



## USPOREDNA ANALIZA VELIKIH VODA PROVEDENA UOBIČAJENIM METODAMA I METODOM GEMORFOLOŠKOG TRENUTNOG JEDINIČNOG HIDROGRAMA PRIMJENOM EBA4SUB PROGRAMA

**Ajla Mulaomerović-Šeta**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, viši asistent

Dr.sc. **Gordan Prskalo**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, izvanredni profesor

**Željko Lozančić**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, viši asistent

Dr. **Andrea Petroselli**

Tuscia University, Viterbo, Italija, profesor

**Amina Bakalović**, dipl.ing.građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, diplomant

**Sažetak:** Problem određivanja hidrograma velikih voda jedan je od temeljnih problema u hidrotehničkoj praksi. Za definiranje hidrograma, odnosno njegovog vrha (pika), uobičajeno se koriste statističke metode godišnjih ekstrema i pikova, za koje je nužno raspolagati povijesnim podacima o protoku, zatim empirijski izrazi, te hidrološki modeli. U radu je prikazana primjena hidrološkog modela EBA4SUB (Event-Based Approach for Small Ungauged Basins) namijenjenog za definiranje hidrograma otjecanja na neizučeniim slivovima. Rezultati velikih voda rijeke Bistrice (pritoke rijeke Vrbas) dobiveni ovim modelom usporedit će se s rezultatima empirijskih metoda. Kvalitet procijenjenih vrijednosti velikih voda dobivenih EBA4SUB modelom bit će provjerene na hidrološki izučeniim profilima rijeke Vrbas, VS Gornji Vakuf i VS Daljan.

**Ključne riječi:** velike vode, geomorfološki trenutni jedinični hidrogram, statističke metode, empirijske metode

## COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH WATERS CONDUCTED BY THE USUAL METHODS AND METHOD OF THE GEMORPHOLOGICAL INSTANTANEOUS UNIT HYDROGRAPH USING EBA4SUB PROGRAM

**Abstract:** Problem of determining the hydrograph of high waters is one of the basic problems in hydrotechnical practice. To define the hydrograph and its peak, regular statistical methods of annual extremes and peaks are commonly used if historical flow data are available, if not, empirical expressions and hydrological models are used. The paper shows the use of a hydrological model EBA4SUB (Event-Based Approach for Small Ungauged Basins), designed to define runoff hydrograph from ungauged basins. Values of high waters of Bistrice river basin (tributary of river Vrbas) obtained with this model will be compared with the results of empirical methods. The quality of the estimated peak values of high waters obtained with the EBA4SUB model will be tested on hydrologically studied profiles of river Vrbas, WS Gornji Vakuf and WS Daljan.

**Key words:** High waters, geomorphological instantaneous unit hydrograph, statistical methods, empirical methods,



## 1. UVOD

Poplave predstavljaju jednu od najvećih opasnosti za ljudsku zajednicu i imaju značajan utjecaj na društveni i ekonomski razvoj, a problem procjene valova velikih voda sve je aktualniji nakon poplava iz svibnja 2014. godine. Sve se češće javlja potreba da se, osim maksimalne ordinate hidrograma, odredi i njegov volumen pa klasična statistička obrada maksimalnih godišnjih protoka ili protoka iznad određenog praga nije dovoljna. U ovim se slučajevima često primjenjuju empirijske metode koje kao parametre, osim oborina, koriste morfološke, geološke i druge značajke sliva. Nažalost, isto se tako često zaboravlja da je njihova primjena ograničena na uvjete koji su slični onima za koje su izvedeni, pa se nekritičkom upotrebom ovih izraza dobivaju precijenjene ili podcijenjene vrijednosti.

U radu je prikazan postupak i rezultati određivanja velikih voda primjenom geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma (Prskalo G. i sur. 2007) dobivenog EBA4SUB modelom na tri profila u slivu rijeke Vrbas. Odabran je jedan neizučeni profil, profil na ušću rijeke Bistrice u Vrbas, te dva izučena profila, VS Gornji Vakuf i VS Daljan, kako bi se ocijenila točnost rezultata velikih voda dobivenih ovim modelom.

## 2. ODREĐIVANJE VELIKIH VODA REGIONALNOM ANALIZOM

Svrha regionalne analize je rejonizirati slivove po homogenosti, odnosno ograničiti područja sa sličnim faktorima odlučujućim za formiranje velikih voda na slivnim površinama. Pri tome treba naglasiti kako je tvrdnja o homogenosti jednog područja relativna, jer je ona vezana za razne i raznoliko zastupljene fizičko-geografske značajke jednog područja (Hrelja H. 2007).

Metoda se bazira na upotrebi determinirajućih faktora za formiranje velikih voda na razmatranom slivu, sa istim faktorima na susjednim slivovima ili podslivovima. Na temelju upotrebe rezultata dobivenih na ovaj način dolazi se do zaključaka o veličinama i drugim bitnim značajkama maksimalnih protoka. Ova metoda nalazi svoju primjenu u uvjetima potpunog ili djelomičnog nedostatka mjerenih hidroloških podataka, kao što je slučaj sa dijelovima sliva i podslivovima vodotoka u slivu rijeke Vrbas.

Zbog lake dostupnosti podataka o veličini slivnih površina, kao najčešće i prve regionalne krivulje, odnosno zavisnosti neke od bitnih značajki hidrograma velike vode i neke od fizičko-geografskih značajki slivova na analiziranom području, mogu se smatrati regionalne krivulje koje povezuju maksimalnu zabilježenu (ili nekog povratnog perioda javljanja) ordinatu hidrograma velike vode i veličinu slivne površine, odnosno specifični maksimalni zabilježeni (ili nekog povratnog perioda javljanja) protok i veličinu slivne površine, u najjednostavnijem obliku:

$$Q_{\max} = a \cdot F_{sl}^b \quad (1)$$

ili

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{F_{sl}^b} = a \cdot F_{sl}^{(b-1)} \quad (2)$$

gdje je:

$Q_{\max}$  – najveći zabilježeni maksimalni protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$q_{\max}$  – najveći zabilježeni specifični maksimalni protok [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ],

$F_{sl}$  – površina sliva [ $\text{km}^2$ ],

(a) i (b) – parametri modela koji se određuju metodama matematske statistike.



U skladu s naprijed navedenim, konstruirane su regresijske veze oblika  $Q_{max} = f(F_{sl})$  za sliv rijeke Vrbas za povratne periode javljanja  $T = 20, 50$  i  $100$  godina. Podaci za konstrukciju regresijskih veza dani su u Tablici 1. Ovi podaci dobiveni su kao rezultati proračuna vrijednosti maksimalnih protoka, za navedene povratne periode javljanja, statističkom metodom godišnjih ekstrema.

Tablica 1. Vrijednosti maksimalnih protoka i protoka s gornje granice 95%-tnog intervala povjerenja za Pearson III funkciju raspodjele vjerojatnoće za navedene povratne periode

Vodomojna stanica	Vodotok	$F_{sl}$ [km <sup>2</sup> ]	Period osmatranja	$Q_T$ [m <sup>3</sup> /s]			$Q_T^{95\%}$ [m <sup>3</sup> /s]		
				Povratni period T [god]			Povratni period T [god]		
				20	50	100	20	50	100
Majevac	Pliva	652	1967-1989	55,30	57,48	58,93	58,96	62,26	64,66
Volari	Pliva	1294	1971-1990	106,43	111,42	114,79	115,39	123,24	129,03
Ugar	Ugar	326	1971-1980	134,78	149,88	160,31	173,14	201,79	223,59
Gornji Vakuf	Vrbas	208	1946-1990 2005-2016	71,87	89,49	102,95	90,75	123,00	149,46
Han Skela	Vrbas	1357	1972-1990	190,67	206,51	217,19	219,88	244,93	263,39
Kozluk Jajce	Vrbas	2831	1971-1989	225,21	247,15	262,43	265,76	302,66	330,47
Vrbanja	Vrbanja	778	1961-1970 1974 1976-1990 1992 1996-2015	568,34	680,72	763,73	704,97	895,08	1044,9
Banja Luka	Vrbas	4376	1961-1990 1996-2015	863,43	1048,50	1191,2	1068,2	1426,1	1723,9
Delibašino selo	Vrbas	5218	1962-1975 1978 1980 1982-2015	1480,20	1794	2030,7	1847,5	2410,8	2865,8
Sarići	Janj	336	1957-1979 1985-1990	72,79	82,30	89,15	87,32	103,59	116,15
Otoka	Janj	231	1968-1975 1977-1982 1985-1990	37,21	43,44	47,92	48,66	60,15	69,08
Milaševići	Ugar	302	1977-1980 1982-1988	69,95	77,78	83,27	89,03	104,23	115,90
Daljan	Vrbas	978,2	1959-2016	217,80	261,86	294,78	274,40	353,98	417,72

Tablica 2. Regresijske veze za sliv rijeke Vrbas za  $Q$  u [m<sup>3</sup>/s] i  $F_{sl}$  u [km<sup>2</sup>]

Povratni period T [god]	$Q_T$	$Q_T^{95\%}$
20	$Q_{20} = 0,586 \cdot F_{sl}^{0,839}$	$Q_{20} = 0,791 \cdot F_{sl}^{0,823}$
50	$Q_{50} = 0,656 \cdot F_{sl}^{0,842}$	$Q_{50} = 0,9186 \cdot F_{sl}^{0,828}$
100	$Q_{100} = 0,703 \cdot F_{sl}^{0,844}$	$Q_{100} = 1,012 \cdot F_{sl}^{0,832}$

Ukoliko se na crtež nanesu uređeni parovi vrijednosti protoka i površine sliva raspored točaka ( $F_{sl,i}$ ,  $Q_{max,i}$ ) ukazuje na relativno dobru vezu u razmatranom području, slivu rijeke



Vrbas, što potvrđuju i koeficijenti korelacije  $r$  čije se vrijednosti, za različite povratne periode, kreću od 0,80 do 0,82 za  $Q_T$ , odnosno 0,76 do 0,80 za  $Q_T^{95\%}$ .

### 3. ODREĐIVANJE VELIKIH VODA EMPIRIJSKIM IZRAZIMA

Za određivanje otjecanja na neizučnim slivovima najčešće se koriste iskustvene (empirijske) formule koje izražavaju neku karakterističnu vrijednost, u ovom slučaju maksimalnu (najveću vrijednost) protoka, kao funkciju veličine sliva, vrijednosti oborina i drugih faktora bitnih za otjecanje. Osim maksimalnih protoka, za koje je izvedeno najviše iskustvenih izraza, empirijskim formulama se mogu računati i neki drugi hidrološki parametri. Za proračun velikih voda u ovom radu odabrane su sljedeće empirijske metode koje se često koriste u praksi:

- Racionalna metoda
- Metoda Srebrenovića
- SCS metoda
- Espey-Altmanov jedinični hidrogram

U nastavku je dan kratki opis navedenih metoda, a u Tablici 3. prikazane su formule po kojima se računaju maksimalne vrijednosti protoka te su opisani parametri o kojima ovise vrijednosti protoka.

Vjerojatno najpopularnija metoda za proračun velikih voda na neizučnim slivovima je racionalna metoda, a svoj uspjeh može pripisati jednostavnosti formule i njene primjene zbog malog broja potrebnih podataka. Upravo to joj je i glavni nedostatak. Određivanje koeficijenta otjecanja (racionalni koeficijent)  $C$  je proizvoljno i obično se svodi na njegov izbor iz empirijskih tablica na temelju načina korištenja i tipa zemljišta. Ove tablice nisu kalibrirane eksperimentalnim putem, a u obzir ne uzimaju ni nagib slivne površine, njen oblik, kao ni druge parametre od značaja za formiranje otjecanja. Drugi problem vezan je za određivanje trajanja mjerodavne kiše, odnosno vremena koncentracije sliva, ali taj problem je izražen i kod drugih metoda.

Dionis Srebrenović je pokušao utvrditi fizičku vezu između klimatskih elemenata, faktora sliva i površinskog otjecanja uz pomoć statističkih i fizikalno-hidroloških metoda. Kao rezultat izveo je, na temelju racionalne formule, značajno složeniju formulu koja u obzir uzima veći broj karakterističnih parametara o kojima ovisi otjecanje velikih voda.

Prema iskustvenim podacima i dugogodišnjem praćenju ponašanja velikih voda na malim slivovima SCS metoda se pokazala vrlo pogodnom i ima dosta široku primjenu u svijetu. Četiri osnovna parametra koja ulaze u formulu V. T. Chowa i o kojima direktno ovisi veličina mjerodavnog maksimalnog protoka  $Q_{max}$  su: veličina sliva  $A$ , intenzitet efektivne oborine  $i_e$ , klimatski faktor  $Y$  i faktor redukcije vrha hidrograma  $Z$  koji ima značajnu ulogu. Faktor redukcije vrha hidrograma je funkcija odnosa vremena trajanja kiše i vremena zakašnjenja, odnosno vremena podizanja jediničnog hidrograma.

Espey-Altmanov jedinični hidrogram se zasniva na analizi 10-minutnih jakih kiša i njima odgovarajućih jediničnih hidrograma zabilježenih na 41 malom slivu u sjevernoj Americi veličine od 0,036 do 39,0 km<sup>2</sup> (Žugaj R. 2010).

Empirijski izrazi za definiranje velikih voda prikazani u ovom radu zahtijevaju podatak o intenzitetu/visini mjerodavne oborine kojoj treba pripisati mjerodavno trajanje i povratni period. Pretpostavlja se da hidrogram povratnog perioda  $T$  uzrokuje oborina istog povratnog perioda, ali ostaje pitanje kako odabrati trajanje mjerodavne oborine. Trajanje oborine bi trebalo biti jednako vremenu koncentracije sliva  $T_c$  kako bi cjelokupna površina u trenutku  $t = T_c$  sudjelovala u otjecanju. Za određivanje vremena koncentracije također postoji veliki broj empirijskih formula od kojih su neke pokazane u Tablici 4.



Tablica 3. Pregled odabranih empirijskih formula za proračun velikih voda (Žugaj R. 2010)

Metoda / Autor	Formula za proračun maksimalnog protoka $Q_{\max}$
Racionalna	$Q_{\max} = C \cdot i \cdot A$ <p><math>C</math> – racionalni koeficijent, <math>i</math> – intenzitet mjerodavne kiše, <math>A</math> – površina sliva.</p>
Srebrenović	$Q_{\max} = 0,48 \cdot \frac{\alpha}{(\beta \cdot \omega)^{\frac{3}{4}}} \cdot A^{0,96} \cdot \Psi_p \cdot S^{\frac{1}{3}}$ <p><math>\alpha</math> – otjecajni koeficijent <math>\alpha = 0,80 [1 + 0,075 (\log T - \beta)]</math>  <math>T</math> – povratni period [god],  <math>\beta</math> – faktor ovisan o propusnosti, pošumljenosti i sl. (vrijednosti od 1 do 3),  <math>\omega</math> – veličina određena izrazom <math>\omega = 1 + \frac{\tau_2}{\tau_1}</math>  <math>\tau_1</math> – vrijeme površinskog sabiranja, <math>\tau_2</math> – vrijeme tečenja duž vodotoka,  <math>A</math> – površina sliva,  <math>\Psi_p</math> – veličina određena izrazom <math>\Psi_p = [P(1 + 1,5 \cdot \log T)]^{1,43}</math>  <math>P</math> – prosječna godišnja oborina [m],  <math>S</math> – ujednačeni pad vodotoka.</p>
SCS metoda	$Q_{\max} = A \cdot i_e \cdot Y \cdot Z$ <p><math>A</math> – površina sliva,  <math>i_e</math> – intenzitet mjerodavne efektivne kiše,  <math>Y</math> – klimatski faktor (<math>Y=1</math> za područja bez regionalne analize oborina),  <math>Z</math> – faktor redukcije vrha hidrograma:</p> $Z = f\left(\frac{t_k}{t_p}\right) = -0,00303 + 0,84902 \frac{t_k}{t_p} - 0,17747 \left(\frac{t_k}{t_p}\right)^2 \quad \text{za } \frac{t_k}{t_p} \leq 2,13$ $Z = 1 \quad \text{za } \frac{t_k}{t_p} > 2,13$ <p><math>t_k</math> – trajanje oborine [mm],  <math>t_p</math> – vrijeme zakašnjenja sliva [min] <math>t_p = C \left(\frac{L \cdot U}{\sqrt{S}}\right)^{0,38}</math>  <math>C</math> – koeficijent čija vrijednost ovisi o veličini i značajkama sliva,  <math>L</math> – duljina sliva od profila do vododijelnice po glavnom vodotoku [km],  <math>U</math> – udaljenost od profila do težišta sliva [km],  <math>S</math> – ujednačeni pad vodotoka.</p>
Espey Altmanov jedinični hidrogram	$Q_p = \frac{359 \cdot A^{0,96}}{T_p^{1,07}}$ $T_p = \frac{4,1 \cdot L^{0,23} \cdot \varphi^{1,57}}{S^{0,25} \cdot I^{-0,18}}, \quad T_B = \frac{1645 \cdot A}{Q_p^{0,95}}, \quad W_{50} = \frac{252 \cdot A^{0,99}}{Q_p^{0,92}}, \quad W_{75} = \frac{95 \cdot A^{0,79}}{Q_p^{0,78}}$ <p><math>A</math> – površina sliva,  <math>T_p</math> – vrijeme podizanja vodnog vala [min],  <math>L</math> – duljina vodotoka [m],  <math>\varphi</math> – veličina ovisna o hrapavosti po Manningu i propusnosti terena,  <math>S</math> – srednji nagib vodotoka,  <math>I</math> – postotak nepropusnog pokrova,  <math>T_B</math> – baza hidrograma [min],  <math>W_{50}, W_{75}</math> – trajanje protoka veličine <math>0,5Q_p</math> i <math>0,75Q_p</math> [min].</p>



Tablica 4. Pregled nekih formula za proračun vremena koncentracije sliva

Metoda/ Autor	Formula za $T_c$ [min]	Napomena
Kirpich (1940.)	$T_c = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$ $L$ – duljina toka od izvora do profila [m] $S$ – prosječan nagib sliva [m/m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• za ruralne slivove sa jasno izraženim riječnim tokovima i strmim nagibima;</li> <li>• za asfaltirane površine ili betonske kanale preporučuje se pomnožiti <math>T_c</math> s faktorom 0,4</li> </ul>
FAA (1970.)	$T_c = 0,7 \cdot (1,1 - c) \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,333}$ $c$ – koeficijent otjecanja u racionalnoj metodi $L$ – duljina površinskog tečenja [m] $S$ – nagib površine [m/m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• formula razvijena za odvodnjavanje aerodroma, a može se koristiti za urbane slivove</li> </ul>
Kinematski val	$T_c = 1,36 \cdot L^{0,6} \cdot n^{0,6} \cdot i^{-0,4} \cdot S^{-0,3}$ $L$ – duljina površinskog tečenja [m] $n$ – Manningov koeficijent hrapavosti $i$ – intenzitet efektivne kiše [mm/min] $S$ – prosječan nagib površine [m/m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• za površinsko tečenje na razvijenim površinama;</li> <li>• formula se rješava iterativno jer intenzitet efektivne kiše ovisi o vremenu koncentracije (uz korištenje ITP krivulje)</li> </ul>
SCS metoda kašnjenja	$T_c = 0,0136 \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7}$ $L$ – najdulji put tečenja na slivu [m] $CN$ – SCS broj krivulje $S$ – prosječan nagib površine [m/m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• za male ruralne slivove;</li> <li>• smatra se dobrom za potpuno pokrivene površine, dok za mješovite površine daje precijenjeno <math>T_c</math>;</li> <li>• nastala od pretpostavke da je <math>T_c = 1,67t_p</math></li> </ul>
SCS metoda brzina	$T_c = \frac{1}{60} \cdot \sum L_i \cdot v_i$ $L$ – duljina putanje tečenja [m] $v_i$ – prosječna brzina tečenja [m/s]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• podrazumijeva određivanje brzina površinskog tečenja</li> </ul>

Glavna ulazna komponenta u procesu otjecanja su oborine. Od ukupne oborine koja padne na tlo samo dio uzrokuje direktno otjecanje. Taj dio se naziva efektivnom oborinom. Vrijednost efektivnih oborina može se odrediti primjenom SCS metode, odnosno CN krivulja. Efektivna oborina  $P_e$  prema SCS metodi definirana je u ovisnosti o bruto oborini  $P$  i broju krivulje CN prema sljedećem izrazu:

$$P_e = \frac{\left[ P - 0,2 \cdot \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) \right]^2}{\left[ P + 0,8 \cdot \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) \right]} \quad (3)$$

Broj krivulje otjecanja CN ovisi o vegetacijskom pokrovu, načinu obrade i tipu (kategoriji) tla te prethodnoj vlažnosti tla. Treba napomenuti da se za male slivove, s kratkim vremenima koncentracije od pola do jednoga sata, veličina efektivne oborine može značajno razlikovati u ovisnosti o izboru parametara koji utječu na broj krivulje CN (Žugaj R. 2010).

Nakon što se odredi mjerodavna kiša (trajanja jednakog vremenu koncentracije sliva i željenog povratnog perioda T), sa PTP krivulja se očita vrijednost bruto kiše, a primjenom izraza (3) se odredi efektivna kiša koja predstavlja ulazni podatak za proračun velikih voda u prethodno prikazanim empirijskim izrazima.





#### 4. GEOMORFOLOŠKI TRENUTNI JEDINIČNI HIDROGRAM – EBA4SUB HIDROLOŠKI MODEL

EBA4SUB hidrološki model namijenjen je za određivanje hidrograma direktnog otjecanja koji je posljedica efektivne kiše pale na sliv. Preslikavanje oborina u otjecanje vrši se preko geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma određenog metodom izokrona. Ovaj software može se koristiti za definiranje hidrograma otjecanje na neizučnim slivovima, a cilj mu je biti brz i praktičan alat za primjenu za hidrološke studije koje karakterizira nedostatak promatranih podataka. EBA4SUB je klasičan hidrološki model u kojem je svaki korak (formiranje hijetograma, procjena neto oborina i transformacija oborina u otjecanje) odgovarajuće prilagođen empirijskim aplikacijama bez kalibracije, koji za proračun koristi iste ulazne podatke koji su potrebni za primjenu racionalne formule, sa krajnjim ciljem smanjenja subjektivnosti i minimizacijom osjetljivosti parametara (koeficijent otjecanja, vrijeme koncentracije sliva) (Piscopio R. i sur. 2015). Ulazni podatak za definiranje trenutnog jediničnog hidrograma (TJH) predstavlja digitalni model terena (DEM). Kao dodatni podatak, koji nije nužan za proračun i definiranje TJH, može se unijeti namjena zemljišta (CORINE Land Cover).

Model EBA4SUB uključuje dvanaest parametara, a to su (Piscopio R. i sur. 2015):

- Primarni: vrijeme koncentracije sliva, broj CN krivulje, postotak početnih gubitaka
- Sekundarni: zasićena hidraulička provodljivost, početna vrijednost sadržaja vode u tlu, količina zasićenog zemljišta na terenu, minimalna brzina tečenja, maksimalna brzina tečenja, riječna mreža, matrični pritisak na čelo početne vlažnosti, vrijeme diskretizacije hijetograma, vrijeme diskretizacije WFIUH (width function instantaneous unit hydrograph) i hidrograma direktnog otjecanja

Devet parametara ima sekundarnu ulogu u smislu da je izlazni hidrogram gotovo neosjetljiv na njihove varijacije, pa se ovim parametrima dodjeljuju prosječne vrijednosti predložene u literaturi. Preostala tri parametra (vrijeme koncentracije, broj CN krivulje i postotak početnih gubitaka) značajno utječu na krajnji rezultat i prema tome imaju dominantnu ulogu u EBA4SUB-u, te se njima vrijednosti dodjeljuju korištenjem empirijskih formula ili tablica i kalibriraju se ukoliko su dostupni podaci o oborinama.

Sam proračun u software-u se provodi u tri koraka (Piscopio R. i sur. 2015):

- Određivanje mjerodavnih oborina
- Konstrukcija trenutnog geomorfološkog jediničnog hidrograma
- Proračun hidrograma otjecanja

##### 4.1 Određivanje mjerodavnih oborina

Podatak o bruto oborinama se dobije na temelju analize kiša sa obližnje kišomjerne stanice. U programu je moguće birati tri modela hijetograma bruto kiše: pravokutni - konstantna kiša, trokutni model i Chicago model.

Dio ukupne oborine koji uzrokuje otjecanje, efektivna oborina, se procjenjuje putem SCS metode, a zatim se vrši raspodjela efektivne oborine kroz vrijeme njenog trajanja. U radu se, pri određivanju efektivne oborine SCS metodom, pretpostavilo da početni gubitak iznosi 20% od potencijalno maksimalnog zadržavanja vode, a zatim se izvršila raspodjela efektivne kiše primjenom Green-Ampt metode za proračun infiltracije:

$$q_0 = i \quad \text{za } t < t_p$$

$$q_0(t) = K_s \left[ 1 + \frac{\Delta\Theta \cdot \Delta H}{i(t)} \right] \quad \text{za } t \geq t_p \quad (4)$$



gdje je:

$q_0$  – stupanj infiltracije,

$t_p$  – vrijeme kada intenzitet kiše dostigne vrijednost infiltracije,

$i$  – intenzitet oborine,

$\Delta\theta$  – promjena vode u tlu,

$K_s$  – zasićena hidraulička provodljivost.

## 4.2 Konstrukcija trenutnog geomorfološkog jediničnog hidrograma

Izabrani trenutni geomorfološki jedinični hidrogram zasnovan je na funkciji širine koja je izražena kao:

$$WFIUH(t) = \frac{L_c(x)}{v_c(x)} + \frac{L_h(x)}{v_h(x)} \quad (5)$$

gdje je:

$L_c, L_h$  – duljina putovanja po riječnom toku i padini,

$v_c, v_h$  – brzina tečenja po riječnom toku i padini.

Vrijednosti  $L_c$  i  $L_h$  dobiju se na temelju optimizacije putovanja kišne kapi. Vrijednosti  $v_c$  i  $v_h$  predstavljaju parametre od kojih ovisi oblik trenutnog jediničnog hidrograma. U istraživanju koje su proveli Grimaldi i sur. predlaže se da se  $v_h$  odredi na temelju hidrogeomorfoloških značajki površine (pada i pokrivača), a da se brzina u vodnom toku kalibrira tako da težište trenutnog jediničnog hidrograma odgovara vremenu zakašnjenja sliva izraženog preko vremena koncentracije sliva kao  $0,6 \cdot T_c$  uz pretpostavku da je brzina tečenja duž vodotoka konstantna. Vrijeme koncentracije sliva određuje se pomoću Giandottijeve formule:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{\Delta H}} \quad (6)$$

gdje je:

$A$  – površina sliva [ $\text{km}^2$ ],

$L$  – duljina glavnog toka [km],

$\Delta H$  – srednja nadmorska visina sliva [m n.m.].

## 4.3 Proračun hidrograma otjecanja

Na temelju trenutnog jediničnog hidrograma i vrijednosti efektivne kiše dobiva se vrijednost protoka prema izrazu:

$$Q(t) = A \int_0^t WFIUH(t - \tau) \cdot P_n(\tau) d\tau \quad (7)$$

gdje je:

$A$  – površina sliva,

$t$  – trajanje kiše,

$\tau$  – vrijeme diskretizacije trenutnog jediničnog hidrograma,

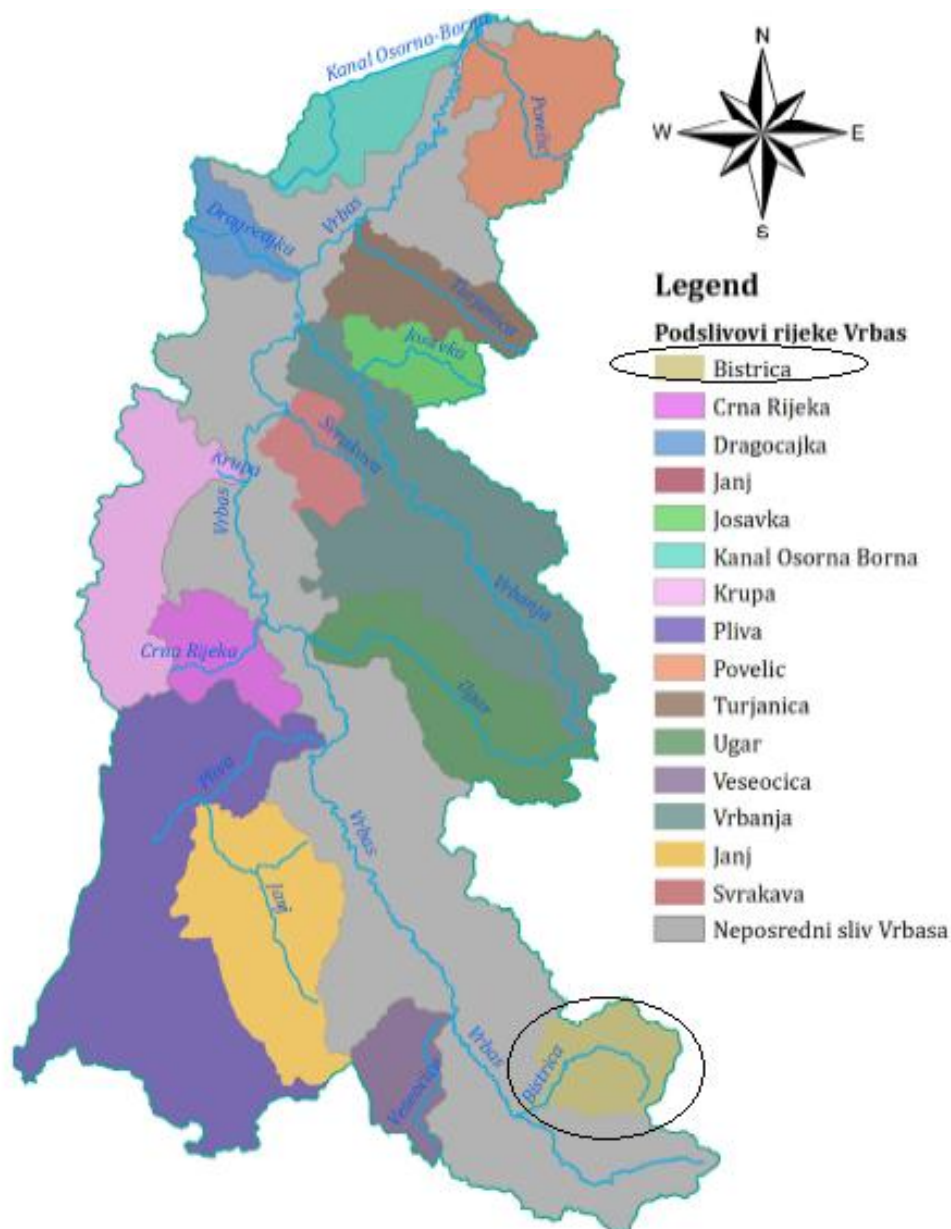
$P_n(\tau)$  – visina efektivne kiše [mm].





## 5. ODREĐIVANJE VELIKIH VODA RIJEKE BISTRICE

Rijeka Bistrica je desna pritoka rijeke Vrbas. Tokom ljetnih mjeseci korito je uglavnom suho dok za vrijeme jeseni nabuja od obilnih kiša. Uzvodno od ušća u rijeku Vrbas, u periodu 1981.-1988. godina, vršena su mjerenja protoka. Kako niz osmatranja iznosi tek 8 godina, klasična statistička metoda za definiranje velikih voda nije provedena. Velike vode rijeke Bistrice, povratnih perioda 20, 50 i 100 godina određene su ranije navedenim empirijskim metodama, metodama regionalne analize i EBA4SUB modelom.



Slika 1. Prikaz sliva rijeke Vrbas sa naznačenim podslivovima

Na temelju topografskih podloga i digitalnog modela terena za sliv rijeke Bistrice utvrđene su potrebne značajke koje se kao parametri javljaju u empirijskim izrazima za proračun velikih voda. Također su određene i vrijednosti efektivnih oborina primjenom CN krivulja i PTP



dijagrama za različite povratne periode i trajanja kiše, odnosno različita vremena koncentracije sliva. Navedene značajke prikazane su u Tablici 5.

Tablica 5. Glavne značajke sliva rijeke Bistrice

Glavni vodotok	Vrbas		
Pritoka	Bistrica		
Površina sliva	165,7 km <sup>2</sup>		
Duljina vodotoka	28,11 km		
Srednja visina sliva	1232,5 m n.m.		
Maksimalna visina u slivu	1750 m n.m.		
Minimalna visina u slivu	645 m n.m.		
Bruto pad sliva	3,9%		
Vrijeme koncentracije	T <sub>c</sub> = 2,97 h (prema empirijskom izrazu Kirpicha)		
	T <sub>c</sub> = 4,62 h (prema empirijskom izrazu Herheulidzea)		
	T <sub>c</sub> = 5 h (odabrano)		
	T <sub>c</sub> = 6 h (odabrano)		
Povratni period	T = 100 god	T = 50 god	T = 20 god
Vrijednost bruto oborine (mm)	za T <sub>c</sub> =2,97 => P=67	za T <sub>c</sub> =2,97 => P=58,5	za T <sub>c</sub> =2,97 => P=48
	za T <sub>c</sub> =4,62 => P=75	za T <sub>c</sub> =4,62 => P=66	za T <sub>c</sub> =4,62 => P=55
	za T <sub>c</sub> =5 => P=76,5	za T <sub>c</sub> =5 => P=67,4	za T <sub>c</sub> =5 => P=56
	za T <sub>c</sub> =6 => P=80,2	za T <sub>c</sub> =6 => P=71	za T <sub>c</sub> =6 => P=59,25
Vrijednost efektivne oborine (mm)	za P=67 => P <sub>e</sub> =16,7	za P=58,5 => P <sub>e</sub> =12,3	za P=48 => P <sub>e</sub> =7,65
	za P=75 => P <sub>e</sub> =18,6	za P=66 => P <sub>e</sub> =13,8	za P=55 => P <sub>e</sub> =8,73
	za P=76,5 => P <sub>e</sub> =19,1	za P=67,4 => P <sub>e</sub> =14,2	za P=56 => P <sub>e</sub> =9,1
	za P=80,2 => P <sub>e</sub> =20,1	za P=71 => P <sub>e</sub> =14,9	za P=59,3 => P <sub>e</sub> =9,5
Koeficijent otjecanja	0,25	0,21	0,16
Broj CN krivulje	71		

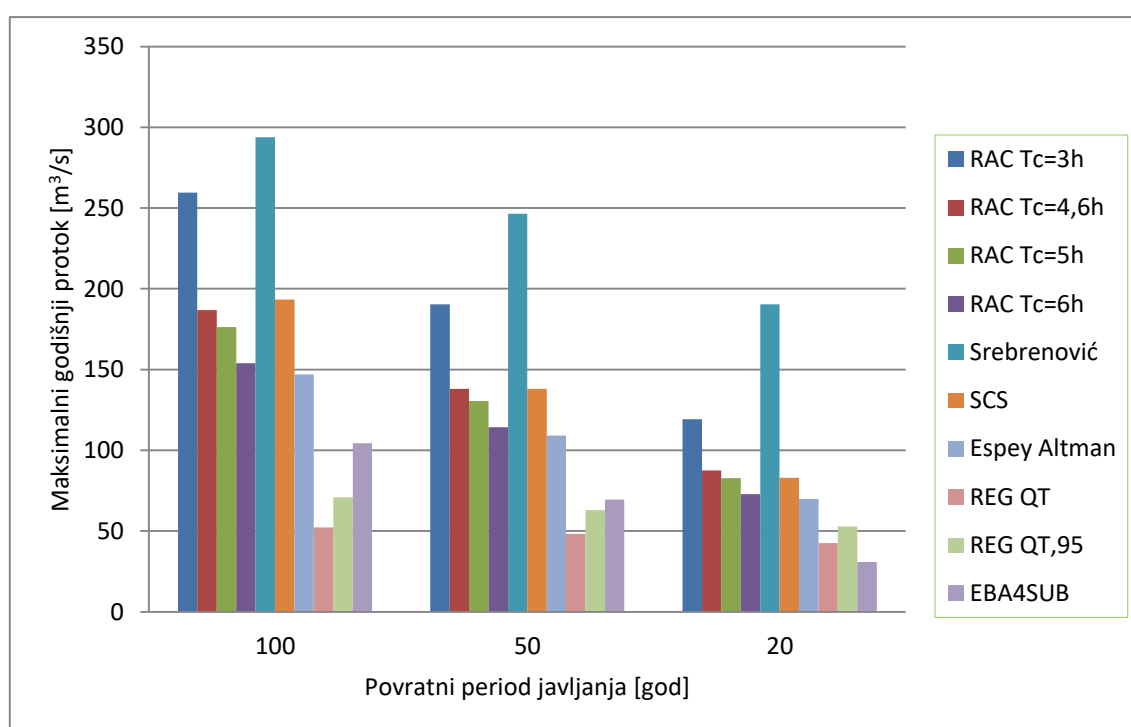
U Tablici 6 prikazani su rezultati proračuna velikih voda za sliv rijeke Bistrice prema metodi regionalnih analiza i prema empirijskim izrazima, na temelju značajki sliva i oborina prikazanih u prethodnoj tablici, za različite povratne periode javljanja.

Iz Tablice 6. može se vidjeti kako su vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka određene metodom regionalne analize značajno manje u odnosu na vrijednosti određene drugim empirijskim metodama za sve povratne periode (i do 5 puta). Sve navedene iskustvene formule izvedene su za različita slivna područja i uvjete, čije se značajke otjecanja velikih voda međusobno značajno razlikuju, pa iz tog razloga treba biti oprezan pri korištenju empirijskih izraza. Tome se može pripisati postojanje značajnih razlika u veličinama maksimalnih protoka definiranih na temelju različitih iskustvenih metoda. Kako je regionalna analiza urađena za sliv rijeke Vrbas, velike vode određene ovom metodom trebale bi dati vjerodostojnije rezultate.



Tablica 6. Maksimalni protoci rijeke Bistrice povratnih perioda 20, 50 i 100 godina dobiveni empirijskim izrazima i metodom regionalnih analiza

Metoda	$Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s]		
	100	50	20
Racionalna			
$T_c=2,97$ h	259,56	190,41	119,32
$T_c=4,62$ h	186,90	138,14	87,46
$T_c=5$ h	176,26	130,48	82,73
$T_c=6$ h	153,94	114,31	72,78
Srebrenovićeva	293,81	246,48	190,40
SCS	193,35	138,11	82,87
Espey – Altman	146,98	109,04	69,88
Regionalna analiza $1Q_T = aF_{sl}^b$	52,30	48,31	42,50
Regionalna analiza $2Q_T^{95} = aF_{sl}^b$	70,81	62,94	52,86



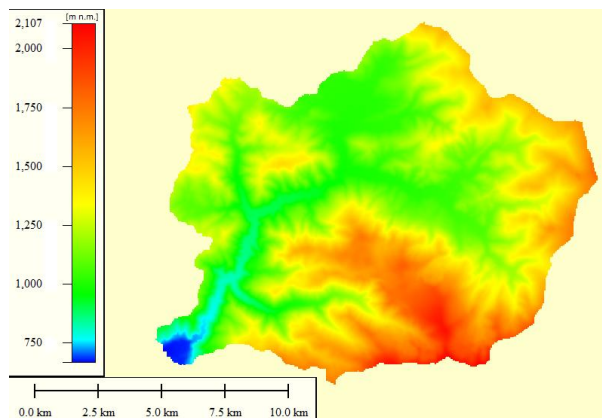
Slika 2. Usporedni prikaz maksimalnih godišnjih protoka prema empirijskim metodama, regionalnim analizama i EBA4SUB modelu za odabrane povratne periode

Zbog nedostatka podataka nije bilo moguće uraditi kalibraciju i verifikaciju modela rijeke Bistrice. U svrhu ocjene hidrološkog modela EBA4SUB odabrana su dva hidrološki izučena profila na rijeci Vrbas (VS Gornji Vakuf i VS Daljan) za koje je moguće provesti statističku analizu i odrediti vrijednosti velikih voda metodom godišnjih ekstrema.

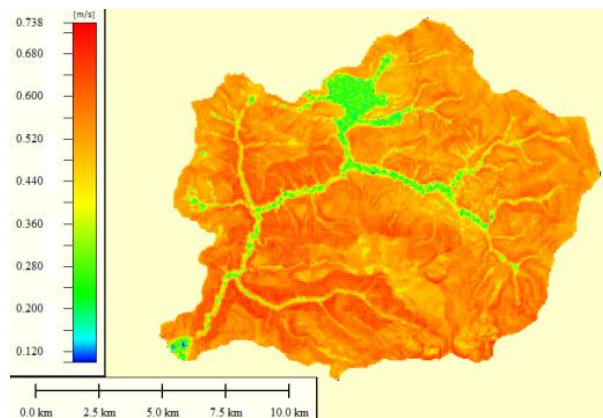
Za potrebe EBA4SUB softvera, na raspolaganju je bio 20 metarski DEM terena sliva rijeke Bistrice (Slika 3), te 100 metarski DEM za VS Gornji Vakuf i VS Daljan, a tip i način korištenja zemljišta dobiveni su pomoću CORINE Land Cover BiH koji predstavlja digitalnu



bazu podataka o stanju i promjenama zemljišnog pokrivača i namjeni korištenja zemljišta, te PTP dijagrama za kišomjernu stanicu Bugojno.

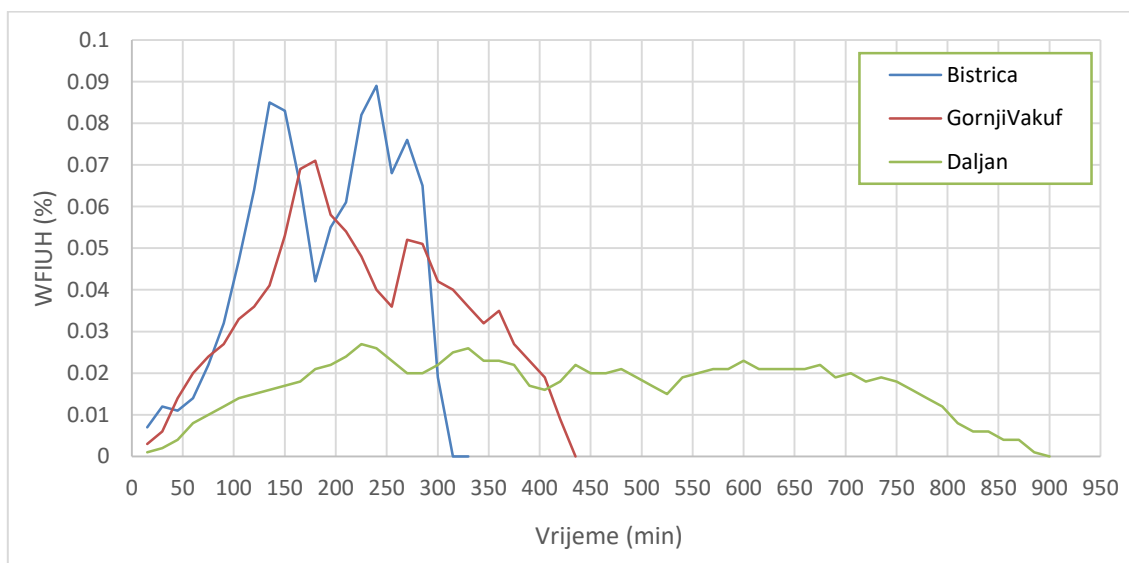


Slika 3. Digitalni model terena sliva rijeke Bistrice



Slika 4. Brzina tečenja po padinama za sliv rijeke Bistrice

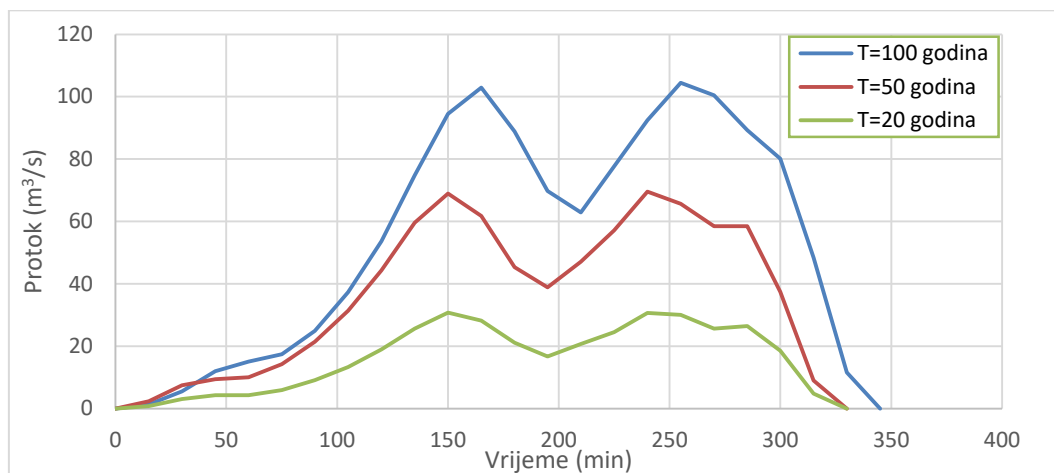
Nakon definiranih brzina tečenja po toku i padinama, dobiveni su trenutni geomorfološki jedinični hidrogrami (WFIUH) prema izrazu (5) za sliv rijeke Bistrice i Vrbasa do vodomjernih stanica Gornji Vakuf i Daljan (Slika 5.).



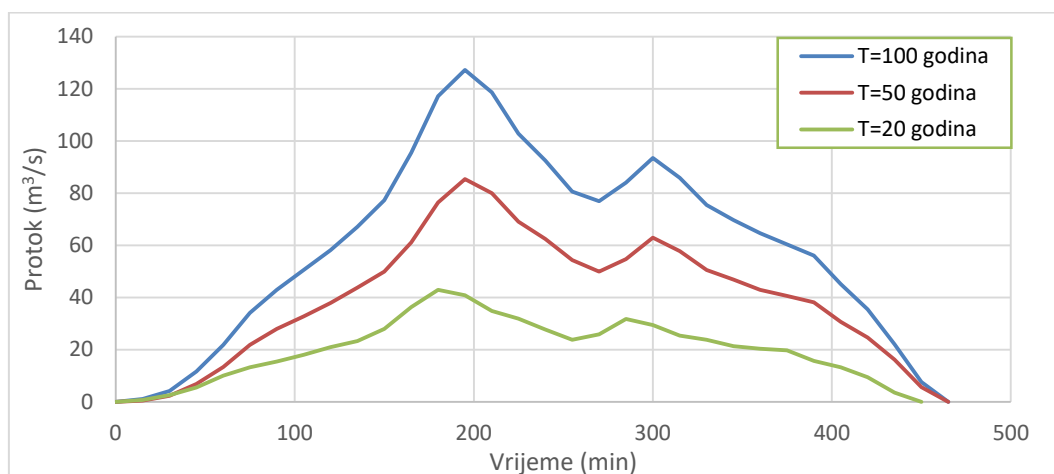
Slika 5. Trenutni geomorfološki jedinični hidrogrami za VS Bistrica, Gornji Vakuf i Daljan

Nakon formiranja trenutnih jediničnih hidrograma pristupilo se izboru oblika hijetograma. U programu EBA4SUB moguće je birati tri modela hijetograma bruto kiše, pravokutni - konstantna kiša, trokutni i Chicago model. Za proračune hijetograma u radu je odabran Chicago model jer se na osnovu iskustva autora pokazao kao model koji dobro opisuje stvarni oblik hijetograma oborina.

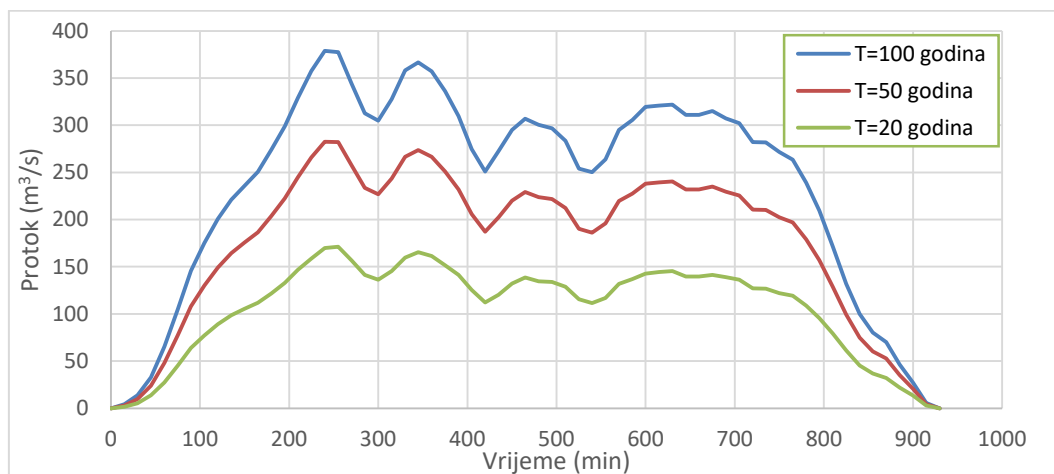
Primjenom izraza (6) određene su velike vode rijeke Bistrice na profilu ušća u Vrbasa, te Vrbasa na profilima VS Gornji Vakuf i VS Daljan. Na Slikama 6., 7. i 8. prikazani su hidrogrami direktnog otjecanja za navedena tri profila dobiveni EBA4SUB hidrološkim modelom za različite povratne periode javljanja.



Slika 6. Hidrogrami maksimalnih protoka različitih povratnih perioda za VS Bistrica



Slika 7. Hidrogrami maksimalnih protoka različitih povratnih perioda za VS Gornji Vakuf



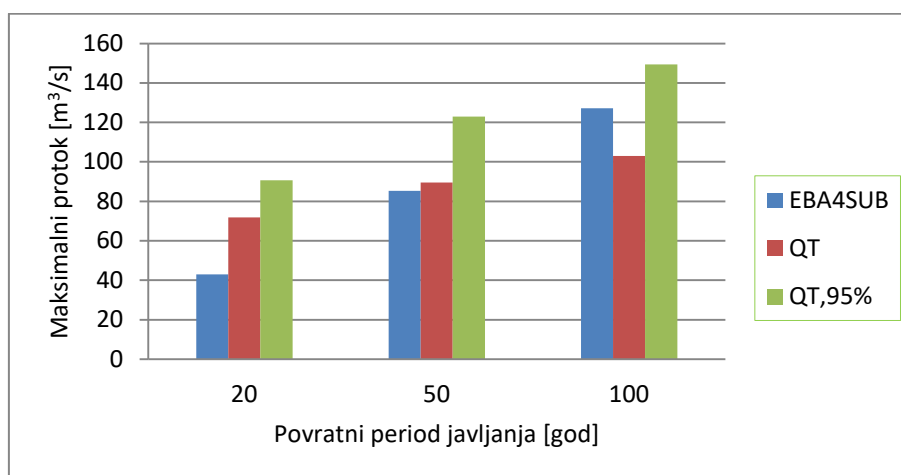
Slika 8. Hidrogrami maksimalnih protoka različitih povratnih perioda za VS Daljan



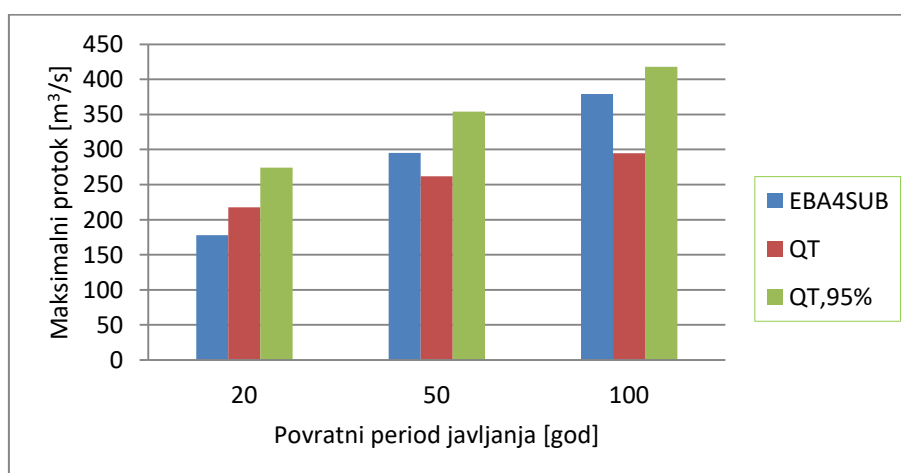
Tablica 7. Vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka  $Q_{\max, \text{god}}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] za navedene povratne periode i profile određene EBA4SUB modelom

PROFIL	Povratni period [god]		
	20	50	100
Bistrica (ušće u rijeku Vrbas)	30,75	69,57	104,46
VS Gornji Vakuf	42,98	85,37	127,15
VS Daljan	178,05	295,11	378,98

Na sljedećim slikama dana je usporedba vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka dobivenih modelom EBA4SUB i statističkom metodom godišnjih ekstrema za profile VS Gornji Vakuf i VS Daljani na vodotoku Vrbas za povratne periode javljanja 20, 50 i 100 godina.



Slika 9. Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih perioda na VS Gornji Vakuf prema modelu EBA4SUB i prema metodi godišnjih ekstrema



Slika 10. Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih perioda na VS Daljani prema modelu EBA4SUB i prema metodi godišnjih ekstrema





## 6. ZAKLJUČAK

Definiranje velikih voda najčešće se temelji na dugogodišnjem (mjerodavnom) povijesnom nizu osmatranja i mjerenja protoka uz upotrebu metoda matematske statistike i teorije vjerojatnoće. Nažalost, zbog neadekvatne mreže hidroloških stanica i čestih prekida u njihovom radu, posebno pri nailasku velikih voda, statističke metode nije uvijek moguće koristiti, pa se hidrogrami velikih voda određuju pomoću raznih empirijskih formula i hidroloških modela.

U radu je korišteno nekoliko empirijskih metoda za određivanje velikih voda, a na osnovu rezultata koji su dobiveni za rijeku Bistricu uočena su velike razlike u vrijednostima određenih protoka, do nekoliko puta. Tako se primjenom racionalne formule, uobičajene za manje slivove, pokazalo kako veliku ulogu igra vrijeme koncentracije sliva, što za posljedicu ima i velike razlike u visinama mjerodavnih kiša, odnosno vrijednostima protoka. Na slivu rijeke Bistrice vršeni su proračuni racionalnom metodom za trajanja kiše od 3 do 6 sati, a razlike u protocima iznose i do 70% za razmatrane povratne periode.

Kako bi se izbjegla osjetljivost rezultata na vrijednost vremena koncentracije sliva i koeficijenta otjecanja izvršen je proračun velikih voda rijeke Bistrice metodom geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma, koji zahtijeva digitalni model terena i namjenu zemljišta (ili procjenjenu osrednjenu vrijednost). Dobiveni rezultati trebali bi biti manje osjetljivi na subjektivnost obrađivača i izbor parametara.

Usporedbom rezultata za sliv Bistrice ustanovilo se da EBA4SUB daje protoke koji su najbliži vrijednostima protoka odgovarajućih povratnih perioda dobivenih regionalnim analizama izvedenim za sliv rijeke Vrbas, a kojim bi se inače trebala dati prednost nad razmatranim empirijskim metodama.

Budući da se zbog nedostatka podataka na rijeci Bistrici nije mogla provesti statistička analiza maksimalnih godišnjih protoka, za dodatnu kontrolu modela EBA4SUB poslužila su dva hidrološki izučena profila na rijeci Vrbas, VS Gornji Vakuf i VS Daljan. Usporedbom rezultata uočavaju se dobra slaganja modela EBA4SUB sa metodom godišnjih ekstrema. Pogotovu se to odnosi na veće povratne periode, 50 i 100 godina, dok za povratni period od 20 godina EBA4SUB daje manje vrijednosti, posebno na VS Gornji Vakuf. Razlog tome može se tražiti u činjenici da EBA4SUB daje hidrograme direktnog otjecanja, a metoda godišnjih ekstrema uzima u obzir i bazno otjecanje, što generalno može imati veći utjecaj pri nižim vrijednostima protoka, odnosno za manje povratne periode. Bolje slaganje moglo bi se dobiti dodatnim analizama, odnosno kalibracijom parametara modela EBA4SUB, što ovdje nije urađeno budući da se željela pokazati mogućnost korištenja modela za neizučene slivove na kojima i nije moguće vršiti kalibraciju.

## LITERATURA

1. Prskalo G., Hrelja H.: *Geomorfološki trenutni jedinični hidrogram kao osnova za definiranje poplavnih voda na neizučanim slivovima*, Hrvatske vode, 2007. godine, 15, 61, str. 261-272
2. Piscopia R., Petroselli A., Grimaldi S.: *A software package for predicting design flood hydrographs in small and ungauged basins*, Journal of Agricultural Engineering, 2015. godine, 46, 2
3. Grimaldi S., Petroselli A.: *Do we still need the rational formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins*, Hydrological Sciences Journal, 2015. godine, 60, 1
4. Žugaj R.: *Velike vode malih slivova*, Zagreb 2010. godine
5. Hrelja H.: *Inženjerska hidrologija*, Građevinski fakultet u Sarajevu, Sarajevo 2007. godine