

Primljen / Received: 9.1.2019.  
Ispravljen / Corrected: 26.4.2019.  
Prihvaćen / Accepted: 30.4.2019.  
Dostupno online / Available online: 23.9.2019.

# Usporedba metodologija za određivanje velikih voda na odabranim slivovima u Bosni i Hercegovini

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Andrea Petroselli**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Tuscia  
Odjel za ekonomiju, inženjerstvo, društvo i poslovnu organizaciju (DEIM)  
[petro@unitus.it](mailto:petro@unitus.it)



**Ajla Mulaomerović-Šeta**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Sarajevu  
Građevinski fakultet  
[ajlasam@yahoo.com](mailto:ajlasam@yahoo.com)



**Željko Lozančić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Sarajevu  
Građevinski fakultet  
[zeljko.lozancic@gmail.com](mailto:zeljko.lozancic@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Andrea Petroselli, Ajla Mulaomerović-Šeta, Željko Lozančić**

## Usporedba metodologija za određivanje velikih voda na odabranim slivovima u Bosni i Hercegovini

U radu su korištene neke od uobičajenih hidroloških metoda te hidrološki model EBA4SUB kojima su određene vrijednosti maksimalnih protoka raznih povratnih razdoblja za tri sliva u Bosni i Hercegovini. Cilj je rada prvi put testirati model EBA4SUB na odabranim slivovima. Rezultati koje daje model EBA4SUB u skladu su s ostalim primijenjenim metodama, a prednosti modela ogledaju se u tome što model u razmatranje uzima i fizičke procese koji se događaju na slivu, utječući na formiranje površinskoga otjecanja.

### Ključne riječi:

projektni hidrogram, EBA4SUB, model oborine-otjecanje, regionalna analiza, Srebrenovičeva metoda

Research Paper

**Andrea Petroselli, Ajla Mulaomerović-Šeta, Željko Lozančić**

## Comparison of methodologies for design peak discharge estimation in selected catchments of Bosnia and Herzegovina

Some usual hydrological methods and the hydrological model EBA4SUB are used in the paper to determine the design peak discharge for various return periods for catchments in Bosnia and Herzegovina. The aim of the paper is to test for the first time the EBA4SUB model in the selected catchments. The results obtained by the EBA4SUB model compare well with other related methods. The advantages of the model lie in the fact that it takes into account physical processes taking place in the catchment, influencing formation of surface runoff.

### Key words:

design hydrograph, EBA4SUB, rainfall-runoff model, regional analysis, Srebrenović method

Vorherige Mitteilung

**Andrea Petroselli, Ajla Mulaomerović-Šeta, Željko Lozančić**

## Vergleich der Methoden zur Bestimmung großer Gewässer in ausgewählten Einzugsgebieten in Bosnien und Herzegowina

In der Arbeit werden einige der gebräuchlichen hydrologischen Methoden und das hydrologische Modell EBA4SUB verwendet, mit denen die Werte der maximalen Ströme verschiedener Rückführungszeiträume für drei Einzugsgebiete in Bosnien und Herzegowina bestimmt werden. Ziel der Arbeit ist es, das EBA4SUB-Modell erstmals in ausgewählten Einzugsgebieten zu testen. Die Ergebnisse des EBA4SUB-Modells stimmen mit den anderen verwendeten Methoden überein, und die Vorteile des Modells spiegeln sich darin wider, dass das Modell auch die am Einzugsgebiet auftretenden physikalischen Prozesse berücksichtigt.

### Schlüsselwörter:

Projekthydrogramm, EBA4SUB, Niederschlag-Abfluss-Modell, Regionalanalyse, Srebrenovic-Methode

## 1. Uvod

Definiranje mjerodavnoga projektnog hidrograma i njegova vrha oduvijek je bilo ključni zadatak u hidrologiji, posebno kada je riječ o neizučnim slivovima na koje zbog nedostatka mjerenja protoka nije moguće primijeniti statističke metode [1]. U slučajevima kada neposredne metode nije moguće primijeniti, koriste se posredne, npr. metoda regionalne analize, empirijske formule ili hidrološki modeli oborine-otjecanje.

Mnoge europske zemlje razmatraju usvajanje raznih strategija za proračun velikih voda. Tako se u Poljskoj za određivanje vrha hidrograma velikih voda obično koriste modeli oborine-otjecanje, a najčešće se koriste Nashov model linearnoga rezervoara, metoda dvostrukih kaskadnih rezervoara, geomorfološki jedinični hidrogram ili Snyderov sintetički jedinični hidrogram [2, 3].

U Rumunjskoj se koriste razne metode kao što su rumunjski nacionalni standard (RNS), metode općih ili sinteznih odnosa te metode utemeljene na projektnim kišama [4]. RNS jest empirijski izraz koji uzima u obzir intenzitet kiše, koeficijent otjecanja i površinu sliva, dok metode općih i sinteznih odnosa podrazumijevaju neizravne pristupe gdje se proračun vrha vodnoga vala temelji na analizi sličnih riječnih slivova te se za analizu u obzir uzimaju satne kiše i vrijednosti koeficijenata koji su za pojedina područja već u nacionalnome standardu za regionalizaciju.

U Slovačkoj se za određivanje mjerodavnih protoka na neizučnim slivovima obično koristi empirijska metoda [5] temeljena na morfološkim parametrima sliva i regionalnim parametrima izvedenima za pojedine regije u Slovačkoj. Uz određivanje vršnoga protoka moguće je odrediti i ukupni hidrogram koristeći SCS bezdimenzionalni jedinični hidrogram [6, 7].

Definiranje projektnoga hidrograma otjecanja i njegova vrha u Bosni i Hercegovini posebno je izazovan zadatak. Dosadašnja praksa u obrani od poplava bila je ograničena uglavnom na veća naselja i važnije industrijske objekte, dok su manja naselja bila u drugome planu. Zbog specifičnoga režima voda malih slivova (nagli porast vodnoga vala i kratko trajanje vala) često nema vremena za provođenje operativnih mjera obrane od poplava, što uzrokuje velike štete. Pored toga što mreža hidroloških stanica nije dovoljno razvijena, u većini su stanica česti prekidi u radu ili su nizovi podataka nedovoljno dugi, zbog čega nije moguće primijeniti klasične statističke metode. U takvim slučajevima primjenjuju se empirijske metode koje, osim oborina, u obzir uzimaju morfologiju terena te geološke i druge karakteristike sliva. Nažalost, većina tih metoda ne daje oblik hidrograma i ne uzima u razmatranje složene procese kao što su infiltracija u tlo ili transformacija vodnoga vala. Napredni hidrološki modeli prevladavaju navedene probleme, ali se zbog nedostatka podataka za kalibraciju parametara upotrebljavaju rijetko ili nikako. Problem određivanja velikih voda postao je još veći nakon poplava koje su se dogodile u svibnju 2014. u BiH [8]. Trenutačno ne postoje zakonske uredbe ili preporuke za

određivanje velikih voda za neizučene slivove, osim Uputa za projektiranje i izgradnju održivih sustava odvodnje na autocesti u Federaciji BiH koje preporučuju upotrebu racionalne formule [9]. Vršni se protok obično određuje racionalnom formulom, regionalnom analizom, primjenom sintetičkih jediničnih hidrograma ili nekim drugim empirijskim metodama. Zbog nekritičke upotrebe empirijskih izraza (pri kojoj se ne pridaje pozornost ograničenjima i uvjetima za koje su izvedeni) procijenjene vrijednosti maksimalnog otjecanja ne mogu se s velikom sigurnosti uzeti kao točne.

Nedavno je razvijen jednostavan hidrološki model EBA4SUB (eng. *Event-Based Approach for Small and Ungauged Basins*) koji predstavlja model transformacije oborina u otjecanje [10-12]. Model je prilagođen za određivanje cjelokupnoga oblika hidrograma otjecanja na neizučnim slivovima uz korištenje istih ulaznih podataka koji su potrebni za dobro poznatu racionalnu metodu i topografskih podataka sadržanih u digitalnome modelu terena (engl. *Digital Elevation Model – DEM*). Varirajući osnovne parametre, model je primijenjen na jednome slivu u Italiji (površina sliva 441 km<sup>2</sup>, nadmorske visine od 6 do 618 m, prosječni pad sliva 7,7 %) i dani su komentari na dobivene vrijednosti protoka [10]. Na drugome talijanskom slivu [11] (površina sliva 8 km<sup>2</sup>, nadmorske visine od 140 do 1030 m, prosječni pad sliva 32 %) uspoređeni su rezultati modela s rezultatima dobivenima racionalnom formulom, dok je u [12] model primijenjen na pet slivova površina između 45 km<sup>2</sup> i 285 km<sup>2</sup> pri različitim klimatskim režimima. Od pet razmatranih slivova tri su njemačka planinska i šumovita sliva, jedan umjetno isušeni sliv u Francuskoj kojim dominira poljoprivredno zemljište i jedan talijanski sliv čiji se uzvodni dio nalazi u planinskome području, dok je niži dio sliva urbaniziran. Usporedbom modeliranih i mjerenih podataka dobivena su dobra slaganja, ali postoji potreba za točnijim testiranjem modela, posebno na području Mediterana, gdje su hidrološka mjerenja često oskudna.

Cilj je istraživanja primjena modela EBA4SUB na odabrane slivove u Bosni i Hercegovini kako bi se procijenili mjerodavni protoci odabranih povratnih razdoblja te usporedili s rezultatima statističke analize, regionalne analize i empirijskih izraza (Srebreновиćeva metoda). Također, u ovoj se studiji nastoji prikazati konceptualni hidrološki model, za koji je dovoljan skroman fond podataka, kao alternativa složenijim i zahtjevnijim metodama za određivanje hidrograma otjecanja.

## 2. Ulazni podaci i metode

### 2.1. Ulazni podaci

#### 2.1.1. Odabrani slivovi i hidrološki podaci

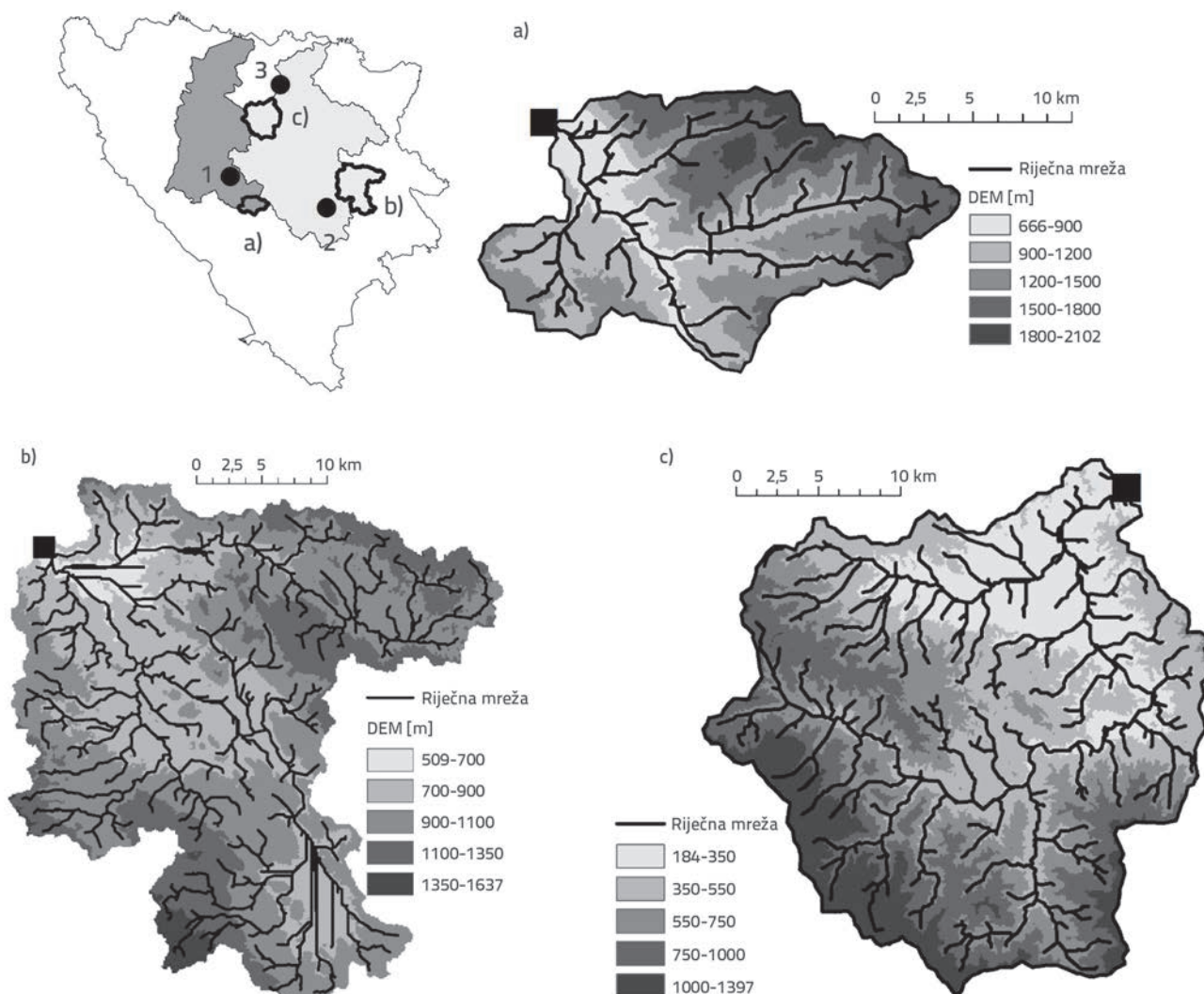
Za analizu odabrana su tri sliva u središnjemu dijelu Bosne i Hercegovine koji pripadaju slivnome području rijeke Save, a

izlazni profili slivova su Hidrološka stanica (HS) Olovo na rijeci Krivaji, desnoj pritoci rijeke Bosne, HS Kaloševiči na rijeci Usori, lijevoj pritoci rijeke Bosne, i HS Gornji Vakuf na rijeci Vrbas. Odabrani su izučeni slivovi kako bi se modelirani maksimalni protoci odabranih povratnih razdoblja mogli usporediti s odgovarajućim vrijednostima određenima statističkom metodom. U tablici 1. dani su osnovni fizički parametri slivova, a lokacije slivova prikazane su na slici 1. Podaci potrebni za model kao što su nadmorske visine, namjena zemljišta i vrsta tla dobiveni su korištenjem baza prostornih podataka uz pomoć GIS alata. Za proračune korišten je digitalni model terena s rezolucijom od 50 metara koji je formirala Federalna uprava za geodetske i imovinsko-pravne poslove. Program CORINE [13] korišten je za određivanje namjene zemljišta, a vrsta tla određena je korištenjem digitalizirane karte u mjerilu 1 : 50 000 dostupne na mrežnoj stranici Federalnog instituta za agropedologiju.

Tablica 1. Parametri razmatranih slivova

Slivno područje		G. Vakuf	Olovo	Kaloševiči
A	[km <sup>2</sup> ]	207,9	881,7	643,3
min z	[m]	666	510	184
aver.z	[m]	1283	972	595
max z	[m]	2102	1637	1397
max z <sub>c</sub>	[m]	1580	1491	885
L	[km]	28,9	60,4	59,9
L <sub>msd</sub>	[km]	22,4	48,5	47,2
nyQ	[-]	44	40	34

Površina sliva (A), minimalna, srednja i maksimalna nadmorska visina (min z, aver.z, max z), maksimalna nadmorska visina osnovnoga toka (max z<sub>c</sub>), duljina osnovnoga toka (L), udaljenost od težišta sliva do hidrološke stanice mjerena duž glavnoga toka (L<sub>msd</sub>), duljina niza mjerenih protoka (nyQ)



Slika 1. Gore lijevo: Položaj odabranih slivova unutar granica Bosne i Hercegovine: sliv rijeke Bosne (svjetlosiva), sliv rijeke Vrbas (tamnosiva), položaj kišomjernih stanica (crni krug: 1-Bugojno; 2- Sarajevo, 3-Doboj); gore desno: a) Gornji Vakuf; dolje lijevo: b) Olovo; dolje desno: c) Kaloševiči. Za a), b) i c) prikazani su DEM, riječna mreža (crne linije) i hidrološka stanica (crni kvadrat)

Za potrebe ovog rada korišteni su podaci s hidroloških stanica za koje su uspostavljene protočne krivulje. Protok je mjeran na stanicama Gornji Vakuf od 1959. do 2016. (s prekidom u radu od 1991. do 2004.), Olovo od 1961. do 2009. (prekid od 1991. do 2000.) te Kaloševiči od 1961. do 2009. (prekid od 1991. do 2005.). Važno je istaknuti to kako su razdoblja za koja se raspolagalo mjerenjima maksimalnih godišnjih protoka na odabranim stanicama ograničena (maksimalno 44 vrijednosti). Podatke je ustupio Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo.

### 2.1.2. Dostupni podaci o kišama

Kako bi se odredio maksimalni protok, za svaki sliv treba odrediti mjerodavnu kišomjernu stanicu (KS) za koju je moguće definirati ovisnost padaline-trajanje-povratno razdoblje (P-t-P). Prilikom izbora kišomjerne stanice nije se izvodila nikakva interpolacija (na primjer metoda Thiessenovih poligona), nego je birana najbliža stanica. Za sliv Gornjeg Vakufa odabran je KS Bugojno za koji su bili dostupni podaci o dnevnim padalinama za period od 1949. do 2016. te satni podaci iz perioda od 1981. do 2016. Za sliv Olovo odabran je KS Sarajevo s dnevnim podacima za period od 1949. do 2016. i satnim podacima za period od 2000. do 2016., a za sliv Kaloševiči KS Doboj s dnevnim podacima za period od 1953. do 1990. (s prekidom u radu od 1959. do 1960.). Podatke je ustupio Federalni hidrometeorološki zavod BiH u Sarajevu. Matematički je P-t-P ovisnost opisana uobičajenim dvoparametarskim modelom:

$$P = a \cdot t^n \quad (1)$$

gdje je  $P$  - bruto padalina [mm],  $t$  - trajanje kiše [h], dok su  $a$  [mm/h] i  $n$  (bezdimenzionalan) koeficijenti koji ovise o povratnome razdoblju. Parametri  $a$  i  $n$  određeni su uz pomoć regresije, dok su kao ulazni podaci korištene vrijednosti bruto padalina odgovarajućih povratnih razdoblja koje su određene prema log-Pearson III. funkciji raspodjele vjerojatnosti za maksimalne padaline trajanja od 1 do 12 sati. Podaci o satnim vrijednostima padalina potrebni za formiranje P-t-P krivulja bili su dostupni za KS Bugojno (za HS Gornji Vakuf) i KS Sarajevo (za HS Olovo). Za HS Kaloševiči su zbog nedostatka mjerenja satnih padalina na najbližemu KS-u Doboj korištene P-t-P krivulje određene za KS Bugojno uz određene korekcije primjenom redukcijskih faktora koji su proračunani kao odnosi maksimalnih dnevnih padalina na te dvije kišomjerne stanice za odgovarajuća povratna razdoblja.

Važno je istaknuti to kako se, s obzirom na to da su neizučeni slivovi obično relativno mali, trajanje mjerodavne projektne oborine obično kreće od nekoliko desetaka minuta do nekoliko sati. Mreža kišomjernih stanica u Bosni i Hercegovini nije dovoljno gusta, a većina stanica bilježi samo dnevne vrijednosti oborina ili rade samo u toplijem dijelu godine, pa nije uvijek moguće formirati točne P-t-P krivulje. Imajući u vidu dužine raspoloživih nizova (35 godina za Doboj) te činjenicu da ne postoje podaci o satnim kišama, upitna je točnost izvedenih P-t-P krivulja za KS

Doboj koji je odabran za mjerodavnu kišomjernu stanicu za sliv HS-a Kaloševiči.

## 2.2. Metode određivanja velikih voda

### 2.2.1. Statistički pristup

Statistički pristup izravna je metoda pri analizi maksimalnih godišnjih protoka. Ulazni hidrološki podaci opisani u prethodnome poglavlju podvrgnuti su testovima homogenosti i neovisnosti (Kruskal-Wallisov test), homogenosti varijance (Levenov test) i značajnosti trenda (Mann-Kendallov test) te su testirane netipične vrijednosti u uzorcima (Spencerov i McCuenov test) [14]. Maksimalni protoci odabranih povratnih razdoblja određeni su primjenom log-Pearson III funkcije vjerojatnosti, za koju su parametri raspodjele određeni metodom najveće vjerojatnosti.

### 2.2.2. Regionalna analiza

Regionalna analiza uobičajena je metoda korištena za određivanje maksimalnih protoka na neizučenim slivovima, a temelji se na mjerenjima na drugim, sličnim slivovima (npr. slivovima koji pripadaju slivu istoga osnovnog toka), za koje se statističkim metodama, opisanim u prethodnome poglavlju, određuju maksimalni protoci željenih povratnih razdoblja. Maksimalni protoci najčešće se izražavaju kao funkcija neke karakteristike sliva koja se može lako odrediti i na taj način omogućuju da se odrede protoci za neizučeni sliv. Svrha regionalne analize jest grupiranje slivova prema homogenosti, tj. grupiranje područja sa sličnim karakteristikama. Potrebno je istaknuti to kako je tvrdnja o homogenosti nekoga područja relativna, jer je povezana s različitim i promjenljivim fizičko-geografskim obilježjima područja [15]. Među raznovrsnim regresijskim jednadžbama najčešće se koriste one koje povezuju maksimalan protok s površinom sliva kao:

$$Q_p = a_{reg} \cdot A^{b_{reg}} \quad (2)$$

gdje je  $Q_p$  [m<sup>3</sup>/s] vršni protok za odabrani povratni period,  $A$  [km<sup>2</sup>] površina sliva, a  $a_{reg}$  i  $b_{reg}$  parametri modela dobiveni metodom regresije.

Regionalne krivulje dobivene su na temelju statističke obrade maksimalnih godišnjih protoka primjenom Pearson III funkcije raspodjele vjerojatnosti za osam hidroloških stanica iz sliva rijeke Bosne (izostavljajući odabrane stanice za analizu u radu), odnosno za slivne površine do 1000 km<sup>2</sup>, što odgovara granici površina odabranih slivova [16]. Za regionalnu analizu sliva rijeke Bosne korišteni su podaci sa hidroloških stanica Vrelo Bosne (rijeka Bosna, površina sliva 4 km<sup>2</sup>, period od 1961. do 1985.), Plandište (rijeka Bosna, površina sliva 12 km<sup>2</sup>, period od 1951. do 1990.), Turija (rijeka Turija, površina sliva 140 km<sup>2</sup>, period od 1966. do 1987.), Sarajevo (rijeka Miljacka, površina sliva 302 km<sup>2</sup>, period od 1951. do 1990.), Bioštica (rijeka Bioštica, površina sliva 411 km<sup>2</sup>, period od 1961. do 1990.),

Strašanj (rijeka Spreča, površina sliva 466 km<sup>2</sup>, period od 1968. do 1990.), Visoko (rijeka Fojnica, površina sliva 721 km<sup>2</sup>, period od 1961. do 1990.) i Merdani (rijeka Lašva, površina sliva 950 km<sup>2</sup>, period od 1961. do 1990.).

Zbog nedovoljnog broja stanica slivnih površina do 1000 km<sup>2</sup> u slivu rijeke Vrbasa, regionalna analiza nije mogla biti provedena. Izuzimajući HS Gornji Vakuf, na slivu rijeke Vrbasa postoje samo još tri stanice sa slivnim površinama do 1000 km<sup>2</sup>, od kojih dvije stanice imaju samo podatke dobivene tijekom 10 godina promatranja. Činjenicom da su slivovi rijeke Vrbasa i Bosne susjedni slivovi te da oba pripadaju slivu rijeke Save opravdava se pretpostavka homogenosti regionalnih parametara te je za procjenu maksimalnih protoka u HS-u Gornji Vakuf korištena regionalna analiza sliva rijeke Bosne.

### 2.2.3. Srebrenovičeva metoda

Srebrenović je uz pomoć statističkih i hidroloških metoda pokušao uspostaviti vezu između klimatskih elemenata, faktora sliva i površinskoga otjecanja. Zaključci su izvedeni na temelju slivova Save i Drave te krških slivova uz jadransku obalu. Kao rezultat analiza, a na temelju racionalne formule, dobiva se znatno složenija formula koja uzima u obzir velik broj karakterističnih parametara. Maksimalni protok definiran je sljedećom formulom [17]:

$$Q_p = 0,45 \cdot A^{0,78} \cdot S^{0,15} \cdot H \cdot e^{-0,6f(1+0,4 \log T_r)} \cdot (1 + 1,25 \log T_r) \quad (3)$$

gdje je  $A$  - površina sliva [km<sup>2</sup>],  $S$  - nagib sliva [m/km] definiran kao omjer razlike između srednje nadmorske visine sliva i nadmorske visine izlaznoga profila (hidrološke stanice) te dulje stranice zamjenjujućega pravokutnika, čija površina odgovara površini sliva, a ovisi o koeficijentu koncentriranosti sliva,  $H$  - srednja godišnja padalina [m],  $f$  - faktor krša i  $T_r$  - povratno razdoblje u godinama.

Sliv rijeke Usore homogen je u klimatskome i hidrološkome smislu te nema utjecaja krša ( $f = 0$ ). Gornji dio sliva rijeke Vrbasa karakterizira dobro razvijena riječna mreža s velikim brojem pritoka, od kojih neke imaju odlike krških tokova, pa je za faktor krša usvojena vrijednost od 0,3. Rijeku Krivaju čine pritoke Bioštica i Stupčanica, a sliv do HS-a Olovo je u smislu razvijenosti riječne mreže heterogen te je velik utjecaj krša, posebno u slivu rijeke Bioštica, pa je za HS Olovo usvojen faktor krša 0,5.

### 2.2.4. Model EBA4SUB

EBA4SUB jest hidrološki model za simulaciju diskretnih događaja namijenjen za neizučene slivove, a sastoji se od sljedećih modula: procjene kumulativnih padalina za odabrani oblik kumulativnoga bruto hijetograma, procjene neto kiša i modula transformacije padalina u otjecanje. Ulazni podaci za EBA4SUB jesu podaci o padalinama, vrsti tla i namjeni zemljišta te topografski podaci (DMT), a kao rezultat dobiva se hidrogram otjecanja.

U model koji se odnosi na bruto kiše mogu se unijeti stvarne (promatrane) kiše ili sintetičke kiše na temelju P-t-P dijagrama, uz izbor raznih oblika hijetograma (pravokutni, trokutasti ili Chicago, koji je primijenjen u ovome radu). Primjenom koeficijenta redukcije padalina (*Areal Reduction Factor* – ARF) prema [18] vrijednost padalina  $s$  jedne kišomjerne stanice prenosi se s težinskim faktorom ARF na čitav razmatrani sliv. Neto kiša procjenjuje se primjenom procedure CN za *Green-Ampt* (skraćeno CN4GA) [19]. Procedura CN4GA provodi se u dva koraka: prvo se za odabranu vrijednost broja krivulje otjecanja (CN) [20] procjenjuju vrijeme saturacije zemljišta i kumulativna vrijednost neto kiše, a u drugome se koraku prema fizički utemeljenoj metodi *Green-Ampt* [21] zapremine neto kiše raspoređuje u vremenu, uz automatsku kalibraciju parametara. CN4GA provodi se pod pretpostavkom da je vrijeme saturacije zemljišta dostignuto kada ukupna zapremina padalina dostigne početni kapacitet infiltracije koji je pretpostavljen u CN metodi.

Padaline se transformiraju u otjecanje preko nedavno razvijene posebne verzije trenutnoga jediničnog hidrograma temeljenog na funkciji širine (WFIUH) [22] nazvane WFIUH-1par [23]. WFIUH-1par izračunava učestalost raspodjele vremena putovanja svih dijelova DMT mreže do izlaznoga profila procjenom brzine tečenja kako u dijelovima DMT mreže koji predstavljaju riječne tokove tako i u padinskim dijelovima generirane mreže:

$$WFIUH(t) = \frac{L_c(x)}{v_c(x)} + \frac{L_h(x)}{v_h(x)} \quad (4)$$

gdje su  $L_c$  [m] i  $L_h$  [m] duljine tečenja riječnom mrežom i duž padina terena za element  $x$  DMT-a, dok su  $v_c$  [m/s] i  $v_h$  [m/s] pretpostavljene brzine tečenja u riječnoj mreži i duž padina terena.

Prije korištenja modela EBA4SUB potrebno je procesuirati DMT kako bi se uklonile depresije i ravne površine [24-26]. Nakon toga proračunavaju se brzine tečenja u elementima mreže DMT-a koje su u funkciji nagiba i vrste pokrova tla [27], da bi se na kraju automatski kalibrirala brzina tečenja u riječnoj mreži, omogućujući to da je središte WFIUH dijagrama jednako vremenu kašnjenja sliva ( $T_L$ ), koje je proporcionalno procijenjenome vremenu koncentracije sliva i iznosi  $T_L = 0,6T_c$ . Vrijeme koncentracije sliva procijenjeno je primjenom Giandottijeve formule [28]. Nakon što je WFIUH definiran, hidrogram otjecanja opisan je izrazom (5):

$$q(t) = A \int_0^t WFIUH(t - \tau) \cdot Pn(\tau) d\tau \quad (5)$$

gdje je  $A$  površina sliva [km<sup>2</sup>],  $t$  - trajanje kiše [h],  $\tau$  - vremenski korak [h], a  $Pn(\tau)$  - visina efektivne kiše određena procedurom CN4GA [mm].

U nastavku navode se prednosti primjene modela EBA4SUB. Za procjenu efektivnih kiša kombinira se točnost fizikalno utemeljene sheme infiltracije s jednostavnošću empirijskoga pristupa, koristeći samo jedan parametar (CN), dok se za transformaciju oborina u otjecanje koristi trenutni jedinični hidrogram (engl. *Instantaneous Unit Hydrograph* – IUH), čiji je oblik izveden korištenjem detaljne geomorfološke informacije uključene u svaki piksel DMT-a, izbjegavajući korištenje sintetičkih oblika IUH-a. U slučaju da su podaci o protocima dostupni, brzina riječne mreže može se lako kalibrirati, dok ju je u slučaju neizučenihih slivova potrebno odrediti na temelju vremena koncentracije ili vremena zakašnjenja sliva.

Za procjenu otjecanja na odabranim slivovima modelom EBA4SUB korištene su P-t-P krivulje. U modelu mogu biti odabrane razne vremenske raspodjele projektne kiše, a korištene su pravokutna raspodjela kiše (konstantna kiša), koja obično daje niže vrijednosti vršnoga protoka, simetrična trokutasta raspodjela i Chicago raspodjela koja ima pozitivne i negativne karakteristike. Negativna je karakteristika to što ima tendenciju precjenjivanja vršnih protoka jer predstavlja kritičnu kišu za sve dijelove kišnoga događaja, dok bi pozitivna osobina bila ta da se njome usvajaju vrijednosti koje su na strani sigurnosti.

U svim razmatranim raspodjelama projektnih kiša primijenjen je ARF faktor, a za trajanja kiše primijenjeno je vrijeme koncentracije sliva određeno Giandottijevom formulom [28], slijedeći uobičajenu pretpostavku da kiša trajanja jednakog vremenu koncentracije sliva izaziva maksimalne protoke na izlaznome profilu.

Prilikom određivanja efektivnih kiša na temelju vrste tla odabrana je hidrološka skupina tla (*Hydrologic Soil Group* – HSG). Za Gornji Vakuf i Olovo usvojena je B skupina tla, dok je za Kaloševiče usvojena C skupina tla. CN vrijednost dodijeljena je slivovima na temelju tablica NRCS [20] koje u razmatranje uzimaju vrstu pokrivača i hidrološku skupinu tla, dok je prema

preporuci izvorne metode usvojena konstantna vrijednost  $\lambda = 0,2$ . Za vrijednost prethodne vlažnosti tla usvojeno je srednje vlažno tlo (AMC II).

Konačno, na temelju vremena koncentracije sliva i njegove veze s vremenom zakašnjenja sliva određen je računski trenutni jedinični hidrogram (IUH) koji je korišten za transformaciju padalina u otjecanje, čime su dobiveni konačni projektni hidrogram direktnog otjecanja i vrijednost maksimalnog protoka.

### 3. Rezultati i rasprava

Prije nego što se prikažu rezultati dobiveni prethodno opisanim postupcima za proračun vršnih protoka, u tablici 2. dane su vrijednosti korištenih parametara potrebnih za proračune. Tako su u tablici 2. navedene vrijednosti vremena koncentracije slivova te ARF i CN brojevi korišteni u modelu EBA4SUB. Također su navedeni koeficijenti regresije  $a_{reg}$  i  $b_{reg}$  (uz vrijednosti koeficijenta determinacije  $R^2$ ) određeni nakon regionalne analize te podaci potrebni za Srebrebreničevu metodu: nagib sliva, srednja vrijednost godišnje padaline i faktor krša. Imajući u vidu raspoložive dužine serija maksimalnih godišnjih protoka, analizirani su povratni periodi Tr od 2, 5, 10, 20, 25 i 50 godina.

Podaci korišteni za statistički pristup određivanja maksimalnih protoka podvrgnuti su Kruskal-Wallisovu ispitivanju homogenosti i neovisnosti koje su potvrđene za razinu značajnosti 5 % za Gornji Vakuf i Olovo, dok to nije bio slučaj za Kaloševiče. Levenov test potvrdio je homogenost varijance za Olovo na razini značajnosti od 5 %, dok se za Gornji Vakuf i Kaloševiče test usvaja, ali na razini značajnosti od 1 %. Mann-Kendallov test nije ukazao na postojanje značajnih trendova na razini značajnosti od 5 %, osim na hidrološkoj stanici Kaloševiči. Spencerov i McCuenov test je na razini značajnosti 5 % potvrdio

Tablica 2. Vrijednosti korištenih parametara potrebnih za odabrane metode

Sliv	Gornji Vakuf			Olovo			Kaloševiči		
	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$
Tc (sat)	6			12			10		
ARF (-)	0,90			0,87			0,86		
CN (-)	60,2			60,4			75,1		
Tr (god)	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$	$a_{reg}$	$b_{reg}$	$R^2$
2	8,65	0,37	0,987	8,65	0,37	0,987	8,65	0,37	0,987
5	8,93	0,43	0,989	8,93	0,43	0,989	8,93	0,43	0,989
10	9,01	0,47	0,990	9,01	0,47	0,990	9,01	0,47	0,990
20	9,02	0,50	0,991	9,02	0,50	0,991	9,02	0,50	0,991
25	9,01	0,51	0,991	9,01	0,51	0,991	9,01	0,51	0,991
50	8,98	0,54	0,987	8,98	0,54	0,987	8,98	0,54	0,987
S (m/km)	46,4			15,3			18,3		
H (mm)	838			929			877		
k (-)	0,3			0,5			0,0		

Vrijeme koncentracije sliva (Tc), ARF, CN broj, parametri regionalne analize ( $a_{reg}$ ,  $b_{reg}$ ,  $R^2$ ), nagib sliva (S), srednja vrijednost godišnje padaline (H) i faktor krša (k)

Tablica 3. Vrijednosti vršnoga protoka povratnoga razdoblja Tr određene odabranim metodama

Tr	EBA-R	EBA-T	EBA-C	REG	SREB	95low	STAT	95up
[god]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /s]
<b>Gornji Vakuf</b>								
2	0,0	0,0	0,0	63,0	48,5	23,2	28,0	33,7
5	6,3	6,5	6,3	90,1	64,1	37,4	46,0	56,7
10	21,4	22,4	21,9	110,7	75,4	46,9	60,1	77,1
20	44,1	45,8	46,1	132,1	86,1	55,2	75,2	102,4
25	52,1	54,1	52,2	139,2	89,4	57,6	80,3	111,8
50	84,4	89,1	89,3	163,7	99,5	64,6	97,0	145,7
<b>Olovo</b>								
2	1,9	2,0	1,8	107,8	122,7	87,2	102,1	120,0
5	34,5	35,0	35,5	168,4	159,3	128,3	152,2	181,2
10	79,2	84,4	87,1	218,3	184,5	153,5	187,0	229,5
20	143,3	152,9	162,0	273,3	207,7	172,8	221,8	284,7
25	167,3	179,0	190,6	292,2	214,8	179,0	233,3	304,0
50	255,1	278,3	299,7	359,4	235,6	195,2	269,4	372,2
<b>Kaloševiči</b>								
2	60,9	65,9	72,6	95,9	130,3	172,1	209,9	256,2
5	133,7	145,9	159,2	146,9	177,4	268,3	327,2	401,7
10	189,3	207,2	226,1	188,2	213,0	324,8	407,8	511,8
20	246,3	274,8	300,8	233,3	248,6	371,2	487,1	638,2
25	264,2	298,1	319,6	248,6	260,1	383,2	512,1	683,2
50	314,4	371,8	407,8	302,7	295,7	414,0	589,3	838,4

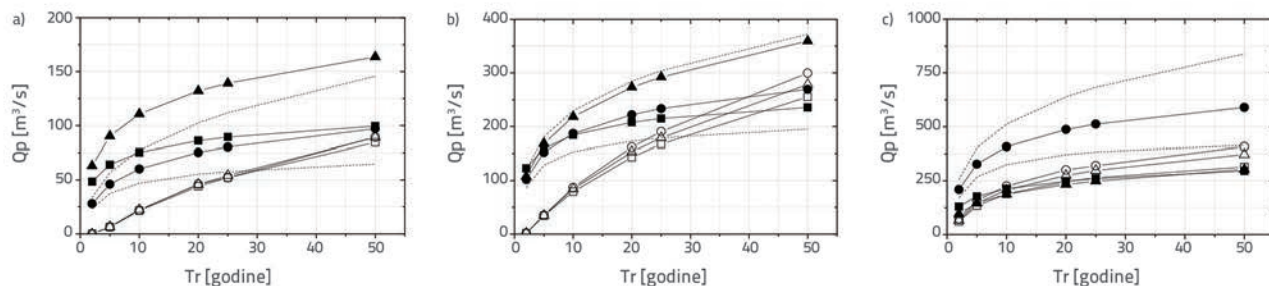
EBA4SUB pravokutnom raspodjelom kiše (EBA-R), BEA4SUB trokutastom raspodjelom kiše (EBA-T), EBA4SUB Chicago hijetogramom (EBA-C), Srebrenovićevom metodom (SREB), statističkom metodom (STAT) s donjom (95low) i gornjom (95up) granicom intervala povjerenja od 95 %

da nema gornjih i donjih netipičnih vrijednosti u uzorcima maksimalnih godišnjih protoka na razmatranim stanicama. Detaljni rezultati provedenih statističkih analiza nisu prikazani u radu zbog velike količine teksta i prostora koji bi zauzeli.

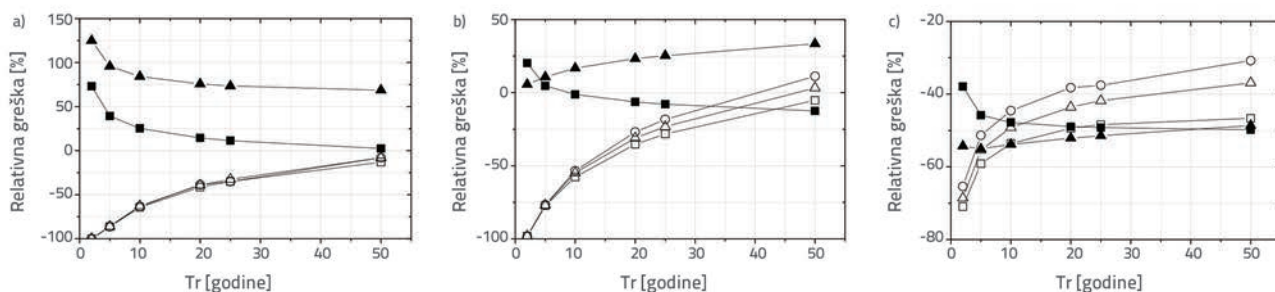
U tablici 3. i na slici 2. prikazane su vrijednosti maksimalnih protoka za razmatrane slivove i metode te vrijednosti s gornje granice intervala povjerenja od 95 %. Budući da su rezultati statističkoga pristupa temeljeni na mjerenim podacima, u nastavku se rezultati statističkih analiza smatraju referentnima te su u odnosu na njih uspoređeni rezultati drugih metoda. Na slici 3. vidljiva je relativna pogreška svake pojedine metode prema statističkoj metodi, na temelju čega se može zaključiti sljedeće.

Za sve razmatrane slivove uočena su znatna odstupanja u rezultatima, koja rastu s povećanjem povratnoga razdoblja. Na primjer, za Gornji Vakuf i povratni period od 50 godina razlika između najmanje i najveće vrijednosti vršnoga protoka je 79 m<sup>3</sup>/s (94 %). Takvi rezultati nisu neočekivani u hidrološkoj praksi. Razne metode i pristupi zahtijevaju procjenu određenih parametara, čime se u proračune unose određene nesigurnosti te kao rezultat daju različite vrijednosti [7]. U razmatranim slučajevima postoji nekoliko objašnjenja za odstupanja rezultata. Tako su, na primjer, uzorci maksimalnih godišnjih protoka

ograničene dužine, što unosi znatne neodređenosti, posebno kada se razmatraju veća povratna razdoblja. Na primjeru Gornjeg Vakufa za povratno razdoblje od 50 godina može se uočiti to kako odnos raspona granica intervala povjerenja od 95 % i vrijednosti kvantila iznosi 83,6 %. Također, u mjerenjima na hidrološkim stanicama postoje i drugi problemi. Ako se pogleda slika 2. za HS Kaloševiči, može se postaviti pitanje o valjanosti krivulje protoka, što bi objasnilo i znatna odstupanja rezultata ostalih metoda od rezultata statističke metode. Također, ako se krivulja protoka ne ažurira redovito novim mjerenjima ili se mjerni profil ne održava, mogu nastati razlike između stvarnoga protoka i protoka određenoga preko nepouzdanje krivulje. Metoda regionalnih analiza također podliježe istome problemu, a uvodi i dodatne neodređenosti vezane uz jednadžbe regresije koje povezuju stanice s raznim svojstvima (npr. nadmorska visina ili površina sliva) i pojavama (npr. otapanje snijega). Može se zamijetiti to kako postoje razne veze između protoka i povratnoga razdoblja u odnosu na primijenjenu metodu. Statistička, Srebrenovićeva i metoda regionalnih analiza, iako opisane raznim funkcionalnim oblicima, pokazuju sličan, rastući oblik. EBA4SUB za kraća povratna razdoblja daje manje vrijednosti protoka u odnosu na druge metode, dok su za veća povratna razdoblja, uz brži prirast funkcije, vrijednosti protoka



Slika 2. Veza protok-povratno razdoblje ( $Q_p$ - $T_r$ ): a) Gornji Vakuf; b) Olovo; c) Kaloševiči. Bijeli kvadrati EBA4SUB-pravokutni hijetogram, bijeli trokuti EBA4SUB-trokutasti hijetogram, bijeli krugovi EBA4SUB-Chicago hijetogram, crni kvadrati Srebenovičeva metoda, crni trokuti regionalna analiza, crni krugovi statistička metoda (isprekidane linije predstavljaju granice intervala povjerenja od 95 %)



Slika 3. Relativna pogreška vršnoga protoka u odnosu na statističku metodu: a) Gornji Vakuf; b) Olovo; c) Kaloševiči. Bijeli kvadrati EBA4SUB-pravokutni hijetogram, bijeli trokut EBA4SUB-trokutasti hijetogram, bijeli krugovi EBA4SUB-Chicago hijetogram, crni kvadrati Srebenovičeva metoda, crni trokuti regionalna analiza

određene metodom EBA4SUB bliže vrijednostima određenima drugim metodama.

Takvo je ponašanje već prije uočeno i zabilježeno u literaturi: za veća povratna razdoblja EBA4SUB obično daje više vrijednosti protoka u odnosu na klasičnu racionalnu metodu i druge empirijske izraze, dok protoke učestalijih pojava podcjenjuje [1, 12, 29, 30]. Razlog tomu ne mora biti isključivo u obliku primijenjenoga Chicago hijetograma, nego i u vrijednostima početnih gubitaka prema CN metodi koje znatno umanjuju efektivnu kišu za niža povratna razdoblja.

Vrijedi ukazati na različite vrijednosti vršnoga protoka koje se dobiju uz pomoć modela EBA4SUB ako se promijeni raspodjela kiše, odnosno oblik hijetograma. Chicago raspodjela uvijek daje najveće vrijednosti protoka, a prema drugim raspodjelama razlika raste s porastom povratnoga razdoblja, dok pravokutna raspodjela daje najmanje vrijednosti. Ti su rezultati također u skladu sa zaključcima iz novije literature, na primjer, u [3] je zaključeno to kako oblik hijetograma ima veliki utjecaj u modelima padaline-otjecanje te da se razlike u rezultatima kreću do 20 %.

Relativne pogreške uglavnom su veće (po apsolutnoj vrijednosti) za manja povratna razdoblja te opadaju s porastom povratnoga razdoblja. Na primjer, u slučaju sliva Gornjeg Vakufa relativna pogreška između modela EBA4SUB s Chicago raspodjelom kiše i statističkoga pristupa iznosi -100 % ( $T_r = 2$  god), -86 % ( $T_r = 5$  god), -63 % ( $T_r = 10$  god), -39 % ( $T_r = 20$  god), -35 % ( $T_r = 25$  god)

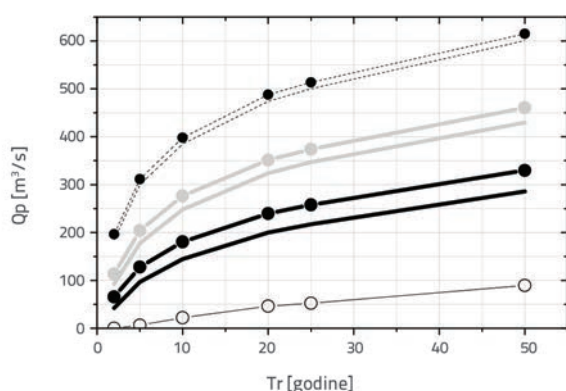
i -7 % ( $T_r = 50$  god). To je potvrđeno i kroz postojeću literaturu, npr. u [1] je prilikom usporedbe modela EBA4SUB i statističkoga pristupa za vršne protoke na devet slivova u Poljskoj pokazano kako relativna pogreška opada s porastom povratnoga razdoblja (za povratna razdoblja od dvije do 20 godina).

Na slici 2. mogu se uočiti odnosi razmatranih metoda prema granicama intervala povjerenja od 95 %. Za sve razmatrane slučajeve vrijednosti kvantila s granica intervala povjerenja prilično su velike za veća povratna razdoblja. S druge strane relativne razlike u rezultatima modela EBA4SUB za sve analizirane oblike hijetograma smanjuju se s porastom povratnoga razdoblja, što bi, u cilju smanjena neizvjesnosti konačnog rezultata, išlo u korist primjene toga modela. Što se tiče primjene EBA4SUB-a, vrijedno je spomenuti to da je model razvijen za male slivove, a u ovoj je studiji prvi put primijenjen i na sliv srednje veličine kao što je Olovo, gdje hipoteza inherentnoga sustava (npr. ravnomjerna raspodjela kiša i odsustvo učinka raslojavanja) nije mogla biti ispunjena, pa se dobiveni rezultati moraju pažljivo razmotriti.

Na kraju važno je razmotriti utjecaj ulaznih parametara modela EBA4SUB na procjenu efektivnih kiša, a time i na procjenu vršnoga protoka kao što je navedeno u [11]. Parametre CN i  $\lambda$  u prethodnim primjenama softver je automatski procjenjivao na temelju podataka o vrsti tla i namjeni zemljišta. Bez obzira na to korisnik ih može mijenjati samostalno i time znatno utjecati na rezultate modela.



Na primjeru sliva Gornjeg Vakufa na slici 4. prikazane su vrijednosti  $Q_p$  dobivene modelom s unaprijed zadanim postavkama modela (vrijednosti  $CN = 60,2$  i  $\lambda = 0,2$ ) i šest dodatnih scenarija, pretpostavljajući  $CN = 70, 80$  i  $90$  i  $\lambda = 0,05$  i  $0,1$ . Svi prikazani rezultati odnose se na Chicago oblik hijetograma. Kao što se može vidjeti na slici 4., znatne su promjene u rezultatima. Na primjer, za  $Tr = 50$  godina model EBA4SUB s unaprijed zadanim vrijednostima  $CN$ -a i  $\lambda$  daje  $Q_p = 89,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , a u ostalim slučajevima dobivene su sljedeće vrijednosti  $Q_p$ :  $329,7 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 70, \lambda = 0,05$ ),  $285,7 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 70, \lambda = 0,1$ ),  $460 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 80, \lambda = 0,05$ ),  $429,6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 80, \lambda = 0,1$ ),  $615 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 90, \lambda = 0,05$ ) i  $600,9 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $CN = 90, \lambda = 0,1$ ). Ti rezultati ističu važnost pravilne procjene vrste tla i namjene zemljišta koji znatno utječu na procjenu efektivnih kiša, a time i na vrijednosti protoka.



Slika 4. Vezu protok-povratno razdoblje ( $Q_p$ - $Tr$ ): a) Gornji Vakuf, EBA4SUB-Chicago hijetogram. Tanka crna linija s bijelim krugovima:  $CN = 60,2$ ,  $\lambda = 0,2$ , debela crna linija:  $CN = 70$ ,  $\lambda = 0,1$ , debela crna linija s crnim krugovima:  $CN = 70$ ,  $\lambda = 0,05$ , debela siva linija:  $CN = 80$ ,  $\lambda = 0,1$ , debela siva linija s crnim krugovima:  $CN = 80$ ,  $\lambda = 0,05$ , tanka isprekidana linija:  $CN = 90$ ,  $\lambda = 0,1$ , tanka isprekidana linija s crnim krugovima:  $CN = 90$ ,  $\lambda = 0,05$

#### 4. Zaključak

Radom se željela ocijeniti primjenjivost modela EBA4SUB za određivanje projektnoga hidrograma velikih voda za odabrane slivove rijeka Vrbasa i Bosne u Bosni i Hercegovini.

Maksimalne vrijednosti protoka dobivene modelom EBA4SUB uspoređene su s rezultatima metoda koje se uobičajeno primjenjuju u Bosni i Hercegovini, a to su statistička metoda godišnjih ekstrema, regionalna analiza i empirijska Srebrenovičeva metoda. Rezultati ukazuju na veliku varijaciju određenih vrijednosti protoka ovisno o odabranoj metodologiji, ističući važnost hidrološkoga modeliranja koje bi moglo snažno utjecati i na druge izvedene rezultate kao što je kartiranje poplavnih područja.

Primjena modela EBA4SUB mogla bi biti svrsishodna iz nekoliko razloga. Prvo, u usporedbi sa široko primjenjivom racionalnom

formulom taj model umanjuje subjektivnost, što mu je i osnovni cilj. Model je lišen subjektivnosti u procjeni koeficijenta otjecanja i prilikom određivanja vremena koncentracije sliva te razni korisnici primjenom modela dobivaju slične rezultate za iste slivove i ulazne podatke. Drugo, moduli u modelu EBA4SUB temeljeni su na već ispitanim procedurama koje se mogu naći u literaturi, a koje su na odgovarajući način modificirane i ažurirane kako bi se optimizirale dostupne informacije. Treće, EBA4SUB je u stanju procijeniti ne samo maksimalni protok, nego može dati i oblik hidrograma otjecanja.

Jedna od prednosti modela EBA4SUB jest potreba za ograničenim brojem parametara. Mnogi hidrološki modeli uzimaju u obzir razne parametre koje je teško procijeniti, osobito kada ne postoje kvalitetni ulazni podaci, što je posebno istaknuto kod distribuiranih modela.

Rezultati pokazuju kako model EBA4SUB može biti odgovarajuća zamjena za druge metode pri procjeni velikih voda za odabrane slivove u Bosni i Hercegovini, osobito u slučaju sliva Gornjeg Vakufa i Kaloševića, dok se rezultati dobiveni za Olovo moraju pažljivo razmotriti zbog svega prethodno navedenog. Konkretno, budući da model može odrediti ne samo vrh vodnoga vala, nego i ukupni oblik hidrograma, može se preporučiti, zajedno s fizički utemeljenim hidrauličkim modelom (tj. dvodimenzionalnim), za kartiranje područja ugroženih poplavama na odabranim slivovima.

Što se tiče rezultata modela EBA4SUB, potvrđeno je ono što je uočeno i u prethodnim studijama, a to je da model često precjenjuje vrijednosti velikih voda za veća povratna razdoblja, dok za učestalije pojave daje manje vrijednosti, što se dijelom može pripisati izboru Chicago oblika hijetograma i vrijednostima početnih gubitaka kojima se smanjuje efektivna kiša.

Za daljnja istraživanja i primjenu preporučuje se analiza parametara modela EBA4SUB u cilju njihove optimizacije kako bi se što preciznije odredilo otjecanje u drugim slivovima u Bosni i Hercegovini, s težištem na tome da se što vjerodostojnije utvrde karakteristike pokriva zemljišta i tip tla, dva parametra koja mogu znatno utjecati na vezu oborina, infiltracije i neto otjecanja. Iako je EBA4SUB namijenjen za male slivove, u ovome je radu primijenjen i na jedan veći sliv (Olovo), čija površina iznosi  $881,7 \text{ km}^2$ . Rezultati za Olovo su u skladu s onima dobivenima drugim metodologijama, ali se hipoteza EBA4SUB o malome slivu (svojstvena trenutnome jediničnom hidrogramu) ne može u cijelosti zadovoljiti, pa se rezultati moraju uzeti u obzir s dozom opreza.

#### Zahvala

Autori rada zahvaljuju Federalnom hidrometeorološkom zavodu Sarajeva i Zavodu za vodoprivredu d.d. Sarajeva za pomoć pri izradi rada te izražavaju posebnu zahvalnost recenzentima na konstruktivnim primjedbama koje su rad učinile boljim.

## LITERATURA

- [1] Młyński, D., Petroselli, A., Wałęga, A.: Flood frequency analysis by an event-based rainfall-Runoff model in selected catchments of southern Poland, *Soil & Water Res.*, 13 (2018), pp. 170–176.
- [2] Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., *Hydrology. A Science for Engineers*, London, CRC Press, 2014.
- [3] Wałęga, A.: The importance of calibration parameters on the accuracy of the floods description in the Snyder's model. *Journal of Water and Land Development*, 28 (2016), pp. 19–25.
- [4] Voda, A.I., Sarpe, A.C., Voda, M.: Methods of maximum discharge computation in ungauged river basins. Review of procedures in Romania, *Geographia Technica*, 13 (2018) 1, pp. 130–137.
- [5] Dub, O.: *Hydrologia, Hydrografia, Hydrometria (Hydrology, hydrography, hydrometry)*, SVTL, Bratislava, Slovakia, 1957.
- [6] SCS (Soil Conservation Service). *National Engineering Handbook*, Section 4. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 1972.
- [7] Petroselli, A., Vojtek, M., Vojteková, J.: Flood mapping in small ungauged basins: a comparison of different approaches for two case studies in Slovakia, *Hydrology Research* (2018), in press.
- [8] ICPDR and ISRBC - International Commission for the Protection of the Danube River and International Sava River Basin Commission, 2015. *Floods in May 2014 in the Sava River Basin: Brief overview of key events and lessons learned*, Vienna – Zagreb.
- [9] Autoceste FBiH d.o.o. Mostar. *Upute za projektiranje i izgradnju održivih sustava odvodnje na autocesti u Federaciji BiH*, Mostar, 2014.
- [10] Grimaldi, S., Petroselli, A.: Do we still need the rational formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins, *Hydrol. Sci. J.* 60, 66 (2015) 7.
- [11] Piscopia, R., Petroselli, A., Grimaldi, S.: A software package for the prediction of design flood hydrograph in small and ungauged basins, *Journal of Agricultural Engineering XLVI*, 432 (2015), pp. 74–84.
- [12] Petroselli, A., Grimaldi, S.: Design hydrograph estimation in small and fully ungauged basins: a preliminary assessment of the EBA4SUB framework, *J. Flood Risk Manage.*, 11 (2018), pp. 197–210. doi:10.1111/jfr3.12193
- [13] European Commission. CORINE (Coordination of Information on Environment) Database, a Key Database for European Integrated Environmental Assessment. Programme of the European Commission, European Environmental Agency (EEA), 2000.
- [14] McCuen, R.H.: *Modeling hydrologic change: Statistical methods*, CRC Press, 2003.
- [15] Hrelja, H.: *Inženjerska hidrologija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, BiH. 2007.
- [16] UNDP.: *Technology transfer for climate resilient flood management in Vrbas River Basin*, UNDP. Sarajevo, 2015.-u tijeku
- [17] Srebrenović, D.: *Primijenjena hidrologija*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1986.
- [18] Leclerc, G., Schaake, J.C.: *Derivation of hydrologic frequency curves, Report 142*. Mass. Inst. of Technol., Cambridge, MA, USA. 1972.
- [19] Grimaldi, S., Petroselli, A., Romano, N.: Curve-number/Green-Ampt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins: parameter sensitivity analysis, *Hydrol. Process*, 27 (2013), pp. 1265–1275.
- [20] NRCS (Natural Resources Conservation Service), *National engineering handbook - part 630, Hydrology*. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 2008.
- [21] Green, W.H., Ampt, G.A.: Studies on soil physics, *J. Agric. Sci.*, 4 (1911), pp. 1–24.
- [22] Mesa, O.J., Miffilin, E.R.: On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response, In: V.K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe, and E.F. Wood (ed.), *Scale problems in hydrology*. D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1–17, 1986.
- [23] Grimaldi, S., Petroselli, A., Nardi, F.: A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrol. Sci. J.*, 57 (2012), pp. 73–83.
- [24] Grimaldi, S., Teles, V., Bras, R.L.: Sensitivity of a physically based method for terrain interpolation to initial conditions and its conditioning on stream location, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (2004) 5, pp. 587–597.
- [25] Grimaldi, S., Teles, V., Bras, R.L.: Preserving first and second moments of the slope area relationship during the interpolation of digital elevation models, *Advances in water resources*, 28 (2005) 6, pp. 583–588.
- [26] Petroselli, A., Fernandez Alvarez, A.: The flat area issue in DEMs and its consequences on the rainfall-runoff modeling, *GIScience & Remote Sensing*, 49 (2012) 5, pp. 711–734. doi:10.2747/1548-1603.49.5.711
- [27] Grimaldi, S., Petroselli, A., Nardi, F., Alonso G.: Flow time estimation with variable hillslope velocity in ungauged basins, *Adv. Water Resour.* 33 (2010), pp. 1216–23.
- [28] Giandotti, M., *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Istituto Poligrafico dello Stato, 8 (1934), pp. 107–117.
- [29] Mulaomerović-Šeta, A., Prskalo, G., Lozančić, Ž., Petroselli, A., Bakalović, A.: Usporedna analiza velikih voda provedena uobičajenim metodama i metodom geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma primjenom EBA4SUB programa, *E-Zbornik. Faculty of Civil Engineering Mostar*, 14, (2017), pp. 76–90.
- [30] Nardi, F., Annis, A., Biscarini, C.: On the impact of urbanization on flood hydrology of small ungauged basins: The case study of the Tiber river tributary network within the city of Rome, *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2) (2018), pp. 594–603.