

## PRIMENA MODELA HBV ZA HIDROLOŠKU PROGNOZU NA SLIVU REKE JADAR

Marija IVKOVIĆ

Republički hidrometeorološki zavod Srbije

Jasna PLAVŠIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Dejan VLADIKOVIĆ i Jelena JERINIĆ

Republički hidrometeorološki zavod Srbije

### REZIME

Model SMHIHBV korišćen je za modeliranje oticaja na slivu reke Jadar radi ispitivanja mogućnosti njegovog korišćenja za prognozu poplavnih talasa. Reka Jadar je najveća pritoka reke Drine na teritoriji Srbije sa površinom od 959 km<sup>2</sup>, na kojoj postoje česti problemi sa velikim vodama i plavljenjem. Model HBV ima mogućnost modeliranja talasa prouzrokovanih naglim topljenjem snega, kao i intenzivnim kišama. Rad prikazuje osnovne postavke ovog modela, kao i proces kalibracije, verifikacije i ocene rezultata za sliv Jadra do stanice Lešnica. Postignuti su zadovoljavajući rezultati imajući u vidu kompleksnu topografiju sliva i mali broj stanica sa raspoloživim podacima za dobro predstavljanje prostorne neravnomernosti meteoroloških parametara.

**Ključne reči:** HBV model, velike vode, kontinualni hidrolološki model

### 1. UVOD

Najveću materijalnu štetu na slivu reke Jadar nanose poplavni talasi nastali naglim topljenjem snega kao i talasi prouzrokovani obilnim kišama. Najugroženija su područja u opštini Osečina i Krupanj koja se nalaze u srednjem delu toka Jadra. Poslednja decenija dvadesetog veka bila je obeležena velikim poplavama i to 2000, 2001. i 2009. godine. U junu 2001. godine kod hidrolološke stanice Lešnica zabeležen je apsolutni maksimalni vodostaj od 413 cm i protok od 192 m<sup>3</sup>/s. Tom prilikom došlo je do popuštanja nasipa i izlivanja Jadra iz svog korita. Kota redovne odbrane od poplave za profil Lešnica iznosi 200 cm.

Od oktobra 2010. godine podaci o vodostajima sa h.s. Lešnica dostupni su u realnom vremenu, čime su stvoreni uslovi za uspostavljanje prognostičkog modela padavine-oticađ kontinualnog tipa, koji ima mogućnost definisanja oticaja za vreme kišnih epizoda i između njih. U tu svrhu u Republičkom hidrometeorološkom zavodu koristi se model HBV (SMHI, 2006), koji je namenjen simulacijama dnevnih protoka na osnovu dnevnih količina padavina, temperatura vazduha i potencijalne evapotranspiracije.

Blagovremena najava i upozorenje na vanredne vodostaje omogućila bi pravovremenu reakciju sa ciljem zaštite stanovništva i materijalnih dobara. Od velike važnosti je što preciznije određivanje mesta, trajanja i vrha poplavnog talasa. Modeli kao što je SMHIHBV imaju mogućnost procene vrednosti tih parametara, a samim tim i izdavanje preciznih hidrololoških prognoza.

U ovom radu prikazani su rezultati na uspostavljanju prognostičkog modela za sliv Jadra do h.s. Lešnica pomoću modela HBV.

### 2. OPIS MODELA SMHIHBV

SMHIHBV je model koji je razvila švedska hidrometeorološka služba SMHI (Bergstrom i Forsman, 1973). To je konceptualni model, komponovan od manjeg broja modula za simulaciju određene faze transformacije bruto/neto kiše u hidrogram oticaja.

Model funkcioniše kao skup modula koji:

- vrše interpolaciju ulaznih meteoroloških veličina,
- proračunavaju akumulaciju snega i njegovo topljenje,

- proračunavaju stvarnu evapotranspiraciju,
- računaju vrednost zemljišne vlage,
- određuju zapreminu oticaja i vrše njenu transformaciju u izlazni hidrogram.

Vremenski posmatrano, SMHIVHBV je kontinualni, a prostorno semi-distribuirani model za proračun transformacije padavina u oticaj. Prostorna raspodela je u horizontalnom smislu određena podelom sliva na podslivove, a u vertikalnom smislu podelom na visinske zone po nadmorskoj visini, vrsti vegetacije i položaju jezera.

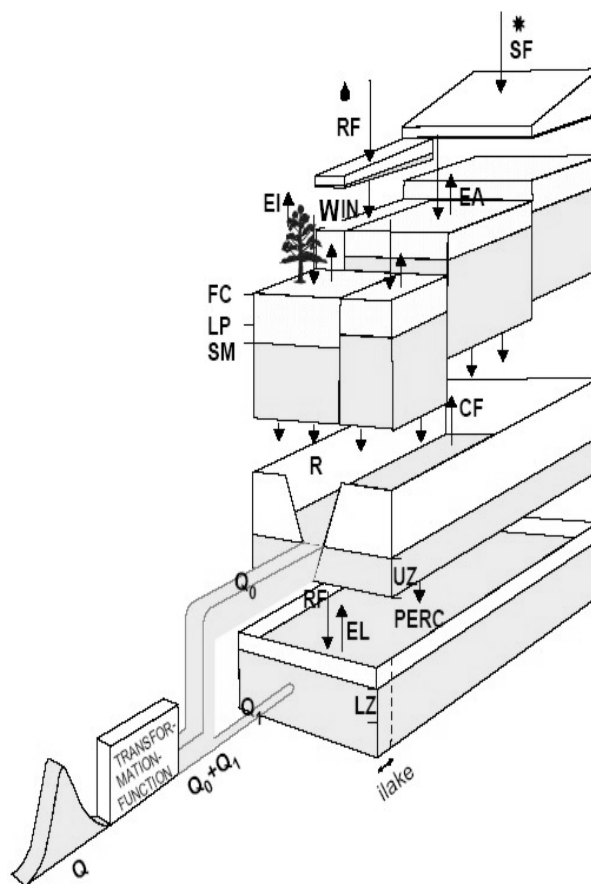
Na slici 1 prikazana je shematizacija hidroloških procesa u modelu SMHIVHBV. Oznake na slici predstavljaju:

- SF - снег
- RF - kišu
- WIN - infiltraciju
- EA - evapotranspiraciju
- EI - evaporaciju iz procesa intercepcije
- EL - evaporaciju sa jezera
- SM - sadržaj zemljišne vlage
- FC - maksimalnu vrednost vlažnosti tla
- LP - parametar koji definiše vlažnost zemljišta iznad koje ET dostiže maksimum
- R - oticaj iz rezervoara zemljišne vlage
- CF - kapilarno penjanje
- UZ - sadržaj gornjeg rezervoara
- LZ - sadržaj donjeg rezervoara
- PERC - perkolaciju
- K, K4 - parametare modela linearnog i nelinearnog rezervoara
- ALFA - recesioni parametar
- $Q_0, Q_1$  - komponente oticaja

Ulazni podaci za model su osmotrene dnevne vrednosti padavina, srednje dnevne temperature vazduha i srednje mesečne vrednosti potencijalne evapotranspiracije.

Temperatura vazduha se koristi za proračun akumulacije snega i njegovo topljenje. Ukoliko se posmatra oblast bez snega, temperature se mogu izostaviti.

Vrednosti potencijalne evapotranspiracije su osrednjene mesečne vrednosti koje se u modelu transformišu u dnevne u zavisnosti od vlažnosti tla.



Slika 1. Shematski prikaz modela HBV (izvor: Lingstrom et al., 1997).

Fizičke karakteristike sliva su predstavljene preko njegove površine, hipsometrijske krive i zastupljenosti namene zemljišta.

Izlazne veličine modela su hidrogram oticaja, stvarna evapotranspiracija, stanje vlažnosti zemljišta kao i zalihe akumulisanog i otopljenog snega.

Prosečne padavine, temperatura i evapotranspiracija na slivu računaju se kao:

$$p = \sum w_{i,p} \cdot P_i$$

$$t = \sum w_{i,T} \cdot T_i$$

$$pet = \sum w_{i,PET} \cdot PET_i$$

gde su:

$w_i$  - težinski koeficijent  $i$ -te merne stanice,  
 $P_i$  - padavine osmotrene na  $i$ -toj stanici,  
 $T_i$  - temperature osmotrene na  $i$ -toj stanici,  
 $PET_i$  - potencijalna evapotranspiracija na  $i$ -toj stanici.

Uticaj nadmorske visine se u proračun unosi korektivnim faktorima za padavine, temperaturu i evapotranspiraciju. Padavine rastu sa povećanjem visine, dok temperatura i evapotranspiracija opadaju.

Parametar  $tt$  je temperaturna granica na kojoj se padavine definišu kao sneg ili kiša i na kojoj počinje topljenje snega. Količina vode usled topljenja akumuliranog snega  $MELT$ , kao i usled ponovnog smrzavanja  $REFR$ , zavise od parametra  $tt$  i srednje dnevne temperature  $T$ :

$$MELT = cfmax \cdot (T - tt)$$

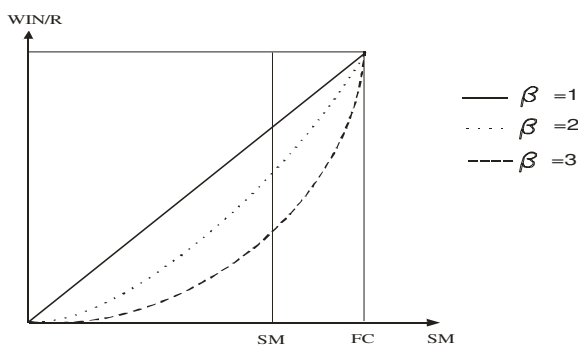
$$REFR = cfr \cdot MELT$$

gde je  $cfmax$  parametar kojim se definiše brzina topljenja snega, a  $cfr$  faktor smrzavanja.

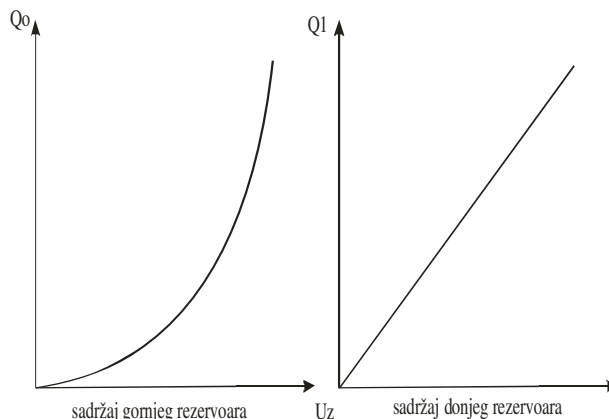
Modul u kome se formira oticaj od suficita vlage iz zemljišta ima glavnu ulogu u proračunu zapremine oticaja. Kiša i otopljeni sneg, umanjeni za gubitke, u ovom modulu se raspoređuju na vlažnost i oticaj iz tla, u zavisnosti od trenutnog stepena zasićenosti zemljišta koji se opisuje odnosom između sadržaja vlage i njene najveće vrednosti.

Odnos oticaja iz rezervoara zemljišne vlage  $R$  i efektivnih padavina  $WIN$  kontroliše se pomoću parametara  $\beta$  i  $FC$  prema sledećem (slika 2):

$$\frac{R}{WIN} = \left( \frac{SM}{FC} \right)^\beta$$



Slika 2. Zavisnost odnosa  $R/WIN$  od zemljišne vlage  $SM$  za različite vrednosti parametra  $\beta$



Slika 3. Oticaj iz gornjeg i donjeg rezervoara u zavisnosti od zapremine rezervoara.

Transformacija viška vode iz tla u oticaj modelovana je sa dva rezervoara, gde gornji nelinearni rezervoar simulira komponentu brzog oticaja, a donji linearni rezervoar komponentu sporog oticaja (slika 3).

U gornji rezervoar smeštena je zapremina vode od površinskog i brzog potpovršinskog oticaja. U donjem je spori oticaj od procesa perkolacije i podzemnih voda. U donji rezervoar uključen je doprinos od direktnih padavina na vodene površine i gubici usled evapotranspiracije.

Izlaz iz gornjeg rezervoara opisan je stepenom funkcijom:

$$Q_0 = K \cdot UZ^{(1+\alpha)}$$

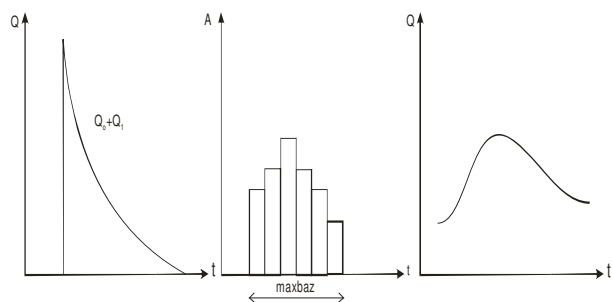
gde je  $UZ$  zapremina gornjeg rezervoara,  $K$  koeficijent gornjeg rezervoara a  $\alpha$  mera nelinearnosti.

Oticaj iz donjeg rezervoara dat je linearnom funkcijom:

$$Q_1 = K4 \cdot LZ$$

gde je  $LZ$  zapremina donjeg rezervoara, a  $K4$  koeficijent donjeg rezervoara.

Svoj konačni oblik hidrogram oticaja dobija prolaskom kroz transformacionu funkciju. Ovaj filter opisuje raspodelu vremena putovanja vode od različitih delova sliva do izlaznog profila, odnosno predstavlja tipski dijagram zavisnosti vreme-površina (slika 4). Vremenska osnova ove raspodele je parametar  $maxbaz$ .



Slika 4. Transformaciona funkcija za formiranje hidrograma oticaja.

### 3. KARAKTERISTIKE SLIVA JADRA

Reka Jadar je najveća pritoka reke Drine na teritoriji Srbije. Pravac pružanja joj je od jugoistoka prema severozapadu. Do h.s. Lešnica površina sliva iznosi 959 km<sup>2</sup>, dok je dužina vododelnice 166,5 km. Prosečna nadmorska visina sliva je 258 mm. U gornjem i srednjem delu sliva reljef je brdovit, u donjem brežuljkast, a u Lozničkom polju tok dobija aluvijalne karakteristike.

Prosečni višegodišnji protok na h.s. Lešnica iznosi 8,21 m<sup>3</sup>/s, dok je srednja velika voda 105,4 m<sup>3</sup>/s.

Kao ulaz za model korišćeni podaci sa klimatoloških stanica u Valjevu, Loznici i Krupnju, i to dnevne padavine, srednje dnevne temperature vazduha i srednje mesečne vrednosti potencijalne evapotranspiracije (procenjene nezavisno Penmanovom metodom).

Sliv Jadra do h.s. Lešnica je u ovom slučaju modeliran kao jedinstven sliv, bez podslivova. Fizičke karakteristike sliva (hipsometrijska kriva) određene su iz digitalnog modela terena. Korišćen je digitalni model terena Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) iz 2000. godine, sa prostornom rezolucijom od 90 m (Farr et al., 2007). Procentualna zastupljenost i namena površina po visinskim zonama dobijena je korišćenjem baze Corine Land Cover 2000 (EEA, 2000).

### 4. ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA I OCENA REZULTATA

S obzirom da su fizički procesi u slivu pojednostavljeno predstavljeni u HBV modelu, kalibracijom parametara model se prilagođava prirodnim procesima. Tačnost rezultata modela u najvećoj meri zavisi od kvaliteta i duži-

ne nizova ulaznih podataka, pa su iz tog razloga za modelovanje korišćeni svi raspoloživi klimatološki podaci.

Model HBV omogućava automatsku kalibraciju tj. optimizaciju parametara (Lawrence et al, 2009), koja je u ovom slučaju primenjena.

Kao pokazatelje slaganja, model HBV koristi tri veličine. Prva veličina pokazuje akumulisane razlike između sračunatog i osmotrenog oticaja:

$$Accdiff = \sum (Q_C - Q_R) \cdot C_t$$

gde su  $Q_C$  vrednosti sračunatih protoka,  $Q_R$  vrednosti osmotrenih protoka, a  $C_t$  koeficijent kojim se protoci pretvaraju u sloj oticaja (u mm). Druga veličina opisuje grešku u maksimalnim protocima i predstavlja odnos suma maksimalnih godišnjih vrednosti sračunatih i osmotrenih proticaja:

$$PeakErr = \frac{\sum_j Q_{Cmax,j}}{\sum_j Q_{Rmax,j}}$$

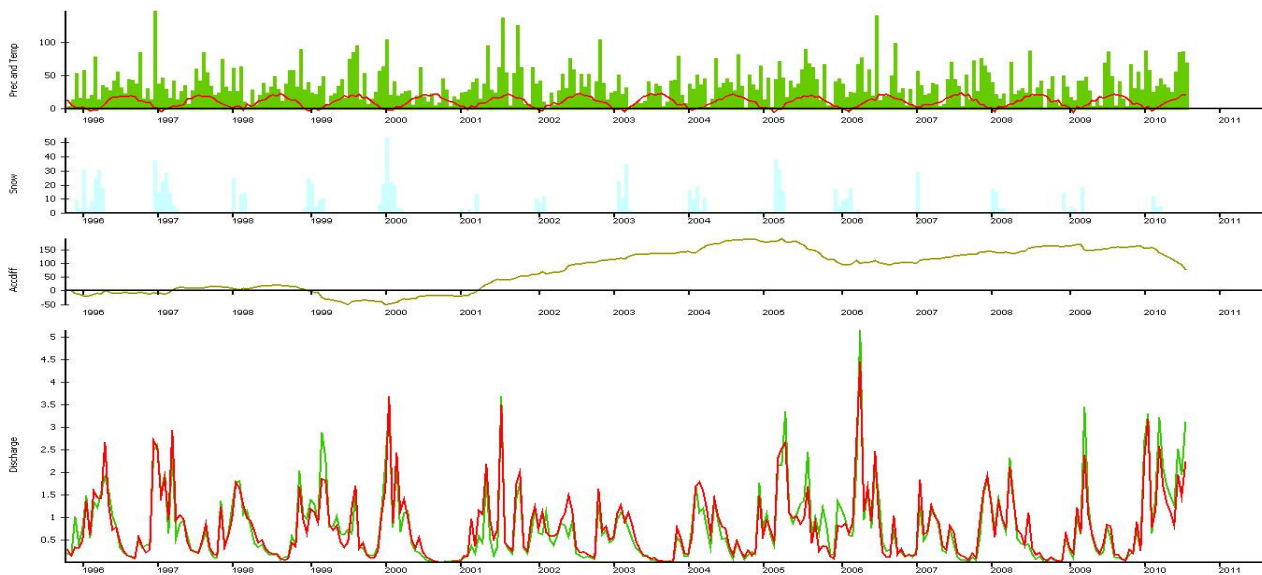
gde je  $j$  indeks koji se odnosi na godine. Treća veličina je Nash-Sutcliffe koeficijent efikasnosti modela  $R^2$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_C - Q_R)^2}{\sum (Q_R - \bar{Q}_R)^2}$$

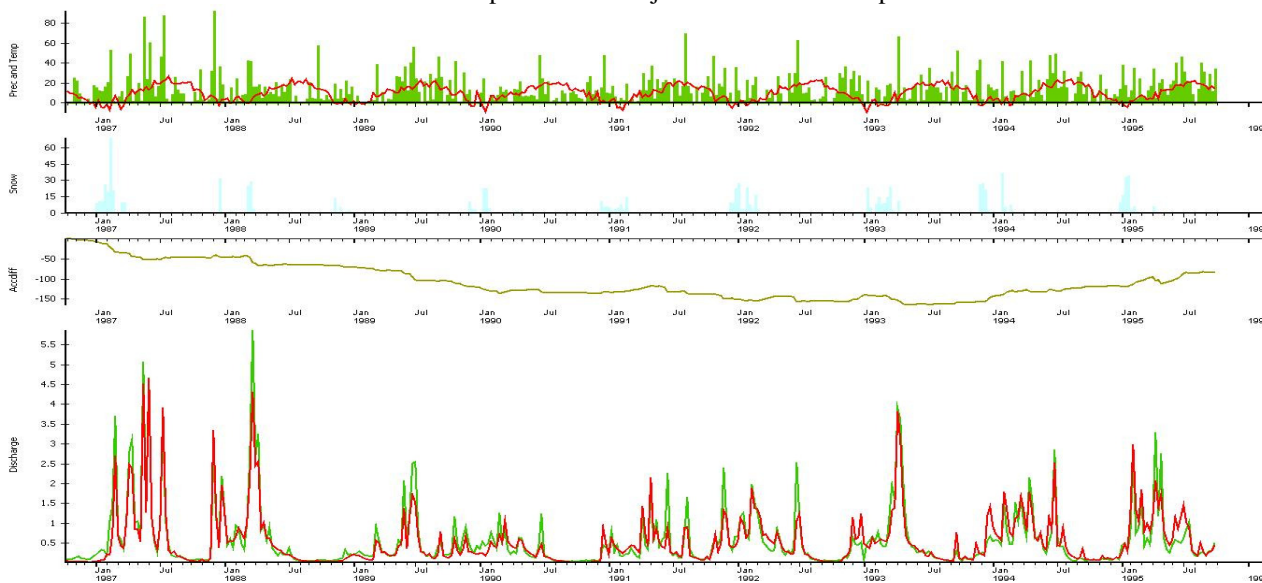
Ocena rezultata kalibracije vršena je i vizuelnim poređenjem sračunatih i osmotrenih hidrograma.

Kalibracija modela HBV za sliv Jadra do Lešnice je rađena na podacima iz više vremenskih serija. Najbolje rezultate dao je set padavina i temperatura od 01.10.1995. do 31.07.2010.godine. Za proces verifikacije korišćeni su podaci od 01.10.1986. do 01.10.1995. godine. Na slikama 5 i 6 prikazani su rezultati simulacija za kalibracioni i za verifikacioni period.

U tabeli 1 prikazani su pokazatelji slaganja za kalibracioni i verifikacioni set ( $R^2$ , akumulisane razlike *Accdiff* i greška u maksimumima *Peak Err*). Na osnovu ovih rezultata se može reći da je postignuto dobro slaganje između osmotrenih i sračunatih vrednosti oticaja jer je vrednost Nash-Sutcliffe koeficijenta  $R^2$  iznad 0,8. Greška u proceni pika *Peak Err* i akumulisana razlika *Accdiff* imaju prihvatljive vrednosti.



Slika 5. Grafički prikaz simulacija za kalibracioni set podataka.



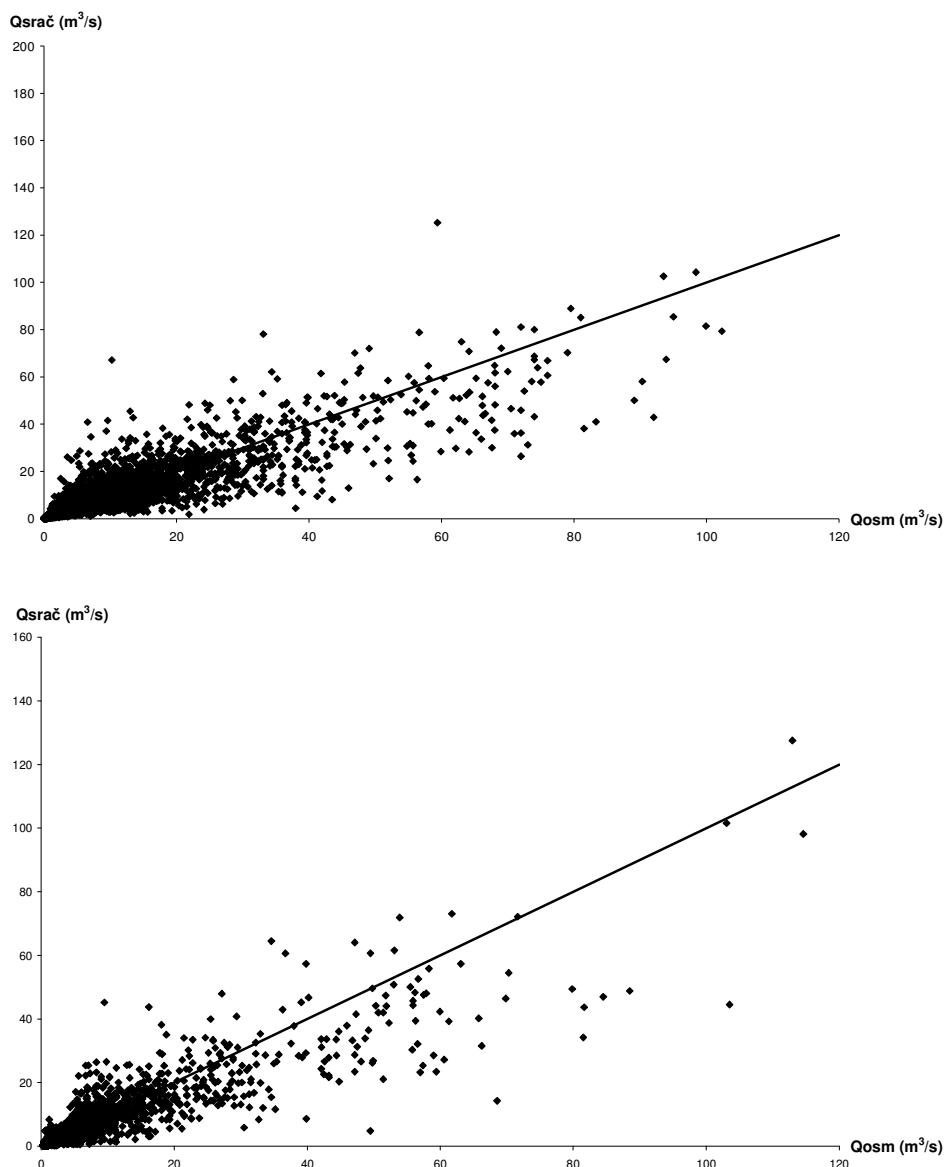
Slika 6. Grafički prikaz simulacija za verifikacioni set podataka.

Tabela 1. Ocena rezultata kalibracije i verifikacije.

Proces	$R^2$	Accdiff	Peak err
Kalibracija	0.82	-68.23	-0.064
Verifikacija	0.79	-83.94	-0.255

Između sračunatih i osmotrenih proticaja postoji dobra korelacija u kalibracionom i u verifikacionom periodu

(slika 7). Najveća odstupanja su u domenu srednje velikih i velikih voda. U oba perioda vrednosti simuliranih proticaja su niže od osmotrenih. Razlika između osmotrene i sračunate vrednosti u vrhu talasa manja je za talase u kalibracionom nego u verifikacionom periodu. Model potcenjuje vrednosti vrhova talasa, što je uopšteno problem mnogih kontinualnih modela.



Slika 7. Odnos sračunatih i osmotrenih vrednosti oticaja za kalibracioni (gore) i verifikacioni period (dole).

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu ocene rezultata može se zaključiti da model ima mogućnost blagovremene najave poplavnih talasa, ali da u pogledu tačnosti prognoza velikih voda još uvek ima mesta za značajnije poboljšanje. Kvalitet modela će se bitno popraviti planiranim postavljanjem dodatnih automatskih kišomera, čija će merenja omogućiti bolje predstavljanje prostorne i vremenske raspodele padavina. Takođe je uočeno da su se sistematske greške

pri merenju u procesu akumulacije snega odrazile na kvalitet njegovog modeliranja. Nasuprot tome, model dobro simulira kišne epizode.

Kako se poplavni talasi na ovom slivu ponekad formiraju u vremenskom periodu kraćem od vremenskog koraka od 24 h, uspostavljanje modela HBV sa kraćim vremenskim korakom (od jednog sata) daće znatno kvalitetnije rezultate i pružiti mogućnost pravovremene najave i upozorenja na poplavni talas.

## LITERATURA

- [1] Lindstrom G., Johannon B., Persson M., Gardelin M., Bergstrom S.: Development and test of the of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology*, 201: 272-288, 1997.
- [2] Bergstrom S., Forsman A.: Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model, *Nordic Hydrology*, 4:147-170, 1973.
- [3] SMHI: HBV/IHMS Manual ver. 5.10, 2006.
- [4] Lawrence D., Haddeland I., Langsholt E.: Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation, Report 01, 2009.
- [5] Farr, T.G. et al.: The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, p. RG2004, 2007.
- [6] EEA: CORINE Land Cover Technical Guide – Addendum 2000, Technical report No. 40, European Environment Agency, 2000.

## THE IMPLEMENTATION OF THE HBV MODEL FOR FLOOD FORECASTING IN JADAR RIVER BASIN

by

Marija IVKOVIĆ

Republic Hydrometeorological Service of Serbia, Belgrade

Jasna PLAVŠIĆ

Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Dejan VLADIKOVIĆ and Jelena JERINIĆ

Republic Hydrometeorological Service of Serbia, Belgrade

### Summary

The SMHIHBV model is used for runoff modelling of the Jadar River basin, for the purpose of hydrological forecasting. The Jadar River is the largest Serbian tributary of the Drina River with an area of 959 km<sup>2</sup>, and is subject to frequent flooding. The HBV model is a semi-distributed conceptual model, able to simulate runoff from snowmelt and rainfall. The paper presents basic concepts of the HBV model and the process of calibration and verification for the basin of the Jadar River at

station Lešnica. Model performance is evaluated using the observed runoff. Satisfactory results are achieved having in mind complex topography and small number of stations with available data for realistic spatial representation of meteorological variables.

**Keywords:** HBV model, floods, continuous hydrologic modelling

Redigovano 12.08.2012.