

MOGUĆNOSTI ZA PRIMENU KALIBRISANOG HIDROLOŠKOG MODELA EPIZODA ZA PRORAČUN RAČUNSKIH VELIKIH VODA

Ranka ERIĆ¹, Jasna PLAVŠIĆ², Andrijana TODOROVIĆ², Vesna ĐUKIĆ¹

¹Univerzitet u Beogradu – Šumarski fakultet

²Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

REZIME

Pouzdanost procene velikih voda su veoma važne za dimenzionisanje hidrotehničkih objekata i od presudne su važnosti sa gledišta ekonomičnosti izgradnje, kao i sa stanovišta sigurnosti ovih objekata. U ovom radu analizirane su ocene računskih velikih voda na slivu reke Obnice dobijene primenom kalibrisanog hidrološkog modela sa različitim računskim kišama. Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima statističke analize maksimalnih godišnjih protoka na profilu Belo polje na reci Obnici. Analizirani su uticaji trajanja i oblika računске kiše, kao i početnih gubitaka na pouzdanost ocene računskih velikih voda na slivu reke Obnice. Rezultati su pokazali da izbor parametara modela u kalibraciji ima najveći uticaj na pouzdanost ocene velikih voda.

Cljučne reči: računске velike vode, računске kiše, hidrološki modeli epizoda, neizučeni slivovi

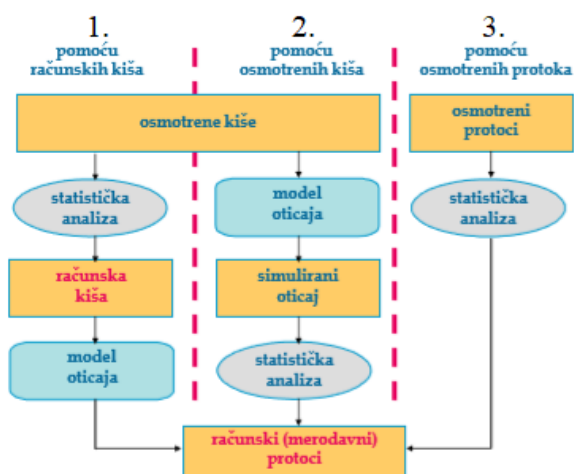
1. UVOD

Analize jakih kiša i velikih voda su važne za hidrološke i vodoprivredne analize. Cilj analize velikih voda je pouzdana procena merodavnih protoka za projektovanje objekata i sistema zaštite ili ocenu verovatnoće pojave kritičnih događaja [6]. U opštem slučaju, postoji nekoliko metoda za proračun merodavnih velikih voda, koje se mogu klasifikovati kao statističke, determinističke i kombinacija ova dva pristupa (slika 1) [14]. Odabir metode za proračun velikih voda zavisi prevashodno od raspoloživih podataka: osmotrenih protoka ili padavina.

Na izučenim slivovima, gde postoje osmatranja protoka na profilu od interesa, merodavne velike vode se dobijaju primenom statističke analize [15], [16]. U praksi se

najčešće analiziraju nizovi maksimalnih godišnjih protoka [10]. Za proračun merodavnih velikih voda može se koristiti i nešto složenija metoda pikova, koja uzima u obzir sve velike vode iznad zadate vrednosti (praga) i koja se smatra pouzdanijom u odnosu na metodu godišnjih maksimuma [11], [12]. S obzirom da zahteva dugačke i pouzdane nizove osmatranja protoka, primena statističke analize je ograničena na izučene slivove.

Deterministički pristup za određivanje merodavnih velikih voda može da podrazumeva korišćenje hidroloških modela epizoda, koji simuliraju poplavne talase na osnovu računskih kiša. Računske kiše su hipotetičke kišne epizode koje treba da odražavaju karakteristike realnih kišnih epizoda na datoj lokaciji, uključujući ukupnu visinu kiše, raspored intenziteta kiše u vremenu i prostorni raspored [6]. Ukupna visina kiše zavisi od trajanja kiše i verovatnoće pojave, što se prikazuje zavisnostima visina – trajanje – povratni period kiše (HTP) [6]. Pored ukupne visine, računска kiša se karakteriše i oblikom hijetograma. Računska kiša može imati konstantan intenzitet tokom svog trajanja (tzv. blok kiša), ili može biti neravnomernog intenziteta, pri čemu oblik hijetograma može biti statistički ili sintetički. Statistički hijetogrami se određuju na osnovu statističke analize osmotrenih kiša, dok se sintetički oblici određuju primenom npr. metode naizmeničnih blokova [10]. S obzirom da ne zahteva nizove osmotrenih protoka, ovaj pristup se najčešće primenjuje za procenu merodavnih velikih voda na neizučenim slivovima [4], [10]. Ovaj pristup se takođe primenjuje i na izučene slivove jer daje kompletne hidrograme velikih voda, za razliku od statističke analize koja daje samo vrednosti vršnog protoka [14]. U osnovi ovog pristupa je pretpostavka da je povratni period velikih voda isti kao povratni period računске kiše. Zbog nelinearne i nejednoznačne veze između padavina i oticaja, uvek postoji sumnja u opravdanost ove pretpostavke [6].



Slika 1. Pristupi određivanja merodavnih velikih voda; 1. deterministički, 2. kombinovani, 3. statistički

Treći pristup je kombinacija prethodna dva i podrazumeva statističku analizu niza maksimalnih protoka dobijenih pomoću kontinualnih hidroloških modela i osmotrenih kiša [17].

Sva tri pristupa imaju svoje prednosti i mane, i ne postoji konsenzus oko pristupa proračunu merodavnih velikih voda, posebno na neizučenenim slivovima. Stoga je ovo pitanje aktuelno i predmet je mnogobrojnih naučnih istraživanja. Rogger i saradnici (2012) su određivali merodavne velike vode primenom statističkog i determinističkog pristupa. Pokazali su da deterministički pristup u nekoliko slučajeva precenjuje vrednosti protoka u odnosu na merodavne velike vode dobijene statističkom analizom. Takođe, ukazali su da oticaj u velikoj meri zavisi od karakteristika sliva i karakteristika kiše, kao i da je važno proceniti dominantnu komponentu oticaja [14]. Grimaldi i saradnici (2012) ukazuju da hidrološki modeli epizoda potcenjuju trajanje i zapreminu hidrograma, kao i da prednost treba dati kontinualnim hidrološkim modelima. Sa druge strane, neka istraživanja pokazuju da kontinualni modeli potcenjuju velike vode [7].

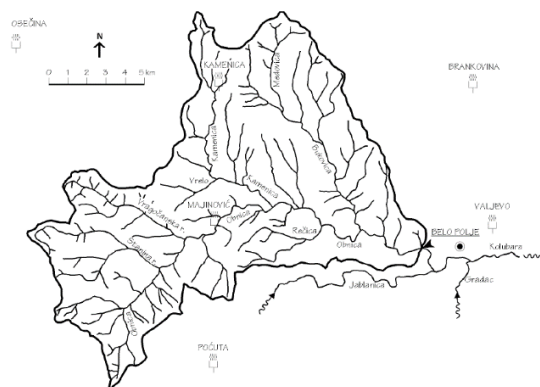
U ovom radu se razmatra pouzdanost primene determinističkog pristupa za neizučene slivove na primeru jednog izučenog sliva. Poređene su računске velike vode na slivu reke Obnice dobijene primenom statističkog i determinističkog pristupa. Formiran je HEC-HMS hidrološki model epizoda za sliv reke Obnice, koji je primenjen sa računskim kišama. Analiziran je uticaj trajanja i oblika računskih kiša, kao i vrednost početnog gubitka za proračun efektivnih kiša, na dobijene računске protoke

velikih voda. Na osnovu poređenja rezultata determinističkog pristupa sa rezultatima statističke analize, koji se smatraju referentnim, dati su i zaključci u vezi sa primenom kalibrisanih modela epizoda sa računskim kišama za proračun merodavnih velikih voda.

2. METODOLOGIJA

2.1 Opis sliva i podaci

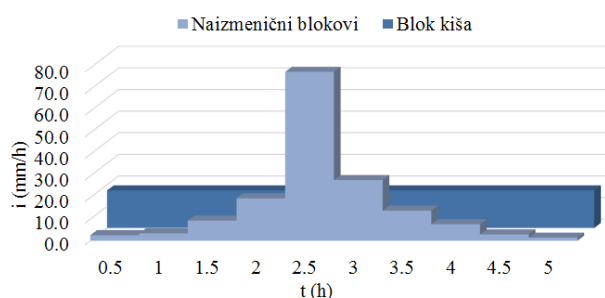
Reka Obnica pripada slivu reke Kolubare, gde učestalost poplava ukazuje da je neophodno unaprediti zaštitu od velikih voda, što zahteva pouzdanije procene velikih voda. U okviru ovog rada analiziran je sliv reke Obnice do vodomerne stanice Belo Polje (slika 2). Površina sliva do stanice Belo Polje iznosi 185 km² [9]. Nadmorske visine na slivu se kreću od 200-300 mnm u aluvijalnim dolinama reke do 1100-1300 mnm u višim delovima sliva. Dužina reke Obnice iznosi oko 25 km, a prosečan nagib glavnog toka iznosi 2.61 %. Veći deo površine sliva je prekriveno propusnim površinama (livade, šume, voćnjaci, i sl.), a manji deo razmatranog sliva zauzimaju goleti i urbanizovane površine [2]. Pri kalibraciji modela u okviru HEC-HMS-a, procenjena vrednost hidrološkog broja CN za sliv reke Obnice iznosi 78.45.



Slika 2. Sliv reke Obnice do stanice Belo polje [9]

Od podataka koji su potrebni za formiranje računskih kiša na raspolaganju je bila zavisnost HTP za Valjevo za period do 2006. godine [13].

Formirane su računске kiše povratnog perioda 20, 50 i 100 godina, sa oblikom blok kiše (kiša konstatnog intenziteta) i prema metodi naizmeničnih blokova (kiša promenljivog intenziteta). Trajanje kiše je varirano od 2.4 do 24 h. Na slici 3 dat je primer kiše povratnog perioda od 20 godina i trajanja $t_k = 5$ h.



Slika 3. Računske kiša (oblika naizmeničnih blokova i blok kiša) za trajanje kiše 5 h i povratnog perioda 20 godina.

Tabela 1. Računske velike vode na slivu reke Obnice dobijene statističkom analizom izmerenih protoka [10]

<i>T</i> (god.)	20	50	100
Q_T (m ³ /s)	146.3	198.8	246.2

Takođe, za potrebe ovog rada na raspolaganju su bili i rezultati statističke analize serije opaženih maksimalnih godišnjih protoka na profilu Belo polje [10], odakle su izdvojene vrednosti za povratne periode 20, 50 i 100 godina (tabela 1).

2.2 Hidrološki model sliva reke Obnice

Za potrebe ovog istraživanja formiran je hidrološki model epizoda primenom javno dostupnog softverskog paketa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) [3]. HEC-HMS se često koristi za hidrološko modeliranje zbog svoje jednostavnosti i fleksibilnosti. Naime, HEC-HMS omogućava izradu hidroloških modela različitog stepena složenosti, u smislu hidroloških procesa, odnosno komponenti koje se simuliraju i metoda za proračun komponenti. HEC-HMS omogućava izradu modela za kontinualne hidrološke simulacije i modele epizoda, kao i prostorno homogene, semi-distribuirane i prostorno distribuirane modele.

U okviru ovog rada razvijen je model epizoda za sliv reke Obnice namenjen modeliranju oticaja od izolovanih poplavnih događaja. S obzirom da je površina ovog sliva relativno mala i sa relativno homogenom namenom zemljišta [2], razvijen je prostorno homogen model.

Razvijeni HEC-HMS model epizoda simulira infiltraciju, odnosno gubitke i efektivnu kišu (zapreminu direktnog oticaja), i transformaciju efektivne kiše u direktni oticaj. S obzirom da je model namenjen simulacijama talasa velikih voda tokom kojih dominira direktni oticaj, bazni oticaj je izostavljen iz modela. Intercepcija, povr-

šinsko zadržavanje vode, topljenje snega i evapotranspiracija su zanemareni jer je u pitanju model epizoda.

Za proračun zapremine direktnog oticaja odabrana je SCS-CN metoda, koja se često koristi u inženjerskoj praksi. Transformacija efektivne kiše u direktni oticaj je simulirana Klarkovim jediničnim hidrogramom, koji je odabran zbog malog broja parametara i velike fleksibilnosti [3].

Metodu SCS-CN za proračun funkcije gubitaka je razvila Američka agencija Soil Conservation Service (SCS). Ova metoda se oslanja na pretpostavku da je odnos stvarne visine efektivne kiše P_e (tj. oticaj) i potencijalne efektivne kiše ($P-I_a$) jednak odnosu stvarne količine vode upijene u zemljište nakon početka oticaja F_a i maksimalnog retenzionog kapaciteta tla d [1]:

$$\frac{P_e}{P-I_a} = \frac{F_a}{d} \quad (1)$$

Kombinovanjem gornje jednačine sa jednačinom kontinuiteta:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2)$$

dobija se:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+d} = \frac{(P-\lambda d)^2}{P-(\lambda-1)d} \quad (3)$$

gde se početni gubitak obično izražava pomoću faktora λ :

$$I_a = \lambda d \quad (4)$$

dok se kapacitet tla za upijanje d dovodi u vezu sa brojem krive CN:

$$d = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Vrednost broja krive CN zavisi od namene i tipa zemljišta, i njegove prethodne vlažnosti [1]. Za početni gubitak I_a se smatra da uključuje intercepciju, površinsko zadržavanje vode i infiltraciju kiše pre formiranja oticaja, a procenjuje se kao deo maksimalnog retenzionog kapaciteta tla. Vrednosti CN-a za prosečne prethodne uslove koje se navode u literaturi odnose se na vrednosti od $\lambda = 0.2$ [18]. Međutim, treba napomenuti da literatura predlaže da λ vrednosti treba da se procene iz osmotrenih padavina i oticaja, ako su dostupni [6,14]. SCS metoda u HEC-HMS-u uključuje sledeće parametre: početni gu-

bitak I_{os} , broj krive CN i udeo nepropusnih površina na slivu [3].

Transformacija efektivnih padavina u direktni oticaj sa sliva je simulirana pomoću Klarkovog jediničnog hidrograma. Ova metoda simulira translaciju oticaja do izlaznog profila sliva pomoću zavisnosti vreme-površina, a ublaženje oticaja simulira metodom linearnog rezervoara, koja objedinjuje jednačinu kontinuiteta (6) i jednačinu linearnog rezervoara (7):

$$\frac{dV(t)}{dt} = U(t) - I(t) \quad (6)$$

$$V(t) = R \cdot U(t) \quad (7)$$

gde je $U(t)$ dotok, $I(t)$ izlaz iz linearnog rezervoara u trenutku t , $V(t)$ zapremina u rezervoaru u trenutku t i R je konstanta linearnog rezervoara. Klarkova metoda u HEC-HMS-u ima dva parametra: vreme koncentracije t_c i konstantu linearnog rezervoara R .

Kalibracija modela predstavlja podešavanje parametara modela s ciljem da se dobije što bolje poklapanje osmotrenog i simuliranog hidrograma. U ovom radu kalibracija je urađena na osnovu četiri poplavna talasa osmotrena na slivu reke Obnice. Parametri su podešavani ručno, a da su pri tome približno podjednako zadovoljeni uslovi fizičke opravdanosti vrednosti parametara i efikasnosti modela u reprodukcivanju osmotrenih hidrograma. Efikasnost modela predstavljena je pomoću Nash-Sutcliffe koeficijenta (NS), greške u maksimumu hidrograma (ε_m), greške u zapremini oticaja (ε_v) i greške u vremenu pojave maksimuma hidrograma (ε_t). Koeficijent Nash-Sutcliffe glasi:

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{\sigma_{osm}^2} \quad (8)$$

gde su: N – broj podataka u nizu, $Q_{sim,i}$ – simulirani protok, $Q_{osm,i}$ – osmotreni protok i σ_{osm} – standardna devijacija osmotrenih protoka. Vrednosti koje uzima koeficijent Nash-Sutcliffe su od $-\infty$ do 1: 1 je idealno slaganje, dok vrednosti manje od nule ukazuju da je model neprihvatljivo loš. Greška u maksimumu hidrograma se računa pomoću sledećeg izraza:

$$\varepsilon_m = \frac{Q_{sim} - Q_{osm}}{Q_{sim}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Greška u zapremini je definisana prema sledećem izrazu:

$$\varepsilon_v = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{sim}} \cdot 100\% \quad (10)$$

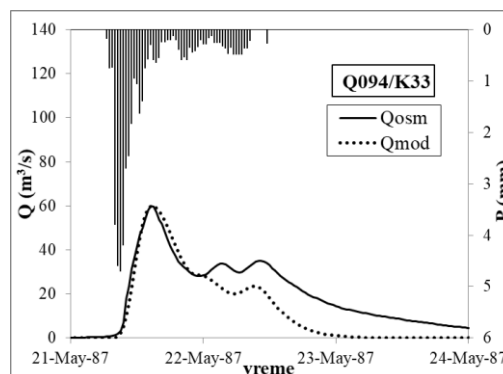
gde su V_{sim} i V_{osm} zapremine simuliranog i osmotrenog hidrograma oticaja. Greška u vremenu pojave pika hidrograma je definisana prema sledećem izrazu:

$$\varepsilon_t = t_{sim} - t_{osm} \quad (11)$$

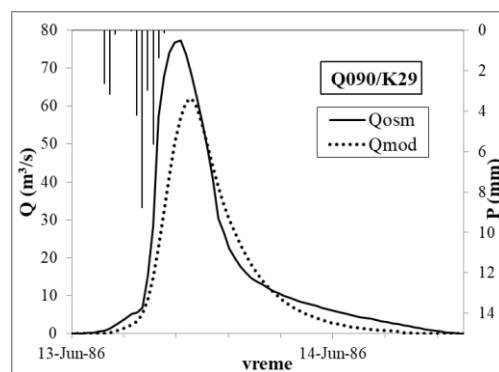
gde su t_{sim} i t_{osm} vremena pojave maksimuma simuliranog i osmotrenog hidrograma oticaja. Po određivanju parametara koji daju najbolja slaganja pojedinih simuliranih talasa sa merenjima, optimalna grupa parametara je određena osrednjavanjem vrednosti parametara od četiri epizode koje su učestvovala u kalibraciji.

Validacija modela obuhvata simulaciju modela sa optimalnim skupom parametara na osnovu pet talasa koji nisu učestvovali u kalibraciji.

Primeri kalibrisanog i testiranog hidrograma su prikazani na narednim graficima (slike 4 i 5).



Slika 4. Osmotreni i modelirani hidrogram - kalibracija



Slika 5. Osmotreni i modelirani hidrogram - validacija

2.3 Proračun velikih voda sa računskim kišama

Sa prethodno kalibrisanim modelom epizoda sliva reke Obnice, kao ulaz u model korišćena su dva oblika računskih kiša:

- računске kiše konstantnog intenziteta (blok kiše) i
- računске kiše oblika naizmeničnih blokova.

Za oba tipa analizirana su različita trajanja kiše, koja se kreću od 2.4 do 24 h, sa korakom diskretizacije od 2.4 h. Hijetogrami su formirani za tri visine kiše koje odgovaraju povratnom periodu od 20, 50 i 100 godina, tako da je formirano po 30 epizoda za svaki oblik kiše.

Pored toga, u toku simulacija sa računskim kišama varirana je vrednost i parametra I_a koji predstavlja početni gubitak u SCS metodi. Za kalibrisanu vrednost broja CN za sliv reke Obnice od 78.45, korišćenjem izraza (5) dobijena je vrednost kapaciteta zemljišta od $d = 70$ mm. U toku simulacija korišćene su vrednosti početnog gubitka od $0.1d$, $0.2d$ i $0.3d$, iliti 7, 14 i 21 mm.

U skladu sa navedenim, za svaki povratni period izvršeno je ukupno 60 simulacija, i to za dva oblika kiše, 10 trajanja kiše i tri različite vrednosti početnog gubitka. Dobijenih 60 simuliranih maksimalnih protoka se pored sa računskim protokom odgovarajućeg povratnog perioda koji je određen statističkom analizom opaženih vrednosti protoka (tabela 1).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Simulirane vrednosti maksimalnih protoka za jedan povratni period zavise od oblika, trajanja i vrednosti početnog gubitka. Rezultati su prikazani na dijagramima na slici 6 posebno za dva oblika kiše, dok ravna linija na svakom dijagramu predstavlja računsku veliku vodu dobijenu statističkom analizom (kao kvantili prema uopštenoj raspodeli ekstremnih vrednosti ili GEV raspodeli).

Prikazani grafici (slika 6) ukazuju da su računске velike vode u slučaju računске kiše sa naizmeničnim blokovima uvek precenjene u odnosu na velike vode dobijene statističkom analizom, bez obzira na trajanje i na početni gubitak. Najveće velike vode dobijaju se za trajanje kiše od 9.6 – 12 h, ali su značajno precenjene u odnosu na referentne vrednosti. U slučaju blok kiše koja ima konstantan intenzitet, za trajanje kiše od 4.8 h dobijaju se najveće računске velike vode, koje su takođe precenjene u odnosu na referentne vrednosti dobijene statističkom analizom. Najbolja podudaranja sa statističkim

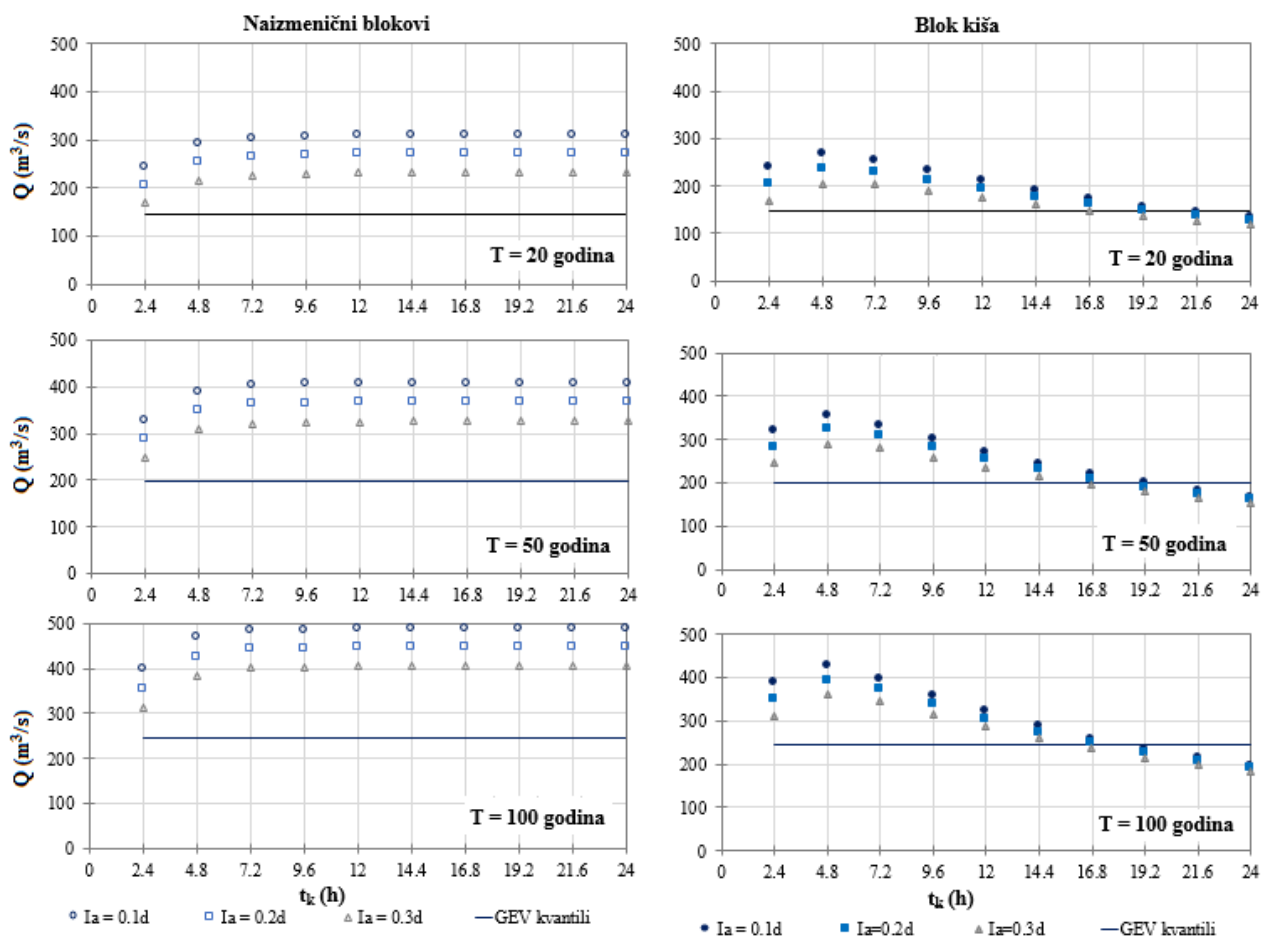
računskim velikim vodama su simulirane velike vode sa blok kišom za trajanja 16.8 – 19.2 h.

U poređenju sa rezultatima drugih istraživanja na slivu reke Obnice [5, 10] dobijeni rezultati se razlikuju u pogledu računskih velikih voda, kao i u pogledu njihovog odnosa sa referentnim statističkim vrednostima. U radu [5] je razvijen model epizoda za sliv Obnice koji koristi SCS metodu za gubitke i Snajderov jedinični hidrogram i koji je kalibrisan na drugačijim epizodama u odnosu na ovaj rad. U radu [10] korišćena je SCS metoda za gubitke i dva različita sintetička jedinična hidrograma. Vrednosti parametara kao što su CN i t_c usvojene u ovom radu se razlikuju od onih u radu [5] i radu [10]. Naime, u oba rada su dobijene skoro duplo veće vrednosti za merodavno trajanje kiše (kreću se od 9 - 12 h), u odnosu na ono koje je dobijeno u okviru ovog rada. Na osnovu toga, primećuje se podudaranje vrednosti merodavnog trajanja kiše koje je dobijeno simulacijama sa računskom kišom oblika naizmeničnih blokova u ovom radu, i iznosi oko 9.6 – 12 h. Što se tiče CN broja, u literaturi [9] usvojena je vrednost CN za uslove prosečne vlažnosti od 72.7. U radu [10] usvojeno je CN = 71 za uslove prosečne vlažnosti, a za uslove velike vlažnosti CN = 86. Vrednost CN broja dobijena kalibracijom u ovom radu iznosi 78.45 i približno odgovara uslovima između prosečne i velike prethodne vlažnosti, dok vrednost CN broja od 87.7, koja je dobijena kalibracijom u radu [5], više odgovara uslovima velike vlažnosti. Posledica različitih usvojenih tj. kalibriranih parametara jesu i različiti jedinični hidrogrami, a time i računski hidrogrami velikih voda. Stoga su dobijene računске velike vode u okviru ovog rada mnogo veće nego u radovima [5] i [10].

4. ZAKLJUČAK

Poređenjem računskih velikih voda dobijenih putem statističke analize i modela epizoda, nameću se sledeći zaključci:

- Maksimalni protoci dobijeni pomoću modela epizoda daju precenjene vrednosti u odnosu na protoke dobijene statističkom analizom.
- Kod kiše oblika naizmeničnih blokova trajanje kiše ne utiče na povećanje računске velike vode, koja ostaje konstantna za trajanja veća od 6 h. U skladu sa tim, nameće se zaključak da se prema metodi naizmeničnih blokova merodavno trajanje kiše kreće u rasponu 9.6 – 12 h. Validnost ovog zaključka je uslovna, jer su računске velike vode dobijene sa kišama oblika naizmeničnih blokova u velikoj meri precenjene.



Slika 6. Poređenje merodavnih protoka dobijenih pomoću modela epizoda, (sa računskim kišama konstantnog i promenljivog intenziteta), i pomoću statističke analize

- Prema rezultatima sa blok kišom merodavno trajanje kiše, tj. ono koje daje najveće računске velike vode, iznosi 4.8 h, pri kome su računске velike vode znatno precenjene. Najbolje slaganje računskih velikih voda sa kvantilima statističke analize dobija se za trajanje kiše od 16.2 h.
- Početni gubici utiču značajnije na računске velike vode u primeni sa kišama oblika naizmeničnih blokova, dok kod blok kiša manje utiču na računске velike vode, posebno za duža trajanja kiše.
- Poređenjem dobijenih rezultata sa rezultatima iz radova [5] i [10] uočava se velika razlika u dobijenim računskim velikim vodama. U odnosu na rad [5], pretpostavlja se da su razlike posledica različitih struktura modela, tj. različitih metoda koje su korišćene za transformaciju padavina u oticaj, kao i različitih kalibrisanih parametara. U tome se ogleda veli-

- ka neizvesnost i problemi u kalibraciji modela epizoda. Naime, za isti sliv se koristi jedan model, a dobiju se različite vrednosti parametara koje predstavljaju važne karakteristike sliva, a da pri tome u svakom od slučajeva ocene efikasnosti modela budu zadovoljavajuće. To ukazuje da kod modeliranja epizoda prethodni uslovi na slivu imaju veliki uticaj na vrednosti parametara, a u velikom broju slučajeva ti podaci nisu dostupni. Pored toga, kod modela epizoda važno je precizirati za koje uslove se rade istraživanja, kako bi se metode i ulazni podaci tome prilagodili.
- U odnosu na rad [10], u kome su korišćene slične strukture modela, ali gde parametri nisu kalibrisani prema merenjima već usvojeni prema inženjerskim preporukama, u ovom radu se takođe javljaju značajne razlike u procenjenim računskim velikim vodama.

To ukazuje da se na primeru sliva reke Obnice, i dalje ne može preporučiti nijedan od ova dva pristupa kao pouzdaniji za ocenu velikih voda na neizučeni slivovima i da su neophodna dalja istraživanja u ovom pravcu.

Zbog ukazanih neizvesnosti u modeliranju epizodnih događaja, preporuka je da se pre svakog modeliranja dobro procene karakteristike sliva i karakteristike kiše, kao i da se odredi dominantna komponenta oticaja, s obzirom da u velikoj meri oticaj zavisi od njih. Takođe, preporučuju se dodatne analize sa drugim oblicima računskih kiše kako bi se potvrdili dobijeni rezultati ili čak dobila bolja slaganja sa rezultatima statističke analize.

LITERATURA

- [1] Chow V. Te, Maidment D. R. and Mays L. W.: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [2] Đukić V.: Matematičko modeliranje oticaja podzemnih voda sliva reke Kolubare, *Vodoprivreda*, 38, pp. 265-280, 2006.
- [3] Feldman, A. D.: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.
- [4] Grimaldi S., Petroselli A. and Serinaldi F.: Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach, *Hydrological Processes*, Vol. 26, 2012.
- [5] Ilić A., Plavšić J., Radivojević D.: Rainfall-Runoff simulation for design flood estimation in small river catchments, *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 16(1), pp. 29-43, 2018.
- [6] Jovanović M., Prodanović D., Plavšić J., Rosić N., Srna P. i Miloš R.: Problemi pri izradi karata ugroženosti od poplava, *Vodoprivreda*, pp. 267-272, 2014.
- [7] Mizukami N., Rakovec O., Newman A., Clark M., Wood A., Gupta H., and Kumar R.: On the choice of calibration metrics for “high-flow” estimation using hydrologic models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, pp. 2601–2614, 2019.
- [8] Petroselli A., Grimaldi S. and Romano N.: Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for net rainfall estimation: a case study of the Mignone watershed, IT., *Procedia Environmental Sciences* 19, pp. 113-121, 2013.
- [9] Petrović, J.: Usporedna analiza maksimalnih proticaja na malim rekama metodama parametarske i statističke hidrologije, magistarski rad, Beograd, 1996.
- [10] Plavšić J., Zlatanović N. and Todorović A.: Design storm duration for estimation of floods in ungauged basins, 7th Int. Conf. Contemporary achievements in civil engineering 23-24. April 2019. Subotica, 2019.
- [11] Plavšić, J. i Milutinović, R.: O računskim nivoima vode za zaštitu od poplava na Dunavu kod Novog Sada, *Vodoprivreda*, 42 (1-3), str. 69-78, 2010.
- [12] Plavšić, J.: Neizvesnosti u analizi velikih voda metodom parcijalnih serija, *Vodoprivreda*, 38 (1-3), str. 41-50, 2006.
- [13] Prohaska S., Bartoš-Divac V., Koprivica A.: Intenziteti jakih kiša u Srbiji, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, Beograd, 2014.
- [14] Rogger M., Kohl B., Pirkl H., Viglione A., Komma J., Kirnbauer R., Merz R., Blöschl G.: Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?, *J. Hydrol.*, 456–457: 30–43, 2012.
- [15] Viglione A. and Blöschl G.: On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (2), 205–216, 2009.
- [16] Walega A. and Rutkowska A.: Usefulness of the Modified NRCS-CN Method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment, *Acta Geophysica* vol. 63, pp. 1423-1446, 2015.
- [17] Winter B., Schneeberger K., Dung N.V., Huttenlau M., Achleitner S., Stötter J., Merz B. and Vorogushyn S.: A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 64, No. 5, pp. 539-554, 2019.
- [18] Woodward D. E., Hawkins R. H., Hjelmfelt A. T. J. and Quan, Q. D.: Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio, World Water & Environmental Resources Congress 2003, P. Bizier, and P. DeBarry, eds., ASCE, Philadelphia, Pennsylvania, pp.1-10, 2003.

APPLICABILITY OF CALIBRATED EVENT-BASED HYDROLOGICAL MODEL FOR DESIGN FLOOD ESTIMATION

by

Ranka ERIĆ¹, Jasna PLAVŠIĆ², Andrijana TODOROVIĆ², Vesna ĐUKIĆ¹

¹University of Belgrade – Faculty of Forestry

²University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Summary

Reliable estimates of flood events are very important for the design of hydrotechnical structures and they are crucial in terms of cost-effectiveness of the construction as well as for the safety of these structures. This paper analyses the design flood estimates in the Obnica River basin, obtained by a calibrated hydrological model with different design storms. The obtained results are compared with the results of the statistical analysis of the maximum annual flows of the Obnica River at Belo polje. The effects of the duration and shape of the design

storms, as well as the initial losses, on the reliability of the design flood estimation in the Obnica River basin, are analysed. The results show that the choice of the model parameters within calibration has the greatest influence on the reliability of the design flood estimation.

Key words: design flood events, design rainfalls, hydrological event-based models, ungauged basins

Redigovano 28.10.2019.