

## Krive trajanja protoka kao sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV-light modela neizučenog sliva

Petar Praštalo<sup>1</sup>, Borislava Blagojević<sup>2</sup>, Žana Topalović<sup>3</sup>

APSTRAKT: Prilikom izrade planova upravljanja veštačkom akumulacijom u uslovima redovnog korišćenja, kod neizučenih slivova se postavlja problem određivanja hidroloških karakteristika prosečnih voda. Za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela za simulaciju vrednosti dnevnih protoka neizučenog sliva, u ovom radu su analizirane mogućnosti korišćenja krivih trajanja protoka sa izučenih slivova iz šireg regiona. Kontinualne hidrološke simulacije dnevnih protoka u periodu 1961-2008 izrađene su za mali sliv reke Vijake do profila brane Drenova u Bosni i Hercegovini. Kao osnovno sredstvo za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela, korišćeno je poređenje nagiba krive dobijene na osnovu simuliranih protoka i prosečne krive trajanja protoka sa izučenih slivova. Kao dodatni kriterijum za verifikaciju modela, uvedeno je vizuelno slaganje modularnih krivih simuliranih prosečnih mesečnih protoka neizučenog sliva i odgovarajućih osmotrenih vrednosti u širem regionu. Rezultati ukazuju na bolje slaganje modularne krive simuliranih prosečnih mesečnih protoka u poređenju sa rešavanjem istog problema pomoću hidrološkog modela HEC-HMS.

Ključne reči: Kriva trajanja protoka, neizučeni sliv, kontinualna simulacija oticaja, HBV light.

## Flow duration curves as a tool for calibration and verification of the HBV-light model in ungauged catchment

ABSTRACT: During development of reservoir management plans for the regular use mode, there is a problem of determining the mean flow characteristics in ungauged basins. For the calibration and verification of the HBV light model for simulating the values of the daily flows in the ungauged basin, this paper analyses the possibilities of using the flow duration curves from the gauged basins in the wider region. Continuous hydrological simulations of daily flows in the period 1961-2008 were made for a small river basin of the Vijaka river at the Drenova dam in Bosnia and Herzegovina. As a basic tool of calibration and verification of the HBV light model, a comparison of the flow duration curve slopes was used. The flow duration curves were generated from simulated flows for ungauged catchment, and observed flow data from gauged catchments. As an additional criterion for verification of the model, visual matching of modular curves – mean monthly flow ratio to mean annual flow curves was introduced. Modular curves obtained from simulated flows in the ungauged basin were compared to the curves from gauged catchments in the wider region. The results indicate a more realistic modular curve of simulated average monthly flows by the HBV light model, compared to the hydrological model HEC-HMS.

Keywords: Flow duration curve, ungauged catchment, continuous runoff simulation, HBV light.

<sup>1</sup> Petar Praštalo, D.I.G., stručni saradnik, Institut za građevinarstvo "IG", Banja Luka, [petarprastalo3@gmail.com](mailto:petarprastalo3@gmail.com)

<sup>2</sup> dr Borislava Blagojević, D.I.G., docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, [borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs](mailto:borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs)

<sup>3</sup> mr Žana Topalović, D. I. G., viši asistent, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, [zana.topalovic@aggfbl.unibl.org](mailto:zana.topalovic@aggfbl.unibl.org)

## 1 Uvod

U toku perioda eksploatacije hidrotehničkih objekata, ponekad se uvidi mogućnost dodeljivanja njihove dodatne/dopunske uloge u vodoprivrednom sistemu. Takav slučaj dogodio se nedavno sa akumulacijom i branom Drenova na severu Bosne i Hercegovine (BiH) u Republici Srpskoj. Akumulacija Drenova je višenamenska akumulacija nastala sedamdesetih godina prošlog veka, sa prvenstvenom namenom zaštite od poplava nizvodnog područja. U dolini reke Vijake izgrađena je niska betonska brana, iza koje je formirano akumulaciono jezero. Nakon izgradnje brane, akumulacija je duži vremenski period korišćena i kao izvoriste za vodosnabdevanje opštine Prnjavor, zbog veoma skromnih rezervi vode na području opštine (ZZV, 2016). Vremenom su se javljali novi načini korišćenja akumulacije, tako da su danas prisutni: zaštita od poplava, snabdevanje vodom, rekreacija i sport, oplemenjavanje malih voda, kao i najnovija namena, hidroenergetika. Nedavno se postavilo pitanje upravljanja branom i akumulacijom, zbog suprotstavljenih interesa svih trenutnih vodoprivrednih korisnika (ZZV, 2016).

U radu se istražuju mogućnosti dobijanja hidroloških podloga u domenu prosečnih voda za izradu planova upravljanja u uslovima redovnog korišćenja akumulacije, pomoću hidrološkog modela za kontinualnu simulaciju protoka. Problem kalibracije modela i verifikacije rezultata simulacije je naglašen zbog nepostojanja podataka osmatranja hidrometeoroloških veličina kako na samom slivu, tako i u neposrednoj okolini slivnog područja. Prethodno istraživanje je obuhvatilo korišćenje krivih trajanja dnevnih protoka (KTP) sa stanica u regionu koje su poslužile za kalibraciju i verifikaciju hidrološkog modela u paketu HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrological Modelling System) (Praštaló i sar., 2017). Cilj ovog istraživanja je ispitivanje mogućnosti drugog modela, HBV light, konceptualnog semi-distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju protoka, da vernije reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja na osnovu istih ulaznih veličina: padavina, temperature vazduha i potencijalne evapotranspiracije (PET). HBV model je 1970tih razvio Švedski meteorološki i hidrološki institut (SMHI) (Bergström, 1976). Verzija modela HBV light je posebno razvijena u obrazovne svrhe na Univerzitetu Upsala (Seibert, 2005; Seibert and Vis, 2012).

## 2 Metodologija

### 2.1 Opis modela HBV light

Model HBV light se temelji na jednačini vodnog bilansa (SMHI, 2018) :

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes) \quad (1)$$

gde su korištene sledeće oznake:  $P$  – padavine,  $E$  – evapotranspiracija,  $Q$  – proticaj,  $SP$  – snežni pokrivač,  $SM$  – vlaga (vlažnost) tla,  $UZ$  – zapremina vode u gornjem rezervoaru,  $LZ$  – zapremina vode u donjem rezervoaru,  $lakes$  – jezera i močvarne površine.

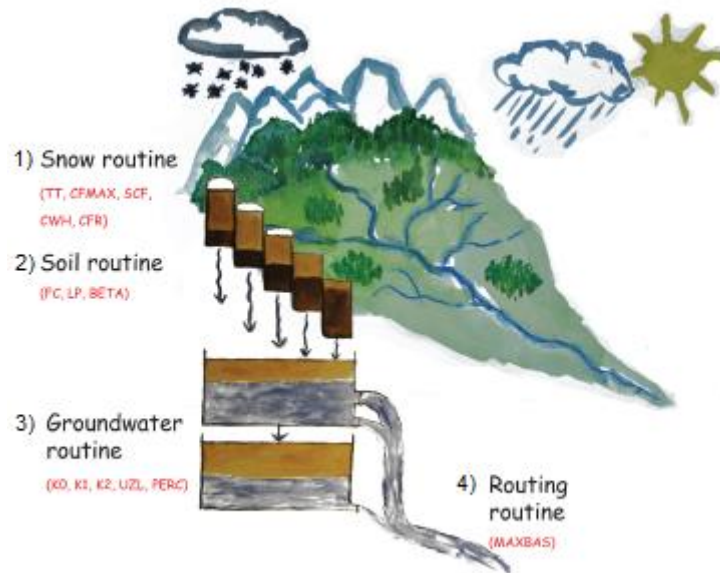
U modelu se na osnovu dnevnih ulaznih podataka o padavinama, temperaturi vazduha i podataka o potencijalnoj evapotranspiraciji (PET), simulacija oticaja sprovodi kroz četiri računski modula: 1) Sneg (akumulacija i topljenje snega), 2) Zemljište (vlažnost i zasićenost tla), 3) Podzemlje (generisanje oticaja), 4) Transformacija oticaja u hidrogram (Seibert, 2005). Struktura modela je ilustrovan na slici 1.

U četiri računski modula modela HBV light figuriše 19 parametara koji su prikazani na slici 1 i objašnjeni u tabeli 1 (kol.1-4).

Model je semi-distribuiran, tako da se sliv može predstaviti: visinskim zonama (najviše 20), vegetacionim zonama (najviše 3) i podslivovima. Temperatura i padavine variraju sa visinom, što određuju parametri  $PCALT$  i  $TCALT$ . Uobičajene vrednosti temperaturnog gradijenta za priraštaj nadmorske visine od 100 m su  $-0.6$  °C, a gradijenta padavina  $+10 \div 20\%$  (Seibert, 2005).

Sneg se računa metodom stepen-dan. U modulu Zemljište, dopuna podzemlja i stvarna evapotranspiracija (ET) se računaju kao funkcije aktuelne/raspoložive zapremine vode, dok je oticaj

funkcija zapremine vode i rezultata sračunatih u modulu Podzemlje. Na kraju se za transformaciju sračunatog oticaja koristiti trougaona ponderisana funkcija. Rezultat proračuna je hidrogram dnevnih protoka u periodu simulacije.



Slika 1. Šema strukture modela HBV light (izvor: Seibert and Vis, 2012).

Figure 1. Schematic structure of the HBV light model (source: Seibert and Vis, 2012).

## 2.2 Izučavano područje, raspoloživi i ulazni podaci

Akumulacija Drenova formirana je izgradnjom betonske brane Drenova na reci Vijaci, najvećoj levoj pritoci reke Ukrine, koja je desna pritoka reke Save (slika 2). U istraživanju je tretirano slivno područje do profila brane Drenova. Površina sliva je 68 km<sup>2</sup>. Sliv je hidrološki neizučen zbog kratkog perioda osmatranja protoka i padavina na slivu, u neposrednoj okolini i izrazito nepouzdanih hidroloških podataka za reku Vijaku (ZZV, 2016). Problem nedostatka hidroloških i meteoroloških podataka u BiH je svakodnevica struke, zbog prestanka rada Republičkog hidrometeorološkog zavoda BiH u periodu 1990-tih i velikih poplava od 2010 pa nadalje, koje su nanele štetu novoformiranim ili obnovljenim stanicama sledstvenika: Republičkog hidrometeorološkog zavoda Republike Srpske i Federalnog hidrometeorološkog zavoda BiH.

Podaci o dnevnim padavinama i temperaturama vazduha sa meteorološke stanice (MS) Banja Luka korišćeni su kao ulazni podaci modela HBV light za sliv brane Drenova, zato što je prostorna analiza podataka o padavinama metodom Tisenovih poligona, pokazala da od tri razmatrane MS u okolini sliva (Slavonski brod, Banja Luka, Doboj) 97% sliva leži u poligonu MS Banja Luka, a 3% u MS Doboj (Praštalo i sar., 2017).

Vremenski korak simulacije (jedan dan) mora biti isti za sve serije podataka osim za evapotranspiraciju, gde se mogu koristiti mesečne vrijednosti PET (Seibert, 2005). Mesečne vrednosti PET su dobijene metodom Torntvajtja (Thorntwaite, 1948), za koju su korišćeni klimatološki podaci sa MS Banja Luka (Praštalo, 2017; Praštalo i sar., 2017).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

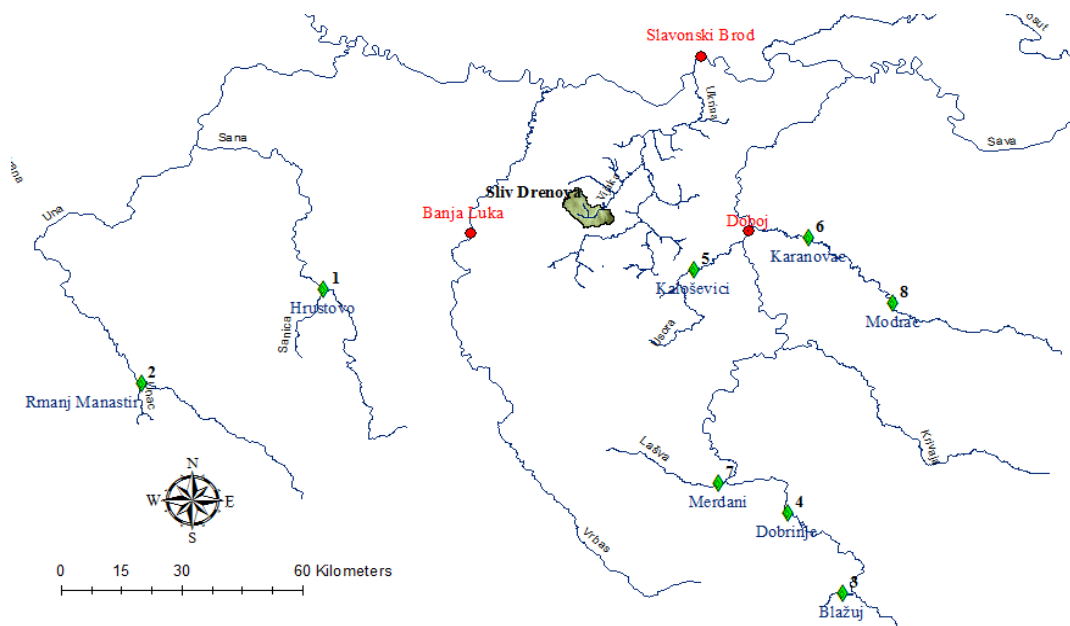
Tabela 1: Opis parametara HBV light modela (Seibert, 2005), opseg i usvojene vrednosti za sliv Drenova.

Table 1: The HBV light model parameter description (Seibert, 2005), parameter range and the Drenova catchment model parameter values.

Modul	Parametar	Opis	Jedinica	Donja granica	Gornja granica	Drenova
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Sneg	<i>TT</i>	Temperaturni prag koji klasifikuje padavine (sneg/kiša)	°C	-3.00	0.50	0.00
Sneg	<i>CFMAX</i>	Faktor topljenja snega	mm/dan/°C	0.100	10.000	10.000
Sneg	<i>SFCF</i>	Korektivni faktor za sneg	-	0.50	2.50	0.85
Sneg	<i>SP</i>	Faktor sezonske varijabilnosti	-	0.1	1	0.9
Sneg	<i>CFR</i>	Koeficijent ponovnog zamrzavanja	-	0.001	1.00	0.01
Sneg	<i>CWH</i>	Kapacitet vode u snegu	-	0.0001	0.0100	0.0001
Zemljište	<i>FC</i>	Maksimalni kapacitet vode u tlu	mm	100.0	550.0	350.0
Zemljište	<i>LP</i>	Vlažnost tla iznad koje ET dostiže PET	mm	1.00	1.00	0.05
Zemljište	<i>BETA</i>	Parametar za definisanje doprinosa proticaja od kiše ili snega	-	0.001	5.000	0.000
Podzemlje	<i>PERC</i>	Maksimalno proceđivanje u donji rezervoar (perkolacija)	mm/dan	0.00	10.00	8.00
Podzemlje	<i>UZL</i>	Granična vrednost u gornjem rezervoaru	mm	5.00	10.00	9.00
Podzemlje	<i>K0</i>	Koeficijent recesije za gornji deo gornjeg rezervoara	dan <sup>-1</sup>	0.001	0.500	0.005
Podzemlje	<i>K1</i>	Koeficijent recesije za donji deo gornjeg rezervoara	dan <sup>-1</sup>	0.01	0.30	0.30
Podzemlje	<i>K2</i>	Koeficijent recesije za donji rezervoar	dan <sup>-1</sup>	0.00005	0.25	0.11
Transformacija oticaja u hidrogram	<i>MAXBAS</i>	Baza jednakostraničnog trougla težinske funkcije	dan	1.00	2.00	1.00
Visinska varijabilnost podataka	<i>PCALT</i>	Promjena padavina sa nadmorskom visinom	%/100 m	10	50	40
Visinska varijabilnost podataka	<i>TCALT</i>	Promjena temperature sa nadmorskom visinom	°C/100 m	0,1	1	0,3
Visinska varijabilnost podataka	<i>elev P</i>	Povećanje padavina u PTQ datoteci	m	0,5	1	0,9
Visinska varijabilnost podataka	<i>elev T</i>	Povećanje temperature u PTQ datoteci	m	0,5	1	0,9

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 2: Lokacije: brane Drenova, pripadajućeg sliva reke Vijake, MS razmatranih za ulazne meteorološke podatke i HS korišćenih za kalibraciju i verifikaciju HBV light modela (dopunjeno na osnovu izvora: Praštalo i sar., 2017).

Figure 2. Location of the Drenova dam and associated catchment, MS stands for the meteorological input data, and HS hydrological stations applied for calibration and validation of the HBV light model (modified from source: Praštalo et al., 2017).

### 2.3 Karakteristike sliva i model sliva u HBV light-u

Površina sliva do pregradnog profila brane Drenova je 68.26 km<sup>2</sup>. Visinski položaj sliva je između 161 mm u profilu brane i 594 mm na najvišoj tački vododelnice. Hidrografsku mrežu čine četiri vodotoka: Vijaka, Topolova, Lišnja i Drenovica sa svojim pritokama (Slika 3 levo). Glavni tok je reka Vijaka. Hidraulička dužina tečenja je 16 km. Prosečan nagib sliva je 9.81%, dok je dužina glavnog toka 14 km, sa prosečnim nagibom od 1.25% (Praštalo, 2017).

Priprema modela slivnog područja je obavljena u GIS okruženju. Za formiranje visinskih zona kao ulazni podatak korišten je digitalni model terena (DTM), prikazan na slici 3 levo. Usvojena je jedna visinska zona. Na slici 3 desno, prikazano je korišćenje zemljišta na slivu Drenove dobijeno iz Corine (EEA, 2006), gde je prisutno 6 različitih tipova korišćenja zemljišta. Na osnovu toga, u modelu sliva su usvojene dve vegetacione zone: šume i ostale površine. Podslivovi nisu odvajani.

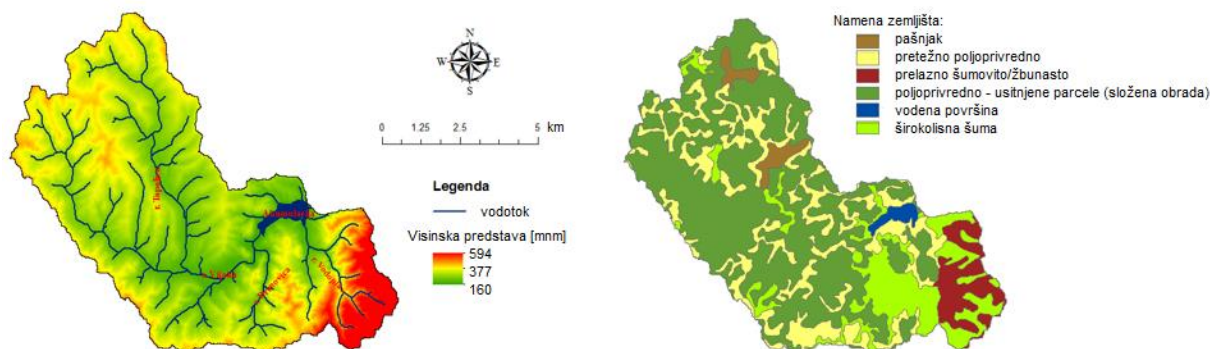
### 2.4 Kalibracija i verifikacija modela

Izbor strategije za kalibraciju parametara modela i verifikaciju rezultata simulacije je veoma složen problem čak i kada su u pitanju slivovi kod kojih postoje podaci osmatranja hidroloških i meteoroloških veličina. Kod neizučenih slivova, koriste se strategije za posrednu kalibraciju i verifikaciju modela. U radu je razmatran jedan pristup za kalibraciju parametara HBV light modela i dva pristupa za verifikaciju. Osnovna strategija je podela na period kalibracije i verifikacije modela, a osnovno sredstvo je bezdimenzionalna kriva trajanja dnevnih protoka (KTP). Kod ovako formulisane KTP, trajanja se povezuju sa odnosom karakterističnih protoka datog trajanja i prosečnog protoka u višegodišnjem periodu za koji se definiše KTP.

Usled nedostatka podataka osmatranja protoka u slivu Drenove za kalibraciju i verifikaciju modela, korišćeni su podaci iz šireg regiona sa hidroloških stanica (HS) koje imaju duži niz dnevnih osmatranja protoka (slika 2). Izbor HS je iznuđen, a vođen je raspoloživim periodom osmatranja, popunjenošću serija dnevnih protoka, površinom sliva i udaljenošću od sliva Drenove.

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018.

## Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.



Slika 3: Levo: Kombinovani prikaz digitalnog modela terena i rečne mreže sliva (izvor: Praštalo, 2017); Desno: Korišćenje zemljišta u slivu prema CLC (EEA, 2006).

Figure 3: Left: Combined DTM and river network (source: (Praštalo, 2017)); Right: Land use in the catchment according to CLC (EEA, 2006).

Odabrani period za kalibraciju modela je od 01.01.1961 do 31.12.1990. tj. 30 godina. Period verifikacije je 4 godine (01.01.2005. ÷ 31.12.2008.). Uticaj akumulacije Drenova je isključen tokom kalibrisanja kao i tokom verifikacije modela. U periodu kalibracije, za formiranje bezdimenzionalne KTP, korišćeni su podaci sa 8 HS, a u periodu verifikacije modela, sa 7 (bez HS Dobrinje na reci Bosni). Dakle, na osnovu registrovanih protoka na 8 HS (slika 2, tabela 2), formirane su bezdimenzionalne KTP za svaku HS, posebno za period kalibracije i posebno za period verifikacije modela. Za oba perioda, formirana je po jedna zajednička KTP (slika 4), osrednjavanjem bezdimenzionalnih KTP sa razmatranih HS.

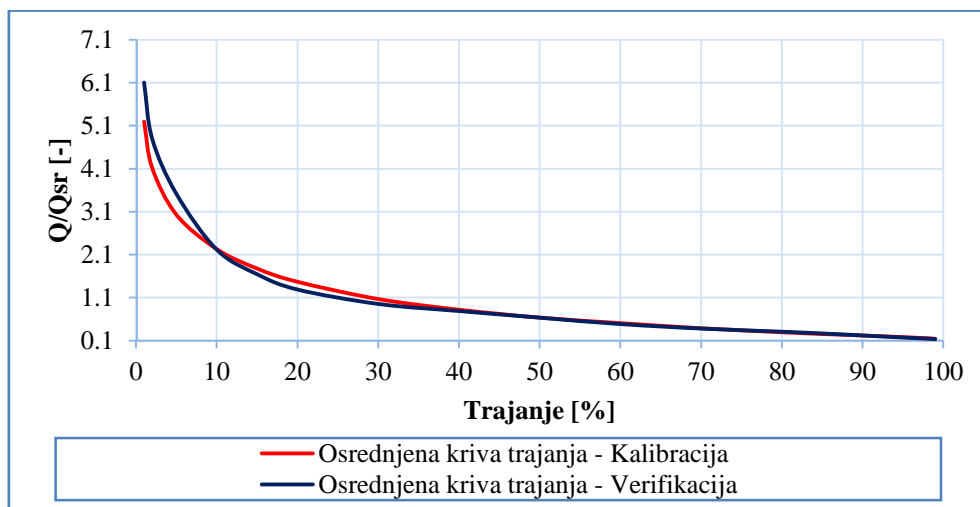
HBV light model može da koristi automatsku kalibraciju parametara modela i daje pet veličina za pokazatelje slaganja sa osmotrenim protocima (Seibert, 2005). Parametri modela ovde su kalibrisani manuelno. Kriterijum za kalibraciju je slaganje KTP modela sa osrednjenom KTP sa stanica iz regiona, a mera slaganja je nagib krive u sredini intervala, tj. za trajanja protoka između 30 i 60%. Međutim, pored kalibracije modela prema sredini intervala, ovde se gledalo slaganje u intervalima od 0-30%, kao i 60-100%, odnosno za period malih i velikih voda.

U poređenju sa korišćenim modelom HEC-HMS sa 8 parametara (Praštalo i sar., 2017), ovde je kalibrisano 19 parametara modela HBV light.

Tabela 2: Podaci o HS korišćenim za kalibraciju i verifikaciju modela Drenove (izvor: Praštalo i sar., 2017).

Table 2: Data on HS applied for calibration and validation of the Drenova model (source: Praštalo et al., 2017).

Br.	HS	Vodotok	Površina sliva [km <sup>2</sup> ]	Period raspoloživih podataka osmatranja protoka	Odstojanje HS od profila brane Drenova [km]
1	Hrustovo	Sanica	348	1966-1990; 2006-2008	74
2	Rmanj Manastir	Unac	1010	1961-1990; 2007-2008	125
3	Blažuj	Zujevina	155	1966-1990; 2006-2008	118
4	Dobrinje	Bosna	2677	1961-1990	93
5	Kalošević	Usora	633	1961-1990; 2006-2009	27
6	Karanovac	Spreča	1828	1961-1990; 2006-2008	52
7	Merdani	Lašva	950	1961-1990; 2006-2008	80
8	Modrac	Spreča	1176	1961-1990; 2006	77



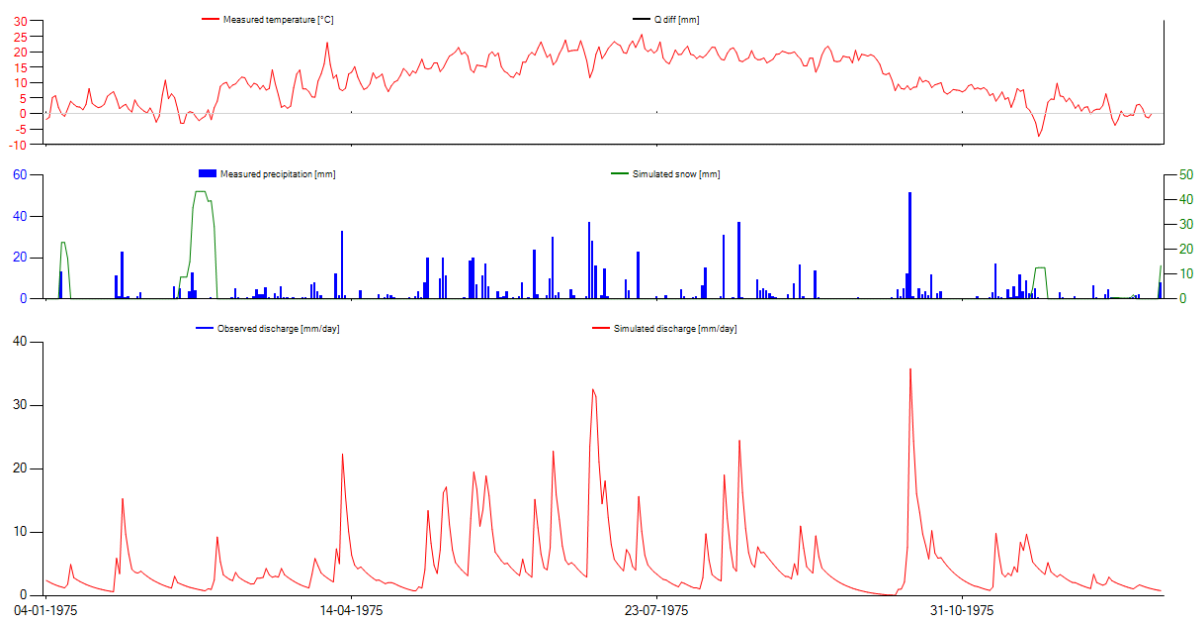
Slika 4: Bezdimenzionalne osrednjene KTP za periode kalibracije i verifikacije modela (Praštalo, 2017)

Figure 4: Dimensionless averaged FDC in the model calibration and verification periods (Praštalo, 2017)

### 3 Rezultati modeliranja i diskusija

#### 3.1 Dnevne KTP u periodima kalibracije i verifikacije modela

Primenjen pristup posredne kalibracije i verifikacije simulacionog modela, podrazumeva dodatni korak u obradi rezultata simulacije – izradu KTP na osnovu godišnjih serija simuliranih dnevnih protoka. Na slici 5 prikazani su rezultati simulacije za jednu godinu iz kalibracionog perioda.



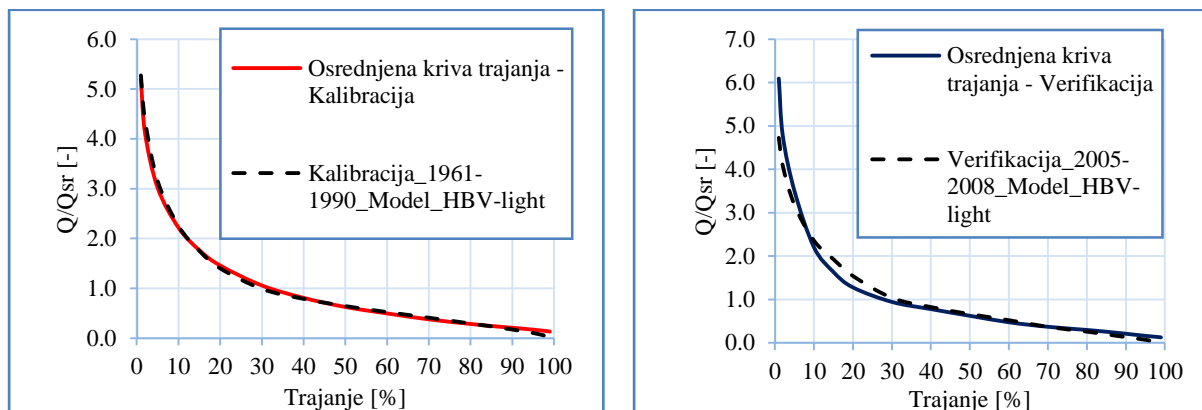
Slika 5: Grafički prikaz simulacije za 1975. godinu iz kalibracionog perioda.

Figure 5: Simulation results for the year 1975. in the calibration period.



# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

'Osmotrene' odn. osrednjene KTP korišćene u procesima kalibracije i verifikacije modela, prikazane su u celom dijapazonu trajanja na slici 6, zajedno sa odgovarajućim KTP modela. Nagib KTP u opsegu trajanja između 30 i 60%, izdvojeno je prikazan numerički u tabeli 4 i grafički na slici 7.



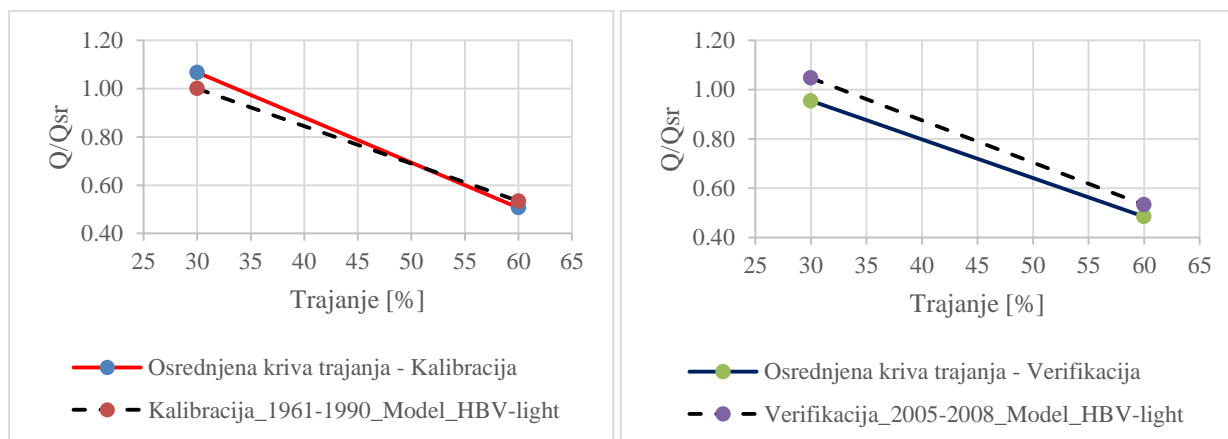
Slika 6: Osmotrene KTP i KTP modela. Levo: Period kalibracije; Desno: Period verifikacije.

Figure 6: Observed and modeled FDC and FDC. Left: The calibration period; Right: The verification period.

Tabela 4: Nagibi KTP [%] za interval trajanja protoka od 30÷60%

Table 4: Daily FDC slope [%] in the flow duration range of 30÷60%

Proces	KTP osmotreno	KTP model Drenova	$\Delta$ (osmotreno-model)
Kalibracija	1.867	1.552	0.315
Verifikacija	1.564	1.715	-0.151



Slika 7: Prikaz KTP u intervalu 30÷60% za periode kalibracije modela (levo) i verifikacije (desno).

Figure 7: The FDC interval 30÷60% in the calibration period (left) and validation period (right).

Na osnovu slike 6, vizuelnim upoređivanjem KTP za period kalibracije, primećuje se sasvim dobro slaganje u celom dijapazonu trajanja KTP. U periodu verifikacije, odstupanje KTP modela se javlja u domenu kraćih trajanja (do 20%) – srednjih velikih voda. Odstupanje nagiba na segmentu KTP između 30% i 60% je manje za period verifikacije u odnosu na period kalibracije (tabela 4). Grafički prikaz segmenata, sa pomakom nagore (slika 7 desno), ukazuje da model daje veću varijaciju oticaja u periodu verifikacije u odnosu na osrednjenu KTP.



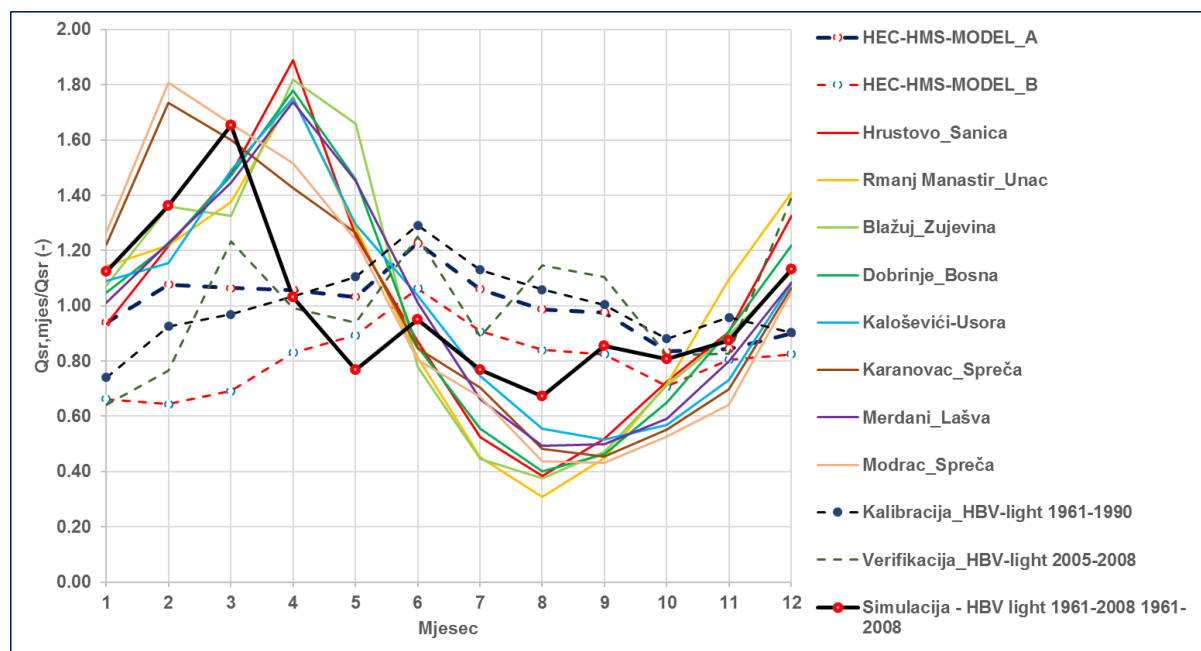
### 3.2 Osetljivost parametara modela

Pod osetljivošću parametara modela podrazumeva se uticaj promene njegove vrednosti u intervalu na konačni rezultat modeliranja - vrednost oticaja sa sliva. Osetljivi parametri modela za malu promenu vrednosti u svom intervalu značajno menjaju rezultat modeliranja.

Usvojene vrednosti parametara HBV light modela sliva Drenove prikazane su u tabeli 2, kol. 7, a gornja i donja granica intervala za svaki parametar u kol. 5 i 6. Prilikom ručne kalibracije modela, analiziran je svaki pojedinačni parametar modela tako što je proverena njegova osetljivost, tj. uticaj na KTP modela i njeno slaganje sa osrednjenom KTP u periodu kalibracije. Utvrđeno je da su najosetljiviji parametri modula Sneg - akumulacije i topljenja snega, kao i parametri transformacije oticaja u hidrogram.

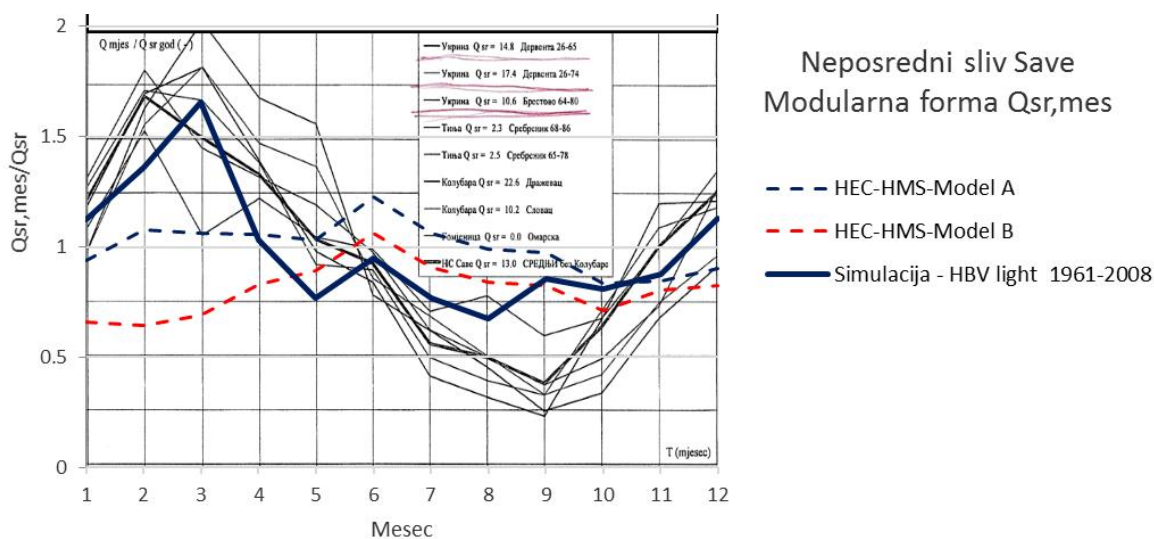
### 3.3 Unutargodišnja raspodela oticaja

U analizi srednjih voda, osim vrednosti prosečnog višegodišnjeg protoka, srednjih mesečnih protoka, kao i KTP, važna je i unutargodišnja raspodela oticaja. Ona ujedno u ovom radu predstavlja dodatni kriterijum za verifikaciju rezultata simulacionog modela HBV light. Verifikacija je opet posredna i prikazana je u dva konteksta: 1) u odnosu na skup HS koje su korišćene za kalibraciju i verifikaciju modela i 2) u okviru slivova direktnih pritoka reke Save u BiH, prema dijagramu iz Analize bilansa voda Republike Srpske (ZZV, 2011). Poređenje unutargodišnje raspodele oticaja među slivovima različite površine, najpogodnije je preko modularne krive srednjih mesečnih protoka. Modularna kriva se predstavlja odnosom srednjih mesečnih protoka i prosečnog godišnjeg protoka u višegodišnjem periodu. Na slici 8 prikazane su modularne krive za HS koje su korišćene za kalibraciju i verifikaciju modela, a na slici 9, za slivove neposrednih pritoka reke Save.



Slika 8: Unutargodišnja raspodela oticaja na HS korišćenim za kalibraciju modela i rezultati simulacije prikazani preko modularne krive srednjih mesečnih protoka.

Figure 8: Interannual variability at HS used for model calibration and simulation results shown as monthly flow ratio to annual flow.



Slika 9: Unutargodišnja raspodela oticaja u karakterističnim profilima direktnih pritoka reke Save (izvor: ZZV, 2011) i rezultati simulacije prikazani preko modularne krive srednjih mesečnih protoka.

Figure 9: Interannual variability for the direct tributaries to the river Sava (source: ZZV, 2011) and simulation results shown as monthly flow ratio to annual flow.

Unutargodišnja raspodela oticaja je slična na HS prikazanim na slici 8, kada je u pitanju pojava malih i velikih voda, osim na reci Spreči, gde je najvodniji mesec februar. Rezultati simulacije u paketu HEC-HMS za model sa snegom (A) i model bez snega (B), ukazuju da model nije u stanju da reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja (Praštalo i sar., 2017). Isto tako, posebno posmatrane modularne krive u periodima kalibracije i verifikacije modela HBV light, ne pokazuju realnu varijaciju oticaja između perioda velikih i malih voda, niti su ovi periodi dobro raspoređeni unutar godine. Period verifikacije modela je kratak da bi unutargodišnja raspodela oticaja mogla da se ispolji, što se i vidi iz naizmeničnih skokova modularne krive. Međutim, modularna kriva za ceo period 1961-2008, dobijena na osnovu simuliranih dnevnih protoka u modelu HBV-light, nalikuje modularnim krivama sa HS (slika 8). Postoji izražen period velikih voda, kao i period malih voda, ali je odnos mesečnih protoka i prosečnog protoka u periodu malih voda veći nego na razmatranim HS na slici 8.

Za pozadinu slike 9 koja je preuzeta iz originalnog dokumenta (ZZV, 2011), nažalost, nije bio dostupan bolji grafički prilog gde bi se jasno videla pripadnost modularnih krivih karakterističnim profilima reka. Ipak, ova slika omogućava da se bolje sagledaju rezultati simulacije modela HBV light za ceo period 1961-2008. Na slici su prikazane modularne krive sa profila koji su služili za bilansiranje voda u slivovima reka na reci Ukrini, Tinji i Gomjenici, a prikazani su i profili HS na Kolubari. Zapaža se da modularna kriva za sliv akumulacije Drenova dobijena preko hidrološkog modela HBV light bolje reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja u odnosu na HEC-HMS. Pored toga, u hladnom/vanvegetacionom periodu godine, modularna kriva odgovara 'familiji' krivih sa slivova iz užeg regiona.

## 4 Zaključak

U radu su istraživane mogućnosti kalibracije i verifikacije modela za simulaciju dnevnih protoka za neizučeni sliv pomoću KTP u softverskom paketu HBV light koji ima 19 parametara. Cilj istraživanja bio je ispitivanje potencijala za reprodukciju unutargodišnje raspodele oticaja u odnosu na rezultate simulacije HEC-HMS modelom sa 8 parametara (Praštalo i sar., 2017), na osnovu istih ulaznih veličina: padavina, temperature vazduha i potencijalne evapotranspiracije (PET).

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

Sliv brane Drenova je za HBV light model šematizovan kao celina – bez podslivova, preko jedne visinske zone i dve vegetacione. Model sliva je pripremljen u GIS okruženju. Za izrađeni model su korišćeni ulazni meteorološki podaci sa MS Banja Luka. Kalibracija i verifikacija modela sprovedene su pomoću KTP sa 8 odnosno 7 HS iz šireg regiona. Period kalibracije je 30 godina, a verifikacije 4. Utvrđeno je da su u HBV light modelu najosjetljiviji parametri modula Sneg - akumulacije i topljenja snega, kao i parametri transformacije oticaja u hidrogram.

Izvršeno je vizuelno poređenje celih dijapazona KTP tokom oba perioda i veća odstupanja u opsegu srednjih velikih voda su očigledna u periodu verifikacije modela. Međutim, u periodu verifikacije, razlika nagiba srednjeg segmenta KTP (30÷60%) je manja u odnosu na period kalibracije. Grafici nagiba KTP, sa druge strane, pokazuju da je KTP u periodu verifikacije bliža osrednjenom KTP u odnosu na period verifikacije gde je ona praktično translatorno pomerena naviše. Ova situacija navodi na zaključak da su sve evidentirane razlike, posebno u dijapazonu velikih voda i povećanja odnosa srednjih mesečnih i srednjeg višegodišnjeg protoka, doprinele da HBV light model bolje reprodukuje unutargodišnju raspodelu oticaja u odnosu na HEC - HMS model.

Pool i saradnici (2017) su zaključili da se hidrogrami bolje simuliraju kada strategije kalibracije i verifikacije modela obuhvate velike vode, a KTP krive, kada se baziraju na srednjim i malim vodama. U nastavku istraživanja, ispitaće se uticaj kalibracije parametara modela na segment KTP bliži velikim vodama, kao i finija šematizacija sliva u modelu HBV light, sa podslivovima i više visinskih zona.

## Zahvalnica

Autori rada se zahvaljuju Zavodu za vodoprivredu d.o.o. Bijeljina na ustupljenim podacima za istraživanje.

## Literatura

1. Bergström, S., (1976) *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*, SMHI Report RHO 7, Norrköping, 134 pp.
2. European Environment Agency (EEA) (2006) Corine Land Cover (CLC)
3. Pool, S., Viviroli, D., Seibert, J. (2017) Prediction of hydrographs and flow-duration curves in almost ungauged catchments: which runoff measurements are most informative for model calibration?, *Journal of Hydrology* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.037>
4. Praštalo, P. (2017) *Modeliranje hidrološki neizučenog sliva za potrebe akumulacije "Drenova"*, Diplomski rad, Arhitektonsko – građevinsko - geodetski fakultet Univerziteta u Banja Luci
5. Праштало, П., Благојевић, Б., Топаловић, Ж. (2017) Калибрација и верификација НЕС НМС модела неизученог слива помоћу кривих протока, *Наука у пракси*, бр. 20/2017, стр. 20-28
6. Seibert, J. (1999) *Conceptual runoff models - fiction or representation of reality?*, Ph.D. thesis, University of Uppsala the Faculty of Science and Technology.
7. Seibert, J. (2005) *HBV light user's Manual*. Stockholm: Stockholm University. doi: 10.13155/29825.
8. Seibert, J. and Vis, M. J. P. (2012) Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3315–3325, 2012. doi:10.5194/hess-16-3315-2012
9. SMHI. (2015) Swedish Meteorological and Hydrological Institute - Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning. [ONLINE] Available at: <https://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/hbv-1.90007>. [Accessed 6 September 2018]
10. Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38-1, pp. 55-94
11. Zavod za vodoprivredu (ZZV) (2011) *Analiza bilansa voda u Republici Srpskoj*, Hidrološka studija, Zavod za vodoprivredu d.o.o., Bijeljina

# 18. Savetovanje SDHI i SDH - Niš, Srbija 2018. Conference SDHI & SDH - Niš, Serbia 2018.

12. Zavod za vodoprivredu (ZZV) (2016) *Analiza stanja i prijedlog mjera za sanaciju brane, uspostavljanje sistema monitoringa i upravljanja branom i akumulacijom Drenova*, Studija, Zavod za vodoprivredu d.o.o., Bijeljina