uključi u hidrološko modeliranje.

Hidrološki modeli bi trebalo da daju vjerodostojne i pouzdane rezultate simulacija (Todorović i Plavšić, 2014) bez obzira na karakteristike perioda simulacije, čak i ako se značajno razlikuju u odnosu na period kalibracije. Međutim, dosadašnja istraživanja pokazuju da hidrološki modeli ne simuliraju pouzdano oticaj u periodima sa različitim hidroklimatskim karakteristikama u odnosu na kalibracioni period (Klemeš, 1986; Merz *i saradnici*, 2011). Drugim riječima, model se može koristiti samo u periodima sa hidroklimatskim karakteristikama sličnim kao u kalibracionom periodu.

Ovaj zaključak ne pogoduje primjeni hidroloških modela u npr. analizi uticaja klimatskih promjena na vodne resurse, jer se od njih u ovakvim situacijama očekuju pouzdane simulacije u klimatskim uslovima

koji mogu znatno da se razlikuju od onih koju su do sada osmotreni. Iz tog razloga, u posljednjoj deceniji je proizašlo nekoliko procedura za kalibraciju i validaciju modela u cilju boljeg razumijevanja njihovog ponašanja u nestacionarnim uslovima i poboljšanja tačnosti rezultata simulacija u ovakvim uslovima (Coron i saradnici, 2012; Fowler i saradnici, 2018). Istraživanja u ovoj oblasti su uglavnom sprovedena sa modelima koji imaju složenu strukturu i rade sa relativno malim vremenskim korakom (npr. jedan dan ili čas), dok su primjeri istraživanja koja se bave MBHM-ima u ovom kontekstu izuzetno rijetki (Hughes, 2015; Xu, 1999). Procjena transferabilnosti MBHM je izuzetno važna, jer se ovi modeli veoma često primjenjuju u praksi, i to upravo za potrebe analize uticaja klimatskih promjena na vodne resurse. Ovi modeli se takođe primjenjuju i za popunjavanje nizova srednjih mjesečnih oticaja, analizu vodnog bilansa na slivu ili regionu za potrebe vodoprivrede (npr. Plavšić i saradnici, 2017), procjenu veličina pojedinih hidroloških komponenti i sl.

Imajući u vidu široku primjenu i značaj MBHM-a, neophodna su detaljna izučavanja njihove transferabilnosti koja će uvažiti sve njihove specifičnosti. Osim vremenske rezolucije, MBHM karakteriše i veoma jednostavna struktura i mali broj slobodnih parametara modela koje je potrebno optimizovati u kalibraciji. Analiza efikasnosti MBHM-a se u nekim aspektima razlikuje od analize efikasnosti modela koji rade sa kraćim vremenskim korakom. Efikasnost modela se kvantifikuje različitim pokazateljima, koji mogu biti matematičke (statističke) mjere i greške u hidrološkim potpisima određenim na osnovu simuliranih i osmotrenih protoka. Mnogi pokazatelji efikasnosti modela koji se koriste za simulacije sa kraćim vremenskim korakom ne mogu da se primjene sa nizovima mjesečnih podataka. Na primjer, efikasnost modela u pogledu malih i velikih voda ne može biti ocijenjena na mjesečnom nivou. Takođe, krive trajanja ne mogu da se formiraju iz mjesečnih protoka. S druge strane, unutargodišnja raspodjela oticaja predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja efikasnosti MBHM-a. Stoga ocjene efikasnosti MBHM-a treba da se prilagode mjesečnim nizovima koje su rezultat simulacija ovih modela. S obzirom na specifičnosti MBHM-a, zaključci o transferabilnosti koji su izvedeni za kompleksne modele koji rade sa kraćim vremenskim korakom (npr., od jednog dana ili časa) ne mogu se smatrati validnim za MBHM-e.

U ovom radu, predlaže se nova procedura za ocjenu transferabilnosti MBHM-a osmišljena upravo za ove

modele i njihovu primjenu u promjenljivim klimatskim uslovima. Ova procedura predstavlja nadogradnju evaluacionog protokola koji su predložili Thirel i saradnici, (2015), a koji podrazumijeva podjelu kompletnog perioda osmatranja na pet jednakih nepreklapajućih potperioda. Modeli se kalibrišu u svakom od pet potperioda kao i u kompletnom periodu, i validuju u svim preostalim periodima. Efikasnost modela je ocijenjena sa nekoliko statističkih pokazatelja kao i sa greškama u odabranim hidrološkim potpisima koji su relevantni za mjesečne nizove podataka. Promjene ovih pokazatelja su takođe analizirane u odnosu na promjenu klimatskih karakteristika perioda (npr. padavine) čime su ocijenjene granice primjenljivosti modela u odnosu na promjene klimatskih uslova. Pored ovoga, u proceduri je analizirana konzistentnost optimizovanih parametara modela iz različitih kalibracionih perioda, kao i konzistentnost simuliranih komponenti vodnog bilansa. Ove analize su dopunjene subjektivnom ocjenom efikasnosti modela i njihove transferabilnosti. Subjektivna ocjena predstavlja dodatak procesu vrednovanja modela, i provjeru numeričkih pokazatelja efikasnosti koji mogu biti pod uticajem kratkih nizova mjesečnih oticaja.

Predložena procedura je primijenjena sa četiri često korišćena MBHM-a, na primjeru sliva rijeke Toplice u Srbiji.

PROCEDURA ZA OCJENU TRANSFERABILNOSTI MBHM-a

Prije formulisanja procedure za ocjenu transferabilnosti MBHM-a, postavljene su hipoteze o robusnim, transferabilnim modelima:

- a) *Efikasnost modela je konzistentna bez obzira na simulacione periode, odnosno njihove hidroklimate karakteristike.* Konzistentna efikasnost podrazumijeva male razlike u pokazateljima efikasnosti modela u periodu kalibracije i van njega.
- b) *Ocjene parametara modela su konzistentne u različitim periodima kalibracije.* U osnovi ove hipoteze je pretpostavka da optimalni parametri reflektuju stvarnu vezu padavina i oticaja na slivu i da ne zavise od hidroklimate karakteristika kalibracionog perioda.
- c) *Simulirane komponente vodnog bilansa su konzistentne u simulacionom periodu, bez obzira sa kojim optimalnim skupom parametara (iz kog kalibracionog perioda) je vršena simulacija.* Nema značajnih razlika u vrijednostima komponenti vodnog bilansa simuliranih sa optimalnim

parametrizacijom iz bilo kog kalibracionog perioda, što znači da komponente nisu osjetljive na kalibracioni period.

Da bi gore postavljene hipoteze bile testirane, predlaže se procedura za ocjenu transferabilnosti MBHM-a, koja podrazumijeva podjelu kompletnog perioda (CP) osmatranja na pet potperioda jednake dužine (P1, P2, ..., P5) prema Tirelovom protokolu (Thirel i saradnici, 2015). Procedura za ocjenu transferabilnosti se sastoji iz četiri koraka: 1) kalibracija i unakrsna validacija modela na kompletnom periodu i svih pet potperioda, 2) analiza transferabilnosti modela, koja podrazumijeva analize konzistentnosti u efikasnosti modela, u optimalnim parametrima modela i u simuliranim komponentama vodnog bilansa, uz subjektivnu ocjenu transferabilnosti na osnovu vizuelnog pregleda rezultata, i 3) rangiranje svih razmatranih modela i donošenje zaključaka o njihovoj transferabilnosti.

Konzistentnost u efikasnosti modela se može procijeniti poređenjem pokazatelja efikasnosti u kalibracionom periodu i van njega, pri čemu je potrebno uzeti u obzir i razlike u hidroklimatskim karakteristikama između kalibracionog i razmatranog validacionog perioda. Na ovaj način se mogu identifikovati granice transferabilnosti, koje predstavljaju „dozvoljene“ razlike u hidroklimatskim karakteristikama u odnosu na kalibracioni period. Van ovih granica, model ima neprihvatljivo lošu efikasnost i nije pouzdan za primjenu.

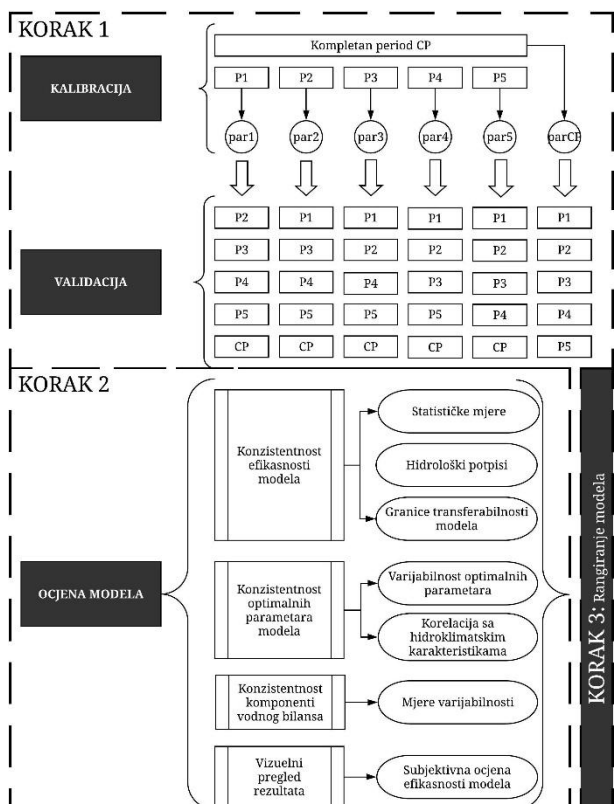
Konzistentnost u ocjenama parametara se procjenjuje poređenjem optimizovanih vrijednosti parametara iz različitih kalibracionih perioda. Posebno se analizira da li su optimalni parametri korelisani sa hidroklimatskim uslovima tokom kalibracionog perioda, i sa opštom parametarskom osjetljivošću, odnosno, da li su uticajniji parametri manje osjetljivi na karakteristike kalibracionog perioda. Ovakvo testiranje modela, prije svega ocijenjene greške u simuliranju hidroloških potpisa i identifikacija varijabilnih parametara modela i komponenti vodnog bilansa, posredno ukazuju na manjkavosti u strukturi modela. Na slici 1 prikazana je šema predložene procedure za ocjenu transferabilnosti MBHM-a, a dalje u tekstu dati su detalji svakog od navedenih koraka.

Kalibracija i unakrsna validacija modela. Modeli su kalibrirani na CP i na svakom od pet potperioda (P1, P2, ..., P5; vidjeti sliku 1), čime se dobija šest optimalnih skupova parametara označenih sa par1, par2, ..., par5, parCP. U ovom radu, modeli su kalibrirani prema Kling-Gupta pokazatelju efikasnosti

(KGE, Gupta i saradnici, 2009), koja je sama po sebi sastavljena iz više pokazatelja:

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

gdje su r , σ i μ Pirsonov koeficijent korelacije, standardna devijacija i srednja vrijednost, respektivno, od osmotrenih Q_o i simuliranih Q , protoka.



Slika 1. Šematski prikaz procedure za ocjenu transferabilnosti MBHM-a

Modeli su automatski kalibrirani primjenom optimizacionog algoritma AMALGAM (Vrugt i Robinson, 2007a). Broj generacija u algoritmu je 150, a primjenom Latin Hypercube metode inicijalno je generisano 100 skupova parametara, koji su dalje optimizovani u postupku automatske kalibracije. Parametarski prostor je definisan donjom i gornjom granicom svakog parametara. Ove granice su određene na osnovu preporuka u literaturi i preliminarnih simulacija oticaja. Iz optimizovanih skupova parametara izdvojen je skup sa najvećom vrijednošću KGE, i on se smatra optimalnim skupom parametara za razmatrani kalibracioni period.

Unakrsna validacija podrazumijeva simulacije sa svakim od šest optimalnih skupova parametara (iz svakog kalibracionog perioda) na 5 preostalih perioda.

Konzistentnost u efikasnosti modela. Efikasnost modela u ovom radu je kvantifikovana pomoću više statističkih pokazatelja i grešaka u hidrološkim potpisima dobijenih iz simuliranih i osmotrenih protoka. Od statističkih pokazatelja korišćeni su KGE, efikasnost u reprodukciji zapremine oticaja (VE), i Nash-Sutcliffe pokazatelj efikasnosti računat sa korjenovanim protocima (NSE_{sqr}) da bi se povećala osjetljivost modela na srednju vrijednost i standardnu devijaciju (Martinez i Gupta, 2010). Takođe, korišćen je i bezdimenzionalni oblik srednje kvadratne greške (RSR), koji predstavlja odnos srednje kvadratne greške (RMSE) i standardne devijacije osmotrenih protoka (Moriyas i saradnici, 2007). Jednačine za proračun ovih pokazatelja su date u tabeli 1.

Hidrološki potpisi koji su korišćeni za vrednovanje MBHM-a (tabela 2), odabrani su imajući na umu

mjesečnu diskretizaciju rezultata simulacija, dostupnost osmotrenih podataka i preporuke iz literature (npr. Addor i saradnici, 2018). Kao pokazatelji efikasnosti, usvojene su apsolutne ili relativne greške u potpisima sračunatih iz simuliranih i osmotrenih protoka.

Za svaki od pokazatelja, statističkih i iz reda hidroloških potpisa, definisane su granice prihvatljivosti efikasnosti modela. Ove granice su usvojene vodeći se preporukama u literaturi ili su proizvoljno definisane kao npr. greška u hidrološkim potpisima od 10 ili 25%. Kako bi se odredile granice transferabilnosti modela, promjena u efikasnosti modela u odnosu na kalibracioni je prikazana relativno u odnosu na promjene u hidroklimatskim karakteristikama, koje su u ovom radu predstavljene padavinama:

$$\Delta P = \left(\frac{P_{val}}{P_{cal}} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

gdje P_{cal} i P_{val} predstavljaju godišnje padavine u kalibracionom i validacionom periodu.

Tabela 1. Statistički pokazatelji efikasnosti modela i njihove prihvatljive vrijednosti

Pokazatelj efikasnosti	Jednačina	Opseg vrijednosti	Prihvatljiva efikasnost
Nash-Sutcliffe pokazatelj efikasnosti sa korjenovanim protocima	$NSE_{sqr} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i}^{1/2} - Q_{o,i}^{1/2})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i}^{1/2} - \overline{Q_{o,i}^{1/2}})^2}$	$(-\infty, 1]$	> 0.5
Korijen srednje kvadratne greške prikazan relativno u odnosu na standardnu devijaciju osmotrenih protoka	$RSR = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}}{\sigma_o}$	$[0, \infty)$	< 0.7
Efikasnost u reprodukciji zapremine oticaja	$VE = 1 - \left \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}} \right = 1 - \frac{ \mu_s - \mu_o }{\mu_o}$	$(-\infty, 1]$	> 0.75

Konzistentnost u optimalnim parametrima modela.

U cilju testiranja druge hipoteze, ocjenjuje se varijabilnost optimizovanih vrijednosti parametara dobijenih u različitim kalibracionim periodima. Varijabilnost u ocjenama parametara je kvantifikovana preko statistike sadržaja informacija (IC), koja je ovdje malo izmijenjena u odnosu na originalnu formulaciju (Wagener i saradnici, 2003) zbog kratkih nizova mjesečnih podataka (šest optimalnih vrijednosti parametara u šest kalibracionih perioda):

$$IC = 1 - (\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (3)$$

U prethodnoj jednačini θ_{max} i θ_{min} označavaju maksimalnu i minimalnu vrijednost normalizovanih parametara koji su optimizovani tokom šest različitih perioda. Nakon optimizacije, dobijene vrijednosti parametara se prikazuju relativno u odnosu na opseg, tj., razliku gornje i donje granice parametra koje su definisane za potrebe optimizacije. Normalizovani parametri imaju vrijednosti između 0 i 1. Statistika IC takođe ima vrijednost između 0 i 1, gdje veće vrijednosti označavaju manju varijaciju u vrijednostima parametra optimizovanom u šest različitih perioda, odnosno veću konzistentnost optimalnih parametara.

Kako bi se analizirala osjetljivost parametara na hidroklimatske uslove kalibracionog perioda, sračunati su Spirmanovi koeficijenti korelacije (SKK) između optimalnih parametara i nekoliko hidroklimatskih

indikatora (npr., godišnje padavine i potencijalna evapotranspiracija, prosječne godišnje temperature, prosječni protoci itd.).

Tabela 2. Greške u hidrološkim potpisima kao pokazatelji efikasnosti modela

Hidrološki potpis	Greška potpisa	Opseg vrijednosti	Prihvatljiva efikasnost
Male vode (5-i percentil, Q_5)	$\varepsilon_{Q_5} = \frac{Q_{5,s} - Q_{5,o}}{Q_{5,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Male vode (20-i percentil, Q_{20})	$\varepsilon_{Q_{20}} = \frac{Q_{20,s} - Q_{20,o}}{Q_{20,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Srednje vode (50-i percentil, Q_{50})	$\varepsilon_{Q_{50}} = \frac{Q_{50,s} - Q_{50,o}}{Q_{50,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Velike vode (80-i percentil, Q_{80})	$\varepsilon_{Q_{80}} = \frac{Q_{80,s} - Q_{80,o}}{Q_{80,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Velike vode (95-i percentil, Q_{95})	$\varepsilon_{Q_{95}} = \frac{Q_{95,s} - Q_{95,o}}{Q_{95,o}}$	$(-\infty, \infty)$	± 0.25
Indeks baznog oticaja (BFI)*	$\varepsilon_{BFI} = BFI_s - BFI_o$	$(-\infty, \infty)$	± 0.1
Unutargodišnja raspodjela oticaja (IAFD)	$\varepsilon_{IAFD} = \frac{\sum_{m=1}^{12} Q_{m,s} - Q_{m,o} }{12 \cdot \mu_o}$	$[0, \infty)$	< 0.25
Elastičnost oticaja (SEL)**	$\varepsilon_{SEL} = \text{SEL}_s - \text{SEL}_o $, $\text{SEL} = \text{median} \left(\frac{\Delta Q_{ann}}{\Delta P_{ann}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right)$	$(0, \infty)$	< 0.1
Autokorelacija prvog reda, AC1 ($k = 1$) Autokorelacija 12. reda, AC12 ($k = 12$)	$\varepsilon_{ACK} = ACK_s - ACK_o $	$[0, \infty)$	< 0.25
Standardna devijacija, STD	$\varepsilon_{\sigma} = \left 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \right $	$[0, \infty)$	< 0.25
Trajanje 20-og percentila (Q_{20}) sračunatog iz kompletnog niza podataka, $D_{Q_{20}}$	$\varepsilon_{DQ_{20}} = \left \frac{DQ_{20,s} - DQ_{20,o}}{n} \right $	$[0, 1]$	< 0.1

*Odvajanje baznog od direktnog oticaja je izvršeno dvoparametarskom metodom digitalnog rekurzivnog filtera (Eckhardt, 2005). Usvojene vrijednosti parametara ove metode su $a = 0.97$ i $BFI_{\max} = 0.8$

**Elastičnost oticaja je sračunata iz razlika u vrijednostima uzastopnih godišnjih protoka i padavina, ΔQ_{god} i ΔP_{god} , i višegodišnjeg prosječnog protoka i padavina, \bar{Q} i \bar{P} (Sawicz, 2013).

Konzistentnost simuliranih komponenti vodnog bilansa podrazumijeva da se nizovi simuliranih komponenti u jednom potperiodu, dobijeni sa različitim optimalnim skupovima parametara (iz različitih kalibracionih perioda) međusobno malo razlikuju, odnosno da simulirane komponente nisu osjetljive na kalibracioni period. Kao mjera konzistentnosti simuliranih komponenti, odabran je relativni opseg simulacija komponenti (SR_{rel}), koji je definisan kao

odnos širine skupa simulacija (dobijenih sa šest različitih skupova optimalnih parametara) i standardne devijacije te komponente dobijene iz simuliranog niza u kalibracionom periodu, analogno r-faktoru koji su predložili Zhang i saradnici (2011):

$$SR_{rel} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\max_j WBC_i - \min_j WBC_i)}{\sigma_{WBC,cal}}, j = 1, 2, \dots, 5 \quad (4)$$

gdje je WBC_i simulirana komponenta vodnog bilansa u mjesecu i , n je dužina niza, odnosno simulacionog perioda (u mjesecima) a j označava indeks simulacije, odnosno optimalne skupove parametara koji su dobijeni u pet perioda izvan kalibracionog. Standardna devijacija je sračunata iz vrijednosti dobijenih kalibracijom u nedostatku osmotrenih vrijednosti komponenti vodnog bilansa. Male vrijednosti SR_{rel} označavaju konzistentnost simuliranih komponenti vodnog bilansa, dok vrijednosti iznad 1 ukazuju na neprihvatljivu osjetljivost simuliranih komponenti na parametre sa kojima se vrše simulacije. Komponente koje su ovdje razmatrane su simulirana evapotranspiracija, zapremina vode u tlu i u rezervoaru podzemnih voda, i bazni, direktni i ukupni oticaj.

Vizuelni pregled rezultata i subjektivna ocjena transferabilnosti modela. U ovom dijelu procedure za ocjenu transferabilnosti MBHM-a, sljedeći grafički prikazi rezultata modela su analizirani: hidrogrami osmotrenih i simuliranih protoka, unutargodišnja raspodjela protoka i veza padavina i oticaja.

Pored dodatnih informacija o transferabilnosti modela koje subjektivna ocjena može da pruži, ona je neophodna i zbog vremenske rezolucije podataka, odnosno rezultata simulacija. Simulacije modela na mjesečnom nivou podrazumijevaju značajno kraće nizove u poređenju sa modelima koji rade sa dnevnim korakom (npr. 40 godina mjesečnih podataka je ekvivalentno 1.3 godine dnevnih podataka, u smislu dužine niza). Kratki nizovi mjesečnih podataka mogu da utiču na pouzdanost sračunatih pokazatelja efikasnosti modela, a time i na zaključke o transferabilnosti ovih modela.

Iako je unutargodišnja raspodjela protoka (IAFD) definisana među pokazateljima efikasnosti kao greška u hidrološkom potpisu, ovdje je dodatno ocijenjena vizuelnim poređenjem simuliranih i osmotrenih raspodjela, imajući na umu koliko je važno da MBHM-i dobro simuliraju IAFD. Veza padavine oticaj (Q-P), iako veoma kompleksna, ovdje je aproksimirana linearnim regresionim modelom radi lakšeg vizuelnog poređenja. Efikasnost modela je ocjenjivana poređenjem nagiba regresione linije dobijene iz osmotrenih i simuliranih oticaja, kao i odsječka na ordinati, koji zapravo predstavlja granicu količine padavina nakon koje počinje da se formira oticaj. Ovaj proces je potpuno subjektivan, ali može da otkrije sistematska pod- ili precjenjivanja oticaja, ili neki drugi obrazac u ponašanju modela.

Rangiranje modela. Posljednji korak u proceduri ocjene modela kombinuje sve prethodne analize i omogućava rangiranje modela prema njihovoj transferabilnosti. Rangiranje modela je vršeno prema sljedećim kriterijumima:

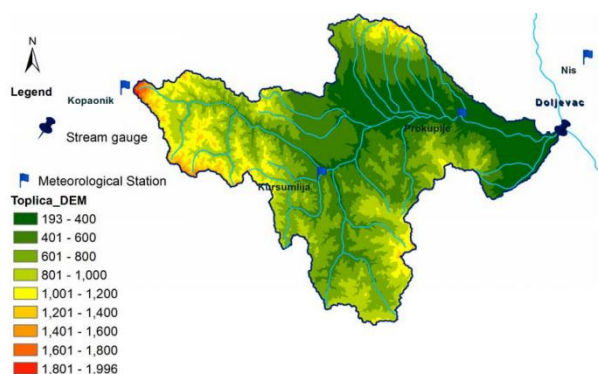
- (1) Mjere statističkih pokazatelja;
- (2) Greške hidroloških potpisa;
- (3) Granice transferabilnosti modela;
- (4) Konzistentnosti optimalnih parametara;
- (5) Konzistentnosti simuliranih komponenti vodnog bilansa;
- (6) Subjektivne ocjene rezultata simulacija.

Prema prva dva kriterijuma, rangiranje je uspostavljeno na osnovu broja neuspješnih transfera određenih na osnovu statističkih mjera i na osnovu grešaka u reprodukciji hidroloških potpisa. Prema kriterijumu 3, modeli su rangirani na osnovu ocijenjene granice transferabilnosti (npr. što je granica šira, model je bolje rangiran). Vrijednosti statistike IC su korišćene za rangiranje modela prema kriterijumu 4, dok su prema kriterijumu 5 rangirani prema vrijednostima SR_{rel} . Kako ovdje ima onoliko rangiranja koliko ima komponenti vodnog bilansa, finalni poredak modela je određen kao srednja vrijednost za sve razmatrane komponente vodnog bilansa. Iz vizuelnog pregleda i subjektivne ocjene dobijaju se tri različita rangiranja modela za tri kategorije (hidrogrami, unutargodišnja raspodjela i Q-P veza), čijim osrednjavanjem se dobijaju rangovi modela prema kriterijumu 6. Konačno rangiranje modela prema njihovoj transferabilnosti predstavlja srednju vrijednost rangova iz svih šest kriterijuma.

PODACI I MODELI

Sliv rijeke Toplice do stanice Doljevac ima površinu od 2052 km² i najveća je lijeva pritoka Južne Morave. Ovaj vodotok je karakterističan po tome što jednim svojim dijelom teče uzbrdo kod Prokuplja. Ovo je rijetka pojava i Toplica je jedina evropska rijeka koja ima ovu anomaliju.

Kompletan period CP je definisan od oktobra 1983. do kraja septembra 2013. a na osnovu raspoloživih podataka-dnevnih vrijednosti temperatura i padavina u periodu 1980-2013. Ovaj period od 33 godine je podijeljen na pet jednakih dijelova čime se dobijaju nepreklapajući periodi dužine po 6 godina. Prve tri godine (1980-1983) su iskorišćene za zagrijavanje modela. Prosječne padavine i temperature na slivu su dobijene na osnovu osmatranja na četiri stanice (Slika 2), primjenom metode Tisenovih poligona. Na osnovu temperatura, PET je sračunata Hamonovom metodom.



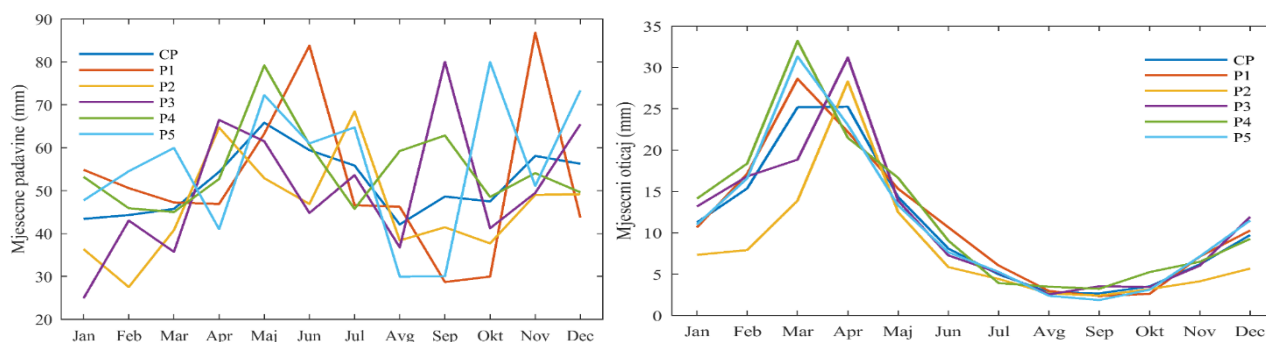
Slika 2. Sliv rijeke Toplice (Izvor: Todorović, 2015)

U tabeli 3 dat je prikaz karakteristika potperioda, dok su na slici 3 prikazane unutargodišnje raspodjele padavina i oticaja za sve potperiode uključujući i CP. Periodi su klasifikovani kao sušni, umjereni ili vodni prema vrijednostima indeksa suše (AR), definisanog kao odnos

Tabela 3. Potperiodi i njihove hidroklimatske karakteristike

	Kompletan period CP	Potperiodi				
		P1	P2	P3	P4	P5
Datum (mjesec/godina)	10/1983 – 09/2013	10/1983 – 09/1989	10/1989 – 09/1995	10/1995 – 09/2001	10/2001 – 09/2007	10/2007 – 09/2013
Srednje temp. T_{avg} (°C)	10.7	10.2	10.5	10.7	10.9	11.8
Srednje godišnje padavine P (mm/god)	621	629	553	591	693	617
Srednja godišnja PET (mm/god)	963	927	938	956	978	999
Srednji protok Q_{avg} (m ³ /s)	8.41	8.92	6.35	8.71	9.40	8.73
Srednji godišnji oticaj V_0 (mm/god)	129.5	135.7	98.5	130.7	150.2	127.3
Indeks suše* $AR = PET/P$ (-)	1.55 (umjeren)	1.47 (vodan)	1.70 (sušni)	1.60 (umjeren)	1.41 (vodan)	1.62 (sušni)
Koeficijent oticaja V_0/P (%)	20.8	21.6	17.8	22.1	21.7	20.6

*>1.6-sušan, 1.5-1.6-umjeren, <1.5-vodan



Slika 3. Unutargodišnja raspodjela padavina i protoka na slivu Toplice u svim razmatranim periodima

Od mnogih MBHM-a koji su opisani u literaturi, odabrana su četiri najčešće korišćena: *abcd* (Thomas, 1981), Budyko (Zhang i saradnici, 2008), GR2M (Mouelhi i saradnici, 2006) i WASMOD (Xu, 2002). Ovi modeli imaju relativno jednostavne strukture i najviše 5 parametra. Opisi i jednačine modela mogu da

se nađu u navedenoj literaturi ili sublimirano u radu Topalović i saradnici (2020). Ovdje se daje samo pregled ulaznih podataka, komponenti vodnog bilansa koje modeli simuliraju kao i parametri i njihovo značenje u strukturi modela (tabela 4). Ulazni podaci (padavine i PET) za svaki model su identični.

Tabela 4. Pregled modela, ulaznih podataka, simuliranih komponenti vodnog bilansa i parametara

Model	Ulazni podaci	Komponente vodnog bilansa	Parametri i njihova uloga u strukturi modela
<i>abcd</i>	P, PET	E, S, G, Q_b, Q_d, Q	a : sposobnost sliva da generiše oticaj prije zasićenja tla b : kapacitet vlažnosti tla c : odnos dopune podzemlja i direktnog oticaja d : koef. proporcionalnosti oticaja iz podzemlja i zapremine podzemnog rezervoara
Budyko	P, PET	E, S, G, Q_b, Q_d, Q	a_1 : efikasnost retenziranja padavina na slivu a_2 : efikasnost evapotranspiracije S_{max} : maksimalna zapremina vlažnosti tla d : linearni parametar zapremina-oticaaj iz podzemnog rezervoara
GR2M	P, PET	E, S, G, Q	X_1 : maksimalni kapacitet vlažnosti tla X_2 : udio oticaja iz podzemnog rezervoara (faktor razmjene vode)
WASMOD	P, PET	E, S, Q_b, Q_d, Q	a_1 i a_2 : parametri proračuna snijega a_3 : kontroliše stvarnu evapotranspiraciju a_4 : recesiona konstanta sporog oticaja a_5 : parametar brzog oticaja

Oznake: P padavine, PET potencijalna evapotranspiracija, E stvarna evapotranspiracija, S zapremina vode u tlu, G zapremina podzemnih voda, Q_b bazni oticaj, Q_d direktni oticaj, Q ukupan oticaj.

REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati kalibracije modela. U kalibraciji svi modeli pokazuju zadovoljavajuće efikasnosti prema statističkim pokazateljima. Izuzetak su Budyko i GR2M u periodu P2 kada su vrijednosti RSR neznatno van definisanih opsega prihvatljive efikasnosti (npr. RSR je 0.81 i 0.73, redom). Pored toga, Budyko model u P2 periodu ima vrijednost NSE_{sqr} 0.36. Prema greškama u hidrološkim potpisima, efikasnost modela u periodima kalibracije varira u zavisnosti od potpisa. Pojedini potpisi su dobro reprodukovani u svim kalibracionim periodima (npr. standardna devijacija, autokorelacija, indeks baznog oticaja, trajanje 20-tog percentila ϵ_{DQ20} i velike vode ϵ_{Q80} i ϵ_{Q95}). Modeli generalno loše reprodukuju elastičnost oticaja, medijanu i male vode ϵ_{Q5} i ϵ_{Q20} . Unutargodišnju raspodjelu dobro reprodukuju samo modeli *abcd* i WASMOD. Očigledno, dobra efikasnost modela mjerena statističkim pokazateljima ne podrazumijeva da su i hidrološki potpisi dobro reprodukovani. Potpisi koji su loše simulirani u periodima kalibracije se neće više razmatrati, osim IAFD. Ovom potpisu se posvećuje posebna pažnja obzirom da predstavlja osnovnu

karakteristiku hidrološkog režima koju bi MBHM-i trebali dobro reprodukovati.

Rezultati analize konzistentnosti u efikasnosti modela. Rezultati pokazuju da efikasnost modela nije konzistentna, odnosno da efikasnost opada kada se model primjeni van kalibracionog perioda. Transfer sa vodnog na mješoviti period i obrnuto je uglavnom zadovoljavajući za sve modele. Transfer sa i na sušne periode P2 i P5 je najlošiji naročito prema pokazateljima NSE_{sqr} i RSR.

Jedan dio hidroloških potpisa je osjetljiv na transfer: koeficijenti autokorelacije, ϵ_{STD} , ϵ_{IAFD} , ϵ_{Q95} , ϵ_{Q80} , $\epsilon_{Q_{med}}$. Drugim riječima, greške u ovim hidrološkim potpisima prate obrazac pada u efikasnosti pri transferima kao i statistički pokazatelji. Potpisi koji su loše reprodukovani u kalibracionom periodu, loše su reprodukovani i u svim validacionim periodima. Isto važi i za potpise koji se dobro reprodukuju: ako su dobro reprodukovani u kalibracionom, onda su i u validacionom periodu. WASMOD i *abcd* imaju malo bolju transferabilnost u smislu reprodukovanja hidroloških potpisa od ostala dva modela. U tabeli 5 prikazani su procenti prihvatljivih

transfera koji su klasifikovani prema karakteristikama kalibracionog i validacionog perioda. Na primjer, transfer v-s (vodni-sušni) označava da je model kalibrisan na vodnom periodu, a da je validacija vršena u sušnom periodu. Procenti prihvatljivih transfera su dobijeni osrednjavanjem po svim statističkim pokazateljima i greškama u reprodukciji hidroloških potpisa. Sivom bojom su označeni najlošiji transferi. Iz tabele se vidi da su transferi sa najmanje procenata prihvatljivih vrijednosti pokazatelja efikasnosti transferi na sušni period.

Navedeni rezultati navode na sljedeća pitanja: zašto modeli uglavnom loše reprodukuju hidrološke potpise i

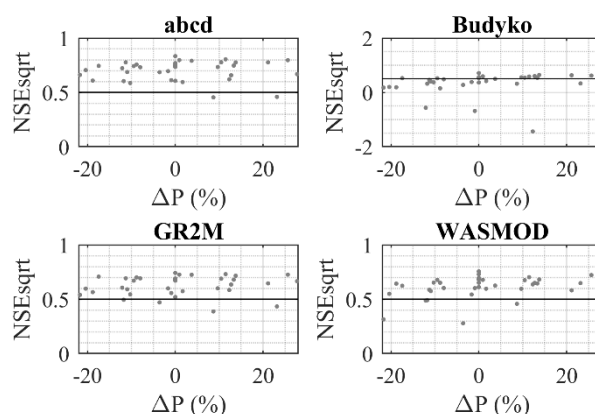
zašto većina potpisa nije informativna po pitanju transferabilnosti modela (tj. jednako su dobro ili loše reprodukovani bez obzira na transfer)? Velike greške u potpisima prilikom simulacija mogu da imaju veze sa činjenicom da parametri modela nisu optimizovani da ih dobro reprodukuju. Neinformativnost potpisa još nije jasna, i odgovor na ovo pitanje traži dalje analize koje bi se sprovele i na drugim slivovima (da li razlog neinformativnosti leži u karakteristikama sliva ili u samoj formulaciji hidrološkog potpisa, ukoliko se potvrdi da je neinformativan na različitim slivovima). Neinformativni potpisi se mogu izostaviti iz ocjene transferabilnosti modela.

Tabela 5. Procenat uspješnih transfera modela. Oznake za periode su: v-vodni, m-mješoviti, s-sušni. Transferi su predstavljeni oznakom kalibracionog i validacionog perioda (kalibracija-validacija).

Transfer	v-v	v-m	v-s	m-v	m-m	m-s	s-v	s-m	s-s
Ukupan broj transfera	2	4	4	4	2	4	4	4	2
Model	Statistički pokazatelji								
abcd	100	88	75	88	75	63	75	81	13
Budyko	50	63	38	88	38	50	63	38	0
GR2M	88	88	75	75	75	50	75	81	38
WASMOD	88	81	63	94	88	56	81	81	75
Sr.vrijedn.	81	80	63	86	69	55	73	70	31
Model	Hidrološki potpisi								
abcd	86	86	75	73	82	68	73	79	54
Budyko	64	73	50	75	61	52	63	52	25
GR2M	71	70	57	68	61	50	73	70	61
WASMOD	61	66	68	71	82	70	57	66	57
Sr.vrijedn.	71	74	63	72	71	60	67	67	49

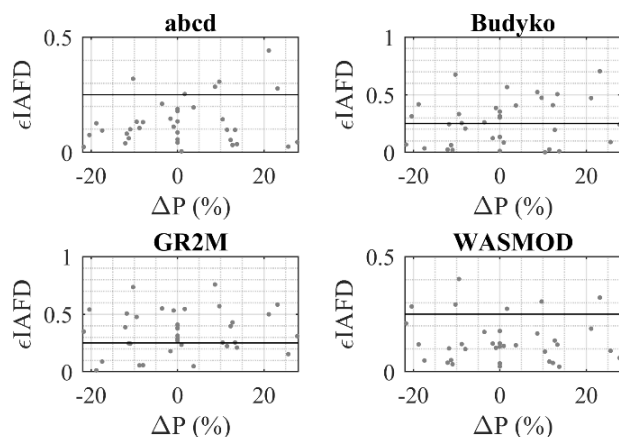
Granice transferabilnosti modela. Zavisnost efikasnosti modela od promjene količine padavina u validacionom periodu u odnosu na kalibracioni pokazuje da efikasnost naglo opada u periodima tokom kojih je oko 8% manje ili više padavina. U ovom smislu, prema statističkim pokazateljima svi modeli (osim Budyko) su transferabilni na periode sa blago manjom ili većom količinom padavina. Ovo ne važi za RSR prema kome modeli nisu transferabilni uopšte.

Prema hidrološkim potpisima, modeli su ili potpuno transferabilni ili ne. Modeli su transferabilni na sve periode (vodnije ili sušnije od kalibracionog) prema potpisima ϵ_{Q20} , ϵ_{Qmed} , i ϵ_{Q80} dok prema ostalim nisu transferabilni uopšte. Prema ϵ_{IAFD} modeli uopšte nisu transferabilni osim *abcd* modela i to u granicama $\pm 10\%$.



Slika 4. Promjena NSE_{sqrt} u odnosu na promjenu padavina između perioda kalibracije i validacionih perioda.

Na slici 4 je prikazana promjena NSE_{sqr} dok je na slici 5 prikazana promjena ϵ_{IAFD} u odnosu na promjenu padavina. Horizontalna linija na slikama predstavlja granicu (ne)prihvatljive efikasnosti modela. Generalno, najbolju transferabilnost postiže *abcd* model zatim WASMOD.



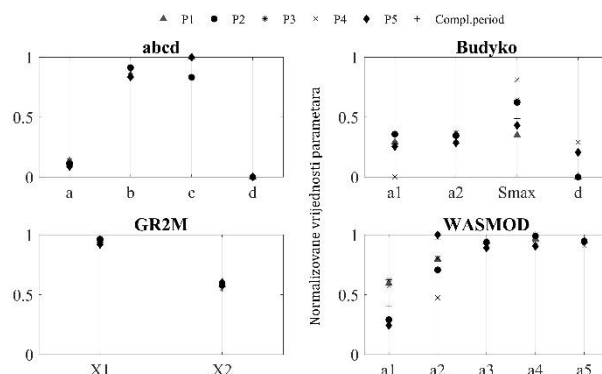
Slika 5. Promjena ϵ_{IAFD} u odnosu na promjenu padavina između perioda kalibracije i validacionih perioda.

Rezultati konzistentnosti u optimalnim parametrima. Većina parametara modela imaju stabilne vrijednosti u svim kalibracionim periodima, ali postoje i parametri koji su osjetljivi na kalibracioni period. Modeli GR2M i *abcd* imaju veoma stabilne parametre sa vrijednosti IC većom od 0.8. Najvarijabilniji parametri Budyko modela su a_1 i S_{max} , a WASMOD-a a_1 i a_2 , što se uočava na slici 6 u vidu širokog raspona.

Varijabilni parametri su vezani za zapreminu vode u tlu kod Budyko modela odnosno za proračun snijega kod WASMOD-a. Varijabilnost ovih parametara može biti uslovljena hidroklimatskim karakteristikama kalibracionog perioda ili njihove loše identifikabilnosti, koja se uočava kod neuticajnih parametara.

Zavisnost optimalnih parametara od hidroklimatskih karakteristika je ocijenjena preko Spirmanovog koeficijenta korelacije (SKK). Vrijednosti SKK veće od 0.7 ukazuju na značajnu korelaciju. Kao što se vidi u tabeli 6, značajna korelacija postoji između osjetljivih (varijabilnih) parametara kao i onih koji su konzistentni. Na primjer, konzistentni parametri *a* modela *abcd* i *b* modela Budyko, su negativno korelisani sa PET i T_{sr} ali ne i varijabilni parametar S_{max} . Varijabilni parametri WASMOD-a su korelisani sa Q i PET, ali je i konzistentni parametar a_3 . Kod WASMOD-a, najveću korelaciju sa hidroklimatskim pokazateljima ima

konzistentni parametar a_3 . Ovi rezultati pokazuju da se osjetljivost parametara na kalibracioni period ne može pripisati hidroklimatskim uslovima u tim periodima.



Slika 6. Normalizovane vrijednosti parametara optimizovanih u različitim kalibracionim periodima.

Tabela 6. Spirmanovi koeficijenti korelacije (SKK) između parametara modela i hidroklimatskih karakteristika kalibracionog perioda. Apsolutne vrijednosti SKK veće od ± 0.7 su označene sivom bojom.

Parametri	P	PET	T_{sr}	$Q_{god,sr}$	AR	V0/P
a	-0.14	-0.83	-0.83	0.31	-0.03	0.43
b	-0.60	-0.37	-0.37	-0.14	0.49	0.09
c	0.65	0.39	0.39	0.65	-0.65	0.65
d	NaN*	NaN*	NaN*	NaN*	NaN*	NaN*
Budyko						
a	-0.71	-0.66	-0.66	-0.60	0.54	-0.54
b	-0.31	-0.71	-0.71	0.26	0.14	0.54
S_{max}	-0.09	0.26	0.26	0.26	0.03	0.43
d	0.68	0.78	0.78	0.34	-0.51	0.10
GR2M						
X_1	-0.37	-0.26	-0.26	-0.03	0.26	0.03
X_2	0.60	0.26	0.26	0.03	-0.37	-0.37
WASMOD						
a_1	0.14	-0.49	-0.49	0.71	-0.26	0.89
a_2	0.49	0.71	0.71	-0.09	-0.43	-0.37
a_3	-0.26	-0.94	-0.94	-0.03	0.09	-0.14
a_4	0.17	-0.06	-0.06	0.29	-0.43	0.03
a_5	-0.20	-0.60	-0.60	-0.43	0.26	-0.60

*Optimalna vrijednost parametra *d* je u svim periodima jednaka jedinici te je normalizovana vrijednost 0 uslijed čega je SKK pri dijeljenju nulom beskonačan broj, ovdje prikazan kao NaN

Analiza parametarske osjetljivosti (nije prikazana u ovom radu zbog obima) dovodi do sličnih zaključaka:

na primjer, neki neuticajni parametri koji se loše identifikuju su konzistentni (npr. $abcd$ parametri c i d , Budyko parametar d , GR2M parametar X_1 , WASMOD parametar a_4). Dakle, varijabilnost parametara u kalibracionim periodima ne može da se pripíše ni slaboj identifikabilnosti, odnosno maloj uticajnosti parametara modela.

Rezultati analize konzistentnosti simuliranih komponenti vodnog bilansa. Varijabilnost simuliranih komponenti vodnog bilansa zavisi od konkretne komponente kao i modela. Najkonzistentnije komponente su stvarna evapotranspiracija i ukupni oticaj, dok su najvarijabilnije bazni oticaj i zapremina podzemnih voda. Od svih modela, jedino Budyko model simulira konzistentno sve komponente vodnog bilansa (SR_{rel} je uvijek manje od 1). GR2M takođe ima konzistentne komponente osim komponenti baznog i direktnog oticaja koje ne simulira pa se ne mogu ni ocijeniti. Nekonzistentne komponente kod modela $abcd$ i WASMOD (modela sa najboljim rezultatima po pitanju konzistentnosti efikasnosti) su zapremina vode u tlu i podzemnih voda kao i bazni oticaj. Vrijednosti SR_{rel} su prikazane u tabeli 7 gdje su sivo obojene najkonzistentnije vrijednosti po modelu i komponenti.

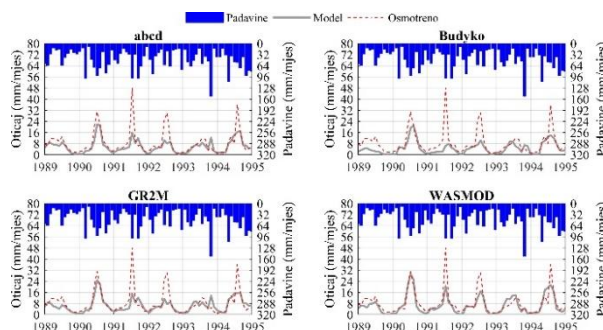
Prethodni rezultati upućuju da su zapremina podzemnih voda i bazni oticaj izuzetno osjetljivi na kalibracioni period i transfer parametara. Velika neizvjesnost ovih komponenti bi mogla da bude posljedica pojednostavljene konceptualizacije potpovršinskih procesa u MBHM-ima, konkretno veze između zapremine vode u tlu i podzemnih voda, odnosno razdvajanja između direktnog i baznog oticaja. Zapremina podzemnih voda i njihova veza sa vodotokom igra presudnu ulogu u generisanju oticaja, te rješenje problema transferabilnosti modela valja potražiti u alternativnim, robusnijim strukturama u kojima će se poboljšati konceptualizacija upravo ovih hidroloških procesa.

Subjektivna ocjena transferabilnosti modela. Vizuelnim poređenjem simuliranih i osmotrenih hidrograma oticaja dobijaju se slični zaključci onima dobijenim iz rezultata numeričkih pokazatelja efikasnosti. Ovi rezultati pokazuju da odabrani pokazatelji efikasnosti mogu pouzdano da kvantifikuju efikasnost modela, uprkos kratkim nizovima mjesečnih protoka. Na slici 7 prikazani su uporedni hidrogrami osmotrenih i simuliranih oticaja za sve modele pri transferu sa sušnog P5 na sušni potperiod P2.

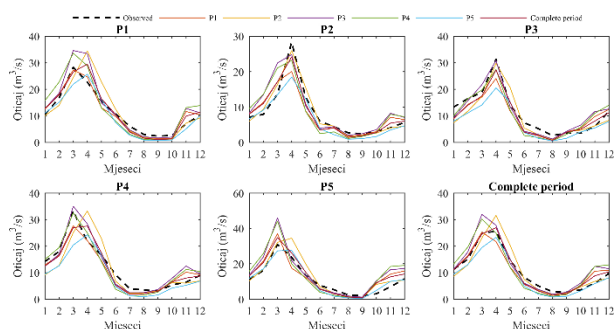
Uporednim pregledom simuliranih i osmotrenih unutargodišnjih raspodjela oticaja, uočava se da iako $abcd$ model ima najmanje neuspješnih transfera prema pokazatelju ε_{IAFD} , WASMOD ima bolje slaganje, naročito u zimskim i proljetnim mjesecima zbog posjedovanja modula snijega. Ovo upućuje da bi trebalo potražiti robusniju verziju ovog pokazatelja efikasnosti ili promijeniti granicu prihvatljivosti. Ostali modeli nemaju modul snijega te su njihove unutargodišnje raspodjele znatno lošije slažu sa osmotrenim.

Tabela 7. Vrijednosti pokazatelja konzistentnosti komponenti vodnog bilansa SR_{rel}

Model	S _{rrel}					
	P1	P2	P3	P4	P5	CP
Evapotranspiracija ET						
<i>abcd</i>	0.17	0.16	0.22	0.18	0.14	0.19
Budyko	0.20	0.21	0.23	0.21	0.12	0.21
GR2M	0.14	0.14	0.18	0.16	0.12	0.16
WASMOD	0.25	0.19	0.30	0.25	0.19	0.26
Zapremina vode u tlu S						
<i>abcd</i>	1.46	1.64	1.76	1.69	0.94	1.52
Budyko	0.47	0.53	0.64	0.59	0.40	0.52
GR2M	0.75	0.88	0.91	0.99	0.49	0.81
WASMOD	0.75	1.14	1.15	1.33	0.88	1.03
Zapremina podzemnih voda G						
<i>abcd</i>	26.75	0.02	23.84	22.25	27.93	24.05
Budyko	0.75	1.10	0.93	0.28	0.62	0.81
GR2M	0.44	0.53	0.36	0.43	0.22	0.44
Bazni oticaj Q _b						
<i>abcd</i>	26.75	0.02	23.84	22.25	27.93	24.05
Budyko	0.49	0.76	0.57	0.40	0.37	0.52
WASMOD	3.28	12.47	1.77	59.14	1.51	46.03
Direktni oticaj Q _d						
<i>abcd</i>	0.44	0.41	0.32	0.38	0.44	0.44
Budyko	0.71	0.36	0.82	0.66	1.20	0.82
WASMOD	0.66	0.50	0.56	0.48	0.65	0.60
Ukupni oticaj Q						
<i>abcd</i>	0.39	0.36	0.33	0.31	0.35	0.38
Budyko	0.66	0.66	0.69	0.46	0.56	0.63
GR2M	0.45	0.48	0.35	0.38	0.29	0.43
WASMOD	0.61	0.47	0.46	0.46	0.60	0.57



Slika 7. Hidrogrami simuliranih i osmotrenih oticaja pri transferu P5/P2 (s-s)



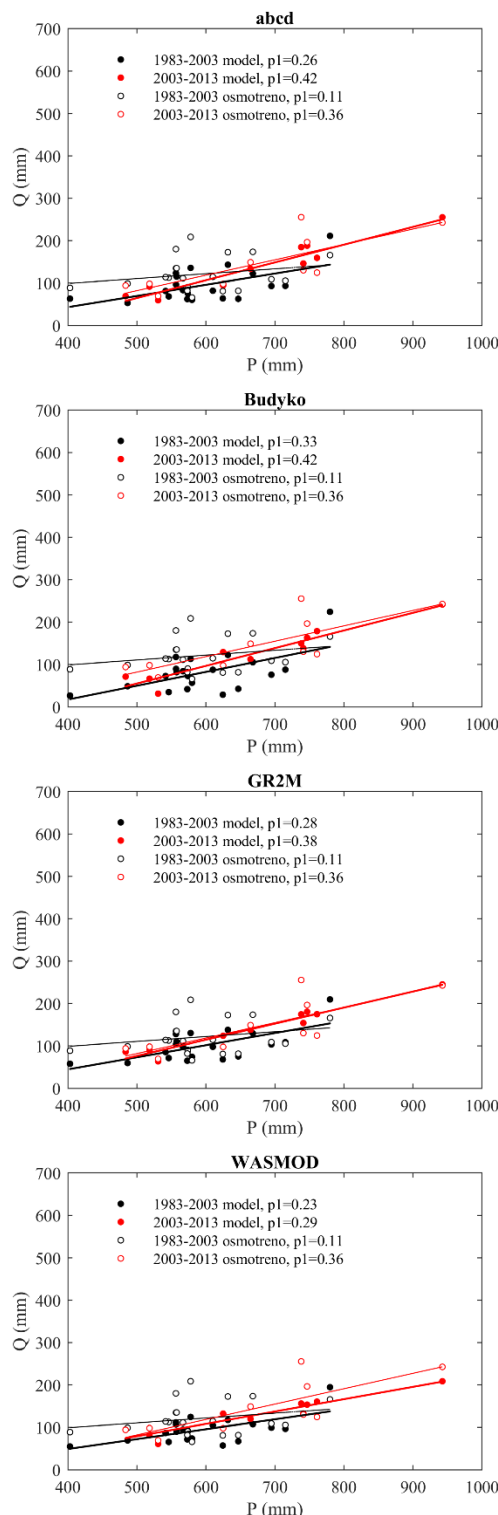
Slika 8. Unutargodišnja raspodjela osmotrenih i simuliranih oticaja sa WASMOD-om i različitim optimalnim skupovima parametara

U cilju provjere kako modeli simuliraju vezu padavina i oticaja, kompletan period osmatranja je podijeljen na dva potperioda, prije i nakon 2003. godine, za koje su simulirani protoci sa šest skupova optimalnih parametara iz šest kalibracionih perioda. Period do 2003. se smatra sušnijim periodom u potpunom osmatranju dok je period nakon 2003. vodniji. Na slici 9 su tačkasto prikazani parovi vrijednosti godišnjih suma padavina i protoka, osmotrenih i simuliranih sa parP5 (za koji su rezultati najlošiji), kao i njihove regresione zavisnosti koje olakšavaju vizuelni pregled slaganja osmotrene i simulirane veze Q-P. Analizom ovih dijagrama zaključuje se da WASMOD najbolje reprodukuje Q-P vezu u vodnom periodu 2003-2013. U sušnom periodu 1983-2003 nijedan model nema zadovoljavajuće rezultate, što odgovara prethodnim rezultatima.

Rangiranje modela i sumarni rezultati. Prema svim prethodnim rezultatima i navedenoj metodologiji, izvršeno je rangiranje modela. Konačno rangiranje je prikazano u tabeli 8.

Prema statističkim pokazateljima efikasnosti, najmanji broj neprihvatljivih transfera ima WASMOD (24%), zatim *abcd* (27%) i GR2M (29%). Prema hidrološkim potpisima, najtransferabilniji je *abcd* sa 26% nezadovoljavajućih transfera, zatim WASMOD i GR2M sa oko 35%, dok Budyko ima neznatno veći procenat nezadovoljavajućih transfera (36%). Modeli su nešto drugačije rangirani prema konzistentnosti simulacija komponenti vodnog bilansa gdje najbolje rezultate ima Budyko model. Prema ukupnom, uprosječenom rangu, najrobusniji model je *abcd*, dok malo lošiju transferabilnost imaju WASMOD i GR2M.

U rangiranju modela, može se dati veća težina određenim aspektima ocjene transferabilnosti modela. U svakom slučaju, rangiranje modela treba da pomogne



Slika 9. Veza Q-P iz osmotrenih i simuliranih godišnjih protoka dobijenih sa parP5. Nagibi regresionih linija p_1 su dati na dijagramima

modelaru da se odluči za jedan model za primjenu u promjenljivim klimatskim uslovima.

Iz rezultata se vidi da niti jedan model nije značajno bolji u odnosu na ostale, odnosno nije transferabilan na najsušnije periode što upućuje na njihovu netransferabilnost na periode sa promjenljivim klimatskim uslovima.

Tabela 8. Rangiranje modela prema rezultatima procedure za ocjenu transferabilnosti. Niži rang označava bolju transferabilnost modela.

Kriterijum	<i>abcd</i>	Budyko	GR2M	WASMOD
Statistički pokazatelji efikasnosti	2	4	3	1
Hidrološki potpisi	1	4	3	2
Granice transferabilnosti	1	4	2	3
Konzistentnost u simuliranim komponentama vodnog bilansa	3	1	2	4
Konzistentnost parametara modela	2	4	1	3
Subjektivna ocjena	1	2	4	2
Srednji rang	1.67	3.17	2.50	2.50
Rangiran kao prvi	3	1	1	1
Rangiran kao posljednji	0	4	1	1

ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJE ISTRAŽIVANJE

U ovom radu prikazana je metodologija za analizu i ocjenu transferabilnosti mjesečnih bilansnih hidroloških modela, koja je primijenjena na četiri često korišćena MBHM-a (*abcd*, Budyko, GR2M i WASMOD) na primjeru sliva Toplice u Srbiji.

U ovom primjeru, statistički pokazatelji ukazuju na pad efikasnosti modela pri njihovom transferu na periode sa različitim klimatskim uslovima (npr. vodni na sušni i obrnuto). Nasuprot statističkim pokazateljima, samo nekoliko pokazatelja efikasnosti modela iz reda hidroloških potpisa (autokorelacije, standardna devijacija, srednji protoci, 80-i i 95-i percentil i IAFD) pokazuju promjenu efikasnosti modela pri transferu slično kao statistički pokazatelji. S druge strane, pojedini potpisi nisu informativni sa aspekta

transferabilnosti modela, jer se jednako dobro ili jednako loše reprodukuju u svim periodima. Ovi rezultati naglašavaju značaj odabira pokazatelja efikasnosti modela, s obzirom da nijedan pokazatelj ne odražava sve aspekte slaganja osmotrenih i simuliranih oticaja. Takođe je evidentno da pojedine pokazatelje efikasnosti (naročito grešku u unutargodišnjoj raspodjeli protoka) treba dodatno prilagoditi mjesečnim podacima jer mogu da prikažu rezultate lošijim nego što to zaista jesu. Na razmatranom slivu nijedan model nije primjenljiv u sušnom periodu ukoliko je kalibrisan u vodnijim periodima. Statistički pokazatelji potvrđuju da modeli nisu pouzdani za primjenu u periodima gdje ima manje ili više od 8% padavina u odnosu na period kalibracije dok za RSR pokazatelj modeli nisu transferabilni uopšte. Prema nekim osjetljivim hidrološkim potpisima (medijana, 80-ti i 95-ti percentil), modeli su u potpunosti transferabilni dok prema ostalim osjetljivim potpisima (ε_{IAFD} , autokorelacije i standardna devijacija) nisu uopšte, osim *abcd* modela i ε_{IAFD} na periode tokom kojih je prisutna promjena padavina od $\pm 10\%$.

Simulacije su pokazale da pojedine simulirane komponente vodnog bilansa, poput zapremine podzemnih voda i baznog protoka, kao i parametri koji kontrolišu vrijednosti ovih veličina, mogu da značajno variraju od jednog do drugog perioda. Međutim, nisu detektovane jasne korelacije između optimalnih parametara i hidroklimatskih karakteristika da bi se uspostavila jasna zavisnost koja bi objasnila razloge te varijabilnosti.

Zbirni rezultati primijenjene procedure za ocjenu transferabilnosti modela ukazuju da je za sliv Toplice najpouzdaniji model *abcd*, a zatim WASMOD koji je preporučljiviji zbog modula snijega u svojoj strukturi. Od svih modela, *abcd* i Budyko su dosta slični po strukturi ali imaju značajno različite rezultate. WASMOD nema rezervoar podzemnih voda ali je ipak bolji u pojedinim rezultatima vjerovatno zbog modula snijega, ali i mogućnosti da na ovom slivu podzemne vode nisu dominantna komponenta. Takođe, jednostavna linearna zavisnost oticaja od zapremine vode u podzemnom rezervoaru kod *abcd* modela pokazala se kao dovoljno kompleksna jer model GR2M, koji ima kvadratnu zavisnost, ne daje bolje rezultate. Rezultati vezani za komponente vodnog bilansa upućuju na potrebu za boljim konceptualizacijama zapremine vode u tlu i podzemnih voda, odnosno razdvajanja direktnog i baznog oticaja.

Preporuke za dalja istraživanja vode upravo u ovim pravcima: formiranje alternativnih, robusnijih struktura

modela, kao i drugih načina kalibracije modela (višekriterijumske, sa uključivanjem hidroloških potpisa, izdvajanjem optimalnih parametara simultano na više potperioda i sl.). Predstavljena procedura za ocjenu transferabilnosti MBHM-a u promjenljivim klimatskim uslovima takođe može biti poboljšana formiranjem novih pokazatelja efikasnosti koji bolje pogoduju mjesečnim nizovima. Dobijeni rezultati mogu da se učvrste primjenom navedene procedure na više različitih slivova koji su pod uticajem promjenljive klime.

LITERATURA

- [1] Addor, N., Nearing, G., Prieto, C., Newman, A.J., Vine, N. Le, Clark, M.P., 2018. Selection of hydrological signatures for large- sample hydrology. *Water Resour. Res.* 54, 8792–8812. doi:10.17605/OSF.IO/2EM53
- [2] Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F., 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resour. Res.* 48, 1–17. doi:10.1029/2011WR011721
- [3] Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process.* 19, 507–515. doi:10.1002/hyp.5675
- [4] Fowler, K., Coxon, G., Freer, J., Peel, M., Wagener, T., Western, A., Woods, R., Zhang, L., 2018. Simulating runoff under changing climatic conditions: a framework for model improvement. *Water Resour. Res.* 54, 1–21. doi:10.1029/2018WR023989
- [5] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- [6] Hughes, D.A., 2015. Simulating temporal variability in catchment response using a monthly rainfall–runoff model. *Hydrol. Sci. J.* 60, 1286–1298. doi:10.1080/02626667.2014.909598
- [7] Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.* 31, 13–24. doi:10.1080/02626668609491024
- [8] Martinez, G.F., Gupta, H. V., 2010. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the “abcd” monthly water balance model for the conterminous United States. *Water Resour. Res.* 46, 1–21. doi:10.1029/2009WR008294
- [9] Merz, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011. Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resour. Res.* 47, n/a-n/a. doi:10.1029/2010WR009505
- [10] Montanari, A., Young, G., Savenije, H.H.G.H.G., Hughes, D.A., Wagener, T., Ren, L.L., Koutsoyiannis, D., Cudennec, C., Toth, E., Grimaldi, S., Blöschl, G., Sivapalan, M., Beven, K., Gupta, H. V., Hipsey, M., Schaefli, B., Arheimer, B., Boegh, E., Schymanski, S.J.J., Di Baldassarre, G., Yu, B., Hubert, P., Huang, Y., Schumann, A., Post, D.A., Srinivasan, V., Harman, C.J., Thompson, S., Rogger, M., Viglione, A., McMillan, H.K., Characklis, G., Pang, Z., Belyaev, V., 2013. “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrol. Sci. J.* 58, 1256–1275. doi:10.1080/02626667.2013.809088
- [11] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W. Van, Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe* 50, 885–900.
- [12] Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., 2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.* 318, 200–214.
- [13] Plavšić, J., Dašić, T., Milovanović, I., 2017. Modeliranje vodoprivrednog sistema sliva Drine i analiza izabranih razvojnih i klimatskih scenarija 49, 125–137.
- [14] Sankarasubramanian, A., Vogel, R.M., 2002. Hydroclimatology of the continental United States. *Water Resour. Res.* 38, 1083–1095. doi:10.1029/2002GL015937
- [15] Sawicz, K.A., 2013. Catchment classification - understanding hydrologic similarity through catchment function. The Pennsylvania State University.
- [16] Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Audouy, J.-N., Berthet, L., Edwards, P., Folton, N., Furusho, C., Kuentz, A., Lerat, J., Lindstrom, G., Martin, E., Mathevet, T., Merz, R., Parajka, J., Ruelland, D., Vaze, J., 2015. Hydrology under change: an

- evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. *Hydrol. Sci. J.* 60, 1184–1199. doi:10.1080/02626667.2014.967248
- [17] Thomas, H.A.J., 1981. Improved Methods for National Water Assessment. Water Resources Contract: WR15249270.
- [18] Todorović, A., 2015. Impact of Calibration Period on Parameter Estimates in the Conceptual Hydrologic Models of Various Structures. Univerzitet u Beogradu.
- [19] Todorovic, A., Plavsic, J., 2016. The role of conceptual hydrologic model calibration in climate change impact on water resources assessment. *J. Water Clim. Chang.* 7, 16–28. doi:10.2166/wcc.2015.086
- [20] Todorović, A., Plavšić, J., 2014. Mogućnost primene modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije. *Vodoprivreda* 46, 117–128.
- [21] Topalović, Ž., Todorović, A., Plavšić, J., 2020. Evaluating the transferability of monthly water balance models under changing climate conditions. *Hydrol. Sci. J.* 1–23. doi:10.1080/02626667.2020.1725238
- [22] Vrugt, J.A., Robinson, B.A., 2007. Treatment of uncertainty using ensemble methods: Comparison of sequential data assimilation and Bayesian model averaging. *Water Resour. Res.* 43, 1–15. doi:10.1029/2005WR004838
- [23] Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M.J., Wheater, H., Gupta, H. V., 2003. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrol. Process.* 17, 455–476. doi:10.1002/hyp.1135
- [24] Xu, C., 2002. WASMOD – The water and snow balance modeling system, in: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, pp. 555–590.
- [25] Xu, C., 1999. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Agric. For. Meteorol.* 98–99, 295–304.
- [26] Zhang, H., Huang, G.H., Wang, D., Zhang, X., 2011. Multi-period calibration of a semi-distributed hydrological model based on hydroclimatic clustering. *Adv. Water Resour.* 34, 1292–1303. doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.005
- [27] Zhang, L., Potter, N.J., Hickel, K., Zhang, Y., Shao, Q., 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. *J. Hydrol.* 360, 117–131. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.07.021

APPLICABILITY OF MONTHLY WATER BALANCE MODELS IN CHANGING CLIMATE CONDITIONS

by

Žana TOPALOVIĆ¹⁾,
Andrijana TODOROVIĆ²⁾, Jasna PLAVŠIĆ²⁾¹⁾ University of Banja Luka - Faculty of Architecture, Civil Engineering i Geodesy²⁾ University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

Monthly water balance hydrological models (MWBM) are commonly used for assessment of climate change impact on water resources. Hence, these models should produce accurate hydrological simulation results under various, i.e., changing climatic conditions. Applicability of MWBM is seldom analysed. This paper strives to bridge this gap by proposing an exhaustive evaluation framework aimed at evaluation of applicability of MWBM under changing climatic conditions, i.e., at evaluation of their transferability. The framework includes analyses of consistency in model efficiency, in parameter estimates and in simulated water balance components, as well as a subjective assessment of model efficiency and transferability. The proposed evaluation framework is applied with four commonly used MWBMs: *abcd*, Budyko, GR2M and WASMOD. These models are applied for runoff simulations in Serbian catchment Toplica.

The *abcd* and WASMOD models slightly outperform the remaining ones in terms of transferability, but still they can be used on periods with limited change in climate conditions. Models can be transferred to wetter or drier periods only if precipitation amount is up to 8% higher or smaller than precipitation in the calibration period. However, none of the models analysed is transferable to driest periods.

A large variability in simulated groundwater storage and baseflow is obtained across various calibration periods, which indicates that these components should be differently conceptualised to improve model efficiency and transferability.

Keywords: monthly water balance models, changing climate conditions, model transferability, model efficiency, hydrological signatures, water balance components

Redigovano 9.11.2020.