

Hidrološko modeliranje korišćenjem geomorfološkog jediničnog hidrograma na neizučnim slivovima

Petar Praštalo¹
Žana Topalović²
Borislava Blagojević³

APSTRAKT: U hidrološkoj praksi danas se koristi veliki broj hidroloških modela koji u svojoj strukturi koriste jedinični hidrogram radi transformacije efektivnih padavina u direktni oticaj. Trenutni geomorfološki jedinični hidrogram (TGMJH) se pokazao kao veoma koristan alat u primjeni na neizučnim slivovima, obzirom da njegovi parametri mogu da se odrede iz geomorfologije sliva na osnovu digitalnog modela visina (DMV). U ovom radu ispitan je uticaj uključivanja TGMJH u strukturu postojećeg modela GR4J na njegovu efikasnost. Nekoliko hidrološki izučnih slivova na slivu rijeke Bosne je modelirano standardnim GR4J modelom, zatim sa izmjenjenom strukturom uvođenjem TGMJH kao metode za proračun transformacije efektivnih padavina u oticaj. Uspostavljena je regionalna zavisnost između optimizovanih parametara modifikovanog GR4J modela i karakteristika sliva iz kojeg su ocijenjeni parametri na hidrološki neizučnim slivovima. Hidrološki neizučni slivovi korišćeni u ovom radu su samo tako tretirani dok isti imaju osmatranja što omogućava validaciju primijenjene metodologije za proračun velikih voda na neizučnim slivovima korišćenjem TGMJH u strukturi postojećeg GR4J modela.

Ključne riječi: Trenutni geomorfološki jedinični hidrogram, geomorfološki parametri, neizučni sliv, GR4J hidrološki model.

Hydrological modeling by geomorphological unit hydrograph on ungauged basins

ABSTRACT: Nowadays, a vast number of hydrological models comprising unit hydrograph in their structure are used in hydrological practice to transform effective precipitation into runoff. The geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) has proven to be a very useful tool for application in ungauged basins, because its parameters can be determined through the basin geomorphology obtained from a digital elevation model (DEM). In this paper, the possibility to apply GIUH in hydrological modeling was investigated by including it in the structure of the GR4J hydrological model. In several gauged river catchments in the Bosna River Basin, modeling was done with the standard GR4J model, and then with the modified structure of the GR4J model by introducing GIUH as a method for calculating the transformation of effective precipitation into runoff. Regional correlation equations were established between the optimized parameters of the modified GR4J model and the characteristics of the basin. From the regional equations, the model parameters of hydrologically ungauged catchments were evaluated. The hydrologically ungauged catchments used in this paper are actually gauged, enabling validation of the applied methodology for flood assessment in ungauged catchments using GIUH in the structure of the existing GR4J model.

Keywords: Geomorphological instantaneous unit hydrograph, geomorphology parameters, ungauged basins, GR4J hydrological model.

¹ Petar Praštalo, student master studija, Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, petar.prastalo@aggf.unibl.org

² Doc dr. Žana Topalović, Univerziteta u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, zana.topalovic@aggfbl.unibl.org

³ Doc dr. Borislava Blagojević, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs

1 Uvod

Modeliranje oticaja i određivanje velikih voda, oduvijek je bilo ključni zadatak u hidrologiji, posebno kada se radi o hidrološki neizučeni slivovima, na kojima zbog nedostatka mjerenja protoka nije moguće primijeniti statističke metode. U slučajevima kada neposredne metode nije moguće primijeniti, koriste se posredne, npr. metoda regionalne analize, empirijske formule ili hidrološki modeli padavine – oticaj [1]. Prilikom izrade strukture hidrološkog modela javljaju se poteškoće, jer ona zavisi od ponašanja slivnog područja [1].

Jedinični hidrogram predstavlja hipotetički odgovor sliva na jediničnu efektivnu kišu ravnomjerno raspoređenu na slivu i često se definiše kao hidrogram direktnog oticaja, obzirom da predstavlja transformaciju efektivnih padavina u oticaj. Kao takav, pogodan je za svaki sliv i pri hidrološkom modeliranju, neophodan dio strukture hidrološkog modela. Trenutni geomorfološki jedinični hidrogram (TGMJH) povezuje karakteristike sliva sa geomorfološkim parametrima sliva. Njegova specifičnost je u tome što za svoju konstrukciju koristi geomorfološke parametre sliva, tako da je primjenjiv i na hidrološki neizučeni slivovima. Zbog svoje specifične pogodnosti, u ovom radu je TGMJH korišten kao dio strukture GR4J modela. Modifikovani GR4J model ima ukupno 7 parametara dok standardni model ima 4 parametra. Ovom modifikacijom modela geomorfološki parametri su postali dodatni parametri modela. Nakon toga urađena je kalibracija i validacija modela i izabran je onaj model koji ima najveću efikasnost. Poređenjem dobijenih rezultata standardnog i modifikovanog GR4J modela korišteni su bolji rezultati za formiranje regresionih zavisnosti između optimizovanih parametara modela i geomorfoloških karakteristika sliva. Za ovo istraživanje izabrani su slivovi rijeke Bosne, i to podijeljeni u dvije grupe. Prvu grupu slivova čine osnovni slivovi za formiranje regresionih zavisnosti i definisanje parametara modela za drugu grupu slivova, tj. test slivova koji su uslovno neizučeni i na kojima je provjerena valjanost primjenjene metodologije. Efikasnost simulacija modela na test slivovima je ocijenjena iz kompletnih simulacija i posebnom analizom pojedinačnih hidrograma poplavnih talasa.

2 Opis GR4J modela

Model GR4J je hidrološki model sa 4 parametara kojeg su razvili Perin i saradnici 2003 godine [2]. Radi se o empirijskom modelu, ali njegova struktura je slična konceptualnim modelima. Ulazni podaci neophodni za modeliranje su potencijalna evapotranspiracija, padavine, a sliv je predstavljen preko dva rezervoara za skladištenje i propagaciju oticaja. Pomoću jediničnog hidrograma vrši se transformacija padavina u oticaj [3].

Generalni razvoj GR4J modela pokrenuo je još *Claude Michel*, početkom 1980 godine u *Cemagref* – u, javnom istraživačkom institutu u Francuskoj [4]. Prva verzija GR4J modela imala je samo jedan parametar, a cilj je bio da se dobije opšti efikasan i robustan model. Vremenom je razvijena verzija modela koja povezuje oticaj sa padavinama i potencijalnom evapotranspiracijom koristeći dnevne vrijednosti podataka.

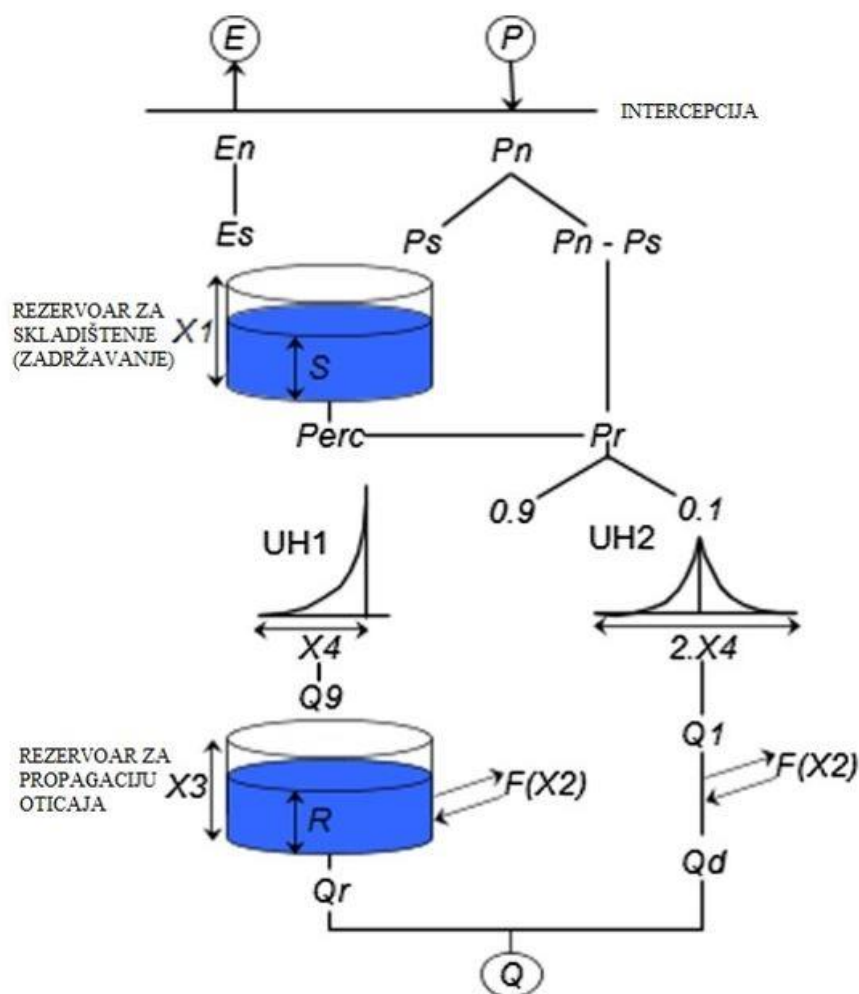
GR4J model ima 4 parametra, gdje se 2 parametra odnose na početne uslove u rezervoarima za skladištenje i propagaciju oticaja koji su u modelu uključeni relativno preko odnosa parametara $X1$ i $X3$. U Tabeli 1 je dat opis parametara GR4J modela i opseg njihovih vrijednosti, a na Slici 1 je prikazana struktura GR4J modela.

3 Izučavano područje, raspoloživi podaci

Izučavano područje obuhvata sliv rijeke Bosne i susjedni sliv rijeke Tinje do HS Srebrenik. Rijeka Bosna je desna pritoka rijeke Save, sa površinom sliva od 10 457 km², i dužinom toka od 271 km. Izvire iz tridesetak kraških vrela u selu Vrutci u blizini grada Ilidže u podnožju planine Igman na oko 500 metara nadmorske visine, a ušće u rijeku Savu je kod Šamca.

Tabela 1. Pregled parametara GR4J modela sa opisom, donjom i gornjom granicom vrijednosti parametara [5]
 Table 1. Overview of GR4J model parameters with description, lower and upper limit of parameter values [5]

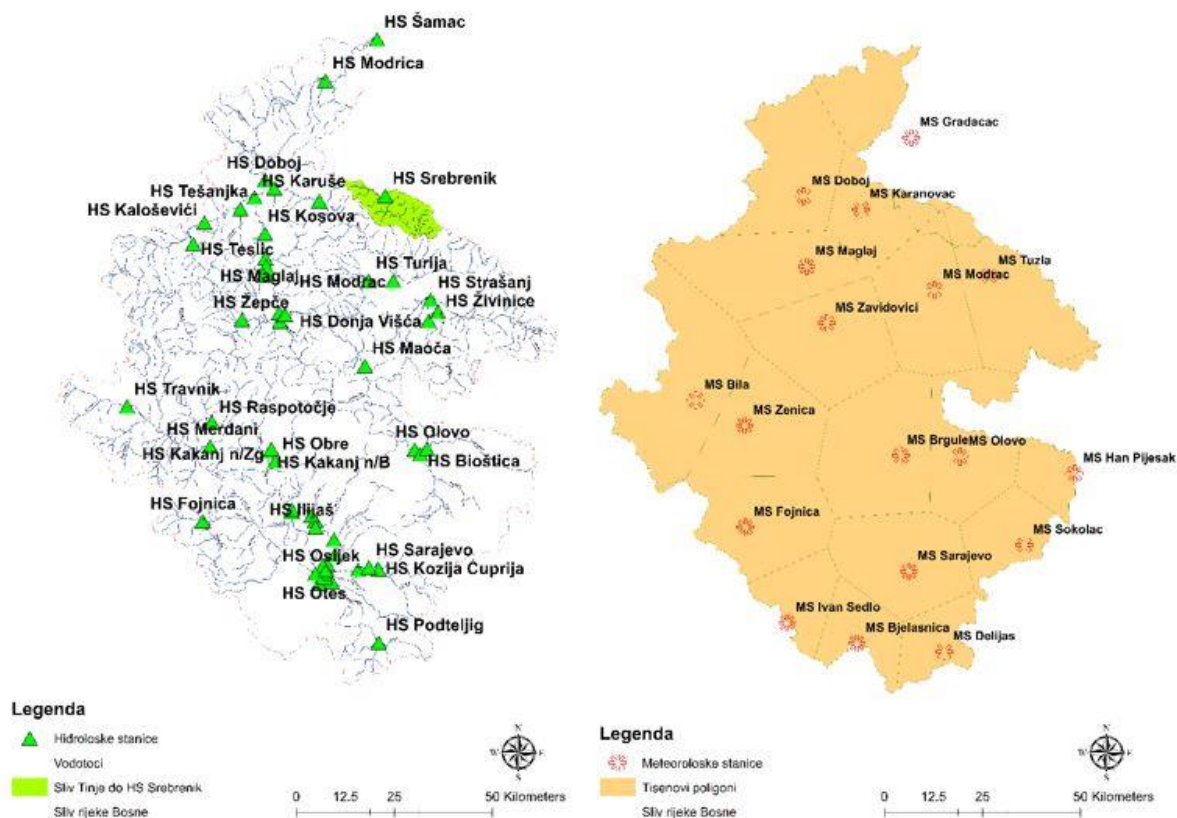
Oznaka parametra	Opis parametra	Jedinica	Donja granica	Gornja granica
$X1$	Površinsko skladištenje: zadržavanje padavina na površini tla	mm	1	1500
$X2$	Koeficijent razmjene podzemnih voda: funkcija razmjene podzemnih voda koje utiču na oticaj	mm	-10	5
$X3$	Podzemno skladištenje: količina vode koja se može zadržati u poroznim sredinama	mm	1	500
$X4$	Vrijeme porasta jediničnog hidrograma: vrijeme kada se ostvaruje vršni protok	dan	0.5	4
So	Početni nivo u rezervoaru za zadržavanje oticaja	mm	-	-
Ro	Početni nivo u rezervoaru za propagaciju oticaja	mm	-	-



Slika 1. Prikaz strukture GR4J hidrološkog modela [5]

Figure 1. Structure of the GR4J hydrological model [5]

Podaci za izradu hidrološkog modela su vremenskog koraka jedan dan, a obuhvatili su proticaje, padavine i temperature. Na raspolaganju su bile 33 hidrološke stanice, 18 padavinskih i 15 temperaturnih stanica. Dužina osmatranja korištena za analizu je u prosjeku 10 godina, odnosno period od 2008 – 2017 godine. Prostorna raspodjela meteoroloških podataka izvršena je metodom Tisenovih poligona. Na slici 2, je prikazan sliv rijeke Bosne sa hidrografskom mrežom vodotoka i hidrološkim i meteorološkim stanicama.



Slika 2. Hidrološke stanice na slivu rijeke Bosne (lijevo) i karta Tisenovih poligona (desno)

Figure 2. Hydrological stations in the Bosna river basin (left) and map of Thiessen polygons (right)

U ovom radu korišteni su podaci sa 21 hidrološke stanice, od čega je 10 stanica za kalibraciju i validaciju standardnog i modifikovanih varijanti GR4J modela. Na osnovu ovih podataka uspostavljene su regresione zavisnosti neophodne za ocjenu parametara na neizučenim slivovima. Ostalih 11 stanica služi za verifikaciju primjenljivosti modela na slivovima koji su uslovno smatrani neizučenim.

Mjerenje evapotranspiracije (*ET*) na slivu ne postoji, tako da je potencijalna evapotranspiracija (*PET*) određena po metodi Hamona (*Hamon, 1963*). Izbor metode za proračun potencijalne evapotranspiracije zavisio je od raspoloživih podataka. Kako se raspolagalo srednjim dnevnim temperaturama vazduha, izabrana je jednostavna metoda koje u proračunu koristi samo temperaturu.

4 Kalibracija i validacija modela

Kako je period raspoloživih podataka uglavnom 10 godina, prvih 5 godina je korišteno za kalibraciju modela, a drugih 5 za validaciju modela. Period zagrijavanja modela za kalibraciju i validaciju prema preporukama iz literature iznosi 2 godine [2]. Efikasnost modela je ocijenjena preko Neš-Satkliif koeficijenta efikasnosti – NSE, definisanog na sledeći način:

$$NSE = \left(1 - \frac{\sum(Q_{osmotreno,i} - Q_{model,i})^2}{\sum(Q_{osmotreno,i} - Q_{osmotreno,sr})^2} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdje su: $Q_{osmotreno}$ – osmotreni dnevni protok (m^3/s), $Q_{osmotreno,sr}$ – srednja vrijednost osmotrenog dnevnog protoka (m^3/s), Q_{model} – protok dobijen iz modela (simulirano) (m^3/s).

Modifikacija strukture standardnog GR4J modela sastoji se u tome što se parametar $X4$ koji predstavlja vrijeme porasta jediničnog hidrograma, zamijeni sa parametrima TGMJH određenih na osnovu geomorfoloških parametara. Kalibracija modela rađena je tako što su u prvoj varijanti modifikacije modela kalibrisana 3 parametra dok su ostali geomorfološki parametri fiksni. U ovoj varijanti modela, geomorfološki parametri su određeni analizom DMV-a u QGIS-u. U drugoj varijanti modifikovanog modela kalibrisani su svi parametri modela, odnosno 7 parametara. Izabran je onaj model koji ima najveći koeficijent efikasnosti prilikom kalibracije modela.

Uloga pokazatelja slaganja je da ukaže na sistemska greške (konstantno precjenjivanje i potcjenjivanje protoka) i dinamičke greške (vrijeme kašnjenja maksimalnog protoka hidrograma, brzine opadanja recesione grane hidrograma, itd.) [6]. Takođe, kvalitet modeliranja ocjenjuje se i tokom perioda validacije modela, koja podrazumijeva primjenu (kalibrisanog) modela za modeliranje oticaja tokom perioda različitog od perioda kalibracije modela. U opštem slučaju, pokazatelji slaganja modela imaju lošije vrijednosti za period validacije modela u odnosu na period kalibracije modela [7],[8].

Kalibracija standardnog i modifikovanog GR4J modela izvršena je maksimiziranjem NSE ciljne funkcije pri promjeni parametra modela, a primjenom GRG nelinearnog optimizacionog algoritma (*The Generalized reduced gradient method*) [9].

Kvalitet modeliranja pojedinačnih hidrograma velikih voda određen je pomoću relativne greške maksimalnog protoka i relativne greške protoka, pomoću sledećih jednačina,

$$\delta = \frac{(Q_{model} - Q_{osmotreno})}{Q_{osmotreno}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Idealan slučaj kada je relativna greška maksimalnog protoka jednaka nuli.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{osmotren,i} - Q_{model,i})}{\sum_{i=1}^N Q_{osmotren,i}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Idealan slučaj kada je greška jednaka nuli.

5 Formiranje regionalne zavisnosti

Regionalna zavisnost između karakteristika slivova i optimizovanih parametara modela uspostavljena je uzimajući u obzir parametre efikasnijeg modela, tj. na osnovu one varijante modela koja ima najveći koeficijent efikasnosti na većem broju slivova za period kalibracije i validacije modela. Prilikom korelacije parametara modela sa parametrima karakteristika sliva u analizi su korišteni: površina sliva, dužina glavnog toka i nagib sliva. Za formiranje regresionih zavisnosti korišćeni su oni parametri modela koji mogu da se dovedu u vezu sa karakteristikama sliva, a da se dobije visok koeficijent determinacije modela. U ovom radu isprobani su regresioni modeli sa 2 i 3 parametra, od čega je za većinu parametara uspostavljen regresioni model sa 3 parametra, dok je samo za parametar razmjere za dužine uspostavljen model sa 2 parametra.

Za test slivove, geomorfološki parametri su određeni na osnovu formiranih regionalnih jednačina na osnovu vrijednosti iz osnovnih slivova. Radi dobijanja što većeg koeficijenta determinacije, većina jednačina je sa tri parametra, iako je za raspoloživi obim podataka najveći broj pouzdano ocijenjenih parametara regresione jednačine mogao da bude dva.

6 Rezultati i diskusija

6.1 Rezultati modeliranja

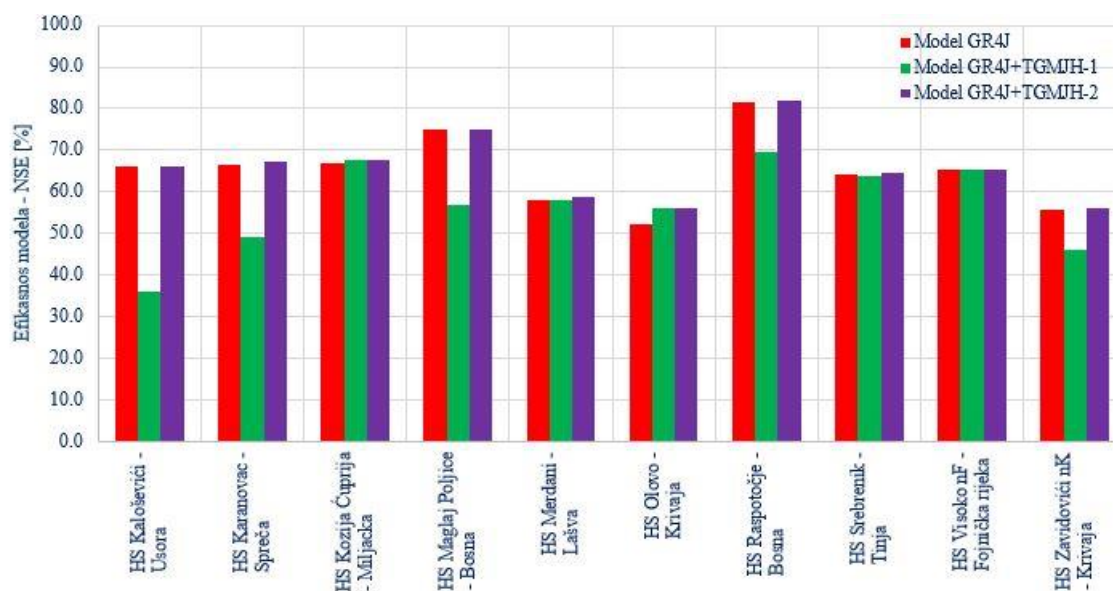
Rezultati kalibracije i validacije standardnog GR4J modela pokazuju sledeće:

- Kod kalibracije, efikasnost modela je u rasponu od 52 – 82%, dok je najmanja efikasnost za HS Olovo – Krivaja i iznosi 52.3%. Na ostalim slivovima efikasnost je veća od 50%.
- U periodu validacije, efikasnost modela za većinu slivova je ispod 50%, dok najveću efikasnost ima HS Maglaj Poljice i iznosi 69.7%. Efikasnost veća od 50% potvrđena je na 3 sliva, dok je na ostalih 7 slivova efikasnost ispod 50%.

Što se tiče modifikovanih varijanti modela, nije se došlo do značajno boljih rezultata u pogledu efikasnosti modela u odnosu na standardni:

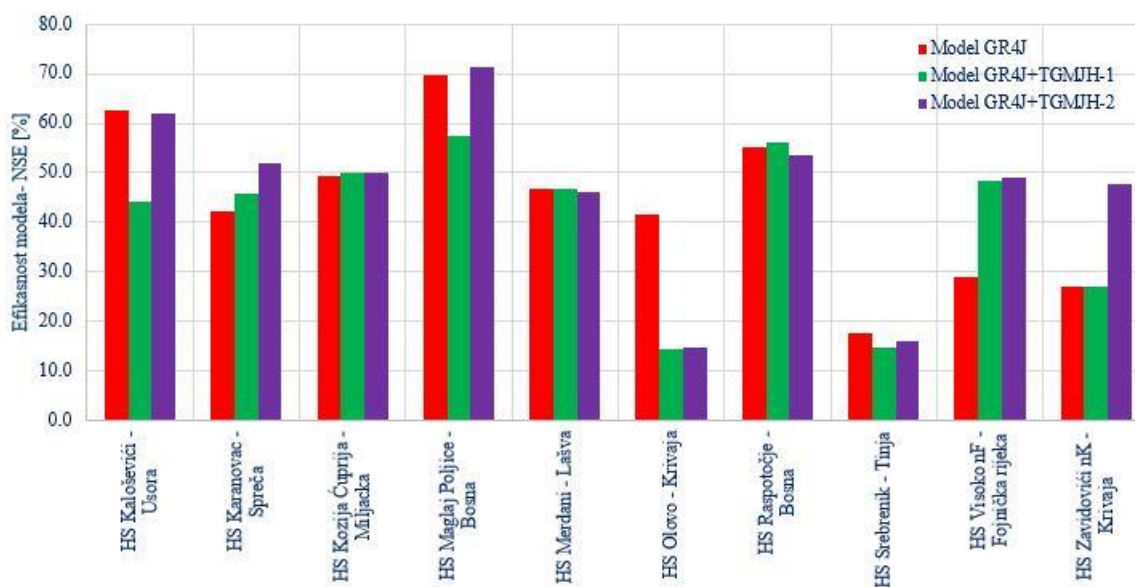
- U prvoj varijanti modifikovanog modela za period kalibracije efikasnost veća od 50% potvrđena je na 7 slivova, dok je za ostala 3 sliva efikasnost manja od 50%.
- U prvoj varijanti modela za period validacije efikasnost veća od 50% potvrđena je na 3 sliva, dok je na ostalih 7 slivova efikasnost manja od 50%.
- U drugoj varijanti modifikovanog modela za period kalibracije efikasnost je veća od 50% potvrđena je na svim slivovima.
- Za period validacije u drugoj varijanti modifikovanog modela efikasnost veća od 50% potvrđena je za 5 slivova, dok je za ostalih 5 efikasnost ispod 50%.

Na osnovu prethodnog jasno je da je efikasnost modela veća od 50% za periode kalibracije i validacije potvrđena na većini slivova u drugoj varijanti modela. Na osnovu optimizovanih parametara ovog modela, formirana je regionalna zavisnost parametara i karakteristika sliva. Na slici 2 su prikazani rezultati efikasnosti modela po slivovima za period kalibracije i validacije modela.



Slika 3. Uporedni prikaz rezultata za period kalibracije modela

Figure 3. Comparative presentation of results for the model calibration period



Slika 4. Uporedni prikaz rezultata za period validacije modela

Figure 4. Comparative presentation of results for the model validation period

7 Ocjena parametara modifikovanog modela u neizučnim slivovima

Nakon što je urađena kalibracija i validacija standardnog i modifikovanih varijanti GR4J modela formirana je regresiona zavisnost parametara modela sa karakteristikama sliva. Na slikama 3 i 4 modifikovani GR4J+TGMJH-2 ima bolje rezultate za period kalibracije i validacije modela za osnovne slivove.

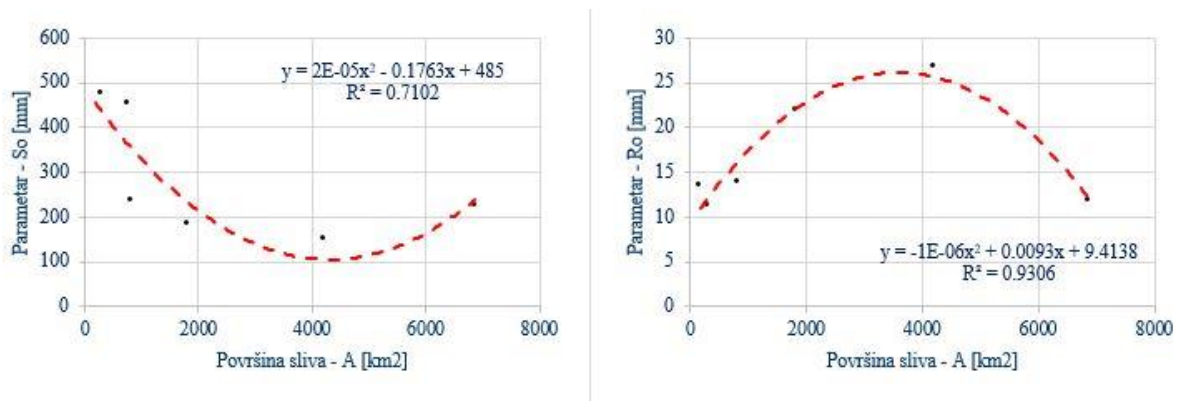
U procesu uspostavljanja zavisnosti između parametara modela i karakteristika sliva težilo se dobijanju što većeg koeficijenta determinacije modela. Istovremeno, vodilo se računa i da se obuhvati što je moguće širi opseg vrijednosti karakteristika slivova, kako bi formirana metodologija mogla da bude primjenjena na što većem broju slivova.

Utvrđeno je da se površina sliva koreliše sa parametrima početnih vrijednosti nivoa u rezervoarima za skladištenje i za propagaciju oticaja, kao i sa parametrom za razmjenu podzemnih voda, $So = f(A)$; $Ro = f(A)$; $X2 = f(A)$. Ovo je sasvim očekivano slaganje, pošto vrijednosti ovih parametara zavise od površine sliva. Takođe se i dva geomorfološka parametra slažu sa površinom sliva, a to su parametar razmjere za dužine i parametar razmjere za površine, $Rl = f(A)$; $Ra = f(A)$. Parametar bifurkacije pokazuje slaganje sa dužinom glavnog toka $Rb = f(L)$, dok parametar brzine pokazuje slaganje sa nagibom sliva $V = f(Isl)$.

Parametar zadržavanja vode na površini tla $X1$ i parametar zadržavanja vode u podzemlju $X3$, nemaju zavisnost sa karakteristikama sliva, tako da se njihova vrijednost dobija na osnovu relativnog odnosa u odnosu na parametre za početni nivo u rezervoarima. Pretpostavlja se da ovi parametri imaju zavisnost sa određenim karakteristikama tla, ali zbog nedostatka podataka nisu razmatrani u ovom radu.

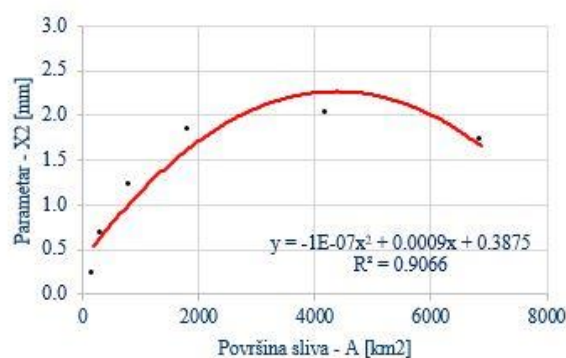
U nastavku se prikazuju uspostavljene zavisnosti za pojedine parametre modela na osnovu poznatih karakteristika tla.

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.



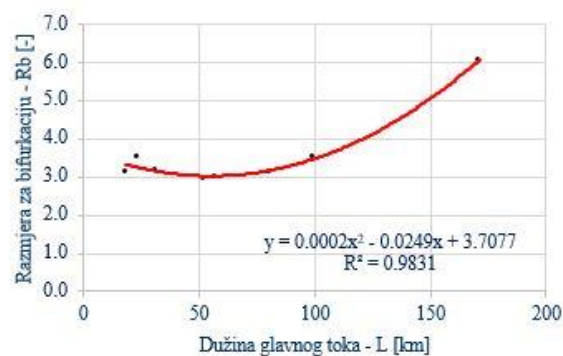
Slika 5. Zavisnost parametra S_o od površine sliva (lijevo) i parametra R_o (desno)

Figure 5. Dependence of the parameter S_o on the catchment area (left) and the parameter R_o (right)



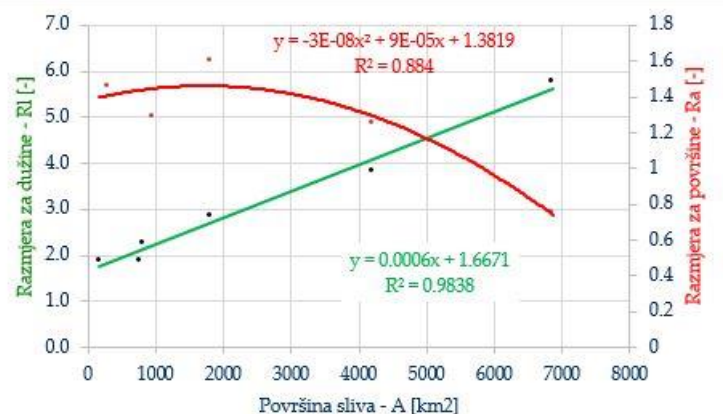
Slika 6. Zavisnost parametara X_2 od površine sliva

Figure 6. Dependence of parameter X_2 on the catchment area



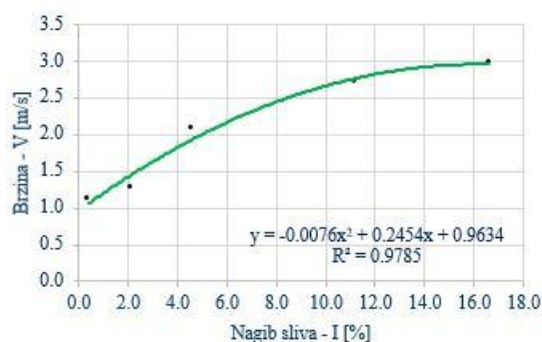
Slika 7. Zavisnost parametra razmjere za dužine R_b od dužine glavnog toka

Figure 7. Dependence of the scale parameter for lengths R_b on the length of the main flow



Slika 8. Zavisnost parametara RI , Ra od površine sliva

Figure 8. Dependence of the parameter RI , Ra on the catchment area



Slika 9. Zavisnost parametra brzine V od nagiba sliva

Figure 9. Dependence of the velocity parameter V on the basin slope

7.1 Hidrogrami velikih voda

Određivanje hidrograma velikih voda izvršeno je pomoću GR4J+TGMJH-2 modela koji generalno ima najbolju efikasnost u odnosu na standardnu i prvu varijantu modifikovanog modela. Iz kontinualnih simulacija modifikovanog GR4J+TGMJH-2 modela izvučeni su pojedinačni hidrogrami poplavnih talasa, te upoređeni sa osmotrenim na test slivovima. Za ocjenu slaganja oblika hidrograma poplavnih talasa korištena je relativna greška maksimalnog protoka i relativna greška protoka prema jednačinama (2) i (3).

Proračunom parametara modela iz formiranih regresionih zavisnosti, prihvatljivi rezultati dobijeni su na tri od 11 test slivova, gdje je efikasnost modela veća od 50%. Ocjena slaganja modeliranih i osmotrenih hidrograma prikazana je u Tabeli 2.

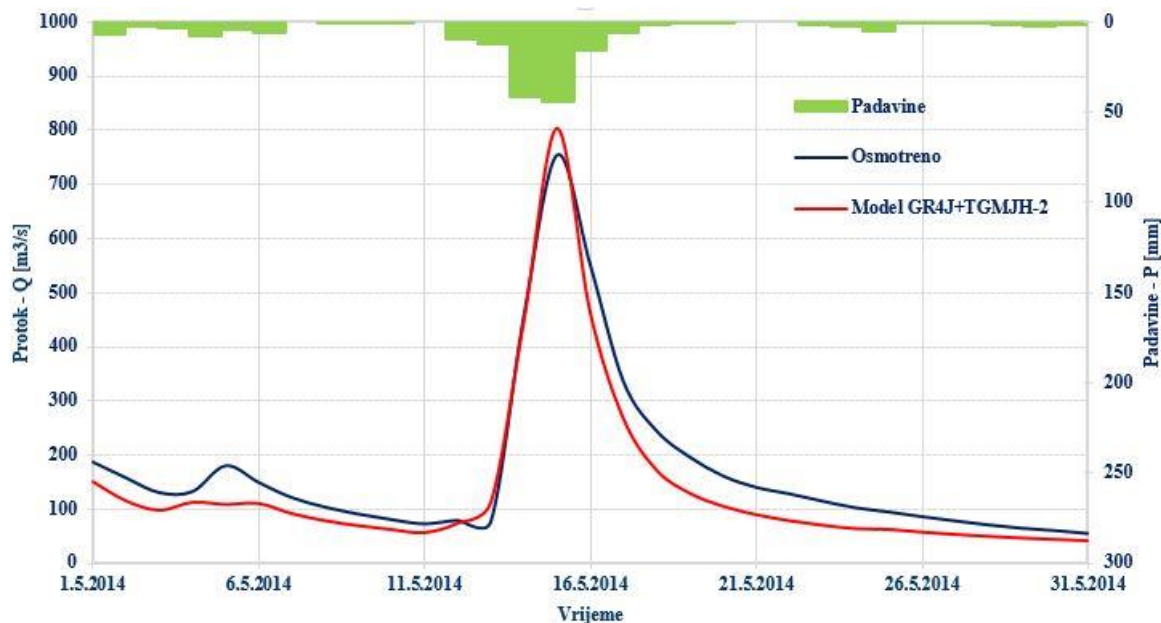
Tabela 2. Rezultati relativne greške maksimalnog protoka i relativne greške protoka za mjesec maj 2014 godine

Table 2. Relative error of the maximum flow and the relative error on the flow for the month of May 2014

Hidrološka stanica	Vodotok	Maksimalni protok		δ (%)	PBIAS (%)
		Osmotreno	Modelirano		
Visoko nB	Bosna	755.1	802.38	6.3	18.2
Zavidovići nB	Bosna	2439.0	1373.2	43.7	24.7
Olovske Luke	Stupčanica	157.0	111.9	28.7	50.0

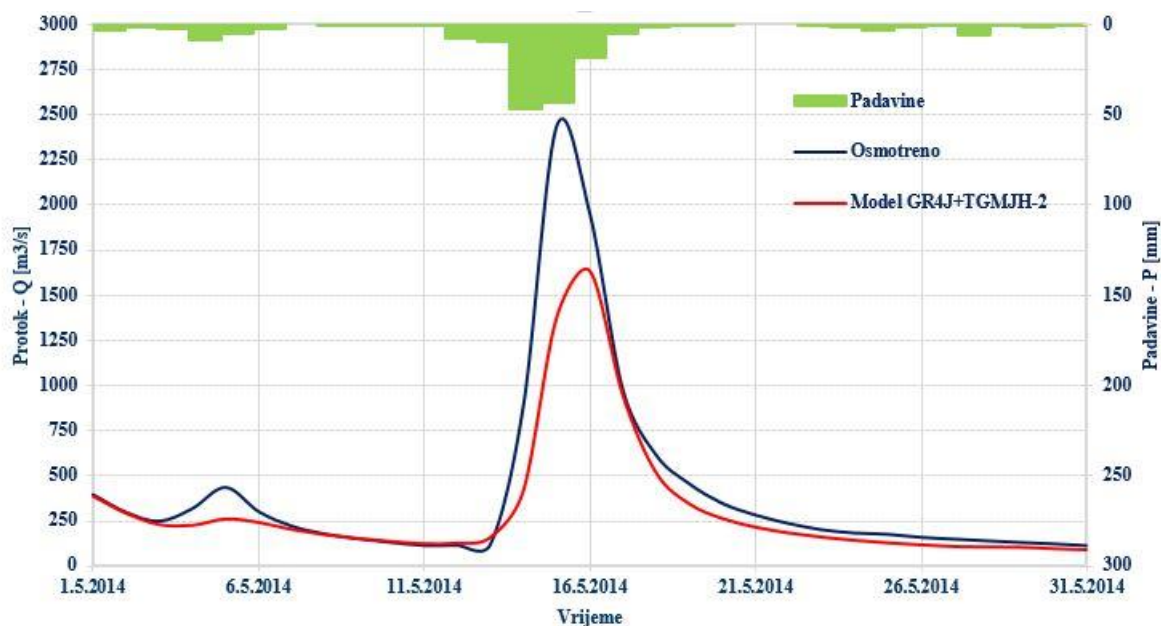
Lošiji rezultati slaganja modeliranih i osmotrenih protoka u pogledu relativne greške maksimalnog protoka i relativne greške protoka su posljedica toga što model nije kalibrisan na iste. Talasi velikih voda su izdvojeni iz kontinualnih simulacija, a njih inače treba simulirati pojedinačno. Na slikama 10, 11 i 12 dat je uporedni prikaz hidrograma velikih voda za razmatrane test slivove.

Prema prikazanim slikama 10 – 12, prema dinamici hidrograma GR4J+TGMJH-2, model se najbolje slaže sa osmotrenim podacima na HS Visoko nB, relativno i u pogledu maksimalnih vrijednosti. Za ostala dva sliva rezultati su lošiji, gdje je maksimalna vrijednost protoka potcijenjena u odnosu na osmotrenu vrijednost.



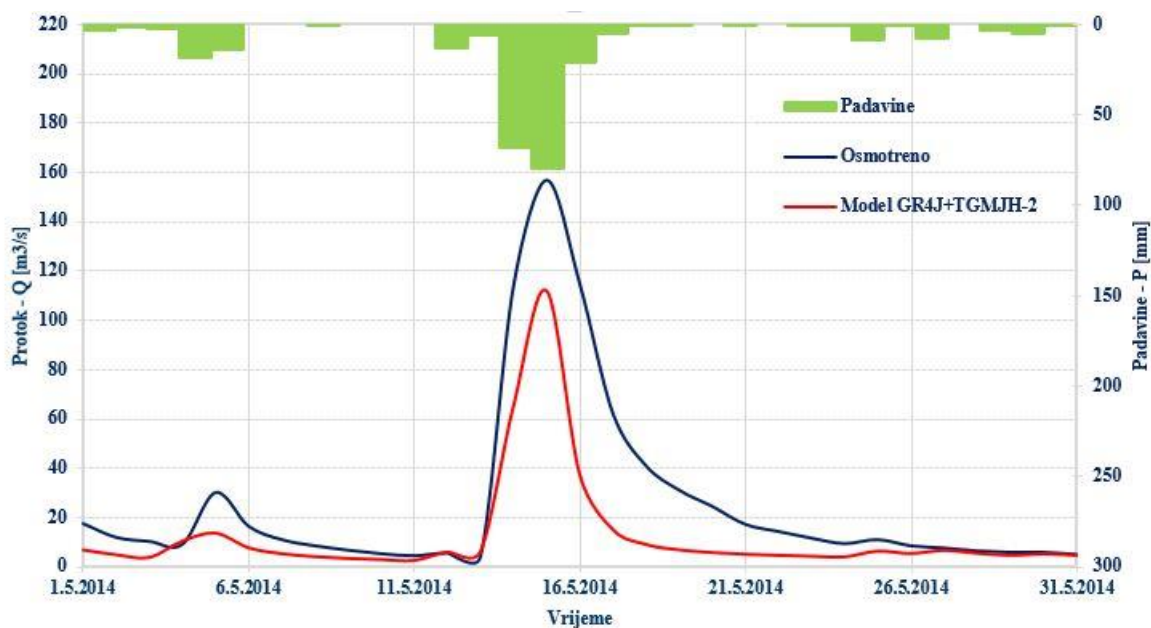
Slika 10. Poređenje osmotrenog i modeliranog hidrograma poplavnog talasa HS Visoko nB – Bosna

Figure 10. Comparison of the observed and simulated flood hydrographs at HS Visoko nB – Bosna



Slika 11. Poređenje osmotrenog i modeliranog hidrograma poplavnog talasa HS Zavidovići nB – Bosna

Figure 11. Comparison of the observed and simulated flood hydrographs at HS Zavidovići nB - Bosna



Slika 12. Poređenje osmotrenog i modeliranog hidrograma poplavnog talasa HS Olovske Luke – Stupčanica

Figure 12. Comparison of the observed and simulated flood hydrographs at HS Olovske Luke - Stupčanica

8 Zaključak

U radu je analizirana primjenljivost TGMJH na slivovima rijeke Bosne u strukturi GR4J modela kao alata za određivanje velikih voda. Za analizu je korišten 21 sliv od čega 10 osnovnih slivova za modeliranje u standardnom GR4J i modifikovanim GR4J+TGMJH modelima. Rezultati modeliranja su pokazali da se za period kalibracije standardnim i modifikovanim modelima dobija visoka vrijednost koeficijenta efikasnosti modela, koja je u granicama od 52 – 82%. Period validacije modela je dao lošije rezultate za standardni GR4J model dok su za GR4J+TGMJH-2 model rezultati nešto povoljniji.

Modifikacijom strukture hidrološkog modela za transformaciju efektivnih padavina u oticaj, dobijen je model koji ima ukupno 7 parametara, od čega su 3 parametra iz standardnog modela a preostala 4 parametra se odnose na TGMJH. Analizom DMV određeni su geomorfološki parametri, dok je za ostala 3 parametra iz standardnog GR4J modela urađena automatska kalibracija. Dobijeni rezultati hidrološkog modeliranja su relativno lošiji, pa je na osnovu toga urađena automatska kalibracija svih 7 parametara. Nakon sprovedene kalibracije dobijeni su nešto bolji rezultati u pogledu efikasnosti modela, dok su za period validacije dobijeni bolji rezultati nego na osnovu standardnog GR4J hidrološkog modela. Na osnovu optimizovanih parametara efikasnije varijante modela, formirana je regresiona zavisnost parametara modela i karakteristika sliva: površine, dužine glavnog toka i nagiba sliva. Za 11 slivova korištenih kao test slivovi na tri sliva dobijeni su prihvatljivi rezultati. Lošiji rezultati su posljedica kraćeg perioda osmatranja, odraženog na podatke za formiranje regresionih zavisnosti. Takođe, test slivovi koji su razmatrani u ovom radu su slivovi sa relativno malom površinom od cca 50 do 300 km². Za veće slivove na kojima je primijenjena uspostavljena regresiona zavisnost za ocjenu parametara, dobijeni su dobri rezultati efikasnosti modela i to od 50 do 70%.

Ocjena velikih voda na izolovanim poplavnim talasima urađena je za mjesec maj 2014 godine, odabran kao jedan od karakterističnih događaja za sliv rijeke Bosne. Provjera je urađena tako što je iz kontinualnih simulacija izolovan ovaj poplavni događaja. Za HS Visoko nB – Bosna dobijeni su prihvatljivi rezultati, dok je za ostala 2 sliva relativna greška veća od 20%. Razlog za ovakve rezultate je vjerovatno izolovanje talasa velikih voda iz kontinualnih simulacija, umesto pojedinačnog modeliranja. Takođe, pošto se radilo o ekstremnim događajima iz 2014 godine, nije poznato da li je maksimalna vrijednost protoka procijenjena, ili je ipak uspješno izmjerena.

Na osnovu prethodnog, provjera primjenljivosti TGMJH kao alata za određivanje velikih voda nije se pokazala kao zadovoljavajuća na korišćenom uzorku slivova. Prihvatljiviji rezultati su dobijeni u primjeni na kontinualnim simulacijama. Za buduća istraživanja, preporuka je da se talasi velikih voda modeliraju pojedinačno i da se na osnovu takvih parametara formiraju regresione zavisnosti i provjere na drugim slivovima. Ukoliko je potrebno da se modeliraju manji slivovi, preporuka je da se slivovi razdvoje na osnovu karakteristika sliva. Rezultati istraživanja upućuju da bi bilo pogodno grupisati slivove površine do 2000 km² i dužine glavnog toka do 100 km. Nužno se nameće i povećanje obima ulaznih podataka, kako u pogledu dužine osmatranja, tako i u pogledu prostorne zastupljenosti.

9 Literatura

- [1] R. Piscopia, A. Petroselli, and S. Grimaldi, "A software package for predicting design-flood hydrographs in small and ungauged basins," *J. Agric. Eng.*, vol. 46, no. 2, pp. 74–84, 2015, doi: 10.4081/jae.2015.432.
- [2] D. Harlan, "THE IMPROVEMENT OF GR4J MODEL PARAMETER TO ESTIMATE UNIT THE IMPROVEMENT OF GR4J MODEL PARAMETER TO ESTIMATE," no. November, 2019.
- [3] C. Perrin, C. Michel, and V. Andréassian, "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation," *J. Hydrol.*, vol. 279, no. 1–4, pp. 275–289, 2003, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- [4] T. River, "Tutorial for using hydroPSO to calibrate TUWmodel," pp. 1–60, 2020.
- [5] V. B. TRAORE, "Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River," *Am. J. Environ. Prot.*, vol. 3, no. 1, p. 36, 2014, doi: 10.11648/j.ajep.20140301.15.
- [6] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment," *Adv. Geosci.*, vol. 5, no. May 2014, pp. 89–97, 2005, doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
- [7] D. Maidment, "Handbook of Hydrology.pdf." p. 824, 1996.
- [8] P. Campling, A. Gobin, K. Beven, and J. Feyen, "Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment: The TOPMODEL approach," *Hydrol. Process.*, vol. 16, no. 2, pp. 231–253, 2002, doi: 10.1002/hyp.341.
- [9] A. Nonlinear, "Nonlinear optimization using the generalized," 1974.
- [10] A. K. Mishra, "Effect of rain gauge density over the accuracy of rainfall: A case study over Bangalore, India," *Springerplus*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-311.