

KALIBRACIJA I VALIDACIJA MODELA EPIZODA U KARSTNOM SLIVU

Mirza MUJČIĆ¹⁾, Ajla MULAOMEROVIĆ – ŠETA²⁾

¹⁾Institut za hidrotehniku Sarajevo, ²⁾Univerzitet u Sarajevu, Građevinski fakultet

REZIME

Za procjenu hidrološkog režima, utjecaja prirodnih ili antropogenih promjena na slivu, ocjene velikih voda na izučanim ili neizučanim slivovima, sve češće se koriste hidrološki modeli. HEC HMS model kišne epizode korišten je za modeliranje tri pojedinačna događaja koja potječu iz različitih perioda u kojima se uobičajeno javljaju velike vode na hidrološkoj stanici Drvar na rijeci Unac. Obzirom da se radi o karstnom slivu, modeliranje otjecanja predstavlja poseban izazov. U ovom radu ispitana je mogućnost primjene relativno jednostavnog modela sa skromnim brojem parametara i ulaznih podataka, te prenosa parametara modela sa jednog na drugi događaj. Ulazni podaci za kalibraciju i validaciju modela su satne vrijednosti proticaja i padavina.

U radu je izvršena ručna kalibracija mijenjajući po jedan parametar. Na osnovu mjera efikasnosti (PBIAS, NSE, RSR) odabran je po jedan set parametara za svaku kišnu epizodu. Krajnji rezultat kalibracije pokazuje dobro slaganje osmotrenog i proračunatog hidrograma prema svim mjerama efikasnosti. U procesu validacije dobivene su lošije mjere efikasnosti, a prenos parametara sa jednog na drugi događaj djelomično je uspješan.

Ključne riječi: Model kišne epizode, HEC-HMS, parametri modela, kalibracija, validacija, karstni sliv, rijeka Unac

1. UVOD

Hidrološki modeli omogućavaju simulacije hidrološkog odgovora sliva na osnovu poznatog meteorološkog ulaza

(prije svega padavina) i karakteristika sliva. Kako se za pretpostavljeni meteorološki ulaz, uz jednake početne uslove, uvijek dobijaju isti rezultati simulacija, ovi modeli se još nazivaju i determinističkim modelima koji se baziraju na utvrđivanju odnosa između uzročnih (ulaznih) i posljedičnih (izlaznih) procesa na bazi relativno kratkih nizova podataka o istovremenim pojavama. Na taj način stvaraju se uvjeti da se određeni (posljedični) procesi simuliraju za zadate (obično dovoljno duge) nizove uzročnih pojava, ili pak da se izlazi predviđaju na osnovu hipotetičkih ulaza, čija realizacija ostaje za ocjenu [1].

U opštem slučaju hidrološki modeli obuhvataju ulazne i izlazne veličine te parametre modela. Ulazne veličine su uglavnom unaprijed poznate (npr. padavine, temperature itd.) ili se ocjenjuju (npr. evapotranspiracija). Veličine čije se vrijednosti modeliraju (npr. vlaga u zemljištu, protok na danom profilu vodotoka itd.) predstavljaju rezultate modela za zadate/pretpostavljene početne uslove i parametre modela.

Definiranje mjerodavnog hidrograma i njegova vrha oduvijek je bio ključni zadatak u hidrologiji, posebno izazovan kada je riječ o neizučanim slivovima na koje, zbog nedostatka mjerenja protoka, nije moguće primijeniti statističke metode [2]. U ovom slučaju moguće je primijeniti empirijske metode. Nažalost, većina tih metoda ne daje oblik hidrograma i ne uzima u razmatranje složene procese kao što su infiltracija u tlo ili transformacija vodnoga vala. Ovi nedostaci se prevazilaze upotrebom hidroloških modela čije parametre treba na neki način definisati. Za mjerodavnu kišu (mjerodavno trajanje i povratni period) moguće je modelom kišne epizode dobiti mjerodavni hidrogram na neizučanim profilima. Pri tome se parametri modela usvajaju na osnovu regionalnih vrijednosti ili regresionih zavisnosti u kojima su najčešće morfološke osobine sliva uzete kao nezavisne varijable (npr. [3]). Iako je postupak na prvi pogled jednostavan, postoji mnogo kontroverzi oko uvedenih pretpostavki [4], [5].

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 12.8.2024.

Ispravljen: 24.8.2024.

Prihvaćen: 30.8.2024.

Kontakt: ajlasam@yahoo.com

Modeli padavine – otjecaj se danas rutinski koriste u hidrologiji. Primjena modela nezaobilazna je u slučajevima hidroloških prognoza [6], procjene efekata određenih mjera na slivu (npr. pošumljavanje / sječa šuma, urbanizacija itd), klimatskih promjena [7], [8], ocjena različitih strategija upravljanja hidrotehničkim objektima [9] itd. Nakon katastrofalnih poplava u maju 2014, pristupilo se izradi mapa opasnosti i rizika na slivovima u BiH što je podrazumijevalo upotrebu hidroloških modela.

Osnovna podjela modela otjecanja je na modele epizoda i kontinualne modele. Modeli epizoda namijenjeni su proračunu otjecanja usljed jedne epizode padavina i ne bave se stanjem sliva između kišnih epizoda. Nasuprot njima su kontinualni modeli, koji pretvaraju kontinualni ulaz padavina i drugih veličina u kontinualni izlaz otjecanja. Kontinualni modeli obavezno obuhvataju komponente za proračun evapotranspiracije i topljenja snježnog pokrivača [10], koji se u modelima epizoda najčešće zanemaruju [11]. Struktura modela zavisi od njegove kompleksnosti, a uglavnom se sastoji od nekoliko komponenti od kojih je ključna transformacija efektivnih padavina u direktni otjecaj. Obzirom na ograničenja i pretpostavke, izbor modela je posebno izazovan. Može se reći da ne postoji univerzalni recept, već da svaki sliv zahtijeva posebnu analizu za adekvatan izbor modela.

Za postupak transformacije efektivnih padavina u direktni otjecaj obično se koristi neki od jediničnih hidrograma. Tako su u [1], [12], [13] korišteni trenutni geomorfološki jedinični hidrogram (TGMJH) na slivovima u Bosni i Hercegovini. Njegova specifičnost se ogleda u tome što za svoju konstrukciju koristi geomorfološke parametre sliva, zbog čega je primjenjiv i na hidrološki neizučeni slivovima. Upotreba ovih modela značajno je olakšana primjenom savremenih alata (npr. GIS) i dostupnosti podataka (npr. DEM, namjena zemljišta, hidrološke grupe tla itd.) [14].

Za modeliranje karstnih sredina uglavnom se biraju distribuirani modeli složenije strukture (npr. [15]), matematički modeli (npr. [16]) ili fizički zasnovani modeli sa značajnim brojem parametara. Za potrebe hidroloških prognoza i izrade mapa opasnosti i rizika od poplava pritoka Save u BiH, koje dijelom pripadaju karstu, korišten je MIKE model razvijen od strane danskog instituta za hidrauliku DHI (Danish Hydraulic Institute). Dugotrajne simulacije otjecanja u slivu rijeke Une, Vrbasa i Bosne provedene su primjenom kontinualnog hidrološkog MIKE NAM modela [17], [18], [19], [20].

Kao jedan od softvera koji se koristi u hidrološkom modeliranju je HEC-HMS, razvijen od strane Hidrološkog centra pri američkoj vojsci (Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers). Namijenjen je prije svega za model epizoda, ali omogućava i kontinualne hidrološke simulacije [21], a primjenjuje se za analizu otjecanja sa različitih vrsta površina, od urbaniziranih do poljoprivrednih [22].

Za potrebu izrade vodno-energetske studije sliva rijeke Vrbas korišten je HEC-HMS model [23] pri čemu su istaknute određene prednosti i mane modela za korištenje u komplikovanim konfiguracijama i kontinualnim simulacijama. Ograničenja i nedostaci primjene kontinualnog HEC-HMS potvrđena su na slivu rijeke Kolubare [21].

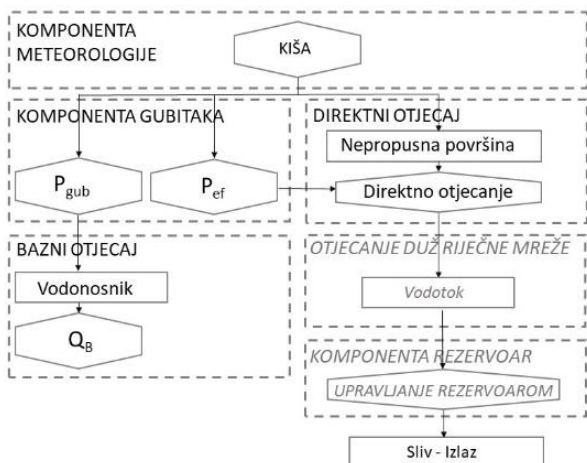
Primjena HEC-HMS modela na karstnim slivovima nije neuobičajena. Model se uglavnom proširuje zapreminom kojom se modelira isticanje iz podzemlja (npr. [24], [25]). U cilju poboljšanja tačnosti predviđanja poplava na malom karstnom slivu u južnoj Kini u HEC-HMS model uključen je kapacitet rezervoara karsta sa različitim otjecanjima u sušnom i vlažnom dijelu godine [26]. Za svaku značajniju pritoku rijeke Save izrađen je HEC-HMS model kišnih epizoda za koji su u procesu kalibracije postignuta jako dobra slaganja valova na hidrološkim stanicama na rijeci Uni [27].

U ovom radu će biti predstavljen homogeni HEC-HMS model epizoda na primjeru rijeke Unac na HS Drvar za izdvojena tri događaja iz različitih perioda unutar 2021 - 2024 godine. Ulazni podaci od interesa su proticaji sa HS Drvar i padavine sa obližnje stanice. U radu je izvršena kalibracija modela i ispitana je mogućnost prenosa parametara modela sa jednog na drugi događaj. Efikasnost modela ocjenjena je prema mogućnosti reprodukcije pika, zapremine vala (preko PBIAS mjere), te Nash-Sutcliffe i RSR mjere.

2. MODEL KIŠNIH EPIZODA (HEC-HMS MODEL)

Modeli u okviru HEC-HMS-a su konceptualni kod kojih su različite komponente hidrološkog ciklusa predstavljene rezervoarima (npr. rezervoari vegetacije, snijega, zemljišta, podzemnih voda) za koje važe jednačine održanja mase, dok se transfer vode između rezervoara opisuje pojednostavljenim jednačinama. Složenost ovih modela varira u širokom opsegu: od veoma jednostavnih (npr. sadrže samo jedan rezervoar), do izuzetno složenih sa brojnim rezervoarima [28].

Generalna shema HEC-HMS modela epizode (događaja) je data na slici 1.



Slika 1. Proces padavina uključenih u strukturu modela događaja (P_{gub} – gubici, P_{ef} – efektivne padavine, Q_B bazni otjecaj) (modifikovano prema [29])

2.1 Postavka modela

U ovom radu razmatra se HEC-HMS model kišne epizode, jedan od najjednostavnijih modela, koji su namijenjeni svakodnevnoj inženjerskoj praksi. Shema strukture modela je jednostavnija u odnosu na onu prikazanu na slici 1. Obzirom da na razmatranom slivu ne postoje akumulacije nema ni komponente upravljanja rezervoarom, a kako se sliv posmatra kao cjelina, izostavljena je komponenta transformacije vala kroz riječnu mrežu.

Za analizu potrebno je definisati parametre za sljedeće ključne stavke:

- Zadržavanje padavina na vegetaciji (intercepcija),
- Infiltracija i efektivne padavine,
- Transformacija direktnog otjecaja na slivu,
- Bazni otjecaj.

Za proračun intercepcije, odabrana je *Simple Canopy* metoda koja podrazumijeva zadržavanje padavina na biljkama do momenta popunjavanja rezervoara biljke, nakon čega padavine dopijevaju na površinu tla. Parametri koji se trebaju definisati su početni sadržaj vode u rezervoaru vegetacije (*Initial Storage*) i maksimalni kapacitet rezervoara (*Max Storage*). Početni sadržaj vode u rezervoaru vegetacije je pokazatelj prethodne vlažnosti, dok maksimalna zapremina definiše maksimalnu količinu vode koja se može zadržati u rezervoaru biljke. Metoda *Simple Canopy* pretpostavlja

konstantnu vrijednost koefcijenta kulture (*Crop Coefficient*), odnosa između stvarne evapotranspiracije (ET) usjeva i potencijalne evapotranspiracije (PET) u određenom vremenskom periodu. Za sušni period usvojena je vrijednost koefcijenta kulture 1, dok je u periodu padavina zanemarena.

Za procjenu efektivnih padavina korištena je SCS-CN metoda gubitaka koja zavisi od hidrološkog broja CN, procenta nepropusnih površina na slivu i početnog upijanja. Proračun efektivnih padavina prema SCS-CN metodi dobija preko izraza [22]:

$$P_{ef} = \begin{cases} \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + d)} & P > I_a \\ 0 & P < I_a \end{cases}$$

$$d = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

gdje I_a predstavlja početno upijanje, odnosno padavine koje se upiju prije nego što se pojavi površinski otjecaj, a d - retenzioni kapaciteta sliva (mm).

Transformacija efektivnih padavina u direktni otjecaj je urađena na osnovu SCS bezdimenzionalnog krivolinijskog jediničnog hidrograma (JH), izrađenog osrednjivanjem jediničnih hidrograma sa velikog broja poljoprivrednih površina u SAD-u. Vrijeme podizanja hidrograma T_p definiše se kao [22]:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p$$

gdje je t_r trajanje efektivne kiše, t_p vrijeme zakašnjenja sliva (definisano kao udaljenost težišta efektivne kiše i težišta jediničnog hidrograma). Početna vrijednost parametra može se procijeniti na osnovu dužine računskog koraka i vremena koncentracije sliva T_c kao [28]:

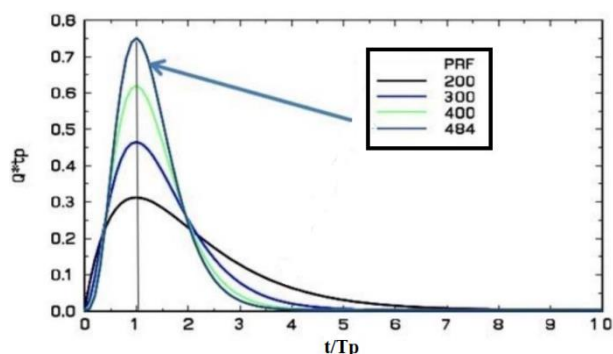
$$t_p = \frac{t_r}{2} + 0.6 \cdot T_c$$

Pik vala jediničnog hidrograma (Q_p) definiše se preko izraza:

$$Q_p = \frac{PRF \cdot A}{T_p}$$

gdje je PRF konstanta od čije vrijednosti zavisi oblik hidrograma, tj. odnos zapremine vala prije i poslije pojave pika, A - površina sliva.

Na vrijednost PRF faktora u prvom redu utiče oblik i nagib sliva, a oblik hidrograma u zavisnosti od njegove vrijednosti prikazan je na slici 2.



Slika 2. Različite varijante SCS bezdimenzionalnog krivolinijskog jediničnog hidrograma u zavisnosti od faktora *PRF* (modifikovano prema [30])

Bazni otjecaj je određen pomoću metode recesije (*Recession*) u kojoj se bazni otjecaj aproksimira eksponencijalno opadajućom krivom:

$$Q_b(t) = Q_0 \exp(-kt)$$

gdje Q_0 predstavlja početnu vrijednost baznog proticaja, a k recesiona konstanta.

Recesiona konstanta ima vrijednost između 0 i 1 i određuje kojom brzinom opada recesiona kriva.

2.2 Kalibracija i validacija modela

Cilj kalibracije modela je pronalaženje parametara modela za koje će se postići najbolje slaganje modeliranih i osmotrenih valova. U ovom procesu podešavaju se i parametri koji se ne mogu izmjeriti ili koji nemaju nikakvo fizičko značenje [29]. Kalibracija se može provesti ručno (pri čemu su od pomoći preporučene granice intervala date u priručnicima za korištenje softvera) ili automatski uz zadavanje ciljne funkcije i kriterijuma.

U ovom radu provedena je ručna kalibracija, što se preporučuje zbog skromnih mogućnosti organizacionih algoritama u HEC-HMS-u, i zbog sveobuhvatnijeg sagledavanja slaganja hidrograma. Ovo je posebno važno ako se modeliraju pojedinačni poplavni talasi gdje dužina nizova (od nekoliko sati do nekoliko dana) nije dovoljna da bi mjere slaganja modela pouzdano odražavale slaganje hidrograma. Prilikom ručne kalibracije modela mijenjao se po jedan parametar do dostizanja prihvatljive vrijednosti vizuelnom ocjenom.

Kvantitativni pokazatelji slaganja modela i osmotrenih vrijednosti dijele su u tri osnovne grupe: greške ovisne o mjerilu (*scale-dependent error measure SDM*) koje

kvantificiraju odstupanja u jedinicama podataka; mjere temeljene na relativnim pogreškama (*Measure based on relative errors MBR*), bezdimenzionalne mjere koje daju relativnu ocjenu modela (npr. srednja apsolutna greška); i relativne mjere (*Relative measures RM*), bezdimenzionalne koje predstavljaju odnos modeliranih i referentne mjere osmotrenih podataka (npr. varijanse osmotrenih podataka) [31].

Odabir mjere, tumačenje i poređenje rezultata mogu biti teški, budući da svaki kriterij daje naglasak na različite aspekte modela (npr. očuvanje oblika, zapremine, pika vala itd.), ili su ovisni o jedinici mjere kao u slučaju *SDM*.

Da bi vrijednosti mjera bile uporedive u ovom radu odabrane su *PBIAS*, *NSE* i *RSR* definisane u nastavku.

PBIAS, mjera efikasnosti očuvanja zapremine vala definisana je:

$$PBIASQ(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{osm,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{osm,i}} * 100$$

Predstavnik relativnih mjera je Nash-Sutcliffe (*NSE*) mjere efikasnosti koja se uobičajeno koristi za ocjenu efikasnosti hidroloških modela, a računa se:

$$NSE(/) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{osm,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm})^2}$$

Model koji perfektно opisuje osmotrenu seriju ima vrijednost $NSE = 1$. Vrijednost $NSE = 0$ podrazumijeva da model ima istu mogućnost predviđanja kao i srednja vrijednost, dok negativne vrijednosti znače da model lošije predviđa seriju od srednje vrijednosti, u smislu sume kvadrata odstupanja, odnosno varijanse.

Standardizovanjem srednje kvadratne greške (*RMSE*) koristeći standardnu devijaciju osmotrenih vrijednosti (σ_0), definirana je *RSR* mjera kao [22]:

$$RSR(/) = \frac{RMSE}{\sigma_0} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{osm,i} - Q_{sim,i})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm})^2} \right]}$$

Optimalna vrijednost *RSR*-a je 0 kada je model istovjetan osmotrenoj seriji.

Budući da je cilj modela kišnih epizoda reprodukcija pika vala izračunata je i greška ε_Q kao:

$$\varepsilon_Q = \frac{Q_{sim,max} - Q_{osm,max}}{Q_{osm,max}} \cdot 100 (\%)$$

Značenja pojedinih članova prethodnih jednačina su: Q_{osm} osmotreni proticaj, Q_{sim} simulirani proticaj, \bar{Q}_{osm} srednja vrijednost osmotrenog proticaja, $Q_{sim,max}$ maksimalni simulirani proticaj, $Q_{osm,max}$ maksimalni osmotreni proticaj.

U tabeli 1 data je ocjena performansi modela prema prethodno navedenim mjerama efikasnosti, rasponi mogućih vrijednosti i ciljna vrijednost.

Tabela 1. Ocjena performansi modela na osnovu mjera efikasnosti [22]

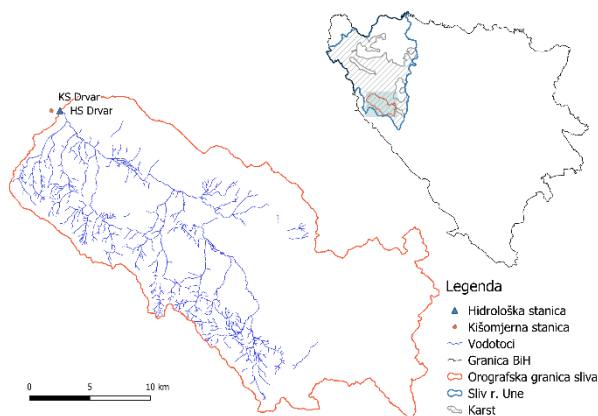
Ocjena performansi	ABS(PBIAS)*	NSE	RSR
Vrlo dobar	<10	≥ 0.75	0 – 0.5
Dobar	10 - 15	0.65-0.75	0.5 – 0.6
Zadovoljavajući	15 - 25	0.50-0.65	0.6 – 0.7
Nezadovoljavajući	≥ 25	≤ 0.50	> 0.70
Raspon vrijednosti	0 - inf	-inf - 1	0 - inf
Ciljna vrijednost	0	1	0

*ABS apsolutna vrijednost mjere

3. MODELIRANJE OTJECANJA NA SLIVU RIJEKE UNAC DO HS DRVAR

3.1. OPIS PODRUČJA

Rijeka Unac pripada slivu rijeke Une. Od vodotoka crnomorskog sliva na razmatranom području, Una je rijeka sa najvećim procentom karsta zbog čega je riječna mreža slabo razvijena (slika 3).



Slika 3. Sliv Unca i Une u BiH sa prikazom karsta, riječne mreža i položaj hidrološke i kišomjerne stanice

U slivnom području Une vlada padavinski režim kontinentalnog tipa zbog čega su režimi tečenja kišno-

snježnog tipa sa dva ciklusa maksimuma i minimuma godišnje. Visoki vodostaji se javljaju u aprilu i u decembru, a niski vodostaji u augustu i u januaru. Odnos maksimalnih i minimalnih srednjih mjesečnih proticaja je 3.9 [32].

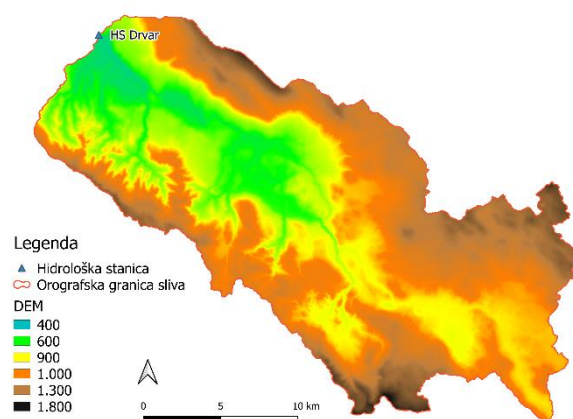
Prirodni početak Unca je Šatorski potok koji izvire kod Šatorskog jezera (Bulino vrelo) ispod Šator planine na oko 1 460 m n.m. Rijeka Unac većim dijelom toka teče kroz uske klisure do spajanja sa Unom, dok preostali tok prati manje doline (Mrđansko polje, Mokronoge, Drvarsko polje).

3.2. ULAZNI PODACI ZA MODEL HEC-HMS

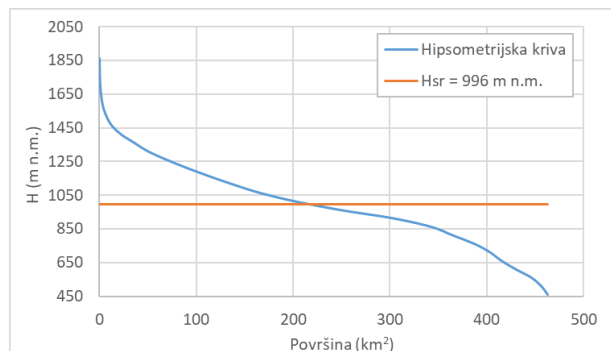
Ulazni podaci potrebni za model kišnih epizoda u HEC-HMS su:

- Hidrološki podaci sa HS Drvar (satne vrijednosti proticaja, izvor AVP Sava) [33],
- Meteorološki podaci sa KS Drvar (satne vrijednosti padavina, izvor FHMZ),
- Digitalni model terena ,
- Corine Land Cover [34],
- Položaj karsta.

Hidrološka stanica Drvar osnovana je 1927. godine [35], i trenutno predstavlja najuzvodniju stanicu na rijeci Unac nad kojom Agencija za vodno područje rijeke Save (AVP Sava) vrši sistemski monitoring. Površina orografskog sliva iznosi 463 km², dok se u [18] navode vrijednosti od 150 km² (zanemarujući jugoistočni dio bez razvijene riječne mreže) do 383 km². Nadmorske visine sliva se kreću od 462 m n.m. do 1860 m n.m. (slika 4) sa srednjom visinom od 996 (slika 5).



Slika 4. Visinska predstava terena na slivu r. Unac do HS Drvar



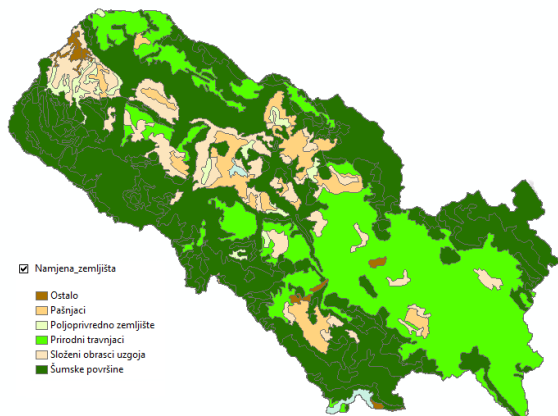
Slika 5. Hipsometrijska kriva sliva sa srednjom nadmorskom visinom

Karakteristične vrijednosti proticaja na hidrološkoj stanici HS Drvar sa pragovima upozorenja i mjerama odbrane od poplava prikazane su u Tabeli 2. Kišomjerna stanica Drvar nalazi se u neposrednoj blizini hidrološke stanice na nadmorskoj visini od 465 m n.m.

Tabela 2. Karakteristične vrijednosti proticaja (m³/s) na HS Drvar (izvor [18], [33])

$Q_{sr, god}$		7.7
srQ_{min}		0.5
$maxQ_{T100}$		213
$Q_{T1.25}$	Redovne mjere	42
Q_{T5}	Vanredne mjere	68
Q_{10}	Maks. zabilježen vodostaj	83

Na osnovu Corine Land Cover (CLC) 2018 [34] određena je namjena zemljišta u rasterskom formatu (slika 6).

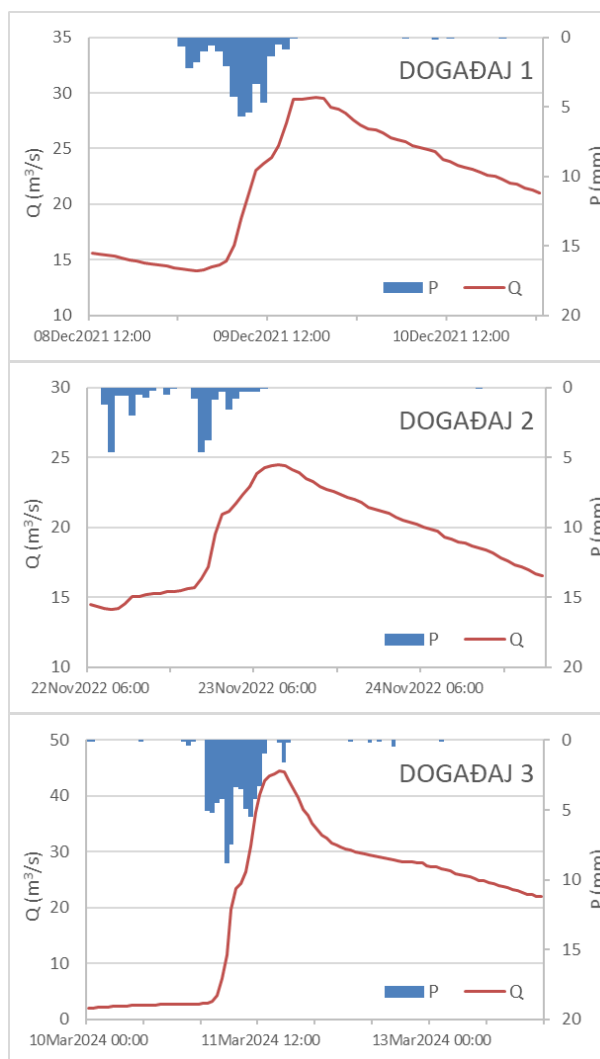


Slika 6. Prikaz namjene zemljišta

Slivno područje rijeke Unac, za HS Drvar, u pogledu namjene zemljišta, prevladavaju šumske površine 54.7%, prirodni travnjaci čine 28.9%, složeni obrasci uzgoja 7.9%, pašnjaci 5.6%, te ostalo čini 2.9%.

Za kalibraciju i validaciju izabrani su sljedeći događaji (slika 6):

- 08.12.2021.-11.12.2021. $Q_{max} = 29.6 \text{ m}^3/\text{s}$
- 22.11.2022.-24.11.2022. $Q_{max} = 24.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- 10.03.2024.-13.03.2024. $Q_{max} = 44.4 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 7. Grafički prikaz osmotrenih bruto padavina i proticaja za tri izdvojena događaja

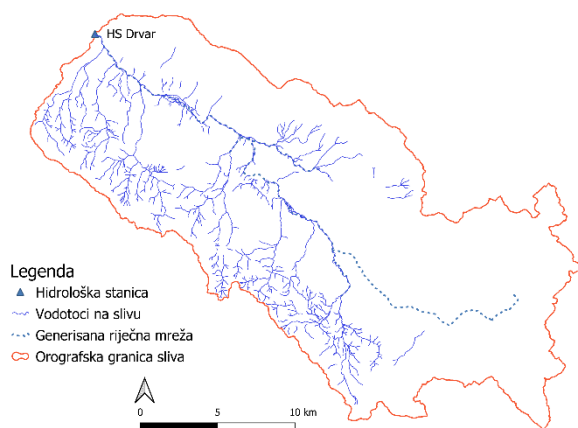
Na ovaj način izbjegnuti su periodi godine sa niskim temperaturama (sa snježnim padavinama), a očekuje se da je u ovom periodu podzemlje zasićeno. Pojave jakih padavina pri “suhom” podzemlju neće izazvati značajne

fluktuacije u proticajima, dok u suprotnom slučaju i relativno česte padavine rezultiraju značajnim otjecanjem. Ova pojava je primijećena kod analize poplava u Mokrom polju kod Trebinja [36] i drugim karstim slivovima [25]. Vrijednosti pikova vala su od $25 \text{ m}^3/\text{s}$ do $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 7) pri čemu su na snazi redovne mjere odbrane od poplava (tabela 2).

3.3. POSTAVKA MODELA I KALIBRACIJA

Dio parametara modela određuje se iz morfoloških osobina sliva. Podloga za njihovo definisanje je digitalni model terena DEM (slika 4) pomoću kojeg je definisana granica orografskog sliva, riječna mreža (za usvojeni prag od 25 km^2) (slika 8), te ostali parametri (tabela 3).

Generisani tok rijeke Unac prati stvarni, iako je znatno duži, dok pritoke sa lijeve strane nisu generisane. Obzirom na geološku građu riječna mreža na dijelu sliva je slabo razvijena te bolje slaganje nije moguće postići promjenom praga. Ostali morfološki parametri izdvojeni iz DEM-a prikazani su u tablici 3.



Slika 8. Stvarna i generisana riječna mreža sliva rijeke Unac (HS Drvar)

Tabela 3. Osnovne karakteristike toka i sliva rijeke Unac, HS Drvar, generisane u HEC HMS modelu

Parametar	Vrijednost
Najduži tok vode (km)	56.2
Nagib najdužeg toka (m/m)	0.021
Udaljenost od težišta do izlaznog profila mjereno duž glavnog toka (km)	64.7
Nagib od težišta do izlaznog profila mjereno duž glavnog toka (m/m)	0.008
Nagib sliva (m/m)	0.262

Parametar maksimalnog kapaciteta rezervoara vegetacije određen je prema nagibu i namjeni zemljišta te je usvojena vrijednost od 7 mm [37]. Početno stanje ovog rezervoara procijenjeno je na osnovu padavina prethodna 3 dana (P_{3D}) (tabela 4), a usvojene vrijednosti su predstavljene u tabeli 5.

Efektivne padavine određene su SCS-CN metodom. Uvidom u CLC utvrđeno je da je procenat nepropusnih površina zanemariv, te je usvojena vrijednost 0. Za koeficijent početnog upijanja odabrana je vrijednost 0 kako bi se što bolje oponašao brzi odgovor sliva karakterističan za karst [38]. Kako u klasičnim tablicama za CN ne postoje preporuke za karstne terene, usvojena je početna vrijednost 40 (u rangu preporučenih za ovakve slučajeve [39]). Pod pretpostavkom da ova vrijednost odgovara prosječnim uslovima prethodne vlažnosti (CN_{II}), konverzija na „suhe“ (CN_I) i „vlažne“ prethodne uslove (CN_{III}) se postiže primjenom izraza [40]:

$$CN_I(/) = \frac{4.2CN_{II}}{(10 - 0.058CN_{II})}$$

$$CN_{III}(/) = \frac{23CN_{II}}{(10 + 0.13CN_{II})}$$

što bi odgovaralo vrijednostima u dijapazonu od CN_I 22 do CN_{III} 61.

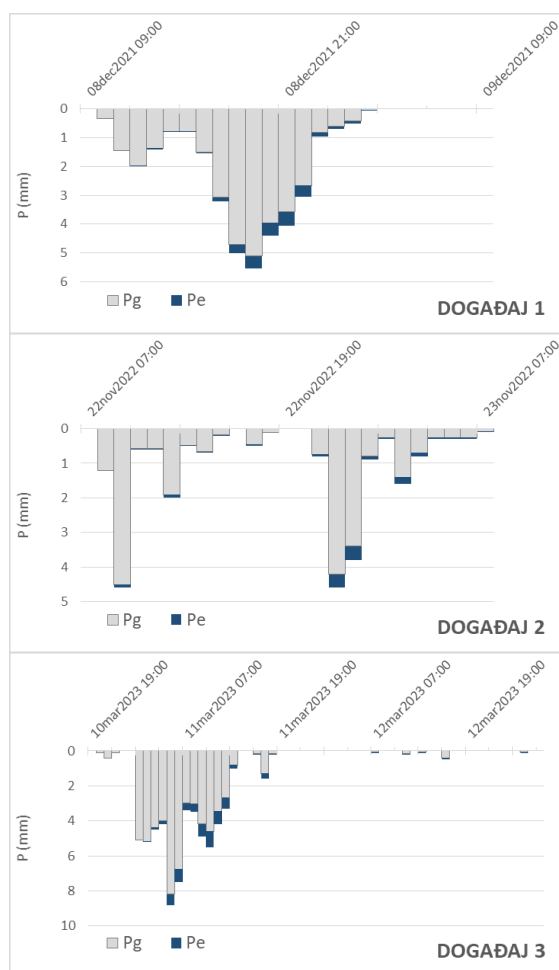
U procesu kalibracije CN je podešavan te su dobivene vrijednosti od 35 do 45. Najveća vrijednost CN postignuta je za događaj 2 (novembar), a pripisuje se povećanoj vlažnosti sliva obzirom na značajne količine padavine iz prethodna tri dana. Za događaje 1 i 3 (decembar i mart) dobivene su praktički jednake vrijednosti, 36 i 35 redom. Efektivne padavine dobivene u modelu (slika 9, tabela 4) poslužile su za određivanje koeficijenta otjecanja koji iznosi od 7 do 10 %, a što odgovara vrijednostima na karstu [5].

Za transformaciju efektivnih padavina u otjecanje korišten je standardni jedinični hidrogram (PRF 484), što je u skladu sa strmijim nagibom terena [11], a u procesu kalibracije podešavan je parameter zakašnjenja sliva t_p . Dobivene su prilično ujednačene vrijednosti za sva tri događaja i to od 613 (događaj 2) do oko 670 za događaj 1 i 3. Vizuelnom inspekcijom može se primijetiti zakašnjenje grane porasta modeliranog u odnosu na osmotreni hidrogram (do 5 sati za događaje 1 i 3). Relativno male vrijednosti CN, te dobrim dijelom prazna zapremina vegetacije rezultovale su velikim gubicima i kasnijom pojavom efektivnih kiša, zbog čega „brzi“ odgovor karstnog sliva nije reprodukovano. Izuzetak je

slučaj 2 kojem su prethodile značajne padavine, gotovo pun rezervoar vegetacije i veći CN.

Tabela 4. Karakteristične padavine (mm): 3 dana prije simulacije (P_{3D}), tokom simulacije (P_{uk}), efektivne padavina (P_e) i koeficijenti otjecanja η

DOGAĐAJ	P_{3D}	P_{uk}	P_e	η (%)
1	1.9	35.8	2.58	7.21
2	46.5	24.8	1.77	7.14
3	9.3	64.7	6.4	9.89



Slika 9. Visine efektivnih padavina (P_e) i gubitaka (P_g) za tri događaja

Koeficijent recesije dobiven je u postupku kalibracije, uz pretpostavku da na početku simulacionog perioda u

otjecanju učestvuje samo isticanje iz podzemlja, tj. Q_0 odgovara osmotrenom proticaju sa početka simulacionog perioda. Vrijednosti se kreću od 0.74 (događaj 3) do 0.85 (događaj 2). Recesiona grana hidrograma definisana je preko odnosa pika vala (*ratio to peak*) i recesione konstante (*recession constant*). U sva tri slučaja su postignute visoke vrijednosti parametra *ratio to peak* (od 0.78 do 0.9), a recesione grane hidrograma su uglavnom dobro reprodukovane modelom (slika 10).

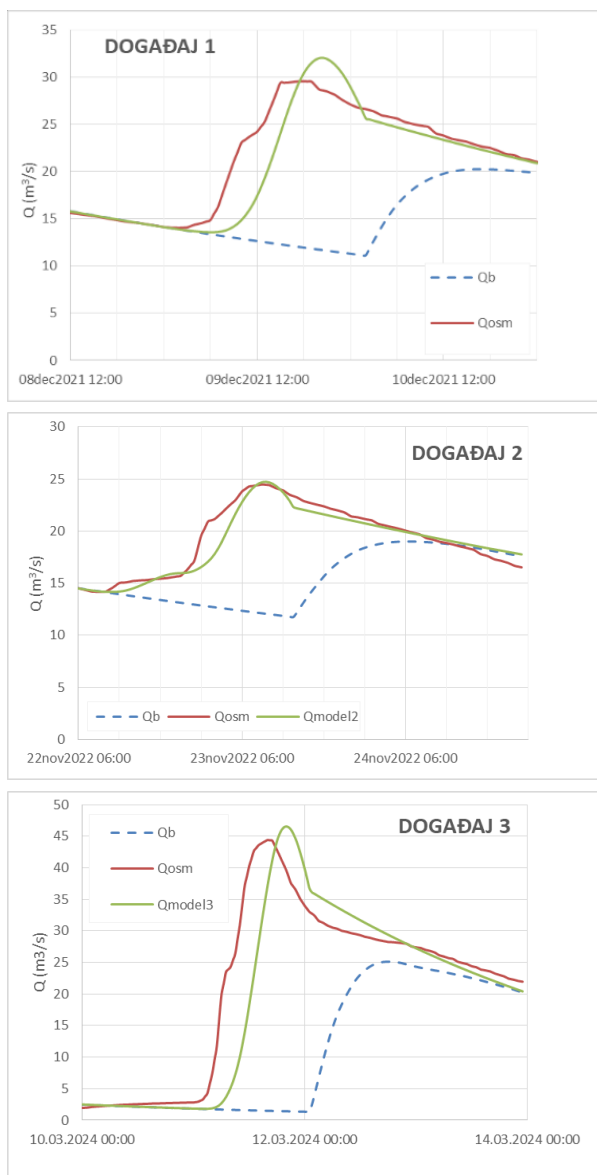
Vrijednosti svih parametara usvojenih u procesu kalibracije prikazani su u tabeli 5, a osmotreni i modelirani hidrogrami (uz prikaz baznog + brzog potpovršinskog otjecanja) na slici 10. Sve tri mjere efikasnosti ocijenile su da su postignuta vrlo dobra slaganja u procesu kalibracije (tabela 6). Modelirani hidrogrami su blago precijenili pikove (od 0.8 do 8.4 %), te podcijenili zapremine valova (od 1.7 do 7.6 %).

Tabela 5. Usvojene vrijednosti modela za 3 događaja

Parametar modela	Jed.	DOGAĐAJ		
		1	2	3
Početni sadržaj vode u rez. vegetacije (<i>Initial Storage</i>)	%	5	95	5
Maks. kapacitet rez. (<i>Max Storage</i>)	mm	7		
Početno upijanje (<i>Initial Abstraction</i>)	mm	0		
Udio nepropusnih površina na slivu (<i>Impervious</i>)	%	0		
Hidrološki broj CN	-	36	45	35
Vrijeme kašnjenja (<i>Lag Time</i>)	min	670	613	673
Recesiona konst. (<i>Recession const.</i>)	-	0.8	0.85	0.74
Odnos prema vršnom proticaju (<i>Ratio to Peak</i>)	-	0.8	0.9	0.78

Tabela 6. Vrijednosti mjera efikasnosti i grešaka u pik-u i zapremini kalibrisanih modela

Mjera efikasnosti	DOGAĐAJ		
	1	2	3
<i>PBIAS</i>	-4.22	-1.73	-7.56
<i>NSE</i>	0.75	0.90	0.75
<i>RSR</i>	0.5	0.3	0.5
ϵ_Q	8.4	0.8	5.0



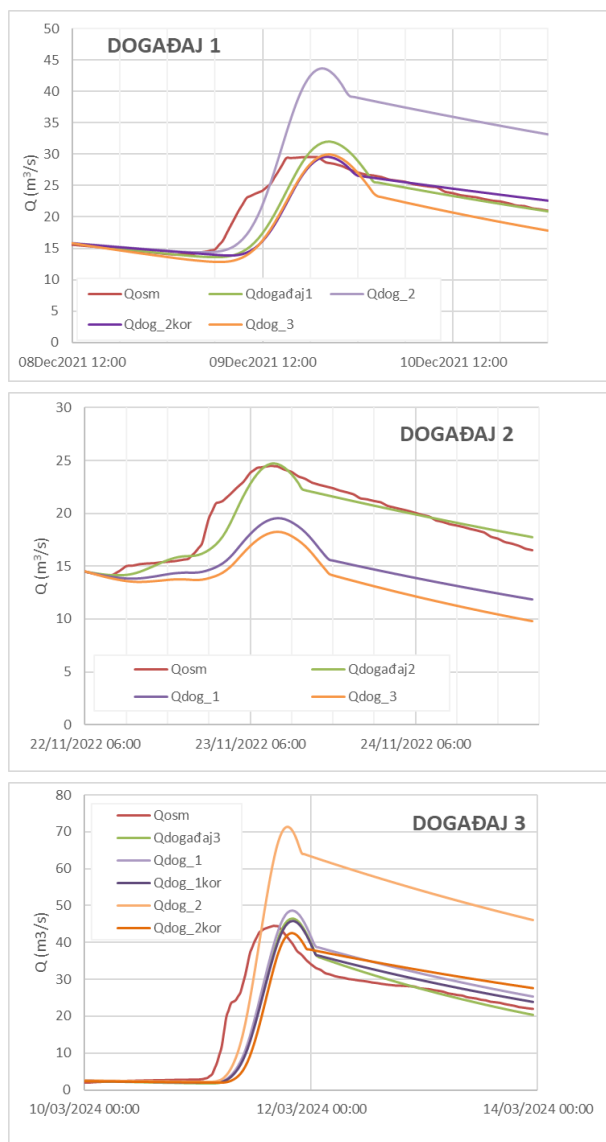
Slika 10. Osmotreni i modelirani hidrogrami tri odabrana događaja sa prikazom baznog otjecanja

4.2 REZULTATI VALIDACIJE MODELA

Postupak validacije modela proveden je na tri odabrana događaja usvajajući parametre druga dva događaja/modela (CN, vrijeme kašnjenja, koeficijent recesije i odnos prema vršnom proticaju). Na ovaj način dobiveno je 6 kombinacija. Obzirom da u pojedinim kombinacijama nisu postignuta zadovoljavajuća slaganja, proširene su sa podvarijantama u kojima je mijenjan koeficijent početnog upijanja tj:

- za događaj 1 razmatrano početno upijanje 10 mm uz parametre događaja 2;
- događaj 3, razmatrani početno upijanje = 2 mm uz parametre događaja 1, te 15 mm za parametre događaja 2.

Ukupno je analizirano 9 slučajeva sa rezultatima prikazanim na slici 11. Radi jedostavnijeg poređenja, na grafikonima su zadržani rezultati kalibracije (oznaka događaj, zelena linija) i validacije za razmatrane slučajeve (oznaka dog_). Vrijednosti mjera efikasnosti prikazane su u tabeli 7.



Slika 11. Osmotreni i modelirani proticaji u procesu validacije

Mjere efikasnosti su očekivano lošije nego u procesu kalibracije. Može se zaključiti da događaj 2 (novembar) nije moguće efikasno opisati parametrima druga dva događaja. Za ove slučajeve podcjenjivanja pika i zapremina vala su između 20 i 30 % a prema mjerama efikasnosti rezultat je klasifikovan uglavnom kao nezadovoljavajući.

Prenos parametara događaja 2 na događaje 1 (decembar) i 3 (mart) prema mjerama efikasnosti ocijenjen je kao nezadovoljavajući, s tim da su pikovi vala precijenjeni za skoro 50 % i više (tabela 5). Rezultat je očekivan obzirom na značajne razlike u CN vrijednostima među događajima. Obzirom na precijenjenu zapreminu i pik vala, a u cilju intervencije na što manjem broju

parametara, korigovano je samo početno upijanje, povećavanjem sa 0 na 10 mm, odnosno 20 mm za događaje 1 i 3 respektivno. Nakon intervencije, pikovi su dobro reprodukovani (sa precjenjivanjem do 4% za događaj 3), a mjere efikasnosti su ocjenjene kao vrlo dobar i dobar.

Jedini uspješan prenos parametara je sa događaja 1 na događaj 3, dok je suprotan slučaj, u zavisnosti od mjere efikasnosti, ocijenjen kao dobar do zadovoljavajući. U oba slučaja greške u piku vala i zapremini su uglavnom ispod 10%. Podvarijanta u kojoj su korigovani parametri modela 1 (dog1_kor) prema mjerama efikasnosti je ista kao i varijanta bez korekcije s tim da je pik vala tačnije procijenjen.

Tabela 7. Mjere efikasnosti postignute u procesu validacije

MJERA	DOGAĐAJ 1			DOGAĐAJ 2		DOGAĐAJ 3			
	DOG2	DOG2_kor	DOG3	DOG1	DOG3	DOG1	DOG1_kor	DOG2	DOG2_kor
PBIAS	29.13	-3.93	-11.7	-22.97	-29.43	3.0	-3.1	68.51	0.13
NSE	-1.90	0.70	0.55	-1.38	-2.87	0.71	0.73	-1.48	0.60
RSR	1.7	0.6	0.7	1.5	2	0.5	0.5	1.6	0.6
ϵQ	47.6	0.0	1.4	-20.0	-25.7	9.7	3.2	60.8	-4.3

4. ZAKLJUČAK

Modeliranje oticanja u karstu uglavnom se provodi primjenom modela crne kutije (npr. vještačnih neuronskih mreža) ili hidrauličkim zakonima tečenja opisanim matematskim modelima. U ovome radu ispitana je mogućnost primjene relativno jednostavnog homogenog modela kišnih epizoda na karstnom slivu rijeke Unac.

U svakodnevnoj inženjerskoj praksi, modeli kišnih epizoda za modeliranje velikih voda imaju veliku prednost u odnosu na kontinualne zbog njihove jednostavne strukture i relativno malog broja parametara [5]. Međutim, izbor parametara modela ima presudan utjecaj na konačan rezultat [41]. Poteškoće proizilaze iz činjenice da pojedini parametri ovise o samom slučaju/događaju (npr. početni gubici, zadržavanje vode u površinskim depresijama, sadržaj vode u tlu). Da bi se ovaj problem djelomično prevazišao predložene su indirektno metode koje podrazumijevaju uspostavljanje empirijskih odnosa između parametara modela i mjerljivih graničnih uslova ili karakteristika vremenskih serija [42]. Drugi autori izbor parametara posmatraju

ovisno o periodu godine, odnosno vrsti padavina [11], [26], [29].

U ovom radu odabran je jednostavan, prostorno homogen model sa relativno malim brojem parametara. U procesu kalibracije dobivene su slične vrijednosti pojedinih parametara koji ne utiču bitnije na pik ili zapreminu vala (vrijeme kašnjenja (*lag time*), recesionu konstantu (*recession constant*), odnos prema vršnom proticaju (*ratio to peak*)). Značajnije razlike se uočavaju u vrijednosti CN na koji je model najosjetljiviji [43], [44].

Vrijednosti CN najčešće se usvajaju na osnovu literaturnih preporuka za normalne uslove vlažnosti (CN_{II}) koje često ne odgovaraju osmotrenim vrijednostima [45], ili nisu definisane za konkretan slučaj (npr. karst). U radu su u procesu kalibracije postignute vrijednosti CN i koeficijenta otjecanja u saglasnosti sa istraživanjima na karstnim slivova [39],[5]. Međutim, gornja i donja granica CN-a daju značajno različite karakteristike hidrograma u smislu pika i zapremine vala, što je potvrđeno lošim vrijednostima mjera efikasnosti u procesu validacije. Pokazano je da se podbacivanjem CN vrijednosti značajno podcjenjuje pik i zapremina vala, dok precijenjene vrijednosti daju prevelike pikove i

zapremine. Kako bi se “kompenzirala” prevelika vrijednost CN, uvećan je koeficijent početnog upijanja kako bi se dostigle povoljne vrijednosti mjera efikasnosti. Uspješan prenos parametara, bez dodatnih intervencija na parametrima modela, postignut je za događaje koji su u procesu kalibracije dostigli slične vrijednosti CN.

Obzirom na osjetljivost modela na vrijednost CN, u budućem periodu planira se ispitati potencijalna veza sa prethodnim padavinama i/ili periodom godine, kako bi se procjena velikih voda učinila pouzdanijom.

ZAHVALA

Autori se zahvaljuju Federalnom hidrometeorološkom zavodu u Sarajevu i Agenciji za vodno područje rijeke Save na ustupljenim podacima o padavinama i proticajima. Autori se zahvaljuju recenzentima na pažljivom čitanju rada i korisnim sugestijama.

LITERATURA

- [1] Prskalo G., Hrelja H.: Geomorfološki trenutni jedinični hidrogram kao osnova za definiranje poplavnih voda na neizučeniim slivovima, e-Zbornik radova Građevinskog fakulteta, broj 1, juni 2011
- [2] Młyński D., Petroselli A. and Wałęga A.: Flood frequency analysis by an event-based rainfall-runoff model in selected catchments of southern Poland, *Soil Water Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 170–176, Sep. 2018, doi: 10.17221/153/2017-SWR
- [3] Praštalo P., Topalović Ž. i Blagojević B.: Hidrološko modeliranje korišćenjem geomorfološkog jediničnog hidrograma na neizučeniim slivovima, Savjetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021.
- [4] Grimaldi S., Petroselli A., Tauro F. and Porfiri M.: Time of concentration: a paradox in modern hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 217–228, Feb. 2012, doi: 10.1080/02626667.2011.644244.
- [5] Efstratiadis A., Koussis A.D., Koutsoyiannis D. and Mamassis N.: Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 6, pp. 1417–1428, Jun. 2014, doi: 10.5194/nhess-14-1417-2014.
- [6] Beven K.J.: *Rainfall-runoff modelling: the primer*. Chichester, UK : New York: J. Wiley, 2001.
- [7] Koutsovoli E.I., Tzoraki O., Theodossiou N. and Gaganis P.: Numerical assessment of climate change impact on the hydrological regime of a small Mediterranean river, Lesvos Island, Greece, *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, vol. 24, no. 1, pp. 28–48, May 2021, doi: 10.2478/ahr-2021-0022.
- [8] Hassaan H.A., Rauf A.U., Ghumman A.R., Khan S. and Aamir E.: Assessment of climate change impact on inflows to Amandara headwork using HEC-HMS and ANNs, *J. Umm Al-Qura Univ. Eng.Archit.*, May 2024, doi: 10.1007/s43995-024-00064-2.
- [9] Plavšić J., Dašić T. i Milovanović I.: Modeliranje vodoprivrednog sistema sliva Drine i analiza izabranih razvojnih i klimatskih scenarija, *Vodoprivreda*, 0350-0519, Vol. 49 (2017) No. 285-287 p. 125-137
- [10] Bennett T.H. and Peters J.C.: Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), pp. 1–10, Apr. 2012, doi: 10.1061/40517(2000)149.
- [11] Fleming M. and Neary V.: Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System, *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 175–183, May 2004, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:3(175).
- [12] Praštalo P., Topalović Ž. i Blagojević B.: Geomorfološki jedinični hidrogram kao alat u hidrološkom modeliranju neizučeniim slivova, *Voda i sanitarna tehnika*, Vol. 5-6, No. 61, pp. 45 - 56, 2021
- [13] Petroselli A., Mulaomerović-Šeta A. and Lozančić Ž.: Comparison of methodologies for design peak discharge estimation in selected catchments of Bosnia and Herzegovina, *Građevinar* 9/2019, vol. 71, no. 9
- [14] Hidrogrami velikih vodnih valova; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Priručnik za hidrotehničke melioracije, III Kolo, Knjiga 1, Savremeni pristupi i metode planiranja i upravljanja hidromelioracijskim sistemima,

- Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatsko društvo za odvodnju i navodnjavanje, Hrvatsko hidrološko društvo; Rijeka, 2003.*
- [15] Chen L., Deng J., Yang W. and Chen H.: Hydrological modelling of large-scale karst-dominated basin using a grid-based distributed karst hydrological model, *Journal of Hydrology*, vol. 628, p. 130459, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130459.
- [16] Jaćimović N., Dašić T., Stanić M., Đorđević B., Milanović P., Sudar N. i Savić S.: Razvoj distribuiranog modela za hidrološke simulacije oticaja na slivovima u karstu, *Vodoprivreda*, 0350-0519, Vol. 47 (2015) No. 273-275 p. 29-40
- [17] Zavod za Vodoprivredu d.o.o Bijeljina, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, and Zavod za vodoprivredu d.d Sarajevo: Izrada mapa ugroženosti i mapa rizika od poplava na slivu rijeke Vrbas u BiH, UNDP, 2016.
- [18] Predviđanje poplava - Pilot prijekat sliv rijeke Une u Federaciji BiH. Agencija za vodno područje rijeke Save.
- [19] ZZV d.d Sarajevo, PRONING DHI d.o.o, and DHI: Uspostava sistema predviđanja poplava u realnom vremenu za sliv rijeke Vrbas u Bosni i Hercegovini. UNDP, 2019 2018.
- [20] ZZV d.d. Sarajevo: Tehnička pomoć kod uspostave sistema za hidrološko prognoziranje poplava na slivu rijeke Save.
- [21] Todorović A. i Plavšić J.: Mogućnosti za primenu modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije, *Vodoprivreda*, vol. 46, no. 1-6, pp. 117-128, 2014
- [22] HEC-HMS Technical Reference Manual.
- [23] Topalovic Ž., Milišić V. i Plavšić J.: Hidrološko modeliranje sliva rijeke Vrbas za izradu vodno-energetske studije, *Zbornik radova sa 16. naučnog savetovanja SDHI i SDH*, pp. 686 - 700, Oct, 2012
- [24] Mo C., Wang Y., Ruan Y., Qin J., Zhang M., Sun G. and Jin J.: The effect of karst system occurrence on flood peaks in small watersheds, southwest China, *Hydrology Research*, vol. 52, Dec. 2020, doi: 10.2166/nh.2020.061.
- [25] Dai J., Rad S., Xu J., Wan Z., Li Z., Pan L. and Shahab A.: Influence of Karst Reservoir Capacity on Flood in Lijiang Basin Based on Modified HEC-HMS through Soil Moisture Accounting Loss. *Atmosphere* 2022, 13(10), 1544; <https://doi.org/10.3390/atmos13101544>
- [26] Liao L., Rad S., Dai J., Shahab A., Xu J. and Xia R.: Hydrologic Model Prediction Improvement in Karst Watersheds through Available Reservoir Capacity of Karst', *Sustainability*, vol. 16, no. 15, Art. no. 15, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16156557.
- [27] Sava River Basin Flood Study: HEC-HMS Technical Documentation Report, International Sava River Basin Commission.
- [28] Todorović A.: Primena softverskog paketa HEC-HMS za procene merodavnih velikih voda. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2018.
- [29] Cunderlik J.M. and Simonovic S.: Calibration, Verification and Sensitivity Analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model.
- [30] Meadows M.: South Carolina Unit Hydrograph Method Applications Manual.
- [31] Hwang S.H., Ham D.H., and Kim J.H.: A new measure for assessing the efficiency of hydrological data-driven forecasting models, *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57, no. 7, pp. 1257-1274, Oct. 2012, doi: 10.1080/02626667.2012.710335.
- [32] Plan upravljanja vodama za vodno područje rijeke Save u Federaciji Bosne i Hercegovine (2016-2021), Prateći dokument br. 7, Hidrološke analize, Novembar 2016.
- [33] Podaci sa stranice Agencije za vodno područje rijeke Save: <https://vodostaji.voda.ba/#2110>.
- [34] CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly — Copernicus Land Monitoring Service
- [35] Hidrološka studija sliva rijeke Une, Knjiga 7, VS Drvar, rijeka Unac; Agencija za vodno područje rijeke Save, IPSA Institut d.o.o. Sarajevo, Zavod za elektroprivredu d.d. Zagreb; Decembar 2017
- [36] Tehnička pomoć za izradu planova zaštite od erozije i tehnička projektna dokumentacija za infrastrukturu za zaštitu od poplave za odabrana prioritetna područja u Bosni i Hercegovini, AVP Sava, 2023 2020.

- [37] Ahbari A., Laila S., Agoumi A. and Serhir N.: Estimation of initial values of the HMS model parameters: Application to the basin of Bin El Ouidane (Azilal, Morocco), *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 9, pp. 305–317, Jan. 2018, doi: 10.26872/jmes.2018.9.1.34.
- [38] Wang F., Chen H., Lian J., Fu Z. and Nie Y.: Hydrological response of karst stream to precipitation variation recognized through the quantitative separation of runoff components, *Science of The Total Environment*, vol. 748, p. 142483, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142483.
- [39] Savvidou E., Efstratiadis A., Koussis A.D., Koukouvinos A. and Skarlatos D.: The Curve Number Concept as a Driver for Delineating Hydrological Response Units', *Water*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/w10020194.
- [40] Plavšić J.: *Inženjerska hidrologija*, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd, 2019.
- [41] Erić R., Plavšić J., Todorović A. and Đukić V.: Mogućnosti za primenu kalibrisanog hidrološkog modela epizoda za proračun računskih velikih voda, *Vodoprivreda*, vol. 51, pp. 179–186, 2019,
- [42] Lin Q., Lin B., Zhang D. and Wu J.: Web-based prototype system for flood simulation and forecasting based on the HEC-HMS model', *Environmental Modelling & Software*, vol. 158, p. 105541, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105541.
- [43] Kousari M.R., Malekinezhad H., Ahani H. and Asadi Zarch M.A.: Sensitivity analysis and impact quantification of the main factors affecting peak discharge in the SCS curve number method: An analysis of Iranian watersheds, *Quaternary International*, vol. 226, no. 1–2, pp. 66–74, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.quaint.2010.05.011.
- [44] Soomro A.G., Babar M.M., Memon A.H., Zaidi A.Z., Ashraf A. and Lund J.: Sensitivity of Direct Runoff to Curve Number Using the SCS-CN Method', *Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2019, doi: 10.28991/cej-2019-03091445.
- [45] Lian H. *et al.*: CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China', *Water Research*, vol. 177, p. 115767, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.115767.

CALIBRATION AND VALIDATION OF EVENT MODEL IN A KARST WATERSHED

by

Mirza MUJČIĆ¹⁾, Ajla MULAOMEROVIĆ – ŠETA²⁾¹⁾Hydro-Engineering Institute Sarajevo,²⁾University of Sarajevo, Faculty of Civil Engineering

Summary

For the assessment of the hydrological regime, the impact of natural or anthropogenic changes on the watershed, and the evaluation of flood events in gauged and ungauged watersheds, hydrological models are increasingly being used. The HEC-HMS model for rainfall-runoff events was utilized to model three distinct events from different periods prone to floods at the hydrological station in Drvar on the Unac River. Considering that this is a karst watershed, modeling runoff presents a unique challenge. This study examined the applicability of a relatively simple model, parsimonious in parameters and input data, as well as the transfer of model parameters from one event to another. The input data for the calibration and validation of the model consisted of hourly discharge and precipitation data.

The study performed manual calibration by adjusting one parameter at a time. Based on efficiency measures (PBIAS, NSE, RSR), a set of parameters was selected for each rainfall event. The final calibration results demonstrated a good agreement between the observed and computed hydrographs according to all efficiency measures. In the validation process, the efficiency measures were poorer, and the transfer of parameters from one event to another was partially successful.

Key words: Rainfall-runoff event model, HEC HMS, model parameters, calibration, validation, karst, Unac River