

## ODREĐIVANJE HIDROGRAMA VELIKIH VODA ZA POTREBE IZRADA MAPA OPASNOSTI I RIZIKA OD POPLAVA – NA PRIMJERU SLIVA RIJEKE VRBAS, BiH –

Žana TOPALović<sup>1)</sup>, Vujadin BLAGOJEVIĆ<sup>2)</sup>, Nedeljko SUDAR<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Univerzitet u Banjoj Luci – Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet

<sup>2)</sup> Zavod za vodoprivredu, Bijeljina

### REZIME

Određivanje velikih voda određenog povratnog perioda je jedna od najčešćih zadataka u hidrotehničkoj praksi. U većini slučajeva, uglavnom je dovoljno odrediti maksimum proticaja za odgovarajući povratni period odnosno vjerovatnoću pojave. Međutim, u nekim slučajevima je neophodno odrediti cjelokupan hidrogram određene vjerovatnoće pojave sa maksimalnim proticajem, zapreminom oticaja, vremenima podizanja i opadanja odnosno baze hidrograma. U slučaju mapiranja zona opasnosti i rizika od poplava na nekom slivu, potrebe hidrauličkog modela pomoću kojeg se vrši izrada mapa zahtijevaju upravo ovako definisane hidrograme i to na većem broju lokacija na slivu. Zadatak dodatno komplikuje nedostatak osmotrenih podataka u prostornom (broj mjernih stanica na slivu) i vremenskom (dužina osmatranja) smislu.

U ovom radu se prikazuje određivanje hidrograma velikih voda primijenjeno za sliv rijeke Vrbas u Bosni i Hercegovini a za potrebe izrade mapa opasnosti i rizika od poplava. Hidrogrami poplavnih talasa traženih vjerovatnoća pojave su dobijeni upotrebom konceptualnog hidrološkog modela MIKE-NAM u sklopu MIKE Hydro River paketa. Hidrološki model je kalibrisan za potrebe dugotrajnih (kontinualnih) simulacija nakon čega su dobijeni proticaji statistički obrađeni u cilju dobijanja kvantila velikih voda. Model je dalje kalibrisan na karakteristične istorijske poplavne talase te uz pomoć računskih kiša simulacijama kišnih epizoda su dobijeni računski hidrogrami na 45 karakterističnih lokacija. Maksimalni proticaji ovih hidrograma su upoređeni sa kvantilima dobijenim statističkom analizom osmotrenih proticaja i simuliranih u kontinualnom modelu. Rezultati pokazuju uspješnu primjenu hidrološkog modela za određivanje talasa velikih voda odgovarajuće vjerovatnoće pojave.

**Ključne riječi:** kvantili, velike vode, poplave, hidrološki model

### UVOD

Ublažavanje negativnih posljedica od velikih voda je jedan od najvažnijih zadataka koje se postavljaju pred hidrotehniku i vodoprivredu. Od svih prirodnih katastrofa u Evropi, npr. zemljotresi, klizišta, epidemija, poplave i suše, poplave čine 34% (CRED, 2017). Mapiranje poplava smatra se jednim od najvažnijih elemenata upravljanja rizikom od poplava. Evropskom Direktivom 2007/60/EC (European Parliament and the Council of European Union, 2007) o procjeni i upravljanju rizikom od poplava, član 6, zahtijeva se od svih članica priprema mapa opasnosti i mapa rizika od poplava. Mape opasnosti od poplava definišu površinu zahvaćenu poplavama i odgovarajuće dubine/visine vode dok mape rizika prikazuju za zahvaćena područja rizik po stanovništvo, ekonomiju i okoliš. Objе vrste se rade za najmanje tri scenarija: male (ekstremne poplave), srednje i velike vjerovatnoće pojave (European Commission, 2016).

Mape opasnosti od poplava odnosno kartiranje zahvaćenih područja pri različitim scenarijima se vrši, između ostalog uz pomoć hidrauličkog modela. Jedan od glavnih ulaznih podataka u ovaj model su hidrogrami proticaja određenih vjerovatnoća pojave duž riječnih dionica glavnog toka i pritoka za koje se mapiranje vrši.

Metodologija proračuna velikih voda zavisi od potreba, raspoloživih podataka, značaja objekta i sl. Direktno određivanje velikih voda podrazumijeva prilagođavanje osmotrenih proticaja nekoj od odabranih teorijskih funkcija raspodjele odakle se dobijaju proticaji određenog povratnog perioda. Ovo je moguće ukoliko postoje osmotreni proticaji dovoljne dužine i kvaliteta. Indirektno određivanje velikih voda podrazumijeva

poznavanje veze padavine-oticaaj na slivu te osmotrene padavine. U zavisnosti kako se padavine unose u model razlikuju se dva pristupa: (a) osmotreni višegodišnji niz padavina odakle se dobijaju kontinualni nizovi proticaja koji dalje podliježu statističkoj analizi (kontinualni model) i (b) računске kiše dobijene iz statističke analize niza osmotrenih padavina odakle se dobijaju pojedinačni poplavni talasi povratnog perioda koji odgovara povratnom periodu unesene računске kiše (model kišnih epizoda).

Svaki od navedenih pristupa ima svoje prednosti ali i probleme. Zajednički problem je uglavnom nedostatak podataka što komplikuje razvoj i usvajanje robusne metodologije za određivanje poplavnih talasa (Crochet and Þórarinsdóttir, 2014).

Statističkom analizom ocjenjuju se vrijednosti proticaja ili padavina povratnog perioda često mnogo većeg od dužine uzorka (npr. mjerodavni proticaji povratnog perioda 50, 100 ili 500 godina sračunati iz niza trajanja 30 godina). Ove vrijednosti bi trebale biti dopunjene informacijama o rangu neizvjesnosti određenog kvantila (Serinaldi, 2009; Brunner *et al.*, 2016) koja, u zavisnosti od primijenjene metodologije, može biti poprilično velika (Topalović, 2015a). Takođe, uslijed promjene namjene i upotrebe zemljišta ili uslijed klimatskih promjena nije uvijek jednostavno postići homogenost niza podataka za statističku analizu, pa je ponekad potrebno korigovati istorijske podatke o poplavama u odnosu na današnje stanje i uslove (Beighley and Moglen, 2003).

U slučajevima kada se ne raspolaže sa dovoljno osmotrenih podataka na slivu, modeli koji predstavljaju vezu padavine-oticaaj su izuzetno koristan alat. Iako pojedini autori smatraju da se prednost treba dati kontinualnim (npr. nekoliko desetina godina) simulacijama modela u odnosu na model kišnih epizoda (Grimaldi *et al.*, 2012; Pathiraja *et al.*, 2012; Verhoest *et al.*, 2010) ovaj pristup zahtijeva dostupnost pouzdanih i dovoljno dugačkih osmatranja npr. padavina, proticaja, evapotranspiracije, neophodnih za kalibraciju. Kontinualni modeli sa dnevnim padavinama imaju tendenciju da podcjenjuju maksimalne proticaje u odnosu na osmotrene (Viviroli *et al.*, 2009) čime se dobijaju podcijenjeni računski proticaji.

U praksi, dostupni podaci (npr. o padavinama, temperaturama, proticajima) su veoma često nedovoljnog kvaliteta i dužine te se u tim slučajevima primjenjuje model kišnih epizoda koji je jednostavniji za upotrebu te sa manje grešaka i neizvjesnosti (Wagener *et al.*, 2004). Modeliranje pojedinačnih

epizoda sa računskim padavinama podrazumijeva tri osnovne postavke: odabir trajanja i vremenske raspodjele kišne epizode, pretpostavka o prethodnom stanju vlažnosti tla i pretpostavka jednakosti povratnog perioda ulazne računске kiše i dobijenog kvantila proticaja. Iako posljednje nije uvijek prihvatljivo (Adams and Howard, 1986) ima primjera gdje se ipak postižu dovoljno dobra slaganja (Ahn *et al.*, 2014). Viglione *et al.* (2009) su mapirali vezu povratnog perioda padavina i oticaja uzimajući u obzir nekoliko scenarija te uticaj odabira koeficijenta oticaja (kao indirektni pokazatelj prethodnog stanja vlažnosti tla). Zaključili su da je povratni period proticaja  $T_Q$  uvijek niži od povratnog perioda padavina  $T_p$ . Procijenjen kvantil proticaja je niži za 2.8-30%, u zavisnosti od sliva (suv ili vlažan tj. sa generalno niskim odnosno visokim koeficijentom oticaja) i povratnog perioda (za niže povratne periode greška je niža i obrnuto). Mapiranjem veze povratnih perioda padavina i proticaja te uticaja trajanja padavina (Viglione and Blöschl, 2008) došlo se do sličnog zaključka da je  $T_Q / T_p < 1$ .

U ovom radu prikazan je proračun hidrograma velikih voda (HVV) uz pomoć hidrološkog modela simulacijom računskih kišnih epizoda primijenjen na slivu rijeke Vrbas. Rezultujući hidrogrami različitih povratnih perioda na 45 lokacija duž glavnog toka i značajnih pritoka su bili neophodan ulazni podatak za potrebe izrade mapa opasnosti i rizika od poplava. Na raspolaganju su bili veoma oskudni podaci o proticajima na 14 hidroloških stanica i nešto kompletniji podaci o padavinama ali na samo 3 meteorološke stanice na čitavom slivu. Osim podataka na glavnim pritokama Vrbasa (Pliva, Vrbanja), većina manjih pritoka spada u grupu hidrološki neizučenihi slivova, bez osmatranja padavina i proticaja. U svrhu izrade hidrološkog modela korišćen je programski paket MIKE NAM. Model pripremljen za kontinualne simulacije je kalibrisan i validovan sa odabranim periodima dužine 8 i 6 godina, respektivno. Kontinualni model je zatim ručno podešen za kratkotrajne simulacije kišnih epizoda u cilju dobijanja odgovarajućih poplavnih talasa. Simulacijama modela kišnih epizoda sa računskim kišama dobijeni su hidrogrami oticaja velikih voda traženih povratnih perioda. U cilju provjere rezultata, izvršeno je poređenje sa kvantilima dobijenim statističkom analizom osmotrenih proticaja kao i proticaja iz kontinualne simulacije modela.

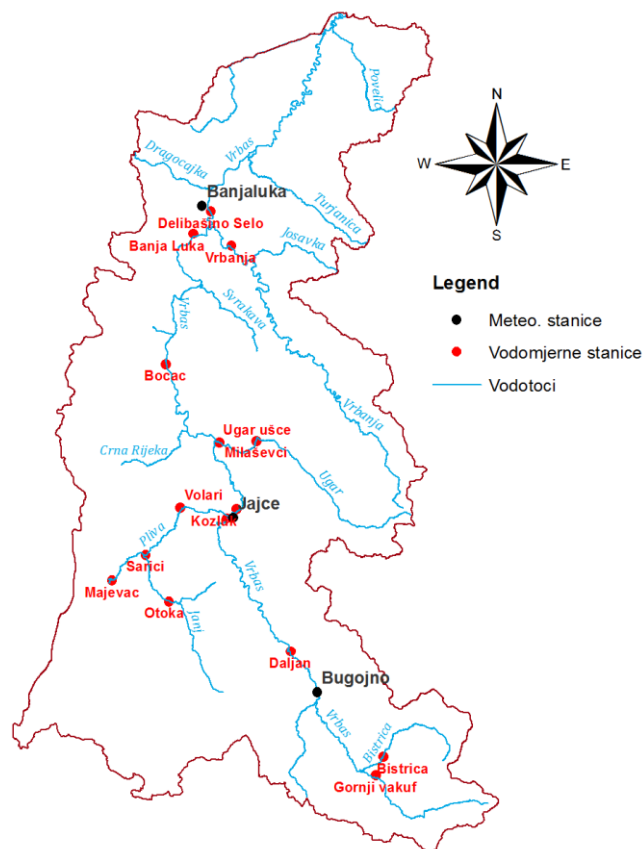
## OPIS SLIVA I PODACI

Rijeka Vrbas se nalazi u Bosni i Hercegovini, desna je pritoka Save i čini 6,7% njenog sliva. Dužina toka je

oko 235km sa površinom sliva od 6273 km<sup>2</sup>. Prosječni proticaj na ušću se procjenjuje na 128 m<sup>3</sup>/s. Vodotok nastaje od dva vrela na Zec-Planini, ogranak Vranice na 1715m nadmorske visine, a uliva se u rijeku Savu kod Srpcu na koti 90 m nadmorske visine, što daje prosječni nagib od oko 6m/km.

Od mjesta gdje nastaje, vodotok je pretežno planinski dok u donjem toku poprima karakteristike ravničarske rijeke.

Raspoloživi podaci na slivu rijeke Vrbas su veoma skromni i po dužini i kontinuitetu. Iako je na raspolaganju bio veliki broj dnevnih podataka sa meteoroloških, padavinskih i vodomjernih stanica, relativno mali broj je mogao biti iskorišćen za potrebe ove studije. Razlog za ovo je uglavnom nepotpunost podataka, kao npr. kratak niz osmatranja, duži niz sa mnogo prekida u osmatranjima, itd. Na Slici 1 predstavljen je sliv Vrbasa sa hidrografijom i meteorološkim i vodomjernim stanicama čiji podaci osmatranja su korišćeni u ovoj studiji.



Slika 1. Sliv rijeke Vrbas sa lokacijama stanica

Pregled raspoloživih podataka na slivu Vrbasa je dat u Tabeli 1. Svi podaci su vremenskog koraka od jednog dana odnosno 24h.

Pored hidroloških i meteoroloških podataka, na raspolaganju je bio digitalni model visina kompletnog sliva tačnosti 5m, Corine2012 karta korišćenja zemljišta te geološka i pedološka karta.

Tabela 1. Pregled raspoloživih podataka na slivu rijeke Vrbas

Meteorološka stanica	Period osmatranja	Periodi bez podataka		
<b>DNEVNE SUME PADAVINA</b>				
Banja Luka	1961-2014	--		
Bugojno	1960-2015	1993-1995		
Jajce	1960-2015	1992-2001, 2011-2014		
<b>SREDNJE DNEVNE TEMPERATURE</b>				
Banja Luka	1961-2014	--		
Bugojno	1961-2014	1993-1995		
Jajce	1961-2014	1992-2001, 2011-2013		
Vodomjerna stanica	Vodotok	Period osmatranja	Godine bez podataka	Broj godina sa podacima
Banja Luka	Vrbas	1958-2015	1993-1996	53
Bistrica	Bistrica	1981-1988	--	8
Daljan	Vrbas	1959-2014	1991-2006	40
Delibašino Selo	Vrbas	1962-2014	--	53
Gornji Vakuf	Vrbas	1946-1988	1965	42
Han Skela	Vrbas	1971-1990	--	20
Kozluk	Vrbas	1971-1989	--	19
Majevec	Pliva	1967-1989	--	23
Milaševci	Ugar	1977-1988	1981	11
Otoka	Janj	1968-1990	1976, 1983-1984	20
Sarići	Janj	1957-1990	1980-1984	29
Ugar ušće	Ugar	1971-1980	--	10
Volari	Pliva	1971-1990	--	20
Vrbanja	Vrbanja	1961-2015	1991, 1993-1996	50

Mjerenja evapotranspiracije (ET) na slivu ne postoje pa je potencijalna ET (PET) sračunata po metodi Hamon-a definisanom sljedećim jednačinama:

$$PET = \left(\frac{DL}{12}\right)^2 \exp\left(\frac{T_m}{16}\right) \quad (1)$$

$$DL = \left(\frac{24}{\pi}\right) \arccos(-tg(\varphi) \cdot tg(\delta)) \quad (2)$$

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(n + 284)\right) \quad (3)$$

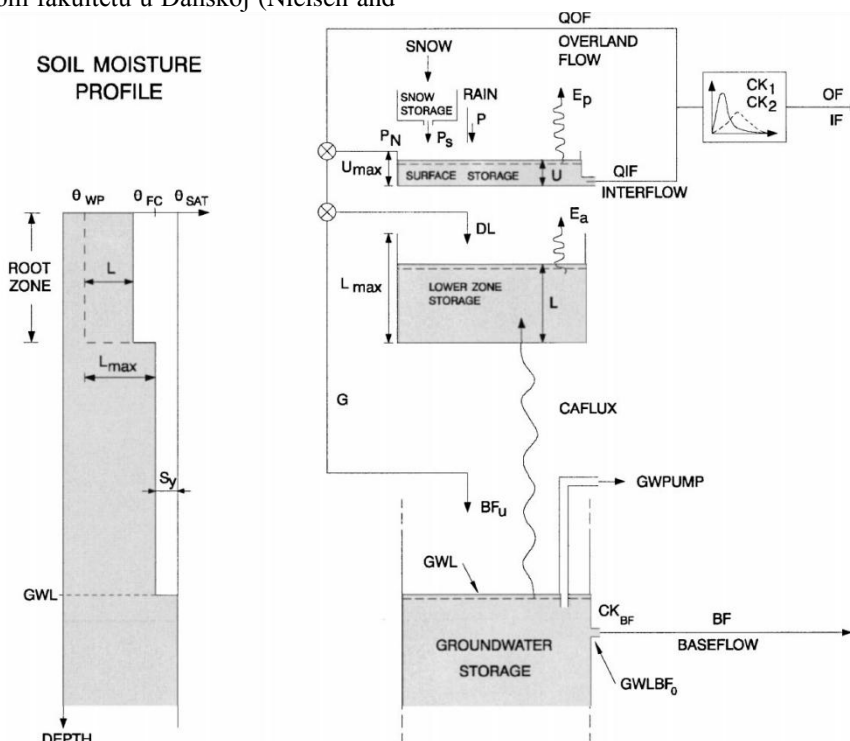
Izbor metode proračuna PET je prvenstveno zavisio od raspoloživih podataka. S druge strane, Hamon metoda iako jednostavna daje odgovarajući empirijski odgovor interakciji vegetacije i klime (Vörösmarty et al., 1998).

**METODOLOGIJA ODREĐIVANJA HVV**

**Hidrološki model.** NAM (Nedbør-Afstrømnings-Model) je konceptualni hidrološki model koji simulira oticaj na nivou sliva kontinualnim proračunom sadržaja vode u četiri različita i međusobno komunicirajuća rezervoara. Svaki od njih predstavlja neki od fizičkih elemenata sliva. Koncept ovog modela je originalno razvijen od strane Odjeljenja za hidrodinamiku i vodne resurse na Tehničkom fakultetu u Danskoj (Nielsen and

Hansen, 1973) i široko poznat kao MIKE NAM. NAM je primjenjivan u mnogim projektima i studijama koje pokrivaju različite klimatske režime (Galkate et al., 2011; Hafezparast et al., 2013; Madsen, 2000; Singh et al., 2014). Model kontinualno računa sadržaj vode u četiri različita ali međusobno povezana rezervoara: površinska zapremina, niži sloj tla – zapremina zone korijenja vegetacije, zapremina podzemnih voda i snijeg. Struktura NAM modela je prikazana na slici 2 (DHI, 2016). U prvoj postavci modela, sliv je izdijeljen na 14 podslivova odnosno na mjestima postojećih hidroloških stanica sa dovoljnim brojem osmatranja za kalibraciju i validaciju modela. U sljedećoj fazi, model je proširen odnosno dodatno izdijeljen na manje podslivove a prema lokacijama na kojima je bilo neophodno definisati ulazne talase velikih voda za hidraulički model. Na ovaj način dobija se model sa 45 podslivova (Slika 3).

**Kalibracija i validacija NAM modela.** Obzirom da je model konceptualan odnosno da njegovi parametri nemaju direktnu vezu sa fizičkim karakteristikama sliva, podešavanje parametara se vrši kroz proces kalibracije. NAM ima ukupno 18 parametara od kojih je 9-11 (u zavisnosti da li se modeliraju niži slojevi tla) neophodno kalibrirati.



Slika 2. Struktura NAM model

Ostali parametri su početne vrijednosti čiji se uticaj na rezultate eliminiše usvajanjem perioda zagrijavanja modela, koji ne ulazi u proračun efikasnosti modela.

NAM u sebi sadrži modul automatske kalibracije sa kojim se optimizuju parametri preko Shuffled Complex Evolution (SCE) algoritma (Madsen, 2000) optimizujući nekoliko ciljnih funkcija. Ciljne funkcije korišćene pri kalibraciji kontinualnog modela su:

- ukupna greška zapremine

$$OVE = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \right| \quad (4)$$

- korijen srednje kvadratne greške

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2} \quad (5)$$

- korijen srednje kvadratne greške velikih proticaja iznad određene granice

$$RMSE_{HF} = \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_p} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2} \quad (6)$$

$N$  - broj vremenskih koraka u kalibracionom periodu,

$Q_{obs,i}$  - osmotreni proticaji u trenutku  $i$ ,

$Q_{sim,i}$  - modelirani proticaji u trenutku  $i$ ,

$M_p$  - broj pikova u kalibracionom periodu iznad određene granice,

$n_j$  - broj vremenskih koraka u talasu  $j$ .

Idealna vrijednost odnosno idealno slaganje osmotrenih i modeliranih proticaja za sve tri ove funkcije je kada uzimaju vrijednost 0. Granica za kalibraciju poplavnih talasa kod  $RMSE_{HF}$  je određena kod svih stanica kao proticaj trajanja 10% godišnje, očitana sa krive trajanja.

Efikasnost modela je provjerena sa nekoliko pokazatelja (ciljne funkcije različite od onih korišćenih pri kalibraciji):

- greška zapremine hidrograma (idealno 1)

$$VE = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \right|}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \quad (7)$$

- Kling-Gupta koeficijent efikasnosti (idealno 1)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{S_{x,sim}}{S_{x,obs}}$$

$$\beta = \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$$

- Pearson-ov koeficijent korelacije (idealno 1)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (9)$$

- Relativna greška proticaja (idealno 0)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^N Q_{obs,i}} \cdot 100 (\%) \quad (10)$$

- Procentualna greška krive proticaja za proticaje trajanja manjeg od 2% godišnje (idealno 0)

$$FDC_{HF} = \frac{\sum_{h=1}^H (Q_{sim,h} - Q_{obs,h})}{\sum_{h=1}^H Q_{obs,h}} \cdot 100 (\%) \quad (11)$$

$\bar{Q}$  -srednja vrijednost odgovarajućih proticaja,

$S_x$  -standardna devijacija.

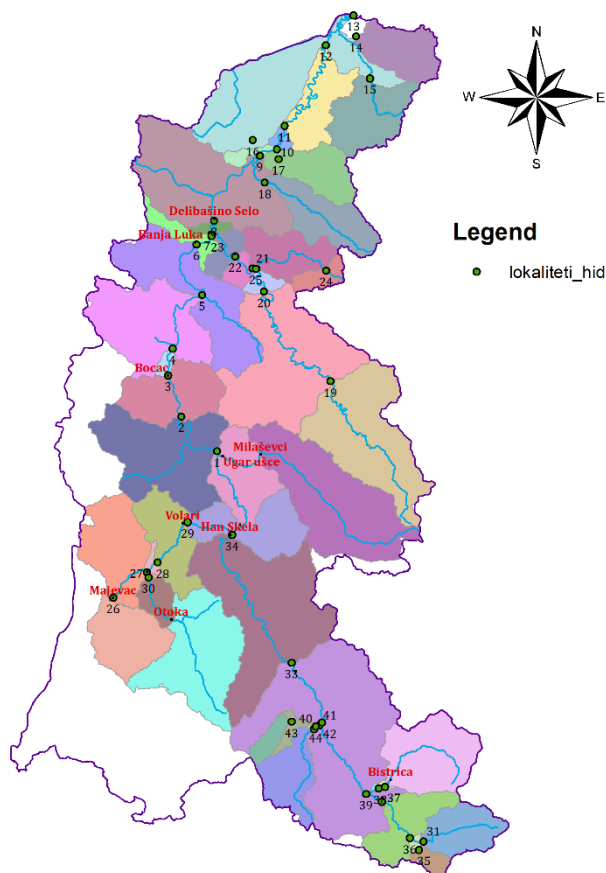
Nakon sprovedene automatske kalibracije prve postavke modela, pristupilo se simulaciji kišnih epizoda. Svim novim podslivovima iz druge postavke modela koji pripadaju slivu iz prve postavke modela dodijeljuje se vrijednost parametara određena kontinualnom kalibracijom. Kao što je bilo za očekivati, poplavnih talasi iz kontinualnog modela su značajno podcijenjeni te su se pojedini parametri dodatno manuelno podešavali. Slaganje modeliranih i osmotrenih hidrograma je mjereno matematičkom greškom maksimalnog oticaja i zapremine talasa po formuli:

$$Err = \frac{model}{osm} \cdot 100 (\%) \quad (12)$$

gdje je  $Err$  greška proticaja ili zapremine,  $model$  označava vrijednost dobijenu u modelu a  $osm$  je osmotrena vrijednost.

Sve simulacije modela kišnih epizoda su sprovedene sa periodom zagrijavanja modela od jedan mjesec koji nije obuhvaćen pri ocjeni greške modela. Ovim se eliminiše uticaj početnih parametara modela na rezultate i postiže adekvatna vlažnost zemljišta koja prethodi kišnoj epizodi od interesa.

Za kalibraciju modela odabrano je nekoliko karakterističnih poplavnih talasa a prema pregledu maksimalnih oticaja na stanicama na slivu.



Slika 3. Podslivovi u NAM modelu kišnih epizoda

Maksimalni oticaji na stanicama se uglavnom nisu dešavali u isto vrijeme. Npr. u gornjem toku Vrbasa, na stanicama Gornji Vakuf, Daljan, Bistrica i Han Skela maksimalni proticaji su se uglavnom javljali u zimskim mjesecima kao posljedica topljenja snijega. Na slivu Plive zbog specifičnosti karstnog područja, velikog baznog oticaja i recesione grane koja traje čak mjesecima, nije jednostavno izolovati pojedinačan poplavni talas reprezentativan za kalibraciju a da je istovremeno reprezentativan za ostatak sliva. Na slivu Vrbanje zbog visoke vrijednosti pulsa velikih voda (broja godišnjeg javljanja proticaja većeg od npr. 3 puta medijana protoka) kao i velike neravnomjernosti toka (visoka vrijednost odnosa srednjih i velikih voda) uočavaju se talasi veoma strmih uzlaznih i recesionih grana i poprilično male baze hidrograma.

U donjem toku Vrbasa, na stanicama Banja Luka i Delibašino Selo, velike vode se javljaju uglavnom od aprila do juna.

Parametri podslivova na Plivi su kalibrisani na talas od 07.10.-05.11.1989. godine. Stanice Vrbanja, Banja Luka

i Delibašino Selo su kalibrisane na poplavni talas od 20.06.-04.07.2010 godine a stanice na gornjem dijelu sliva – Gornji Vakuf, Daljan, Bistrica i Han Skela su kalibrisani na talas od 01.-16.12. 1976. godine. Parametri sliva Ugra su kalibrisani posebno, obzirom da ima veoma kratak period osmatranja, na poplavni talas 26.09-15.10.1978.

Tabela 2. Parametri NAM modela za kalibraciju (Madsen, 2000)

Oznaka	Opis	Tipične vrijednosti
Umax	Maksimalni kapacitet vlažnosti tla u površinskom sloju	10-20 mm
Lmax	Maksimalni kapacitet vlažnosti u zoni korijenja	50-150 mm
CQOF	Koeficijent površinskog tečenja	0,1-0,99
CKIF	Vremenska konstanta za međuoticaaj – oticaj između površinskog sloja i zone korijenja	200-1000 h
CK1,2	Vremenska konstanta za površinski i među-oticaaj. Određuje oblik hidrograma.	3-48 h
TOF	Granična vrijednost za površinsko tečenje	0-0,7
TIF	Granična vrijednost za međuoticaaj	0-0,99
CKBF	Vremenska konstanta baznog oticaja – definiše oblik hidrograma u periodima bez padavina	500-5000 h
TG	Granična vrijednost u zoni korijenja za priraštaj oticaja u podzemlje	0-0,99
CQLOW	Priraštaj vode u niže podzemne slojeve	
CKLOW	Vremenska konstanta linearnog rezervoara kojim se modelira bazni oticaaj	h

Talasi za validaciju modela kišnih epizoda su birani imajući na umu istoriju poplava na slivu Vrbasa. Validacija modela je obavljena istovremeno na svim stanicama na nekoliko istorijskih poplavnih talasa koji su se desili na slivu: septembar 1968, avgust 1972,

jun 2001, april 2004 i maj 2014. Pri tome, za poplave koje su se desile u periodu od 2000-2014, podaci za poređenje su bili dostupni samo na 4 stanice.

Prije samog procesa kalibracije i validacije, odvojeni su bazni oticaji od direktnih obzirom da model kišnih epizoda zbog kratkotrajnosti simulacije ne daje dobre rezultate baznog oticaja te je simulirani talas zapravo direktni oticaj. Odvajanje baznog dijela hidrograma je izvršeno digitalnom rekurzivnom metodom (Eckhardt, 2005).

**Mjerodavno trajanje kiše.** Simulacijom kišnih epizoda različitih trajanja dobijeni su proticaji kao odgovor sliva te se za mjerodavno trajanje kiše uzima ona vrijednost za koju se dobijaju maksimalni proticaji. Obzirom na veličinu sliva, provjerena su trajanja kiše od 1-72 sata. Analizom odgovarajućih proticaja formirani su najnepovoljniji scenariji oticaja sa sliva. Vremenska neravnomjernost padavina (računski hijetogrami) nije razmatrana obzirom da se nije raspolagalo sa dovoljno podataka za formiranje neravnomjernih kiša. Takođe, jednostavna vremenska raspodjela, poput uniformne odn. blok kiše, pokazala se kao sasvim dovoljna za uspješno modeliranje velikih voda (Sikorska et al., 2017). Imajući sve ovo u vidu, simulacije kišnih epizoda su izvršene sa blok kišom odnosno kišom uniformnog intenziteta.

**Simulacija računskih kišnih epizoda.** U model pripremljen na prethodno opisan način unesene su blok kiše zahtijevanih povratnih perioda a prema određenim padavine-trajanje-povratni period (PTP) zavisnostima za tri meteorološke stanice na slivu (Zavod za Vodoprivredu d.o.o. Bijeljina, 2016). I ovdje je primijenjen period zagrijavanja modela od jednog mjeseca. Za vrijeme simulacije je odabran mjesec maj kad su se desile velike poplave na slivu Vrbasa te je prethodni mjesec – period zagrijavanja modela, sa stvarnim padavinama koje su prethodile velikom poplavnom talasu. Na ovaj način, svaka simulacija sa računskom kišom je izvršena pri prethodnom stanju vlažnosti tla iz maja 2014 kao najnepovoljniji scenario.

## REZULTATI

**Kalibracija i validacija kontinualnog modela.** Da bi što više stanica bilo uključeno pri kalibraciji i validaciji modela i pritom imajući na umu nedovoljno podataka za većinu stanica, odabran je period kalibracije od 1971-1979 i validacije 1982-1988. Jedino u ovim periodima postoje podaci na gotovo svih 14 stanica, izuzev za VS Bistrica za koju postoje podaci samo u periodu 1982-1988 i VS Milaševci na kojoj se raspolagalo kraćim

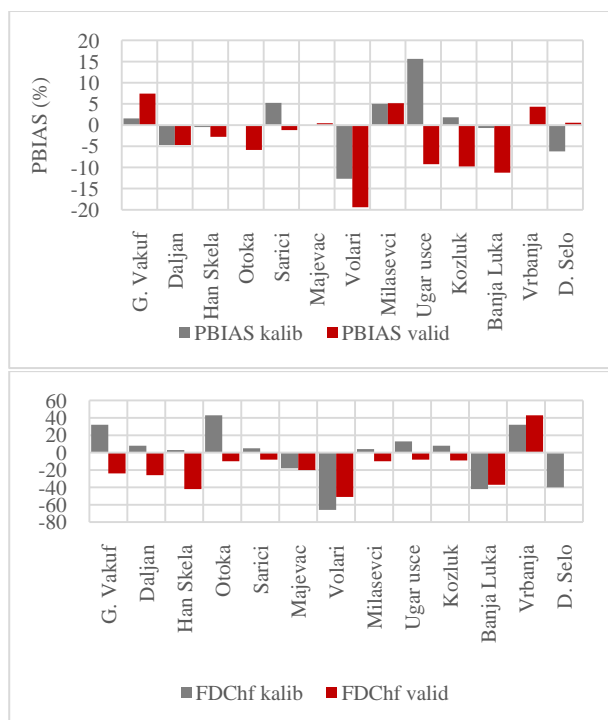
nizom podataka u periodu kalibracije odn. od 1978-1980 plus prethodni period zagrijavanja modela. Oskudnost i nekontinualno osmatranje proticaja na stanicama na slivu Vrbasa nisu dozvoljavali duže periode kalibracije i validacije niti uključivanje novijih podataka npr. osmatranja nakon 2000 kada su raspoloživi proticaji samo na nekoliko stanica.

Na svim slivovima model pokazuje veoma dobar ukupni bilans odnosno greška zapremine je veoma mala ( $VE=0.95-0.99$ ) što je i bilo za očekivati obzirom da je ukupna zapremina hidrograma bila jedan od ciljnih funkcija pri kalibraciji. U pogledu koeficijenta efikasnosti KGE koji se kreće od 0,52-0,80 i ukupne greške modela ( $PBIAS=-12,7\pm 15,7\%$ ) najlošija simulacija proticaja je za dio sliva do VS Volari i Ugar ušće. Pearsonov koeficijent korelacije uzima slične ili nešto bolje vrijednosti kao KGE i kreće se od 0.52-0.81. Najslabije slaganje modeliranih i osmotrenih proticaja pokazuje efikasnost modela pri simulaciji velikih voda, odnosno slaganje krive trajanja u domenu velikih voda  $FDC_{HF}=-66\pm 43\%$ , pri čemu negativna vrijednost označava da model podcjenjuje proticaje dok pozitivna znači da ih precijenjuje. Na slivovima Gornji Vakuf, Otoka i Vrbanja velike vode se precijenjuju za 32, 43 i 32% respektivno dok se podcijenjuju na slivovima Majevac, Volari, Banja Luka i D. Selo za čak 18, 66, 42 i 40%, respektivno. Iako model dobro reprodukuje opštu dinamiku slivova uglavnom dosta loše simulira u domenu velikih voda trajanja kraćeg od 2% godišnje.

Pri validaciji modela dobijaju se slični, ponegdje i bolji rezultati kao pri kalibraciji (Slika 4). Greška zapremine VE se kreće od 0.95 do 0.99 osim za Volare (0.87) i Ugar ušće (0.84), s tim da za posljednju stanicu za validaciju su bili dostupni podaci samo za 1980 godinu. KGE uzima vrijednosti od 0.52 (Volari) do 0.8 (Milaševci) dok koeficijent koleracije  $r$  je od 0.59 (G.Vakuf) do 0.81 (Milaševci). Vrijednost PBIAS se kreće od -12.68 do 15.65 i najveća je za slivove do VS Volari i Ugar ušće, respektivno dok za sve ostale stanice uzima vrijednost ispod  $\pm 6$ . Kao i kod kalibracije, reprodukcija velikih voda u modelu pokazuje najveće greške. Osim za Vrbanju, gdje su velike vode podcijenjene za 43% u periodu 1982-1988, na svim stanicama su precijenjene za 51, 42, 37, 26, 24 i 20% na stanicama Volari, Han Skela, Banja Luka, Daljan, G. Vakuf i Majevac, respektivno. Za ostalih pet stanica greška je ispod 10%.

Parametri određeni kalibracijom su za sve slivove različiti, pri čemu se samo tri značajnije mijenjaju od sliva do sliva: CKBF, C1,2 i CKIF, koji kontrolišu osnovne komponente ukupnog proticaja (bazni,

površinski i međuotocaj) te se može smatrati da oslikavaju karakteristično formiranje oticaja na svakom slivu. Model nije osjetljiv na navedene parametre odnosno unutar jednog sliva promjena ovih parametara ne utiče mnogo na efikasnost modela. Analizom osjetljivosti modela uočena je najveća promjena PBIAS i OVE pri promjeni parametara  $U_{max}$ ,  $L_{max}$ , CQOF i TG (Zavod za Vodoprivredu d.o.o. Bijeljina, 2016).



Slika 4. Poređenje vrijednosti relativne greške proticaja (gore) i greške krive proticaja u segmentu velikih voda (dole) za period kalibracije i validacije

**Kalibracija i validacija modela kišnih epizoda.** Model kalibrisan i validovan na prethodno opisan način je poslužio kao početna postavka modela kišnih epizoda. Manuelnom kalibracijom ovako podešenog modela kišnih epizoda uočena je izuzetna osjetljivost oblika i veličine simuliranog hidrograma na samo dva parametra modela, CQOF i CK1.2, koja su jedino i mijenjana u odnosu na kalibrisane vrijednosti iz kontinualne simulacije modela da bi se dobilo zadovoljavajuće slaganje sa osmotrenim talasima. U Tabeli 3 su date ocjenjene greške maksimalnih proticaja i zapremine a na Slici 5 su uporedo prikazani hidrogrami osmotrenih i modeliranih proticaja.

Validacija modela očekivano pokazuje manje dobro slaganje modeliranih i osmotrenih hidrograma. Hidrogrami odgovaraju oblikom i po vremenu pojave

maksimalnog proticaja, međutim vrijednost maksimalnog proticaja a time i ukupna zapremina direktnog oticaja se podcjenjuje ili precijenjuje. Izuzetak je poplavni talas iz 2010 godine pri kome se na stanicama Vrbanja, Banja Luka i D. Selo dobijaju veoma dobra slaganja. Generalno, na nizvodnom dijelu sliva, tačnije na stanicama Vrbanja, Banja Luka i D. Selo validacijom se dobijaju mnogo bolji rezultati nego za stanice na uzvodnom dijelu sliva.

Tabela 3. Greške modela u reprodukciji maksimalnog proticaja i zapremine direktnog oticaja talasa odabranog za kalibraciju

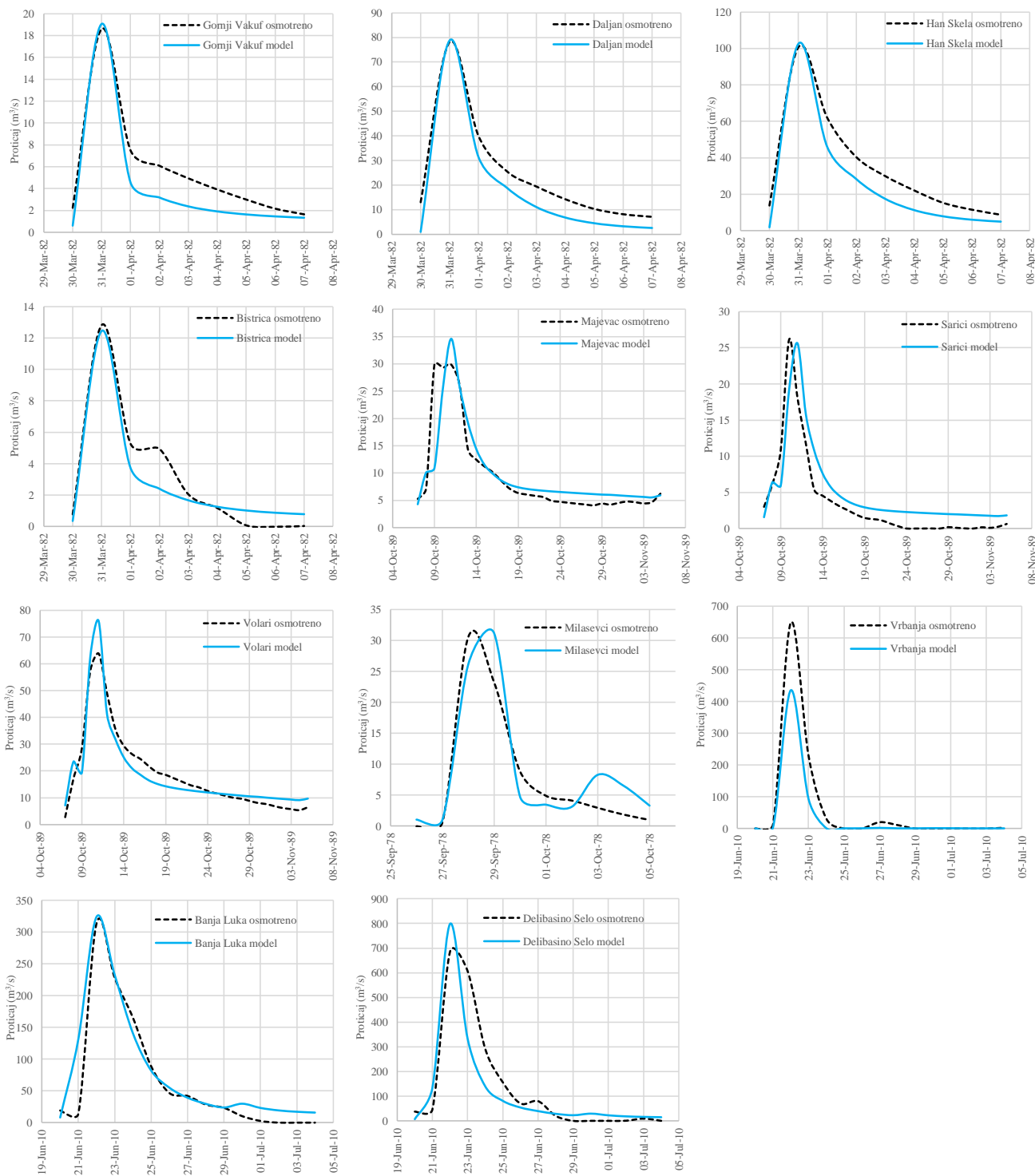
Vodomezna stanica	Greška maksimalnog oticaja (%)	Greška zapremine direktnog oticaja (%)
Gornji Vakuf	-2.3	28.0
Daljan	-0.8	27.0
Han Skela	-2.0	25.6
Bistrica	3.0	9.9
Majevac	-15.6	-5.9
Sarići	1.9	-44.0
Volari	-18.9	1.3
Milasevci	-1.8	-13.6
Vrbanja	32.9	43.9
Banja Luka	-3.2	-19.3
Delibašino Selo	-16.4	12.5

Ovo ne važi za poplavu iz 2014 za koju se dobijaju dosta različiti hidrogrami (po obliku) u odnosu na osmotrene uz značajno podcjenjivanje simuliranih maksimalnih oticaja. Variranjem parametara NAM modela u cilju što bolje simulacije ove poplave iz maja 2014 nije pronađen set parametara kojim se pri simulaciji postiže osmotreni maksimum. S druge strane, model kalibrisan da reprodukuje upravo ovu poplavu, pri validaciji na ostalim poplavnim talasima daje precijenjene vrijednosti za preko 200%. Specifični uslovi koji su doveli do pojave poplave 2014. godine očito obuhvataju hidrološke procese koji se teško mogu reprodukovati hidrološkim modelom.

U Tabeli 4 prikazane su vrijednosti odstupanja maksimalnih oticaja i odgovarajućih zapremine dobijenih simulacijom talasa odabranih za validaciju modela.

Vrijednost n/a je korišćena u slučajevima gdje nije bilo osmotrenih podatka za navedene periode poplava. Oskudnost podataka se ponovo prikazuje kao osnovna prepreka robusnijoj kalibraciji i validaciji modela.





Slika 5. Poređenje osmotrenih i modeliranih hidrograma poplavnih talasa pri kalibraciji modela

Sljedeći problem koji je uočen pri simulaciji poplavnih talasa je loše slaganje (superpozicija) hidrograma na tri stanice: Banja Luka, Vrbanja i Delibašino Selo. Banja Luka je stanica na Vrbasu prije ušća Vrbanje dok je D. Selo smještena poslije. Model bilansno „slaže“ talase npr. sumarni hidrogram na VS Banja Luka i Vrbanja treba da odgovara hidrogramu na D.Selu, dok to nije slučaj u osmotrenim hidrogramima. Navedeno upućuje na loš kvalitet osmotrenih podataka gdje je često maksimalni oticaj na VS D. Selo niži od zbira istih na VS Banja Luka i Vrbanja bez obzira na isto vrijeme pojave pika što dodatno doprinosi velikim odstupanjima simuliranih talasa u odnosu na osmotrene.

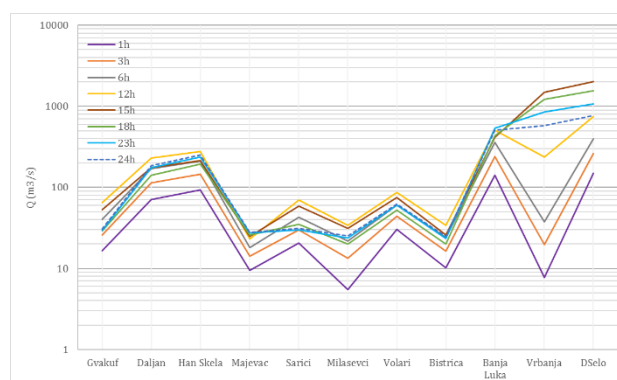
Tabela 4. Greške modela kišnih epizoda pri validaciji. Greška maksimalnog proticaja je prvi broj dok je greška zapremine drugi

Stanica	Septembar 1968	Avgust 1972	April 2004	Jun 2010	Maj 2014
Majevac	49.2 42.6	33.2 27.4	n/a	n/a	n/a
Sarići	-39.9 48.2	14.6 41.3	n/a	n/a	n/a
Vrbanja	-53.4 -84	-66.9 -30.1	7.2 9.3	32.8 43.8	73.9 46.2
Banja Luka	11.2 13.5	21.8 0.69	-22 -24.4	-3.2 -17.7	33.8 20.7
D.Selo	-6 -15.6	-32.4 -37.5	-7.6 2.4	-16.4 13.3	55.5 26.4
G.Vakuf	n/a	27.5 33.8	n/a	n/a	n/a
Daljan	n/a	-27.2 12.6	n/a	n/a	n/a
Han Skela	n/a	-62.4 -36.6	n/a	n/a	n/a

**Simulacija modela kišnih epizoda sa računskim kišama.** Analizom odgovora sliva Vrbasa na padavine različitih trajanja, od 1h do 72h, zaključuje se da je kritično trajanje kiše (trajanje za koje se dobija najveći maksimalni oticaj) za sliv Vrbasa 12h na uzvodnim stanicama i 24h na nizvodnim (Banja Luka, Delibašino Selo i Vrbanja) što odgovara i nekim ranijim istraživanjima (Topalović, 2015b). Na Slici 6 grafički su prikazane vrijednosti maksimalnih oticaja na VS na slivu Vrbasa dobijenih simulacijom modela za različita trajanja kiše i povratnog perioda 100 godina. Za ostale povratne periode dolazi se do istog zaključka. Na VS

Vrbanja mjerodavno trajanje kiše je 15h međutim, poređenjem dobijenih vrijednosti sa rezultatima statističke analize koja je služila kao referentna vrijednost, dobijaju se značajno precijenjene vrijednosti maksimalnih oticaja za sve tražene povratne periode te je ovaj scenario odbačen. Prema prethodnom zaključku, formirana su dva scenarija: (1) trajanje kiše na sve tri stanice je 24h i (2) trajanje kiše na stanicama Jajce i Bugojno je 12h dok je stanici Banja Luka 24h.

U Tabeli 5 date su visine računskih kiša konstantnog intenziteta korišćene u navedenim scenarijima a preuzete iz formiranih PTP krivih.



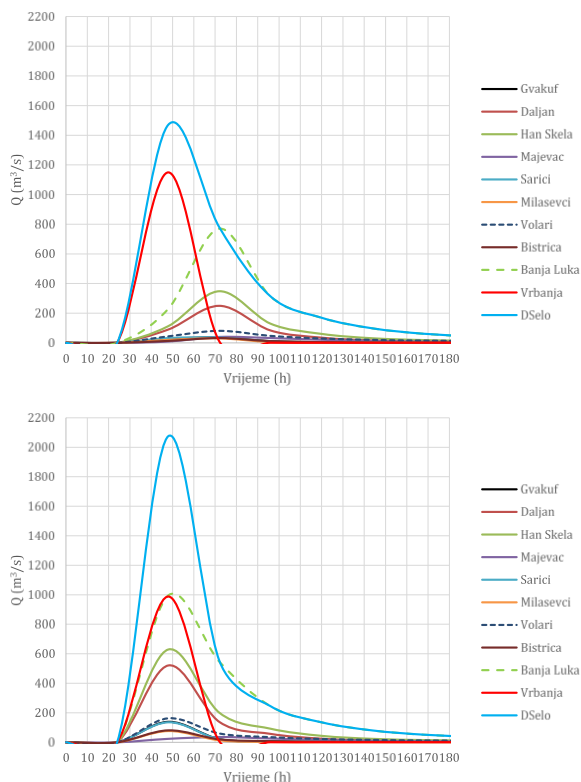
Slika 6. Određivanje mjerodavnog trajanja kiše

Tabela 5. Visine računskih kiša za stanice na slivu Vrbasa različitih povratnih perioda i mjerodavnih trajanja kiše

Scenario 1	Povratni period T (god)	Banja Luka (t <sub>k</sub> =24h)	Bugojno (t <sub>k</sub> =24h)	Jajce (t <sub>k</sub> =24h)
	20	120,9	94	84,6
50	148	103,1	94,9	
100	168,7	111,9	102,4	
500	217,5	131,8	119,6	
Scenario 2	Povratni period T (god)	Banja Luka (t <sub>k</sub> =24h)	Bugojno (t <sub>k</sub> =12h)	Jajce (t <sub>k</sub> =12h)
	20	120,9	80,3	69,8
	50	148	93,3	79,6
	100	168,7	103,1	87
	500	217,5	125,5	104,1

Na Slici 7 prikazani su karakteristični hidrogrami za povratni period 100 godina prema dva navedena scenarija.

Prema Scenariju I, na uzvodnom dijelu sliva maksimalni oticaji su niži a vrijeme pojave pika dosta kasnije u odnosu na iste hidrograme prema Scenariju II. Istovremenost pojave maksimalnog oticaja na svim stanicama na slivu u Scenariju II dovodi do povećanih proticaja na donjem dijelu sliva odnosno na posljednjoj stanici Delibašino Selo.

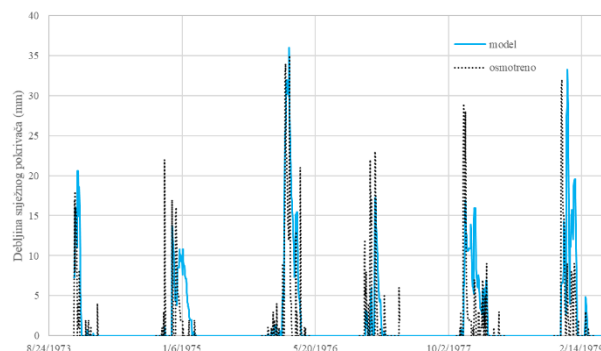


Slika 7. Hidrogrami velikih voda povratnog perioda 100 godina prema Scenariju 1 (slika gore) i Scenariju 2 (slika dole)

U cilju evaluacije rezultujućih računskih hidrograma, dobijeni kvantili velikih voda su poređeni sa vrijednostima dobijenim putem statističke analize: (a) raspoloživih osmotrenih proticaja (iz Tabele 1) te (b) modeliranih proticaja u kontinualnom modelu za period 1962-2014. Papiri vjerovatnoće sa nanesenim teorijskim funkcijama raspodjele, empirijskom funkcijom te intervalima povjerenja 95% sračunatim iz osmotrenih podataka i odgovarajuće funkcije raspodjele Pearson 3 su prikazani na Slici 9. Prikazani rezultati nisu konzistentni na svim stanicama, u smislu jedinstvenog odnosa vrijednosti kvantila sračunatih prema tri metode. Na većini stanica, kvantili dobijeni simulacijom računskih kiša su dosta veći od vrijednosti dobijenih sa

druge dvije metode, dok isti dobijeni iz simuliranih proticaja u kontinualnom modelu su uglavnom podcijenjeni, ponegdje i dosta ispod donje granice intervala povjerenja. Velike razlike u poređenim rezultatima, npr. odstupanja veća od granica intervala povjerenja ili nedosljednost rezultata u odnosu na većinu, se uočavaju na stanicama na kojima su dobijene lošije ocjene modela pri kalibraciji i validaciji. To su stanice na karstnom dijelu sliva, tj. na Plivi (Majevac i Volari) i Gornji Vakuf.

Računski proticaji dobijeni modelom kišnih epizoda su uglavnom veći nego prema statističkoj analizi osmotrenih godišnjih maksimuma, osim na 2 stanice. Na stanicama Gornji Vakuf i Majevac vrijednost ovih kvantila je značajno ispod donje granice intervala povjerenja. Razloga za ovo može biti dosta. Na slivu do Gornjeg Vakufa, uslijed nedostatka drugih podataka, korišćene su padavine sa MS Bugojno koja se nalazi na 500 mm. Obzirom da je skoro polovina sliva Vrbasa do stanice G.Vakuf na srednjoj visini od 1700mm najvjerovatnije da padavinski režim sa MS Bugojno nije odgovarajući. Pored ovoga, pretpostavlja se da je proces topljenja snijega na ovom dijelu sliva dominantan izvor pojave velikih voda. Kako formirane računke kiše odražavaju samo kišne padavine ali ne i snježne, pri simulacijama u modelu kišnih epizoda na slivovima sa dominantnim snježnim procesima gubi se informacija o velikim vodama izazvanim topljenjem snijega. Kontinualni model relativno dobro modelira proces topljenja snijega odn. debljine snježnog pokrivača, uz podcijenjene maksimume u pojedinim godinama (Slika 8.). Međutim, ovo ne mijenja značajno ocjenu kvantila velikih voda iz ovog modela obzirom da su još niži u odnosu na kvantile iz modela kišnih epizoda (Slika 9.- Gornji Vakuf).



Slika 8. Osmotrene i modelirane visine snježnog pokrivača na stanici Gornji Vakuf

Na dijelu sliva do stanice Majevac, kao i na čitavom slivu Plive, uslovi oticanja nisu dovoljno poznati obzirom da je veći dio sliva u karstu te oticaj nije formiran samo uslijed padavina već i iz podzemnih rezervoara koji topografski pripadaju susjednom slivu. Uslijed toga, hidrogrami na stanicama na slivu Plive imaju karakteristične oblike sa velikim baznim oticajima i višestrukim pikovima u jednom talasu. Sve ovo dodatno komplikuje hidrološko modeliranje, pa je kod kontinualnog modela, da bi se nadoknadila nedostajuća zapremina otekle vode pri kalibraciji podizali parametri koji utiču na veličine pikova hidrograma i time dobili precijenjeni kvantili velikih voda. Iz tog razloga, kvantili dobijeni iz kontinualnog modela su na slivu Plive značajno veći od sračunatih iz osmotrenih podataka. S druge strane, kod modela kišnih epizoda poplavni talas na koji su podešeni parametri modela, očito nije bio reprezentativan, u smislu omjera oticaja generisanog uslijed padavina i iz podzemlja (karsta), pa su dobijene podcijenjene vrijednosti velikih voda.

Kvantili dobijeni kontinualnim modeliranjem su najniži od svih rezultata, osim za VS Majevac i Volari, gdje su poprilično precijenjeni u odnosu vrijednosti dobijene statističkom analizom, što je već navedeno. Na pet stanica se teorijska funkcija raspodjele modeliranih proticaja nalazi unutar intervala povjerenja dobijenih statističkom analizom osmotrenih proticaja ali bliže donjoj granici, dok se za stanicu Banja Luka uočava dobro slaganje ove raspodjele sa dobijenom iz osmotrenih podataka.

## DISKUSIJA

Osmotreni proticaji na slivu Vrbasa uglavnom nisu u kontinuitetu, imaju kratak period osmatranja na većini stanica i ponegdje su upitnog kvaliteta, bilansno ne složeni. Iz ovog razloga, izbor setova podataka za kalibraciju i validaciju modela, naročito kod modela kišnih epizoda gdje je trebalo naći istovremene poplavne talase na svim stanicama, je bio veoma oskudan. Problem je prevaziđen pojedinačnim kalibriranjem dijelova sliva na karakteristične (i sa dostupnim osmatranjima) poplavne talase. Međutim, validacija na nekoliko poplavnih talasa nije mogla biti izvršena na svim stanicama, ponovo zbog nedostatka podataka.

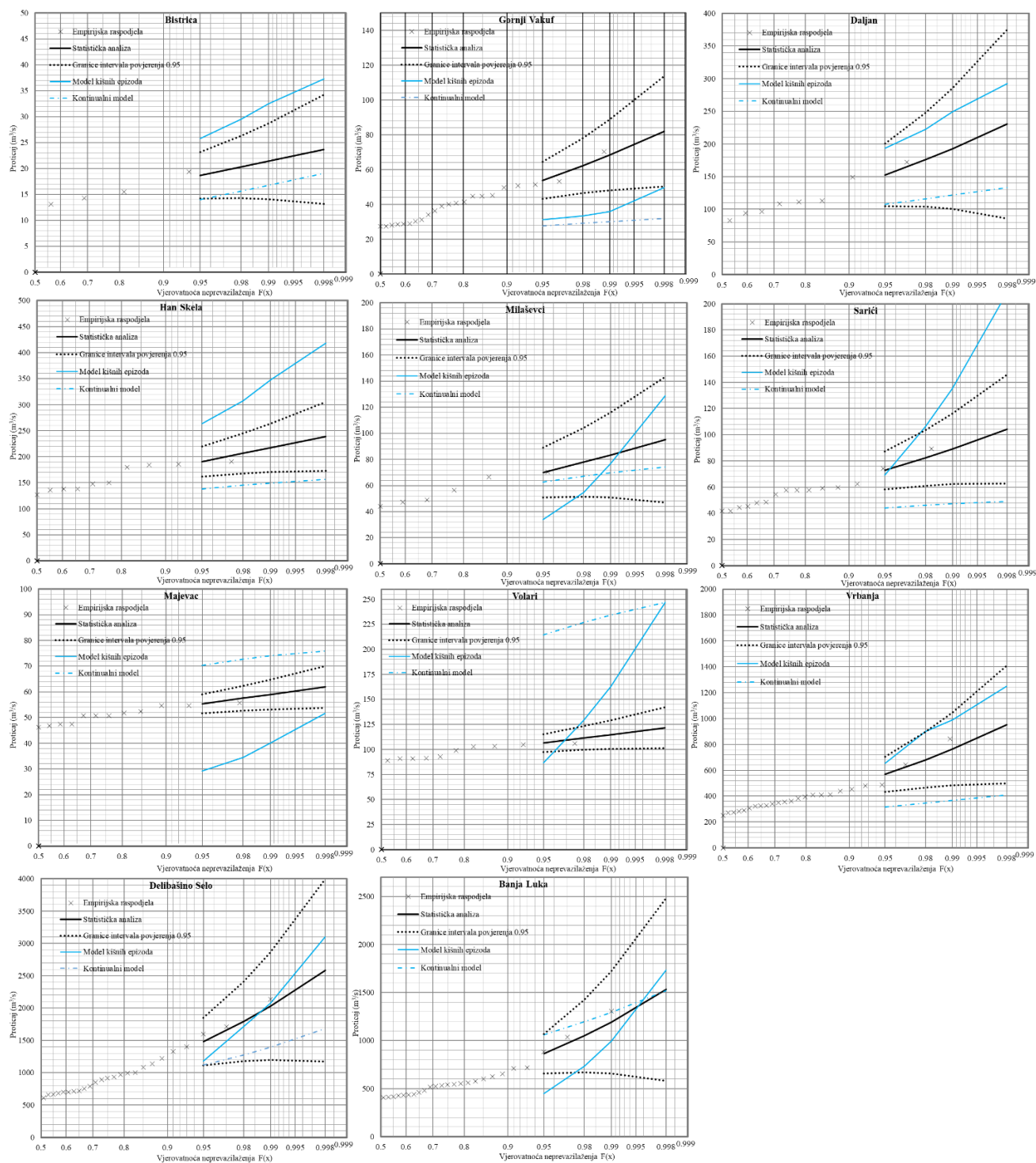
Iako model dobro reprodukuje opštu dinamiku slivova uglavnom dosta loše simulira u domenu velikih voda trajanja kraćeg od 2% godišnje. Razlozi mogu biti brojni, od kvaliteta ulaznih podataka, parametrizacije i

tačnosti koncepta hidrološkog modela i sl. Međutim, najvjerovatnije da osnovni problem leži u broju padavinskih stanica na slivu i njihove rezolucije (dnevne sume) što može dovesti do velikih grešaka. Npr. Mishra (2013) pokazuje da je najmanja greška simuliranih proticaja u odnosu na osmotrene kada se na površini sliva od 2500km<sup>2</sup> uključe podaci sa 4-7 stanica, dok se smanjenjem broja stanica sa 7 na 1 na ovu površinu sliva greška koeficijenta koleracije poveća sa 15% na 64%. Girons Lopez et al. (2015) diskutuju da se najveće greške prikazuju na dijelovima sliva sa malim brojem padavinskih stanica naročito pri kišama velikih intenziteta. Takođe, prostorna distribucija padavina bitno utiče na efikasnost modela u pogledu simulacije velikih voda (Tramblay *et al.*, 2011).

Kvantili određeni iz modela kišnih epizoda su uglavnom najveći u odnosu na ostale metode, naročito u domenu velikih povratnih perioda od 200 i 500 godina. Izuzetak je na dijelu sliva Vrbasa do VS Gornji Vakuf gdje su ovi kvantili niži od donje granice povjerenja. Ovo je ujedno najviši dio sliva Vrbasa sa srednjom nadmorskom visinom od 1333 mnm i smatra se da su niže vrijednosti rezultat neadekvatnih padavina.

Vrijednost kvantila dobijenih iz kontinualnog modela je uglavnom dosta niža od obje druge metode, ponegdje niža i od ocijenjenog donjeg intervala povjerenja. Izuzetak je na dijelu sliva Plive do VS Majevac i Volari gdje su ovi kvantili značajno veći u odnosu na druge dvije metode. Obzirom da je ovaj dio sliva karst, koji je teško odrediti zbog visoke heterogenosti fizičkih karakteristika i nedostatka hidrogeoloških mjerenja i informacija, ima visok kapacitet za skladištenje vode.

Statističkom analizom osmotrenih podataka moguće je podcijeniti kvantile velikih voda kod ovakvih slivova, posebno ako je period osmatranja kratak pa ne obuhvati stepenu promjenu (skok) u funkciji raspodjele (Rogger *et al.*, 2012). Ova promjena se neminovno javlja kod slivova sa visokim kapacitetom za skladištenje vode i to u trenutku kad proticaj prevaziđe navedeni kapacitet. Manifestuje se stepenim povećanjem kvantila (skokom) koji ostane neprimjećen uslijed nedovoljno osmotrenih podataka za statističku analizu, te dovodi do podcjenjivanja kvantila. Međutim, to ne objašnjava niske vrijednosti kvantila iz modela kišnih epizoda na VS Majevac. Pri simuliranju kišnih epizoda odvaja se bazni oticaj od direktnog. Kako se smatra da više od trećine maksimuma poplavnog talasa dolazi iz karsta a ne od direktnog oticaja (Malard *et al.*, 2015) kvantili proračunati na ovaj način se podcjenjuju.



Slika 9. Teorijske funkcije raspodjele velikih voda rijeke Vrbas dobijene iz raspoloživih osmotrenih podataka, simuliranih kontinualnim modelom u periodu 1962-2014 i simulacijama računskih kiša u modelu

Dostupni osmotreni podaci nisu sadržavali dovoljno informacija o većim poplavama. Obzirom na postavljene zadatke, na samo nekoliko stanica osmotreni proticaji (preko veze Q-H) su bili dovoljne dužine da bi se iz podataka mogao odvojiti potreban broj poplavnih talasa zadovoljavajuće magnitude. To je osnovna zamjerka u procesu kalibracije, ili bolje rečeno do-kalibracije, modela kišnih epizoda.

Pri kalibraciji modela, kako automatskoj tako i manuelnoj pri uspostavljanju modela kišnih epizoda, za pojedine dijelove sliva nije bilo moguće postići bolje rezultate. Loše ocjene efikasnosti modela dobijene za npr. VS Gornji Vakuf, Majevac i Volari su na neki način najavile nekonzistentnost sračunatih kvantila prema tri poređene metode upravo na ovim stanicama. Na ostalim stanicama rezultati su uniformni i uglavnom ulaze u opseg sračunatih granica povjerenja. Ovo je naročito tačno kod stanica sa dužim nizom osmatranja (>40 godina), kao npr. Daljan, Vrbanja, D. Selo i Banja Luka dok kod ostalih stanica na kojima su bili raspoloživi proticaji do maksimalno 20 godina, dolazi do „rasipanja“ rezultata odnosno do značajnijih međusobnih razlika u vrijednostima kvantila. Ovo je za očekivati, obzirom da neizvjesnost koja se čini statističkom obradom suviše malog uzorka nije uračunata.

## ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Određivanje hidrograma velikih voda određenih vjerovatnoća pojave je jedan od najvažnijih zadataka koje se postavljaju u hidrološkoj praksi. Rezultati ovih analiza direktno utiču na kvalitet daljnjih studija, poput određivanja mapa opasnosti i rizika od poplava. Standardni metod određivanja kvantila velikih voda podrazumijeva statističku analizu osmotrenih podataka temeljenu na teoriji vjerovatnoće. Međutim, moguće su velike greške u procjenama uslijed kratkog niza osmatranja iz koga se ekstrapoluju kvantili malih vjerovatnoća pojave, pretpostavke o stacionarnosti osmotrenih veličina (iako su evidentne promjene upotrebe zemljišta i klime) i pretpostavke o ergodičnosti ulaznih veličina koje obrazuju uzorak (Klemeš, 1993). Pored toga, u praksi se često dešava da za analizirani sliv nema dovoljno dugih serija osmotrenih podataka (ili ih nema uopšte) niti dovoljan broj stanica na slivu kako bi se formirali rezultujući kvantili na svim važnijim pritokama i duž glavnog toka.

Alternativa standardnoj proceduri određivanja kvantila je upotreba hidroloških modela, i to: (a) modeliranje kišnih epizoda čime se računске kiše transformišu u

oticaje istog povratnog perioda i (b) kontinualno modeliranje kojim se dobija dugačak niz (dužine osmotrenih padavina) proticaja pogodnih za dalju primjenu statističke analize ekstrema.

U ovom radu prikazana je primjena hidrološkog modela u određivanju hidrograma velikih voda određenih vjerovatnoća pojave na primjeru sliva rijeke Vrbas a za potrebe određivanja mapa opasnosti i rizika od poplava na slivu. Konceptualni MIKE NAM model je korišćen za kontinualnu simulaciju oticaja na osnovu osmotrenih dnevnih padavina u periodu od 1962-2014 godine te za simulaciju kišnih epizoda na osnovu računskih kiša očitanih sa PTP krivih a za mjerodavna trajanja kiše definisana po principu najvećeg oticaja. Rezultati obje metode su poređeni sa rezultatima statističke analize osmotrenih podataka.

Kvantili dobijeni standardnom procedurom (statističkom analizom osmotrenih proticaja) uz pripadajuće intervale povjerenja, iako na mnogim stanicama sračunati iz veoma kratkog niza osmatranja, u svom rangu neizvjesnosti (intervalima povjerenja) uglavnom sadržavaju kvantile sračunate putem hidrološkog modela. Ovo je važan zaključak koji potvrđuje uspješnost primjene hidrološkog modeliranja u praksi. Izuzetak su dijelovi sliva na kojima, zbog nedovoljno podataka ili nepoznatih karakteristika sliva (tj. karst), nije postignuto dovoljno efikasno modeliranje. Ova neizvjesnost pri ocjeni kvantila velikih voda se u manjoj ili većoj mjeri prenosi na kartiranje plavnih zona, u zavisnosti od morfoloških karakteristika toka (pad, hidraulički radijus). Pri većim opsezima kvantila, u donjim tokovima rijeka razlike nivoa odnosno plavnih površina određenog ranga pojave mogu da budu dosta male dok u gornjim tokovima veoma značajne. Ono što je jasna prednost ovdje prikazanog načina određivanja poplavnih talasa određenog ranga pojave je mogućnost formiranja nekoliko poplavnih scenarija kao i „slaganje“ hidrograma u hidrološkom smislu (od uzvodnog do nizvodnog kraja vodotoka), čime se izbjegava precjenjivanje nivoa velikih voda u konačnim mapama opasnosti od poplava.

Imajući na umu sve prepreke i probleme prisutne u slučaju sliva rijeke Vrbas, ali i gore prikazane rezultate smatra se da su dobijeni hidrogrami zadovoljavajući za izradu mapa opasnosti i rizika od poplava. I ovdje se pokazuje da je količina i kvalitet osmotrenih podataka izuzetno važna za dobijanje kvalitetnijih rezultata. Kako u praksi to nije slučaj, kompenzacija se može učiniti

upotrebom i međusobnim poređenjem više različitih metoda uz uračunavanje izvora neizvjesnosti.

Nakon proširenja mreže stanica za hidrometeorološka osmatranja na slivu i verifikacije krivih protoka, ponovna kalibracija modela sa proširenim podacima bi pokazala kolika greška u ocjeni kvantila može da se napravi u slučaju manjeg obima podataka. Obzirom da je potreban dugi niz godina osmatranja za ovakve analize, preporuka za dalje istraživanje je da se izvrši proračun na slivu sa boljom hidrometeorološkom mrežom ali za više varijanti broja uključenih stanica i količine podataka koji se koriste (isključivanjem postojećih kao da ih nema). Na ovaj način, procijenila bi se neizvjesnost rezultata (maksimalnih otcaja i zapremine poplavnih talasa određenog ranga pojave) koja proističe od broja i količine podataka, kako meteoroloških tako i hidroloških stanica.

#### LITERATURA

- [1] Adams, B. J. and Howard, C. D. D. (1986) 'Design Storm Pathology', *Canadian Water Resources Journal*, 11(3), pp. 49–55. doi: 10.4296/cwrj1103049.
- [2] Ahn, J. *et al.* (2014) 'Flood frequency analysis for the annual peak flows simulated by an event-based rainfall-runoff model in an urban drainage basin', *Water (Switzerland)*, 6(12), pp. 3841–3863. doi: 10.3390/w6123841.
- [3] Beighley, R. E. and Moglen, G. E. (2003) 'Adjusting measured peak discharges from an urbanizing watershed to reflect a stationary land use signal', *Water Resources Research*, 39(4), pp. 1–11. doi: 10.1029/2002WR001846.
- [4] Brunner, M. I. *et al.* (2016) 'Flood volume estimation in Switzerland using synthetic design hydrographs - a multivariate statistical approach', in *Interpraevent*. Lucerne, Switzerland, pp. 468–476.
- [5] CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2017) *EM-DAT The international disaster database*. Available at: <http://www.emdat.be/>.
- [6] Crochet, P. and Þórarindóttir, T. (2014) *Flood frequency estimation for ungauged catchments in Iceland by combined hydrological modeling and regional frequency analysis*. Available at: [http://www.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/skyrslur/2014/VI\\_2014\\_001.pdf](http://www.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/skyrslur/2014/VI_2014_001.pdf).
- [7] DHI (2016) 'Mike Hydro Basin User Guide'. DHI, pp. 1–236.
- [8] Eckhardt, K. (2005) 'How to construct recursive digital filters for baseflow separation', *Hydrological Processes*, 19(2), pp. 507–515. doi: 10.1002/hyp.5675.
- [9] European Commission (2016) *Flood mapping: a core component of flood risk management*. Available at: [http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/flood\\_atlas/](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/) (Accessed: 22 November 2017).
- [10] European Parliament and the Council of European Union (2007) *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks*.
- [11] Galkate, R. V. *et al.* (2011) 'Rainfall Runoff Modeling Using Conceptual NAM Model'. Nagpur: Institute of Management and Technology.
- [12] Girons Lopez, M. *et al.* (2015) 'Location and Density of Rain Gauges for the Estimation of Spatial Varying Precipitation', *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(1), pp. 167–179. doi: 10.1111/geoa.12094.
- [13] Grimaldi, S., Petroselli, A. and Serinaldi, F. (2012) 'Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach', *Hydrological Processes*, 26(20), pp. 3124–3134. doi: 10.1002/hyp.8384.
- [14] Hafezparast, M. *et al.* (2013) 'A Conceptual Rainfall-Runoff Model Using the Auto Calibrated NAM Models in the Sarisoo River', *Hydrology Current Research*, 4(1), pp. 1–6. doi: 10.4172/2157-7587.1000148.
- [15] Klemeš, V. (1993) 'Probability of extreme hydrometeorological events - a different approach', in Kundzewicz, Z. W. *et al.* (eds) *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, pp. 167–176.
- [16] Madsen, H. (2000) 'Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives', *Journal of Hydrology*, 235(3), pp. 276–288. doi: 10.1016/S0022-1694(00)00279-1.

- [17] Malard, A., Jeannine, P.-Y. and Weber, E. (2015) 'Assessing the contribution of karst to flood peaks of the Suze River, potentially affecting the city of Bienne (Switzerland)', in Lollino, G. et al. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and water Resources*. Springer.
- [18] Mishra, A. K. (2013) 'Effect of rain gauge density over the accuracy of rainfall: a case study over Bangalore, India.', *SpringerPlus*, 2(1), p. 311. doi: 10.1186/2193-1801-2-311.
- [19] Nielsen, S. A. and Hansen, E. (1973) 'Numerical Simulation of the Rainfall Runoff Process on a Daily Basis', *Nordic Hydrology*, 4, pp. 171–190.
- [20] Pathiraja, S., Westra, S. and Sharma, A. (2012) 'Why continuous simulation? the role of antecedent moisture in design flood estimation', *Water Resources Research*, 48(6), pp. 1–15. doi: 10.1029/2011WR010997.
- [21] Rogger, M. et al. (2012) 'Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 456–457, pp. 30–43. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.
- [22] Serinaldi, F. (2009) 'Assessing the applicability of fractional order statistics for computing confidence intervals for extreme quantiles', *Journal of Hydrology*, 376(3–4), pp. 528–541.
- [23] Sikorska, A. E., Viviroli, D. and Seibert, J. (2017) 'Effective precipitation duration for runoff peaks based on catchment modelling', *Journal of Hydrology*, (November). doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.028.
- [24] Singh, A. et al. (2014) 'Rainfall-Runoff Modeling Using MIKE 11 NAM Model for Vinayakpur Intercepted Catchment, Chhattisgarh', *Indian Journal of Dryland Agricultural Research and Development*, 29(2), p. 1. doi: 10.5958/2231-6701.2014.01206.8.
- [25] Topalović, Ž. (2015a) 'Praktični problemi određivanja mjerodavnih velikih voda za potrebe projektovanja sistema odbrane od poplava', in *Zbornik radova sa 17. Savetovanja SDHI i SDH održanog 5.-6. oktobra u Vršcu*. Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, pp. 893–903. doi: 978-86-7518-183-5.
- [26] Topalović, Ž. (2015b) 'Towards catchment scale flood protection and climate change resilience with system of reservoirs , case study: Vrbas River Basin', in *IWA 7th Easter European Young Water Professionals Conference*. Belgrade.
- [27] Trambly, Y. et al. (2011) 'Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modelling efficiency and initial soil moisture conditions estimation', *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), pp. 157–170. doi: 10.5194/nhess-11-157-2011.
- [28] Verhoest, N. E. C. et al. (2010) 'Are stochastic point rainfall models able to preserve extreme flood statistics?', *Hydrological Processes*, 24(23), pp. 3439–3445. doi: 10.1002/hyp.7867.
- [29] Viglione, A. and Blöschl, G. (2008) 'On the role of storm duration in the mapping of rainfall to flood return periods', *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5, pp. 3419–3447.
- [30] Viglione, A., Merz, R. and Blöschl, G. (2009) 'On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods', *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), pp. 577–593. doi: 10.5194/hess-13-577-2009.
- [31] Viviroli, D. et al. (2009) 'Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland—Part I: Modeling framework and calibration results', *Journal of Hydrology*, 377(1–2), pp. 191–207. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2009.08.023.
- [32] Vörösmarty, C. J., Federer, C. A. and Schloss, A. (1998) 'Potential evapotranspiration functions compared on US watersheds: implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling', *Journal of Hydrology*, 207, pp. 147–169.
- [33] Wagener, T., Wheeler, H. S. and Gupta, H. V. (2004) *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. Imperial College Press.
- [34] Zavod za Vodoprivredu d.o.o. Bijeljina (2016) *Pregled i analiza hidroloških podataka i razvoj hidroloških modela*. Banja Luka, Bijeljina, Sarajevo, Beograd.



## ESTIMATION OF THE FLOOD HYDROGRAPHS FOR THE FLOOD HAZARD AND RISK MAPPING - THE CASE STUDY OF THE VRBAS RIVER BASIN, B&H -

by

Žana TOPALOVIĆ<sup>1)</sup>,  
Vujadin BLAGOJEVIĆ<sup>2)</sup>, Nedeljko SUDAR<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> University of Banja Luka - Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

<sup>2)</sup> Institute for Water Management, Bijeljina

### Summary

Flood frequency estimation is one of the common and very important tasks in hydrotechnical practice. In most cases, it is generally sufficient to determine the maximum flow for the appropriate return period or probability of occurrence. However, in some cases, it is necessary to determine the entire hydrograph of a certain probability of occurrence with maximum flow, runoff volume, times of raising and recession, or the base of hydrographs. In the case of the flood hazard and risk mapping, the needs of the hydraulic model used in mapping require the precisely defined hydrographs in a number of locations in the basin. The task further complicates the lack of observed data, both spatially (number of measuring stations on the basin) and in the terms of time (length of observation).

This paper presents the methodology of flood frequency hydrographs estimation applied for the Vrbas River Basin in Bosnia and Herzegovina, and for the purpose of developing flood hazard and flood risk maps.

Hydrograms of the required probability of occurrence were determined using the conceptual hydrological model MIKE-NAM within the MIKE Hydro River package. The hydrological model was calibrated for the needs of long-term (continuous) simulations, after which the obtained flows were statistically processed in order to obtain high waters quantiles. The model is further calibrated to the characteristic historical flood waves in order to obtain synthetic hydrographs on 45 characteristic locations on the basin. The maximum flows of these hydrograms are compared with quantiles obtained by statistical analysis of the observed flows and simulated in a continuous model. The results demonstrate the successful application of the hydrological model for the determination of flood frequency hydrographs.

Key words: quantiles, high waters, floods, hydrological model

Redigovano 5.11.2018.