

UDK: 551.482.4
Originalni naučni rad

MOGUĆNOSTI ZA PRIMENU MODELA HEC-HMS ZA KONTINUALNE HIDROLOŠKE SIMULACIJE

Andrijana TODORVIĆ, Jasna PLAVŠIĆ
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

REZIME

U ovom radu su analizirane mogućnosti paketa hidroloških modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije poređenjem rezultata tri različito postavljena modela sa osmotrenim hidrogramima. Modeli su formirani za sliv reke Kolubare do hidrološke stanice Beli Brod. Slaganje simuliranih i osmotrenih hidrograma kvantifikovano je preko nekoliko pokazatelja kvaliteta modela. Rezultati u ovom radu ukazuju na neke nedostatke i ograničenja HEC-HMS-a u primeni za kontinualne hidrološke simulacije.

Ključne reči: parametarski hidrološki modeli, kontinualne hidrološke simulacije, HEC-HMS

UVOD

Kontinualne hidrološke simulacije podrazumevaju modeliranje hidroloških veličina tokom više kišnih epizoda, kao i u sušnim periodima između njih [3]. Da bi oticaj bio korektno sračunat, potrebno je da početni uslovi (npr. količina vlage u zemljištu) pre svake kišne epizode budu što tačnije određeni. Stoga je modeliranje procesa kao što su evapotranspiracija (ET) i topljenje snega sastavni deo kontinualnih simulacija. Zato su za kontinualne simulacije, pored podataka o padavinama, neophodni i drugi podaci potrebni za modeliranje ovih procesa (npr. podaci o temperaturama, sunčevom zračenju, brzini vetra, itd.).

Izrada kontinualnih hidroloških modela je veoma značajna zato što se ovi modeli koriste za hidrološke prognoze i za potrebe analiza rada vodoprivrednih sistema i analiza uticaja klimatskih promena na vodne resurse.

Softverski paket HEC-HMS se često koristi u hidrološkom modeliranju jer je besplatan [16]. Ovaj

model je prevashodno namenjen modeliranju oticaja od izolovanih epizoda kao što su računске kiše, ali omogućava i kontinualne hidrološke simulacije. Sastoji se iz više komponenata namenjenih modeliranju efektivnih padavina, direktnog i baznog oticaja i propagacije talasa u vodotocima. U okviru svake od komponenata postoji nekoliko modela, što omogućava da se HEC-HMS prilagodi dostupnim podacima i potrebama izrade modela.

Kako bi se analizirale mogućnosti HEC-HMS-a za kontinualne hidrološke simulacije u ovom radu je simuliran oticaj na slivu reke Kolubare do hidrološke stanice (HS) Beli Brod primenom tri modela različite strukture:

- model 1 (osnovni), koji posmatra sliv kao celinu (model sa homogenim parametrima) i koristi jednostavniji metod za kontinualnu simulaciju gubitaka,
- model 2 koji takođe posmatra sliv kao celinu i koristi složeniji metod za proračun gubitaka, i
- model 3 u kome je sliv podeljen na tri podsliva, pa predstavlja semi-distribuiranu verziju modela 1.

Simulirani hidrogrami su poređeni sa osmotrenim, čime je omogućena ocena doprinosa uslošnjanja strukture i prostorne disagregacije parametara modela kvalitetu kontinualnih simulacija oticaja.

U radu su uopšteno prikazani parametarski hidrološki modeli (poglavlje 2), a zatim je ukratko opisan paket HEC-HMS (poglavlje 3). U poglavlju 4 je prikazano modeliranje oticaja sa sliva reke Kolubare do HS Beli Brod, dok su rezultati analizirani u poglavlju 5.

HIDROLOŠKI MODELI

Parametarski hidrološki modeli (modeli padavine-oticaaj) rezultuju vrednostima hidroloških veličina (najčešće hidrogramom na razmatranom hidrološkom profilu) za

zadati vektor ulaznih veličina (pre svega, padavina). Kako ovi modeli za isti vektor ulaznih veličina uvek daju isti rezultat, često se nazivaju i determinističkim. Nasuprot njima su stohastički modeli, koji rezultuju funkcijom (gustine) raspodele veličine koja se modelira [2]. S obzirom na stohastičku prirodu hidroloških veličina, sve više se koriste intervalne ocene koje podrazumevaju primenu metoda obe grupe modela [13].

Prema strukturi parametarski hidrološki modeli mogu se klasifikovati kao [3, 12]:

1) modeli „crne kutije“ (ili modeli zasnovani na podacima, engl. *data-driven models*) u čijoj je osnovi preslikavanje vektora ulaznih podataka (padavine, temperature, itd.) u izlaz (protok), bez analize samog procesa formiranja oticaja. Modeli ove grupe često podrazumevaju primenu rasplnutih („fazi“) skupova i veštačke inteligencije (ANN modeli) [3]. Prema Bevenu [1], ovoj grupi modela pripadaju empirijske relacije bazirane na regresionim analizama, transfer funkcije, od kojih neke predstavljaju produžetak metode jediničnog hidrograma (j.h.), i neuronske mreže. Pechlivadis i saradnici [12] smatraju da ovoj grupi pripadaju i modeli sintetičkog j.h. (npr. Šermanov j.h.), posebno ako se koriste u kombinaciji sa regionalnim vrednostima parametara j.h.

2) konceptualni modeli (ili modeli „sive kutije“, engl. *gray box models*), pod kojima se najčešće podrazumeva aproksimacija procesa u ciklusu oticaja nizom rezervoara (npr. rezervoari vegetacije, zemljišta, itd.). Za rezervoare važe jednačine održanja mase, dok se fluksevi između rezervoara aproksimiraju empirijskim relacijama (npr. jednačine linearnog rezervoara) [12]. Kompleksnost ovih modela varira u zavisnosti od konceptualizacije procesa oticaja i relacija kojima se aproksimiraju fluksevi [12]. Beven [1] konceptualnim modelima naziva stadijum u razvoju hidrološkog modela u okviru koga se hidrološki procesi na slivu opisuju jednačinama.

3) fizički zasnovani modeli, koji podrazumevaju primenu fizičkih zakona za pojedine procese u hidrološkom ciklusu (npr. Ričardsonova jednačina za modeliranje tečenja u nezasićenoj sredini). Ovo su najsveobuhvatniji hidrološki modeli, ali je njihova primena ograničena velikim brojem potrebnih ulaznih podataka, koji često nisu dostupni [3, 5, 6, 12].

Beven i Young [13] smatraju naziv „fizički zasnovani modeli“ nekorektnim zato što fizički proces formiranja

oticaja još uvek nije korektno opisan jednačinama i zato što i elementi modela „crne kutije“ (npr. transfer funkcija) mogu imati jasnu fizičku konotaciju. Oni predlažu podelu na modele zasnovane na indukciji (engl. *inductive models*) i modele zasnovane na dedukciji. Stukturu modela prve grupe određuju raspoloživi podaci, dok modeli druge grupe imaju unapred definisanu strukturu.

U opštem slučaju, hidrološki modeli obuhvataju veličine čije su nam vrednosti poznate i koje predstavljaju ulazne veličine, zatim veličine čije se ponašanje modelira (npr. vlaga u zemljištu, protok na datom profilu vodotoka, itd.) i za koje je potrebno definisati početne uslove, i parametre modela. Vrednosti parametara modela se mogu odrediti na osnovu merenja ili karakteristika sliva (npr. površina i srednji nagib sliva) ili u postupku kalibracije (npr. prosečan intenzitet infiltracije na slivu, prosečan kapacitet rezervoara zemljišta ili vegetacije). Kalibracija podrazumeva variranje parametara modela u cilju dobijanja što boljeg slaganja rezultata modela sa osmotrenim veličinama [1, 5]. Kod konceptualnih modela kod kojih je proces oticaja prikazan nizom rezervoara većina parametara ne predstavlja direktno merljive veličine (npr. koef. nelinearnosti rezervoara), već se može odrediti samo putem kalibracije. Kod fizički zasnovanih modela vrednosti parametara bi trebalo da budu poznate *a priori*, ali je često potrebno „fino podešavanje“, kako bi se postiglo što bolje slaganje simuliranih i osmotrenih veličina [1].

Modeli kod kojih parametri variraju u prostoru nazivaju se distribuiranim ili prostorno raspodeljenim. Ovi modeli se odlikuju velikim brojem parametara, ali rezultuju vrednostima hidroloških veličina u svakom elementu računске mreže [1, 2]. Nasuprot njima su modeli sa homogenim ili koncentrisanim parametrima (engl. *lumped models*), kod kojih je ceo sliv predstavljen jednim skupom parametara. Postoje i semi-distribuirani modeli, koji podrazumevaju podelu sliva na podslivove, pri čemu se za svaki podsliv definiše poseban skup parametara. Na taj način, model sliva je predstavljen skupom modela sa homogenim parametrima [1, 2, 3, 5].

Hidrološki modeli mogu da se koriste za modeliranje izolovanih poplavnih talasa (modeli epizoda) i za kontinualne hidrološke simulacije (kontinualni modeli), koje obuhvataju modeliranje tokom kišnih epizoda i tokom sušnih perioda.

Kvalitet hidrološkog modela određen je slaganjem rezultata simulacija i osmotrenih veličina, najčešće

hidrograma oticaja. Slaganje modeliranih i osmotrenih hidrograma kvantifikuje se različitim pokazateljima (npr. koeficijentom korelacije, Nash-Suttcliffe-ovim koeficijentom efikasnosti – *NSE*, itd.). Uloga pokazatelja slaganja je da ukažu na sistematske greške (konstantno precenjivanje ili potcenjivanje protoka) i dinamičke greške (npr. kašnjenje pika hidrograma, brzina opadanja recesionih grana hidrograma, itd.) [6, 7]. Kvalitet modela ocenjuje se i tokom tzv. validacije modela, koja podrazumeva primenu (kalibrisanog) modela za simulaciju oticaja tokom perioda različitog od kalibracionog. U opštem slučaju, pokazatelji slaganja imaju lošije vrednosti u periodu validacije u odnosu na period kalibracije [1].

OPIS MODELA HEC-HMS

1.1 Hidrološke veličine

HEC-HMS sadrži nekoliko komponentata namenjenih modeliranju:

- 1) efektivnih padavina (zapremine direktnog oticaja),
- 2) direktnog oticaja,
- 3) baznog oticaja i
- 4) propagacije talasa duž vodotoka.

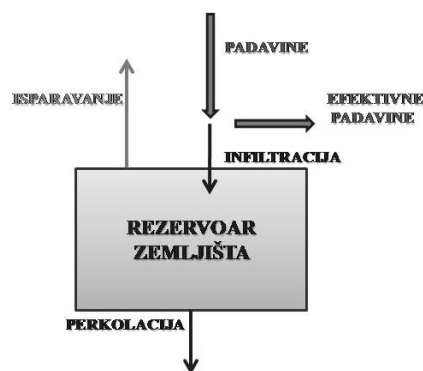
Pored ovih osnovnih komponenti, HEC-HMS ima i dodatne komponente za modeliranje račvanja i spajanja toka i transformaciju talasa u akumulaciji [4, 8].

U opisu koji sledi pažnja je posvećena onim komponentama modela koje su interesantne sa gledišta kontinualnog hidrološkog modeliranja. Komponente primenljive samo za modele epizoda nisu prikazane.

Modeliranje efektivnih padavina. U okviru HEC-HMS-a postoji nekoliko modela efektivnih padavina: model konstantnih gubitaka sa početnim gubitkom, kontinualni model deficita i konstantnih gubitaka, eksponencijalni model gubitaka (Hortonova kriva infiltracije), SCS-CN, Green-Ampt, Smith-Parlange i SMA (*Soil Moisture Accounting*) model [4, 8]. Neki od ovih modela mogu biti i prostorno distribuirani (npr. SCS, Green-Ampt, i dr.), pri čemu se svi parametri definišu u vidu rastera [4].

S obzirom da intenzitet infiltracije i efektivne padavine zavise od zasićenosti zemljišta vodom [1], za kontinualne hidrološke simulacije neophodno je modeliranje vlage u zemljištu tokom i između kišnih epizoda, što u okviru HEC-HMS-a omogućavaju samo model deficita i konstantnih gubitaka i SMA model [4].

Model deficita i konstantnih gubitaka (slika 1) podrazumeva kontinualno praćenje vlage u rezervoaru zemljišta primenom jednačine bilansa čiji su elementi padavine (umanjene za intercepciju, ako rezervoar vegetacije postoji u modelu), infiltracija i isparavanje, dok se u periodima kada je zemljište zasićeno javlja i perkolacija [4]. Povremeno uključivanje perkolacije u bilans omogućava neumanjenu infiltraciju čak i u uslovima zasićenja tla (intenzitet infiltracije je jednak manjoj od vrednosti intenziteta kiše i definisane konstantne infiltracije).



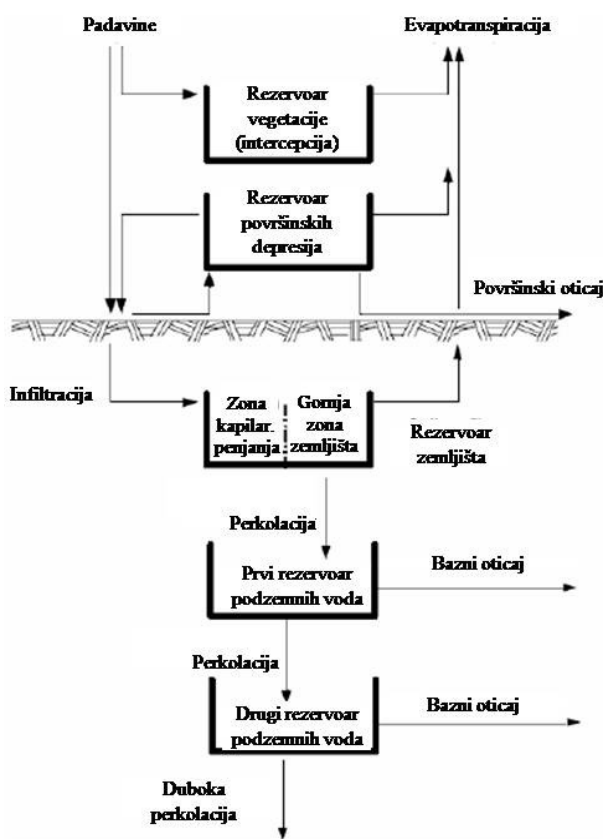
Slika 1. Shematski prikaz modela deficita i konstantnih gubitaka

Model SMA je kompleksniji u odnosu na model deficita i konstantnih gubitaka: on sadrži rezervoare vegetacije, površinskih depresija, nezasićene zone (zona kapilarnog penjanja, iz koje nema perkolacije, i gornja zona zemljišta) i dva rezervoara podzemnih voda, pri čemu se drugi rezervoar opciono može isključiti iz modela (slika 2). Duboka perkolacija iz drugog rezervoara podzemnih voda predstavlja „izgublenu“ vodu sa sliva (karst). Ovaj model sadrži veliki broj parametara koje je potrebno kalibrisati. Svi fluksevi između rezervoara modela SMA zavise od ispunjenosti rezervoara [4].

Kod svih modela za određivanje efektivnih padavina potrebno je definisati učešće nepropusnih površina na slivu. Prema postavci modela, padavine sa nepropusnih površina čine površinski oticaj, bez mogućnosti naknadne infiltracije [4].

U HEC-HMS model se mogu uključiti i rezervoari vegetacije (proces intercepcije) i površinskih depresija (ovi rezervoari su obavezni samo kod modela SMA) [4]. Za modeliranje gubitaka na intercepciju i u površinskim depresijama na raspolaganju su samo metode proste intercepcije (*Simple Canopy*) i prostih površinskih depresija (*Simple Surface*). Za oba modela potrebno je

definisati vrednost maksimalnog kapaciteta rezervoara i početnu ispunjenost rezervoara. Ukoliko postoji rezervoar vegetacije, padavine najpre pune ovaj rezervoar, a nakon što se on napuni počinje proces infiltracije u zemljište. Ukoliko postoji višak padavina u odnosu na kapacitet zemljišta, on se najpre troši za popunjavanje površinskih depresija, nakon čega počinje površinski oticaj [4]. Karakteristično za HEC-HMS je da je kapacitet rezervoara vegetacije isti tokom cele godine, što je opravdana pretpostavka samo ako se modelira oticaj sa sliva na kome dominira zimzelena vegetacija.



Slika 2. Shematski prikaz modela SMA za vertikalni vodni bilans; prema [4]

Modeli direktnog oticaja. Transformacija efektivnih padavina u direktni oticaj vrši se metodom kinematskog talasa ili nekim od jediničnih hidrograma: Snyder-ov, Clark-ov, SCS ili proizvoljni j.h. koji definiše korisnik (u vidu jediničnog hidrograma ili S-krive) [4, 8].

Modeli baznog oticaja. To su: model konstantnih mesečnih baznih protoka, model recesije i ograničene

recesije i model linearnog rezervoara, koji se koristi samo uz SMA model efektivnih padavina [4, 8].

Modeli propagacije talasa duž vodotoka. Obuhvaćeno je nekoliko modela različite složenosti: od modela čiste translacije (model pomaka), preko modela Muskingum i Muskingum-Cunge do modela kinematskog talasa [4].

Detalji o modelima raspoloživim u okviru HEC-HMS-a mogu se naći u literaturi [4] i [8].

1.2 Definisanje ulaznih meteoroloških veličina

U okviru HEC-HMS postoje metode za određivanje:

- 1) prostorne raspodele padavina,
- 2) potencijalne evapotranspiracije i
- 3) topljenja snega.

Prostorna raspodela padavina. U okviru HEC-HMS-a prostorna raspodela padavina se može predstaviti u vidu rastera (što je korisno za radarski osmotrene kiše) ili u vidu hijetograma za pojedinačne kišomerne stanice. U drugom slučaju, prosečna visina padavina na slivu određuje se ponderisanjem na osnovu težina za pojedine stanice ili metodom kvadrata recipročnih rastojanja [4].

Potencijalna evapotranspiracija (PET). U okviru HEC-HMS-a PET se može računati metodom Priestley-Taylor, kod koje se aeraciona komponenta PET aproksimira delom radijacije (najčešće kao 30%) [2]. U okviru HEC-HMS-a se može računati prostorno distribuirana PET, s tim da je tada potrebno koristiti podatke o temperaturi, neto radijaciji i koeficijentima kultura u rasterskom obliku [4, 8].

Alternativno, u program se mogu uneti i eksterno sračunate mesečne vrednosti PET kao tipska sezonska raspodela (model *Monthly Average*) [3]. Ukoliko se raspolaže osmotrenom ET, moguće je uneti i vrednosti korekcionih koeficijenata kojima se uzima u obzir da je osmotreno isparavanje iz evaporimetra veće u odnosu na isparavanje sa okolnog tla, čak i pri saturaciji tla [1].

Stvarna ET se računa na osnovu vrednosti PET i raspoloživih količina vode u rezervoarima vegetacije, površinskih depresija i tla [4, 8]. Karakteristično za HEC-HMS je da se ET smatra zanemarljivom u računskim koracima u kojima postoje padavine, i kao takvu isključuje iz proračuna bilansa u tim koracima.

Topljenje snega. U HEC-HMS-u topljenje snega se modelira metodom temperaturnog indeksa, koja se bazira na metodi stepen-dan po kojoj je količina vode usled topljenja snega M srazmerna razlici temperature vazduha T_a i temperature pri kojoj dolazi do topljenja snega PX (tzv. bazna temperatura) [11]:

$$M = C_M (T_a - PX) \text{ [mm]} \quad (1)$$

Vrednost bazne temperature PX zavisi od toga da li se za modeliranje topljenja snega koriste podaci o srednjim ili maksimalnim dnevnim temperaturama. Ako se koriste podaci o maksimalnim dnevnim temperaturama, vrednost PX bi trebalo da bude nešto veća [11]. Koeficijent C_M je koef. intenziteta topljenja snega i njegova vrednost zavisi od toga da li se topljenje odvija u suvim ili kišovitim uslovima [2, 11]. Vrednost C_M zavisi i od toga koliko je snežni pokrivač prethodno bio izlagan temperaturama iznad bazne, što se kvantifikuje preko zavisnosti C_M od indeksa prethodne temperature ATI (*Antecedent Temperature Index*). Vrednost C_M zavisi i od mnogih drugih činilaca (npr. C_M varira tokom sezone) [1]. Detalji o modelu temperaturnog indeksa mogu se naći u literaturi [1], [4], [8] i [11].

MODELIRANJE OTICAJA SA SLIVA REKE KOLUBARE DO HIDROLOŠKE STANICE BELI BROD

1.3 Analizirani sliv i raspoloživi podaci

Sliv reke Kolubare (slika 3) obuhvata oko 3700 km², dok je površina sliva do HS Beli Brod 1896 km² [14]. Sliv reke Kolubare do HS Beli Brod obuhvata nadmorske visine od 300 do 1200 m.n.m. Prema „Corine Land Cover 2006“, na slivu dominiraju listopadne šume sa oko 40 % ukupne površine sliva i poljoprivredne površine sa 55.5 %.

Podaci korišćeni za modeliranje oticaja sa sliva reke Kolubare do HS Beli Brod dobijeni su od RHMZ-a za periode 1969-1974, 1979-1984 i 2005-2011 (periodi kalibracije i verifikacije) i obuhvatili su:

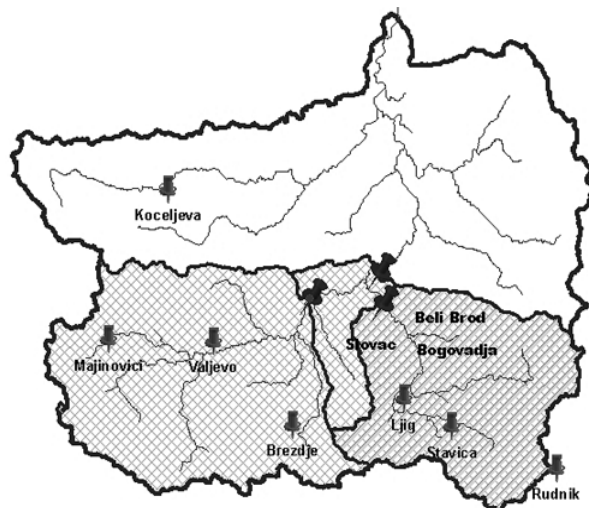
- podatke o protocima: korišćeni su podaci o srednjim dnevnim protocima sa tri hidrološke stanice: Beli Brod, Bogovađa i Slovac (slika 4).
- podatke o padavinama: na raspolaganju su bili podaci o ukupnim dnevnim padavinama sa padavinskih stanica Valjevo, Ljig, Rudnik, Brežđe, Koceljeva, Majinovići i Štavica (slika 4). Stanice na slivu su odabrane tako da bude što manje nedostajućih podataka u periodima kalibracije i validacije. Nedostajući podaci

popunjeni su modelom višestruke linearne regresije.

- podatke o temperaturama: korišćeni su podaci o srednjim dnevnim temperaturama sa meteorološke stanice Valjevo.



Slika 3. Sliv reke Kolubare [14]



Slika 4. Sliv reke Kolubare, razmatrane hidrološke i meteorološke stanice i podela sliva na podslivove do HS Slovac, HS Bogovađa i HS Beli Brod

U modelu su korišćeni i:

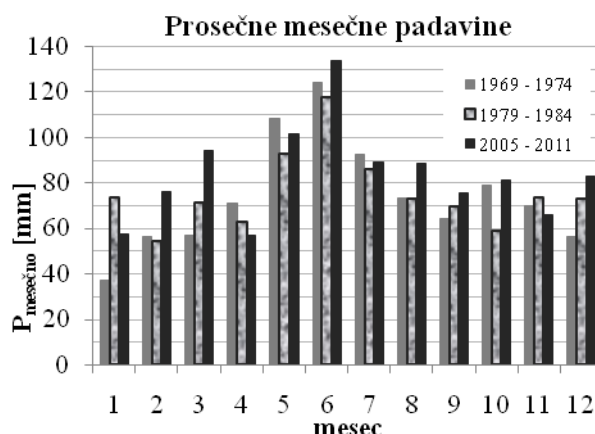
- podatke o PET: na raspolaganju su bile mesečne vrednosti PET za stanicu Valjevo za period od 1979. do 1984. Ove vrednosti sračunate su metodom Eagleman-a. Detalji o ovoj metodi mogu se naći u literaturi [10].
- digitalni model terena (DMT): za određivanje hipsometrijske krive na razmatranim podslivovima korišćen je DMT rezolucije 90 m*90 m preuzet iz SRTM [15].

Prosečne godišnje visine padavina, prosečne temperature osmotrene na stanici Valjevo, srednji

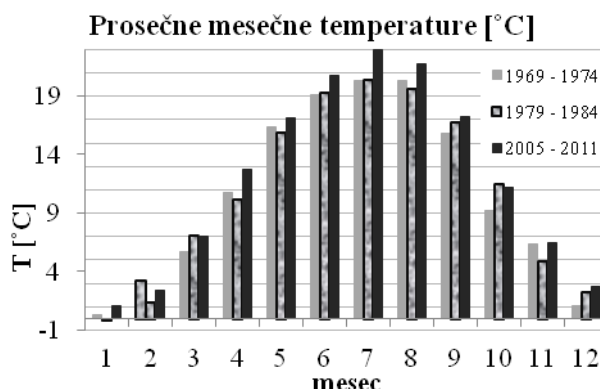
protoci osmotreni na HS Beli Brod i približne vrednosti koeficijenta oticaja C za tri simulaciona perioda dati su u tabeli 1. Prosečne mesečne padavine, srednje mesečne temperature sa stanice Valjevo i srednji mesečni protoci sa HS Beli Brod tokom tri simulaciona perioda prikazani su na slikama 5, 6 i 7. Prosečna visina padavina određena je ponderisanjem osmotrenih padavina na razmatranim stanicama, gde su težine stanica određene metodom Tisenovih poligona.

Tabela 1. Ukupne padavine, prosečne temperature i prosečni protoci na slivu reke Kolubare do HS Beli Brod tokom tri simulaciona perioda

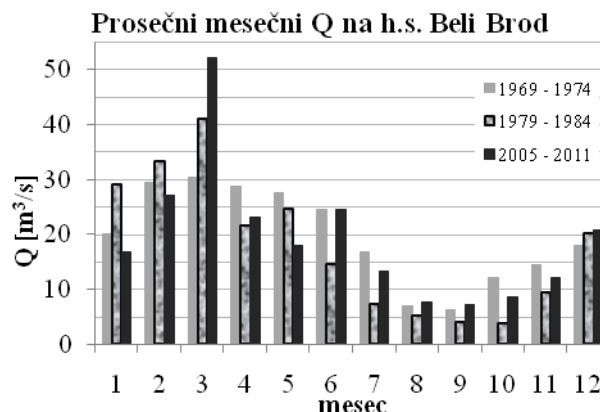
Period	P_{god} [mm]	T_{SR} [°C]	Q_{SR} [m ³ /s]	C [/]
1979 – 1984	906	10.7	17.9	0.37
1969 – 1974	888	10.8	19.6	0.33
2005 – 2011	1002	12.0	19.3	0.32
Svi periodi	936	11.2	19.0	0.34



Slika 5. Prosečne mesečne padavine na slivu reke Kolubare do HS Beli Brod tokom tri simulaciona perioda



Slika 6. Prosečne mesečne temperature tokom tri simulaciona perioda na meteorološkoj stanici Valjevo



Slika 7. Prosečni mesečni protoci tokom tri simulaciona perioda osmotreni na HS Beli Brod

1.4 Modeli oticaja

Da bi se analizirale mogućnosti HEC-HMS-a za kontinualne hidrološke simulacije, testirana su dva modela sa homogenim parametrima koji koriste metodu deficita i konstantnog gubitka (model 1) i metodu SMA (model 2) i semi-distribuirana verzija modela 1 (model 3). Komponente testiranih modela date su u tabeli 2.

S obzirom da se modeli koriste za kontinualne simulacije, oni sadrže i model topljenja snega (metoda temperaturnog indeksa), dok je prosečna mesečna PET uneta kao ulazni podatak (metoda *Monthly Average*).

Modeli su ručno kalibrisani spram osmotrenih protoka u periodu od 5 hidroloških godina, od 1.10.1979. do 30.9.1984. godine. Vršene su dve validacije modela: validacija unazad (od 1.10.1969. do 30.9.1974.) i validacija unapred (od 1.10.2005. do 30.9.2011.). Sve simulacije počinju sa početkom hidrološke godine, čime se olakšava postavljanje početnih uslova vezanih za model topljenja snega. Računski korak u svim simulacijama je $\Delta t = 12$ h. Dužina računskog koraka odabrana je tako da se omogući bolje modeliranje direktnog oticaja (vreme koncentracije sliva u modelu mora biti celobrojni umnožak dužine računskog koraka) i propagacije talasa (vreme putovanja talasa u metodi Maskingama ne može da bude kraće od vremenskog koraka) [4, 8].

Tabela 2. Analizirane varijante HEC-HMS modela

MODEL	1	2	3
Vrsta modela	homogen	homogen	semi-distribuiran
Intercepcija	Prosta intercepcija		
Površinsko retenziranje	Prosto površinsko retenziranje		
Efektivne padavine	Deficit i konst. gub.	SMA	Deficit i konst. gub.
Direktni oticaj	Clark-ov jedinični hidrogram		
Bazni oticaj	Recesija	Linerani rezervoar	Recesija
Propagacija poplavnih talasa u vodotocima	-	-	Maskingam

1.5 Definisane meteoroloških veličina

Kao model padavina u HEC-HMS korišćena je metoda ponderisanja padavina na pojedinim stanicama. Težine stanica su određene metodom Tisenovih poligona.

Na osnovu raspoloživih podataka o PET određene su prosečne mesečne vrednosti za period 1979 – 1984, koje su korišćene kao tipska sezonska raspodela. PET varira od 2.3 mm/mes (januar) do 123.8 mm/mes (jul).

Za modeliranje topljenja snega u HEC-HMS koriste se podaci o padavinama i temperaturama i hipsometrijske krive. U HEC-HMS-u se hipsometrijska kriva prikazuje u vidu zona, pri čemu se za svaku zonu definiše prosečna nadmorska visina, njen udeo u ukupnoj površini sliva i početni uslovi za model topljenja snega [4]. Hipsometrijske krive određene su na osnovu DMT-a tako da je svaki podsliv predstavljen sa tri visinske zone približno istih raspona nadmorskih visina.

Parametri modela topljenja snega su veoma osetljivi na promene, tako da se kalibracija mora pažljivo sprovesti. Jedan od ključnih parametara je zavisnost koeficijenta topljenja snega C_M od indeksa prethodnih temperatura ATI . Za ovu funkciju ne daju se nikakve preporuke u korisničkom uputstvu za HEC-HMS, a ni u stručnoj literaturi nisu pronađena nikakva iskustva vezana za ovu zavisnost. Usvojena zavisnost $ATI-C_M$ do koje se došlo probanjem prikazana je na slici 8.

ANALIZA REZULTATA MODELA

Slaganje rezultata modela sa osmotrenim hidrogramima kvantifikovano je preko relativne pristrasnosti,

koeficijenta korelacije i Nash-Sutcliffe koeficijenta za protoke i logaritmovane protoke:

- Relativna pristrasnost, odnosno greška u prosečnom protoku se računa iz izraza:

$$B = \frac{\sum_i Q_{sim,i} - \sum_i Q_{obs,i}}{\sum_i Q_{obs,i}} * 100\% \quad (2)$$

Vrednosti B veće od nule pokazuju da su osmotreni protoci, a samim tim i vodni bilans, preceñeni, i obratno. Velike apsolutne vrednosti B ukazuju na velika odstupanja osmotrenih i simuliranih protoka. Relativna pristrasnost data u tabeli 3 računata je na osnovu dnevnih protoka.

- Koeficijenti korelacije r između osmotrenih i simuliranih protoka dati su u tabeli 4. Koeficijent korelacije nije osetljiv na sistemske greške, već ukazuje samo na slučajne greške modela [6, 7].

- Nash-Sutcliffe-ovi koeficijenti za protoke NSE i logaritmovane protoke $NSE(\log Q)$ računati za prosečne mesečne vrednosti protoka dati su u tabeli 4. Na vrednost NSE prevashodno utiče slaganje u domenu velikih voda [6]. Kako bi se kvantifikovalo i slaganje u domenu malih voda, računat je $NSE(\log Q)$.

Vizuelno poređenje hidrograma omogućava kvalitativnu procenu mogućnosti modela da reprodukuje režim oticaja. Hronološki prikaz prosečnih mesečnih osmotrenih i simuliranih protoka tokom tri simulaciona perioda dat je na slici 9.

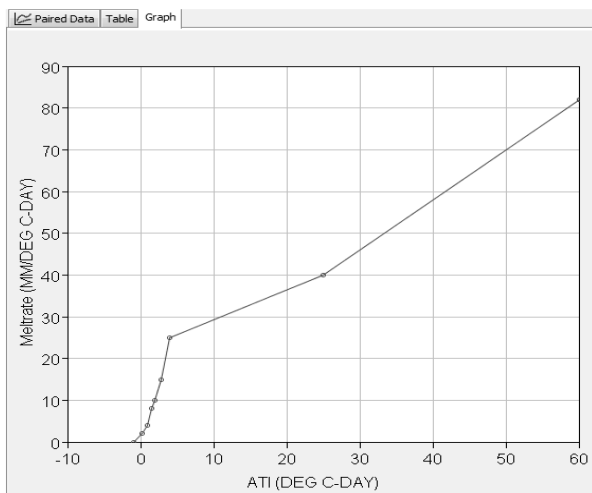
Rezultati pokazuju da svi modeli relativno dobro reprodukuju vodni bilans tokom kalibracionog perioda, ali ne i tokom validacionih (tabela 3). Posebno su izražena odstupanja tokom prvog validacionog perioda (1969-1974). Karakteristično je da su svi modeli potcenili bilans tokom prvog i precenili tokom drugog validacionog perioda. Vodni bilans tokom kalibracionog i drugog validacionog perioda najbolje je reprodukovao model 1, ali je njegova pristrasnost tokom prvog validacionog perioda znatno veća u odnosu na ostala dva modela.

Kod svih modela javljaju se odstupanja simuliranih od osmotrenih hidrograma koja mogu da budu znatna, što pokazuju hidrogrami na slici 9 i NSE koeficijenti za protoke i logaritmovane protoke u tabeli 4. Najveća odstupanja se mogu videti tokom letnjih meseci kada je preceñivanje hidrograma izraženo. Najbolje slaganje

simuliranih i osmotrenih protoka tokom kalibracionog i drugog validacionog perioda dao je model 1 (tabela 4). Nešto lošije slaganje hidrograma kod modela 3 u odnosu na model 1 može biti posledica prostorne i vremenske razmere podataka: u modelu 3 su korišćeni dnevni podaci o kišama i protocima što je ista vremenska razmera kao u modelu 1, ali za znatno manje podslivove.

Zbog mnogo više parametara u odnosu na ostale modele, ručna kalibracija modela 2 je najkompliciranija. Bolje slaganje osmotrenih i simuliranih hidrograma primenom modela SMA moglo bi se očekivati primenom automatske kalibracije odnosno povezivanjem HEC-HMS-a sa programima za ocenu parametara kao što je npr. PEST [17]. Modul za optimizaciju parametara koji je dostupan u postojećim verzijama HEC-HMS-a ne može se koristiti za kalibraciju SMA modela [4].

S obzirom da su različiti modeli tokom različitih perioda davali najbolje slaganje sa osmotrenim vrednostima, ni jedan od razmatranih modela se ne može izdvojiti kao superioran u odnosu na ostala dva. Prednosti modela 1 su najjednostavnija kalibracija (zbog najmanjeg broja parametara) i najbolje vrednosti pokazatelja kvaliteta modela tokom dva simulaciona perioda.



Slika 8. Usvojena zavisnost koeficijenta topljenja snega C_M od indeksa prethodnih temperatura ATI

Tabela 3. Relativna greška u prosečnom oticaju [%]

MODEL	KALIBRACIJA (1979-1984)	VALIDACIJA 1 (1969-1974)	VALIDACIJA 2 (2005-2011)
1	0.5	-30.6	2.3
2	-4.2	-17.5	15.6
3	-6.2	-22.5	15.2

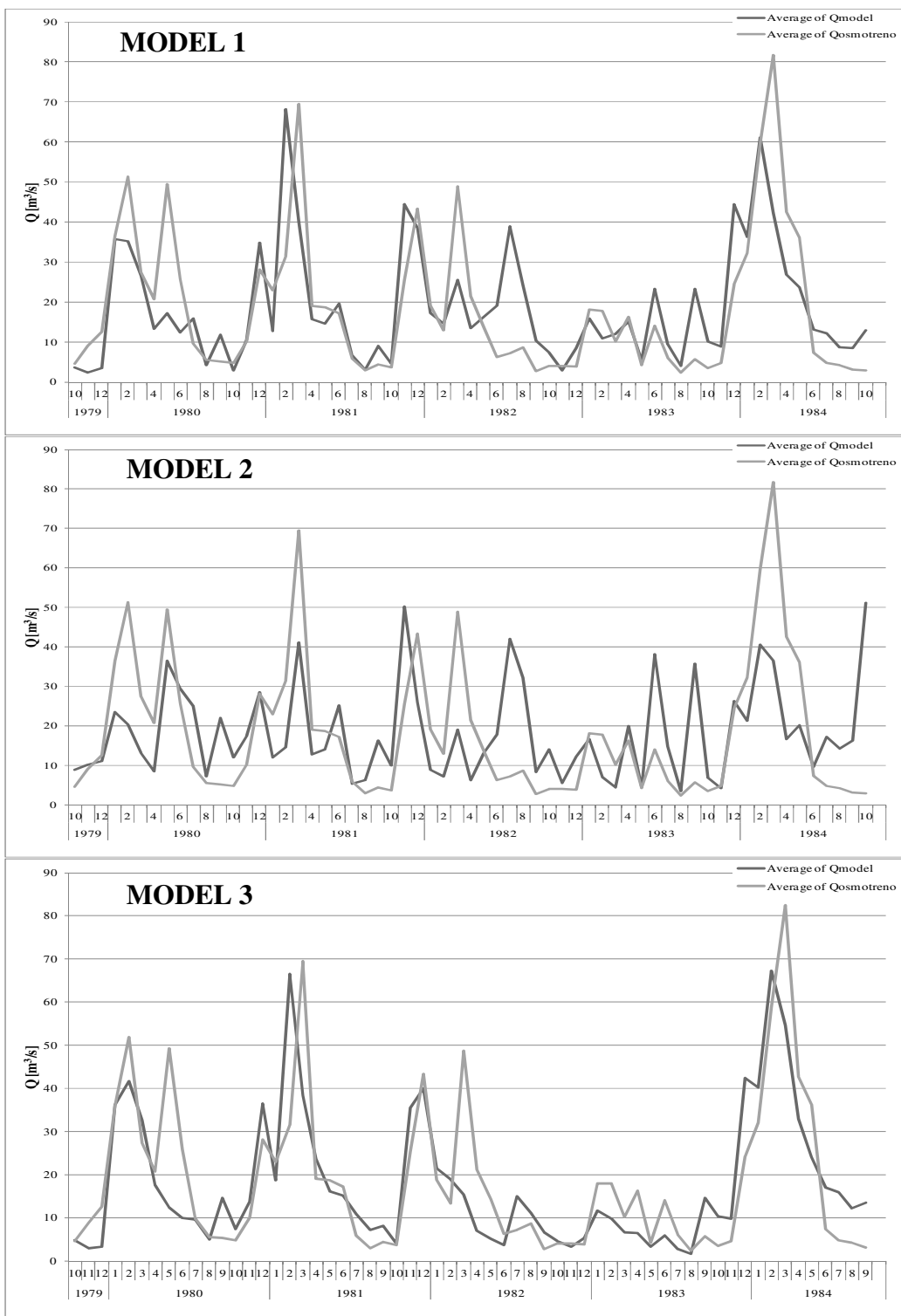
Tabela 4. Koeficijent korelacije r i koeficijenti NSE i $NSE(\ln Q)$ za prosečne mesečne protoke tokom tri simulaciona perioda

MODEL	KALIBRACIJA (1979-1984)			VALIDACIJA 1 (1969-1974)			VALIDACIJA 2 (2005-2011)		
	r	NSE	$NSE(\ln Q)$	r	NSE	$NSE(\ln Q)$	r	NSE	$NSE(\ln Q)$
1	0.84	0.69	0.60	0.78	0.44	-1.61	0.76	0.53	0.50
2	0.54	0.28	0.21	0.74	0.53	0.44	0.67	0.37	0.04
3	0.76	0.56	0.51	0.79	0.57	0.01	0.61	0.13	0.25

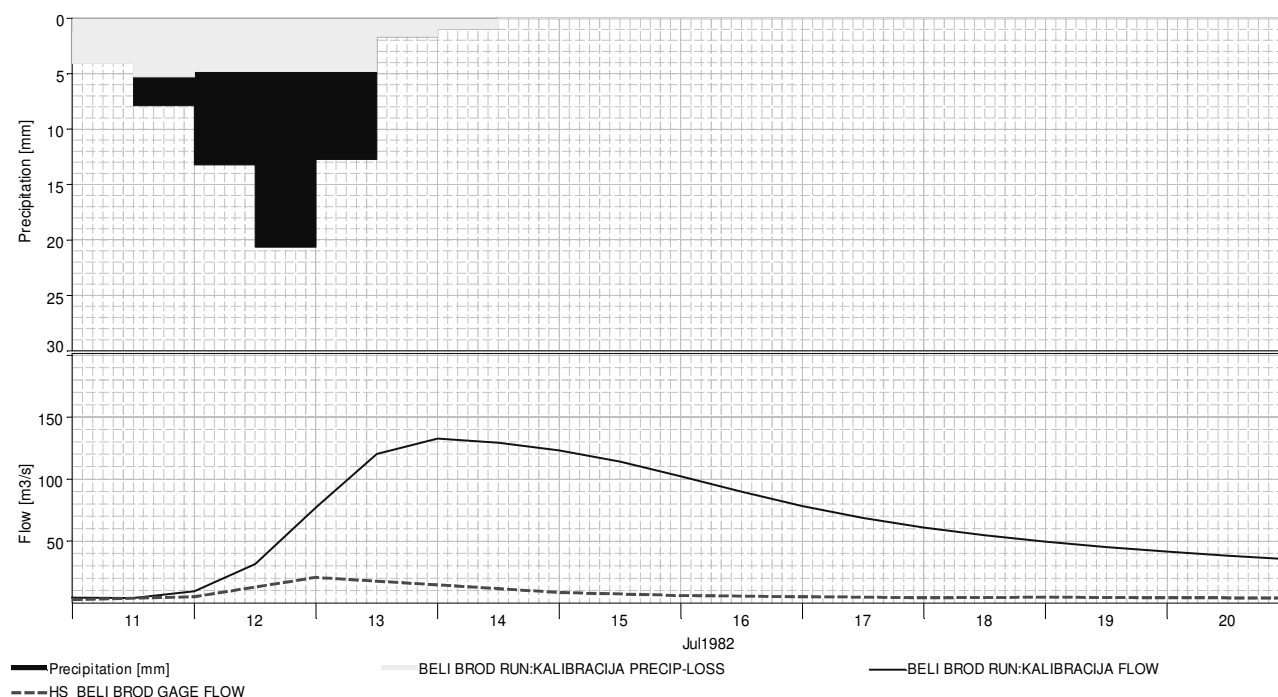
U poglavlju 3 istaknute su dve odlike HEC-HMS-a koje mogu bitno da utiču na kvalitet kontinualnih simulacija: prvo, tokom kišnih vremenskih intervala ET se potpuno isključuje iz bilansa, i drugo, parametri vezani za vegetaciju se ne menjaju po sezonama. Zanemarivanje ET tokom kišnih intervala može da dovede do vrlo malih vrednosti simulirane stvarne ET ako se koriste podaci o ukupnim dnevnim padavinama. Na primer, tokom čitavog kalibracionog perioda stvarna ET prema modelu 1 sa rezervoara vegetacije iznosi 375.6 mm i iz rezervoara zemljišta 2.5 mm, rezultujući prosečnom stvarnom ET od 75.6 mm godišnje. Vremenska nepromenljivost parametara vegetacije može dovesti do toga da usvojeni kapacitet rezervoara vegetacije ne bude dovoljan tokom vegetacionog perioda, pa simulirani oticaj može da bude znatno veći od osmotrenog. Ovo posebno dolazi do izražaja ukoliko se javi više uzastopnih kišnih dana, čime je onemogućeno da ET isprazni rezervoar vegetacije (slika 10).

ZAKLJUČCI

U radu su analizirane mogućnosti softverskog paketa HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije tako što su poređena tri modela oticaja sa sliva reke Kolubare do HS Beli Brod: dva sa homogenim parametrima, zasnovana na dve različite metode za proračun efektivnih padavina sa mogućnošću kontinualnog praćenja vlage u zemljištu, i jedan semi-distribuirani model. Modeli su odabrani tako da omoguće sagledavanje doprinosa usloznavanja strukture modela (model 2) i prostorne disagregacije podataka i parametara (model 3) kvalitetu kontinualnih simulacija. Slaganje modeliranih i osmotrenih protoka ocenjeno je preko relativne pristrasnosti prosečnog protoka, koeficijenta korelacije, Nash-Sutcliffe-ovog koeficijenta efikasnosti za protoke i logaritmovane protoke i vizuelnim poređenjem dobijenih hidrograma.



Slika 9. Osmotreni i modelirani prosečni mesečni protoci tokom kalibracionog perioda (svetle linije predstavljaju proseke osmotrenih protoka)



Slika 10. Hijetogram i osmotreni i simulirani hidrogrami tokom letnjeg (vegetacionog) perioda prema modelu 2 (isprekidana linija predstavlja osmotreni hidrogram)

Modeli su kalibrisani ručno, prema usvojenim pokazateljima kvaliteta modela. Najjednostavnija je kalibracija modela 1, a najsloženija kalibracija modela 2, zbog velikog broja parametara i njihove međusobne zavisnosti.

Odstupanja simuliranih od osmotrenih hidrograma postoje kod svih modela, na šta ukazuju i pristrasnost modela i koeficijenti NSE i $NSE(\log Q)$. Model 1 daje najbolje slaganje sa osmotrenim hidrogramima tokom kalibracionog i drugog validacionog, ali najlošije tokom prvog validacionog perioda. Zato se model 1, uprkos jednostavnoj kalibraciji, ne može jasno izdvojiti kao superioran u odnosu na modele 2 i 3.

Poređenje rezultata modela ukazuje da uslozljavanje strukture modela zahteva automatsku kalibraciju parametara i da je prostorna disagregacija modela smisljena samo ako vremenska rezolucija raspoloživih podataka odgovara manjim podslivovima.

Za HEC-HMS modele su karakteristična precenjivanja protoka tokom letnjih meseci, što je posledica toga što

se parametri vegetacije ne menjaju u vremenu i zanemarivanja ET tokom kišnih intervala. Konstantne vrednosti parametara vegetacije su opravdane samo ako se modelira oticaj sa sliva na kome dominira zimzelena vegetacija. Zanemarivanje ET tokom kišnih intervala dovodi do nerealno malih vrednosti simulirane stvarne ET ako se u modeli koriste podaci o ukupnim dnevnim padavinama i, uopšte, do toga da ET veoma malo utiče na bilans, što može da bude ograničavajući faktor za primenu modela za analizu dugoročnog bilansa voda i uticaja klimatskih promena na vodne resurse. Podaci o padavinama finije vremenske rezolucije, koji bi doveli do realnijih vrednosti stvarne ET, nisu uvek raspoloživi.

Nedostatak HEC-HMS-a je i oskudna dokumentovanost nekih od njegovih modela.

Sa druge strane, HEC-HMS je javno dostupan softverski paket i omogućava modeliranje oticaja sa malim brojem ulaznih veličina i parametara. Ipak, njegovu primenu za kontinualne hidrološke simulacije i analizu dobijenih rezultata bi trebalo vršiti imajući u vidu sva njegova ograničenja.

ZAHVALNOST

Istraživanje prikazano u ovom radu je urađeno okviru naučnog projekta Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije TR 37009 "Uticaj klimatskih promena na vodne resurse u Srbiji". Svi podaci o hidrološkim i meteorološkim veličinama dobijeni su od RHMZ-a, na čemu se autori zahvaljuju.

LITERATURA

- [1] Beven, K. J. (2003). *Rainfall - Runoff Modelling The Primer*. Chichester, England: John Wiley & Sons
- [2] Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988.). *Applied Hydrology*. Austin, Texas: McGraw-Hill Book Company
- [3] Daniel, E., Camp, J., LeBoeuf, E., Penrod, J., Dobbins, J., Abkowitz, M., *Watreshed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review*, The Open Hydrology Journal, Vol. 5, 26-50, 2011.
- [4] Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center
- [5] Jovanović, S., Radić, Z., (1990). *Parametarska hidrologija*, Građevinski fakultet u Beogradu
- [6] Krause, P., Boyle, D., & Base, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. Advances in Geosciences 5, 89-97, European Geosciences Union
- [7] Maidment, D. R. (1980). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- [8] Scharffenberg, W. A., Fleming, M. J. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center
- [9] Technical Release 55. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. United States Department of Agriculture
- [10] Tzenkova, A., Ivancheva, J., Videnov, P. *Investigation of the Evapotranspiration Regime in the Region of the Town Rousse*. Sofia, Bulgaria: National Institute of Meteorology and Hydrology
- [11] US Army Corps of Engineers. (1994). *Flood-Runoff Analysis – Engineering Manual*
- [12] Pechlivanidis, I., Jackson, B., McIntyre, N., Wheater, H., *Catchment scale hydrological modeling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications*, Global NEST Journal, Vol 13, No 3, pp 193-214, 2011
- [13] Beven, K., and P. Young (2013), A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees, *Water Resour. Res.*, 49, doi:10.1002/wrcr.20393.
- [14] RHMZ, internet prezentacija http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/povrsinske/sliv_kolubara.php
- [15] CGIAR-CSI, Consortium for Spatial Information, SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1, <http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>
- [16] US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hech-hms/downloads.aspx>
- [17] PEST, Model-Independent Parameter setimation and Uncertainty Analysis, <http://www.pesthomepage.org/Home.php>

APPLICABILITY OF THE HEC-HMS MODEL FOR CONTINUOUS RUNOFF SIMULATIONS

by

Andrijana TODOROVIĆ, Jasna PLAVŠIĆ
University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Summary

To examine the applicability of the HEC-HMS software for continuous runoff simulations, efficiencies of three different HEC-HMC models are assessed. The first and the second models are lumped ones, based on deficit and constant loss model and (more complex) Soil Moisture Accounting (SMA) loss model, respectively, whereas the third model is the semi-distributed version of the first one. In this way, the impact of the increase model structural complexity and parameter spatial disaggregation on model's ability to reproduce observed flows can be estimated.

The models are calibrated against flows observed at the Beli Brod stream gauge. Model efficiencies are quantified in terms of relative bias, correlation coefficients and Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for both, flows and the logarithms of flows. Also, model performance is estimated by visual comparison between simulated and observed hydrographs. The results indicate certain HEC-HMS's disadvantages and limitations to the application for continuous runoff simulations.

Key words: rainfall-runoff models, continuous runoff simulations, HEC-HMS

Redigovano 17.11.2014.