



## GEOMORFOLOŠKI TRENUTNI JEDINIČNI HIDROGRAM KAO OSNOVA ZA DEFINIRANJE POPLAVNIH VODA NA NEIZUČENIM SLIVOVIMA

dr. sc. **Gordan Prskalo** dipl. ing. građ.  
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru  
prof. dr. sc. **Husno Hrelja**, dipl. ing. građ.  
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

**Sažetak:** U radu je prikazan postupak definiranja Geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma, koji predstavlja dobru osnovu za određivanje maksimalnih protoka/poplavnih voda na neizučenim, vodoprivredno potencijalnim lokalitetima. Tradicionalno, poplavne vode na takvim lokalitetima/slivnim površinama određuju se metodama regionalizacije, tj. transfera informacija s izučenih slivnih površina/lokaliteta na neizučene slivne površine. Taj pristup temeljen je na multiregresijskoj analizi parametara kojim se definiraju jedinični hidrogram i značajke slivne površine. Koncept geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma (GTJH), kao identifikacije transformacijske funkcije, odnosno jediničnog hidrograma u ovisnosti o topologiji riječne mreže i karakteristika vodnih tokova u njoj, nudi se kao jedna od mogućih alternativa. Određivanje GTJH ovisi o nizu pretpostavki od kojih su najvažnije ocjene tzv. „karakterističnih brzina“. Primjena GTJH prikazana je na tri vodotoka iz sliva rijeke Bosne. Dobiveni preliminarni rezultati preporučuju metodu GTJH za daljnje istraživanje na vodnim tokovima u Bosni i Hercegovini i poređenje rezultata te metode i drugih raspoloživih metoda.

**Ključne riječi:** poplavne vode, modeliranje procesa oborine-otjecanje, jedinični hidrogram, geomorfologija, geomorfološki trenutni jedinični hidrogram

## GEOMORPHOLOGICAL INSTANTANEOUS UNIT HYDROGRAPH AS A BASIS FOR DEFINING FLOOD WATERS IN UNGAUGED CATCHMENTS

**Abstract :** This study represents the process of defining Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH), which serves as a good basis for defining maximum flow/floods at the ungauged, potential water management use locations. Traditionally, the floods at such regions/drainage areas are determined by the methods of regionalization, i.e. the transfer of information from the gauged to the ungauged catchments. Such an approach is based on the multiple linear regression parameter analysis which defines both the unit hydrograph and characteristics of the drainage area. The concept of GIUH, as a identification of transfer function, respectively unit hydrograph in subordination to stream network topology and channel characteristics, offers an alternative methodology. GIUH derivation depends upon series of assumptions, including that of estimating a “characteristic velocity”. GIUH application is represented on the three river streams of the Bosna river basin. The preliminary results suggest the GIUH method forward for further investigation of river basins in Bosnia and Herzegovina and comparing this method with other available methods.

**Key words:** floods, rainfall-runoff process modeling, unit hydrograph, geomorphology, geomorphologic instantaneous unit hydrograph.

Rad objavljen:  
Hrvatske vode, 15, 61, 261-272, 2007 godine



## 1. UVOD

Poplave predstavljaju jednu od najvećih opasnosti za ljudsku zajednicu i imaju značajan utjecaj na društveni i ekonomski razvoj. Broj ljudi ugroženih poplavama u periodu od 1991. do 2000. godine, prema Svjetskoj Meteorološkoj Organizaciji (WMO), procjenjuje se na 1,5 milijardi [Hrelja, 2003.]. Iako se dugo smatralo da je najrazvijeniji dio svijeta riješio probleme poplava i da se to događa samo u slabije razvijenim dijelovima svijeta, događanja u Europi (Njemačka, Austrija, Češka) pa i širom svijeta (Kina, Filipini) koja su uslijedila u ljeto 2002. godine, pa i poslije, definitivno su razbile tu iluziju. Riječ je o vrlo bogatim i vrlo organiziranim državama u Europi, pa i u svijetu, koje su tokom mjeseca kolovoza 2002. godine doživjele doista katastrofalne poplave. Smatralo se naime da su te zemlje, ili barem neke od njih, riješile probleme poplava velikih rijeka na zadovoljavajući način i da se takvi problemi mogu javljati samo u slabije razvijenim dijelovima svijeta.

Velike i doslovno kataklizmičke poplave koje su se dogodile u Europi u ljeto 2002. godine karakteristične su po golemim štetama (prve grube procjene su preko 20 milijardi eura), ali i gubitcima ljudskih života. Općenito, nesreće prouzročene poplavama su u porastu i uglavnom su posljedica širenja naselja i rasta ulaganja unutar poplavnih područja.

Posljednje iskustvo govori u prilog činjenici da su sve do sada poduzete mjere nedovoljne i ne preostaje ništa drugo nego novim istraživanjima problema pronaći nova i djelotvornija inženjerska rješenja. Treba unaprijed znati da su ta rješenja skupa i komplicirana, ali očigledno prijeko potrebna.

Te poplave i nekoliko velikih poplava u raznim dijelovima Europe i svijeta u posljednjoj dekadi dvadesetog stoljeća, praćene visokim štetama i gubitcima ljudskih života, vratile su problem poplava u centar interesa javnosti. Kako uslijed ekonomskog razvoja postoji veliki pritisak na korištenje prostora pored rijeka, postalo je jasno da stoljećima primjenjivan pristup "borbe protiv poplava" mora biti zamijenjen principom "živjeti s poplavama".

Tako poplave koje se i kod nas događaju nisu nikakva specifičnost, a naročito nisu rezultat naše nespremnosti, ili su to samo manjim dijelom. Poplave se, dakle, događaju svuda, u razvijenim i u nerazvijenim dijelovima svijeta, na mjestima gdje su izgrađeni sustavi obrane od poplava i na mjestima gdje su takvi sustavi nepotpuni ili ih uopće nema, u situacijama i društvima u kojima postoje dobro organizirane mjere prognoze i dojave poplava i u situacijama i društvima gdje su takve mjere slabo organizirane. Međutim, bitna je razlika u dimenzijama njihovih posljedica-šteta. U prvim, dakle onim razvijenijim, štete su apsolutno, a naročito relativno (s obzirom na njihov društveni dohodak) bitno manje, a osim toga sanacija šteta mnogo je brža i djelotvornija.

Rješavanje je problema obrane od poplava, pored ostalog, vezano i za što točnije određivanje poplavnih/velikih voda na lokalitetima ugroženim poplavama, odnosno objektima i sustavima za obranu od poplava. Ovo dalje zahtijeva precizno određivanje parametara režima velikih voda, što je uvjet za sveobuhvatno sagledavanje rizika i neizvjesnosti pojave ekscenčnih događaja. S obzirom da su u Bosni i Hercegovini raspoloživi nizovi podataka daleko kraći od zahtijevanih, vjerojatnosti relativno rijetkih pojava su dobivane uz pomoć ekstrapolacija linija vjerojatnost (ponekad nedopustivo velikih). Ako se tomu doda činjenica da velike vode imaju izražene varijacije, a i da su podatci u mnogim slučajevima nehomogeni kao rezultat antropogenih utjecaja u slivu, jasno je da su i same procjene velikih voda opterećene manjim ili većim greškama. Daleko teža situacija je na hidrološki neizučeni lokalitetima (slivovima) ili općenito tamo gdje su hidrološke informacije o količinama voda vrlo oskudne. Tada se za određivanje velikih (poplavnih) voda primjenjuju druge poznate tehnike (metode) za njihovo definiranje.



Bosna i Hercegovina je upravo primjer zemlje s neadekvatnim hidrološkim mrežama uz poražavajuću činjenicu o gotovo potpunom nedostatku mjerenja protoka u proteklih petnaest godina. Postojanje izvjesnog broja vodomjernih postaja koje prikupljaju samo informacije o vodostajima nema nikakav smisao.

U tu svrhu, u ovom radu prikazan je postupak i rezultati određivanja geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma koji se može uspješno primijeniti za procjenu poplavnih voda na hidrološki neizučeni slivovima/lokalitetima.

## 2. OPĆI OSVRT NA ODREĐIVANJE JEDINIČNOG HIDROGRAMA

Metoda jediničnog hidrograma jedna je od metoda iz grupe determinističkih (parametarskih) metoda za određivanje velikih voda. Determinističke ili parametarske se metode 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.

Prilikom determinističkog modeliranja, od modela se zahtijeva da oborine, kao funkciju lokacije i vremena  $P(x, y, t)$ , transformira u protok u funkciji vremena -  $Q(t)$

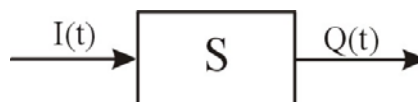
$$P(x, y, t) \rightarrow Q(t) \quad (1)$$

gdje su  $(x)$  i  $(y)$  koordinate prostora,  $(t)$  je vrijeme,  $(P)$  visina kiše i  $(Q)$  protok na izlaznom profilu sliva.

Transformacija oborina u otjecanje je deterministički proces pošto izlaz  $Q(t)$  isključivo ovisi od ulaza  $P(x, y, t)$  i početnih uvjeta.

Kada su u pitanju nedovoljno ili u potpunosti hidrološki neizučeni slivovi, u procesu transformacije padavina u otjecanje, vrlo često se koristi pristup nazvan model „crne kutije“ (black-box model) koji se sastoji u tome da se matematički opiše rad hidrološkog sustava na bazi opaženog ulaza u sustav i izlaza iz sustava, bez ulaženja u fizičke zakone koji upravljaju radom sustava. Tipičan model iz ove grupe je upravo jedinični hidrogram. Iako se ova metoda u hidrološkoj praksi uspješno primjenjuje više od 70 godina, tek 60-ih je godina prošlog stoljeća za jedinični hidrogram razvijena odgovarajuća teorija (zbroj konvolucije). Istovremeno su evoluirale i metode za identifikaciju jediničnog hidrograma. Model se sa gledišta teorije sustava svodi samo na određivanje operatora ulazno-izlaznog preslikavanja.

Neka se promatra jedan kontinuirani deterministički sustav s jednim ulazom i jednim izlazom (slika 1).



Slika 1. Blok shema kontinuiranog determinističkog sustava s jednim ulazom i jednim izlazom



Ako ne postoje nikakva apriorna znanja o dinamici procesa koji se odvijaju u sustavu, osim što se zna (ili pretpostavlja) da je sustav linearan, onda se ovakav sustav može izučavati preko integrala konvolucije [Anđelić i dr., 1986.]:

$$Q(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) I(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

koji predstavlja neparametarski model sustava, gdje su:

$I(t)$  - ulaz (oborine);

$Q(t)$  - izlaz (otjecanje);

$u(t)$  - impulsna funkcija odziva ili reakcija sustava na jedinični impulsni ulaz  $\delta(t)$  (ili trenutni jedinični hidrogram);

$\tau$  - memorija sustava.

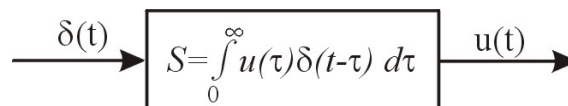
Impulsna funkcija ulaza  $\delta(t)$  poznatija je pod imenom DIRAC-ova delta funkcija.

Ako se uzme da je:

$$I(t) = \delta(t) \quad (3)$$

tada je izlaz sustava  $Q(t) = u(t)$  (slika 2.)

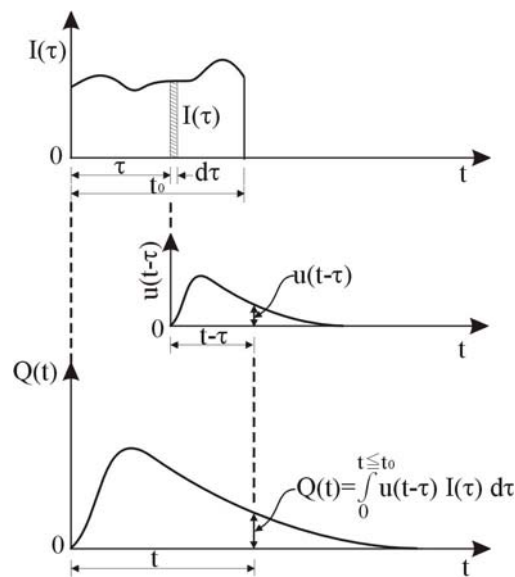
$$Q(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \delta(t-\tau) d\tau = u(t) \quad (4)$$



Slika 2. Shematski prikaz odziva sustava (izlaza) na impulsnu funkciju ulaza

Ukoliko su početni uvjeti u trenutku  $t = 0$  takvi da je  $I(t) = Q(t) = u(t) = 0$ , kao i za svako  $t < 0$ , što vrijedi za sve fizički ostvarljive (neanticipativne) sustave, onda se umjesto relacije (2) dobiva (slika 3):

$$Q(t) = \int_0^{\infty} u(\tau) \cdot I(t-\tau) \cdot d\tau \quad \text{ili} \quad Q(t) = \int_0^{\infty} u(t-\tau) \cdot I(\tau) \cdot d\tau \quad (5)$$



Slika 3: Operacija konvolucije; funkcija sustava: trenutni jedinični hidrogram (TJH), [Chow, 1964.]

Identifikacija transformacijske funkcije  $u(t)$ , odnosno odziva sustava ili jediničnog hidrograma, svodi se na rješavanje integralne jednadžbe (5), što se relativno lako može analitički provesti, bilo u domenu vremena bilo u domenu frekvencija ako su  $Q(t)$  i  $I(t)$  dati kao jednostavne, strogo analitički definirane funkcije vremena.

Problem identifikacije kontinuiranih linearnih stacionarnih sustava predstavljenih neparametarskim modelom može se riješiti, ali samo za određenu klasu kontinuiranih funkcija i to onih koje se mogu analitički predstaviti u funkciji vremena. Činjenica je, međutim, da za mnoge ulazno-izlazne promjenljive (čak ako se mjere ili osmatraju kontinuirano u vremenu) ne postoji analitička forma. S druge strane, mnoge ulazno-izlazne promjenljive, premda su po prirodi kontinuirane, mjere se diskretno u vremenu. Ovi razlozi, kao i mogućnosti koje pružaju digitalni računari, uvjetovali su da se problemi identifikacije najčešće rješavaju preko diskretnih modela.

Neparametarski model jednog diskretnog, linearnog determinističkog sustava može se predstaviti zbirom konvolucije [Anđelić i dr., 1986.]:

$$Q(k) = \sum_{i=0}^{\infty} u(i)I(k-i) \quad (6)$$

gdje veličine u diskretnom vremenu ( $k$ ,  $Q(k)$  i  $I(k)$ ), imaju značenja analogna onim koja su dana uz izraz (2), a  $u(k)$  predstavlja odziv sustava na jedinični ulaz  $\delta(k)$ , ili jedinični "odgovor" sustava što predstavlja  $\Delta t$ -jedinični hidrogram, gdje je  $\Delta t$  interval diskretizacije.

Metode za određivanje jediničnog hidrograma, kao i trenutnog jediničnog hidrograma svode se na problem identifikacije nepoznatog funkcioniranja sustava (sliva) kada su poznati njegov ulaz (hijetogram) i izlaz (hidrogram otjecanja vode). Postoji niz metoda za određivanje trenutnog jediničnog hidrograma (TJH) na osnovu poznatog hijetograma efektivne kiše i odgovarajućeg hidrograma direktnog otjecanja, od kojih se izdvajaju sljedeće metode:



- definiranje TJH na osnovu prethodno definirane S-krive;
- definiranje TJH pomoću konceptualnih modela;
- definiranje TJH prilagođavanjem harmonijskih serija na hidrogram direktnog otjecanja, hijetogram efektivne kiše koja ga je izazvala i trenutni jedinični hidrogram;
- definiranje TJH korištenjem Laplasove transformacijske funkcije.

Pri tomu treba konstatirati da su u hidrološkoj praksi, zbog jednostavnije procedure određivanja, u širokoj upotrebi prve dvije metode.

Kao preduvjet za primjenu prve metode je poznavanje  $\Delta t$ - jediničnog hidrograma, odnosno odgovarajuće S-krive, koji se određuju na osnovu istovremenog osmatranja hidrograma direktnog otjecanja i efektivnih kiša koje su ih izazvale, korištenjem integrala, odnosno zbira konvolucije. Kod ovog postupka ordinata trenutnog jediničnog hidrograma u vremenskom trenutku (t) predstavlja nagib S-krive u istom vremenskom trenutku (t). Procedura je zasnovana na činjenici da se S-kriva dobije integriranjem površine ispod trenutnog jediničnog hidrograma.

Korištenje konceptualnih modela podrazumijeva model koji je komponiran od relativno malog broja jednostavnih elemenata. Svaki od ovih elemenata simulira neku etapu fizičkih procesa u slivu. Tako, na primjer, model za izolirani poplavni val može biti predstavljen nekom komponentom koja simulira translaciju vode u slivu i jednim rezervoarom kojim se simulira efekt retencije sliva. Njihovo korištenje u hidrologiji za određivanje trenutnog jediničnog hidrograma počelo je kada je Zoch 1934. godine [Jovanović, 1974.] predložio postupak koji proces transformacije padavina u odgovarajuće otjecanje simulira linearnim kanalima u seriji s linearnim rezervoarima.

Kao tipični predstavnici ove grupe modela mogu se izdvojiti široko korišteni i dobro poznati Clarkov model i Nashov model.

### 3. TEORETSKE OSNOVE METODE GEOMORFOLOŠKOG TRENUTNOG JEDINIČNOG HIDROGRAMA

Naprijed pobrojane metode za određivanje trenutnog jediničnog hidrograma, kao što je to već rečeno, zasnivaju se na poznavanju istovremeno osmotrenih hidrograma otjecanja valova velikih voda i hijetograma kiša koje su ih izazvale. Međutim, postojanje takvih podataka često je upitno, osobito u slabije razvijenim i hidrološki neistraženim područjima. Potreba za poznavanjem trenutnog jediničnog hidrograma i u takvim područjima dovela je do razvoja više metoda kojima je osnova za određivanje trenutnog jediničnog hidrograma povezivanje geomorfoloških i hidroloških značajki sliva. Jedna od tih metoda je i metoda kojom se definira tzv. „Geomorfološki trenutni jedinični hidrogram (GTJH)“.

Osnove metode dali su Rodríguez-Iturbe [Rodríguez-Iturbe, 1979.] i Gupta [Gupta, 1980.] uvođenjem funkcije gustoće raspodjele vjerojatnosti vremena putovanja potrebnog da čestica vode (kišna kap) dođe do izlaznog profila sliva. Drugim riječima, GTJH je interpretiran kao funkcija gustoće raspodjele vjerojatnosti vremena putovanja slučajnih oborina ravnomjerno raspoređenih na riječnom slivu do izlaznog profila sliva. Pri tome je pretpostavljeno da vremena putovanja površinskog tečenja vode po padinama sliva ili duž vodnih tokova u slivu imaju eksponencijalnu raspodjelu vjerojatnosti koja uključuje početnu vjerojatnost i prijelaznu vjerojatnost koje se računaju na bazi poznatih Hortonovih morfometrijskih parametara: zakona broja tokova ili bifurkacionog faktora  $R_B$ , zakona dužine



tokova  $R_L$  i zakona površine tokova  $R_A$ .

Hortonov morfometrijski parametar	Opis
Zakon broja tokova (bifurkacioni faktor) $R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}}$	$N_i$ i $N_{i+1}$ su brojevi tokova reda (i) i (i+1). $\Omega$ - predstavlja najveći red toka u slivu, $i = 1, 2, \dots, \Omega$
Zakon dužine tokova $R_L = \frac{\bar{L}_{i+1}}{\bar{L}_i}$	$\bar{L}_i$ je srednja dužina toka reda (i): $\bar{L}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} L_{j,i}$
Zakon površine tokova $R_A = \frac{\bar{A}_{i+1}}{\bar{A}_i}$	$\bar{A}_i$ je srednja vrijednost podpovršine koja pripada toku reda (i) $\bar{A}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} A_{j,i}$ gdje $A_{j,i}$ predstavlja ukupnu površinu koja se drenira u j-ti vodotok rok reda (i)

Tablica 1. Pregled izraza na osnovu kojih se računaju Hortonovi morfometrijski parametri, [Bras, 1990.]

Kako bi se definirao trenutni jedinični hidrogram za određeni sliv pretpostavlja se ulaz u sliv (sustav) kao jedinična zapremina koju čini beskonačan broj kišnih kapi. Analiza se bazira na putovanju slučajno odabrane kišne kapi po slivnoj površini vodotoka. Kišna kap putuje po slivnoj površini čineći prijelaze iz vodnih tokova manjeg reda u vodne tokove većeg reda. Taj prijelaz možemo shvatiti kao promjenu stanja gdje je stanje red vodnog toka u kome kišna kap putuje. Stanja napredovanja se definiraju kao položaj kišne kapi na malom dijelu slivne površine (padine)  $a^\omega$  ili vodnom toku  $r^\omega$  reda  $\omega$  gdje se kišna kap našla u vremenu (t) [Bras, 1990.].

Putovanje kišne kapi upravljano je slijedećim pravilima [Bras, 1990.] :

Pravilo 1: Kada je kišna kap još na padini slivne površine, stanje  $a^\omega$  je reda vodnog toka ka kome se ta padina direktno drenira.

Pravilo 2: Jedini mogući prijelaz iz stanja  $a^\omega$  je u odgovarajući  $r^\omega$ . Iz vodnog toka  $r^\omega$  prijelazi tipa  $\omega \rightarrow j$  za  $j > \omega$  ( $j = \omega + 1, \dots, \Omega$ ) su mogući.

Pravilo 3: Definirajući izlaz sa sliva kao krajnje stanje  $\Omega + 1$  konačno stanje kišne kapi je  $\Omega + 1$  iz koga nije moguć daljnji prijelaz.



Gore navedena pravila definiraju konačan set mogućih putova koje kišne kapi koje su slučajno pale na slivnu površinu mogu slijediti da bi došle do izlaznog profila sliva. Na primjer, za slivno područje sa najvećim redom vodotoka tri (slika 4), skup mogućih putova kišne kapi  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  je:

- $s_1 : a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{izlaz}$
- $s_2 : a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{izlaz}$
- $s_3 : a_2 \rightarrow r_2 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{izlaz}$
- $s_4 : a_3 \rightarrow r_3 \rightarrow \text{izlaz}$



Slika 4. Ilustracija slivnog područja sa vodotokom najvećeg reda tri prema Strahlerovoj shemi rangiranja riječnih tokova prema redovima, [Rodríguez-Iturbe, 1979.]

Pretpostavlja se da uvijek kišna kap na svom putu prvo padne na padinu sliva, tj. na jedno od početnih stanja  $a^\omega$ . Nadalje, uvijek se podrazumijeva prijelaz vode s padine reda  $\omega$  u vodotok reda  $\omega$ .

Prema Gupta [Gupta, 1980.], kumulativna funkcija vjerojatnosti vremena putovanja kišnih kapi s neke točke sliva do izlaza iz sliva može se izraziti kao:

$$P(T_B \leq t) = \sum_{s \in S} P(T_s \leq t)P(s) \quad (7)$$

gdje su:

$P(\cdot)$  - označava vjerojatnost za niz u zagradi;

$T_B$  - vrijeme putovanja kišnih kapi do izlaza s slivnog područja;

$T_s$  - vrijeme putovanja kišnih kapi po pojedinom putu "s";

$P(s)$  - vjerojatnost da će kišne kapi otjecati (putovati) putem "s";

$S$  - skup svih mogućih putova kojim kišne kapi mogu otjecati nakon pada na sliv.





Vrijeme putovanja  $T_s$  na određenom putu  $a_i \rightarrow r_i \rightarrow r_j \rightarrow \dots \rightarrow r_\Omega$ ,  $i < j < \Omega$ , mora biti jednako sumi vremena putovanja kroz parcijalne dijelove toga puta [Bras, 1990.]:

$$T_s = T_{a_i} + T_{r_i} + T_{r_j} + \dots + T_{r_\Omega} \quad (8)$$

gdje je:

$T_{a_i}$  - vrijeme putovanja oborine po određenom dijelu slivne površine (padini),

$T_{r_i}, i \in (1, 2, \dots, j, \dots, \Omega)$  - vrijeme putovanja kišnih kapi u vodotoku reda (i),

Obzirom da postoji mnogo padina i vodnih tokova danog reda s različitim osobinama na jednoj slivnoj površini, različita vremena tečenja su onda slučajne varijable s funkcijama gustoće raspodjele vjerojatnosti  $f_{T_{a_i}}(t)$  ili  $f_{T_{r_i}}(t)$ , respektivno. Nadalje, ne postoji razlog za sumnju da ta vremena nisu ništa drugo do neovisno raspodijeljene slučajne varijable.

Funkcija gustoće raspodjele vjerojatnosti ukupnog vremena putovanja kišnih kapi  $T_s$  je tada konvolucija funkcija gustoća raspodjele vjerojatnosti  $f_{T_{a_i}}(t)$  i  $f_{T_{r_i}}(t)$ , koji odgovaraju elementima puta (s) [Bras, 1990.]:

$$f_{T_s}(t) = f_{T_{a_i}}(t) * f_{T_{r_i}}(t) * \dots * f_{T_{r_\Omega}}(t) \quad (9)$$

gdje znak \* označava tzv. konvolucijski operator.

Na primjer (slika 4), za put  $s_2$  ( $a_1 \rightarrow r_1 \rightarrow r_3 \rightarrow$  izlaz), vjerojatnoća  $P(T_s \leq t)$  se može izraziti kao:

$$f_{T_{s_2}}(t) = \int_0^t \int_0^{t''} f_{T_{a_1}}(t') \cdot f_{T_{r_1}}(t'' - t') \cdot dt' \cdot f_{T_{r_3}}(t - t'') \cdot dt'', \text{ i} \quad (10)$$

$$P[T_{s_2} \leq t] = \int_0^t f_{T_{s_2}}(t) \cdot dt \quad (11)$$

U svojim izvornim radovima Rodriguez-Iturbe i Valdes [Rodríguez-Iturbe, 1979.] su zanemarili vrijeme putovanja po padini s obzirom na njegov relativan odnos na ukupno vrijeme koje kišna kap provede na slivnoj površini. Zbog toga se jednadžbe (8) i (9) mogu pojednostaviti i izraziti kao:

$$T_s = T_{r_i} + T_{r_j} + \dots + T_{r_\Omega} \quad (12)$$

$$f_{T_s}(t) = f_{T_{r_i}}(t) * f_{T_{r_j}}(t) * \dots * f_{T_{r_\Omega}}(t) \quad (13)$$



Vjerojatnost bilo kojeg puta (s), P(s) može se napisati kao:

$$P(s) = \theta_i \cdot P_{ij} \cdot P_{jk} \dots P_{l\Omega} \quad (14)$$

gdje je  $\theta_i$  vjerojatnost da će kišna kap početi svoje putovanje na dijelu padine i oteći ka vodnom toku reda (i),  $P_{ij}$  je prijelazna vjerojatnost iz vodotoka reda (i) u vodotok reda (j).

Treba uočiti da je, shodno pravilu 1, kišna kap koja je početno pala na dio slivne površine koji se drenira ka vodotoku reda (i) i oteče u vodotok reda (i) sa vjerojatnošću 1 (jedan) - siguran događaj.

Rodriguez-Iturbe i Valdes [Rodríguez-Iturbe, 1979.] pokazali su da su vjerojatnosti početnih stanja  $\theta_i$  i prijelazne vjerojatnosti  $P_{ij}$  samo funkcije geomorfoloških i geometrijskih značajki slivne površine. Fizikalna interpretacija ovih vjerojatnost može se izraziti kao:

$$\theta_i = \frac{(\text{ukupna površina koja se drenira direktno u vodotok reda } i)}{(\text{ukupna slivna površina})} \quad (15)$$

$$P_{ij} = \frac{(\text{broj tokova reda } i \text{ koji se dreniraju u tokove reda } j)}{(\text{ukupan broj tokova reda } i)} \quad (16)$$

Prijelazne se vjerojatnosti mogu aproksimirati kao funkcije broja Strahler-ovih tokova svakog od reda  $N_i$ , koristeći se slijedećim općim izrazom koji je predložio Gupta [Gupta, 1980.] :

$$P_{ij} = \frac{(N_i - 2N_{i+1})E(j, \Omega)}{\sum_{k=i+1}^{\Omega} E(k, \Omega) N_i} + 2 \frac{N_{i+1}}{N_i} \delta_{i+1, j}; \quad 1 \leq i \leq j \leq \Omega \quad (17)$$

gdje je  $\delta_{i+1, j} = 1$  ako je  $j = i+1$ ,  $\delta_{i+1, j} = 0$  ako je  $j \neq i+1$ .

$E(i, \Omega)$  označava prosječan broj unutarnjih veza reda "i" u konačnoj mreži vodotoka reda  $\Omega$ . On se može izraziti kao [Smart, 1972.] :

$$E(i, \Omega) = N_i \prod_{j=2}^i \frac{N_{j-1} - 1}{2N_j - 1}; \quad i = 2, \dots, \Omega \quad (18)$$

Jedna unutarnja veza je segment mreže vodotoka između dva uzastopna spoja ili između izlaza sliva i prvog uzvodnog spoja.



Slično, vjerojatnost da će kišna kap pasti na dio površine reda  $\omega$  može se približno izraziti preko sljedećih izraza:

$$\theta_1 = \frac{N_1 \bar{A}_1}{A_\Omega}; \quad (19)$$

$$\theta_\omega = \frac{N_\omega}{A_\Omega} \left[ \bar{A}_\omega - \sum_{j=1}^{\omega-1} \bar{A}_j \left( \frac{N_j P_{j\omega}}{N_\omega} \right) \right] \quad (20)$$

Na sreću, efekti pojednostavljenja učinjenih gornjim jednadžbama su relativno zanemarljivi. Nadalje treba uočiti da se za određenu slivnu površinu jednadžbe (15) i (16) mogu egzaktno riješiti.

Kao primjer u tablici 2. dana je potpuna lista početnih i prijelaznih vjerojatnoća za slivnu površinu sa najvećim redom vodotoka  $\Omega=3$ . One su sračunate uvrštavanjem Hortonovih morfometrijskih parametara: zakona broja tokova ili bifurkacionog faktora  $R_B$  i zakona površine tokova  $R_A$ , čije su definicije dane u tablici 1, u jednadžbe (19) i (20).

Početna vjerojatnost ( $\theta_\omega$ )	Prijelazna vjerojatnost ( $P_{i,j}$ )
$\theta_1 = \frac{R_B^2}{R_A^2}$	$P_{12} = \frac{R_B^2 + 2R_B^2 - 2}{2R_B^2 - R_B}$
$\theta_2 = \frac{R_B}{R_A} - \frac{R_B^3 + 2R_B^2 - 2R_B}{R_A^2(2R_B - 1)}$	$P_{13} = \frac{R_B^2 - 3R_B + 2}{2R_B^2 - R_B}$
$\theta_3 = 1 - \frac{R_B}{R_A} - \frac{R_B^3 - 3R_B^2 + 2R_B}{R_A^2(2R_B - 1)}$	$P_{23} = 1$

Tablica 2. Početne i prijelazne vjerojatnosti za slivnu površinu sa najvećim redom vodotoka tri, [Bras, 1990.]

Naprijed navedenim u potpunosti je definirana funkcija vjerojatnosti vremena putovanja kišnih kapi unutar slivne površine na osnovu geomorfoloških značajki slivne površine i funkcije vjerojatnosti  $f_{T_{r_i}}(t)$  koja se odnosi na vrijeme putovanja kišnih kapi u vodnom toku

$T_{r_i}$ .

Geomorfološki trenutni jedinični hidrogram se tada definira kao funkcija gustoće raspodjele vjerojatnosti od  $T_B$ . Kako je jednadžbom (7) definirana kumulativna funkcija vjerojatnosti od  $T_B$ , to onda slijedi da se vrijednosti ordinata GTJH u vremenu (t) mogu odrediti kao:

$$u(t) = dP(T_B \leq t) / dt = \sum_{s \in S} f_{T_{a_j}}(t) * f_{T_{r_1}}(t) * \dots * f_{T_{r_\Omega}}(t) \cdot P(s) \quad (21)$$



Obzirom na pretpostavke koje su uvedene za određivanje svakog od pojedinih članova  $f_{T_{r_i}}$  u prethodnoj jednadžbi, Rodriguez-Iturbe i Valdes [Rodríguez-Iturbe, 1979.] uveli su ideju da se vrijeme putovanja vode kroz vodotok reda  $\omega$  izrazi u obliku eksponencijalne funkcije gustoće raspodjele vjerojatnosti, kao:

$$f_{T_{r_\omega}}(t) = K_\omega \cdot \exp(-K_\omega t) \quad (22)$$

gdje je  $K_\omega$  parametar koji odražava značajke vodotoka reda  $\omega$  i ima dimenziju  $[T^{-1}]$ . Kako  $1/K_\omega$  također znači srednje vrijeme putovanja vode, Rodriguez-Iturbe i Valdes [Rodríguez-Iturbe, 1979.] predložili su opći izraz za ocjenu parametra  $K_\omega$ , kao:

$$K_\omega = \frac{v}{L_\omega} \quad (23)$$

gdje je  $v$  tzv. „karakteristična brzina“. Pretpostavljeno je da je  $v$  isto na čitavoj slivnoj površini u bilo kom vremenskom trenutku. Na taj način se funkcije gustoće raspodjele vjerojatnosti  $f_{T_{a_i}}(t)$  i  $f_{T_{r_i}}(t)$ , koje figuriraju u jednadžbi (21), mogu izraziti kao:

$$f_{T_{a_i}}(t) = \alpha_i \exp(-\alpha_i t) \quad (24)$$

$$f_{T_{r_i}}(t) = \beta_i \exp(-\beta_i t) \quad (25)$$

gdje su  $\alpha$  i  $\beta$  prosječna vremena putovanja po padinama slivne površine i duž vodnih tokova respektivno, dok je  $v$  izraženo preko  $v_0$  za brzinu tečenja po padinama sliva i preko  $v_s$  za brzinu tečenja duž vodnih tokova, respektivno.

$\alpha_i = \frac{v_0}{L_0}$ , gdje je  $L_0 = \frac{1}{2D}$  - prosječni put tečenja vode po površini sliva (padinama)

$D$  - gustoća riječne mreže koja se računa kao [Horton, 1945.]:

$$D = \sum_{\omega=1}^{\Omega} \frac{N_\omega \cdot \bar{L}_\omega}{A_\Omega} \quad (26)$$

$$\beta_i = \frac{v_s}{L_i} \quad (27)$$

#### 4. DEFINIRANJE GEOMORFOLOŠKOG TRENUTNOG JEDINIČNOG HIDROGRAMA (GTJH)

Definiranje GTJH testirano je na tri slivne površine, odnosno vodotoka u slivu rijeke Bosne: (i) rijeci Brijesnici (V.P. Brijesnica), (ii) rijeci Bukovici (V.P. Podgaj) i (iii) rijeci Oskovi (V.P. Mačkovac) (slika 5). Osnovni podaci za spomenute vodomjerne postaje dani su u tablici 3.



Slika 5 . Zemljopisni položaj slivova rijeka Brijesnice, Bukovice i Oskove

Vodotok	Vodomjerna postaja	Površina sliva (km <sup>2</sup> )	Prosječna visina sliva (m n.m)	Opseg sliva (km)	Koeficijent koncentriranosti	Prosječni pad sliva (m/m)
Brijesnica	Brijesnica	27	434	25	0,62	0,035
Bukovica	Podgaj	52	455	34	0,46	0,025
Oskova	Mačkovac	49	750	36	0,78	0,059

Tablica 3. Osnovne fizičko-geografske značajke slivnih površina korištenih za definiranje GTJH, [Hrelja i dr., 1980.]

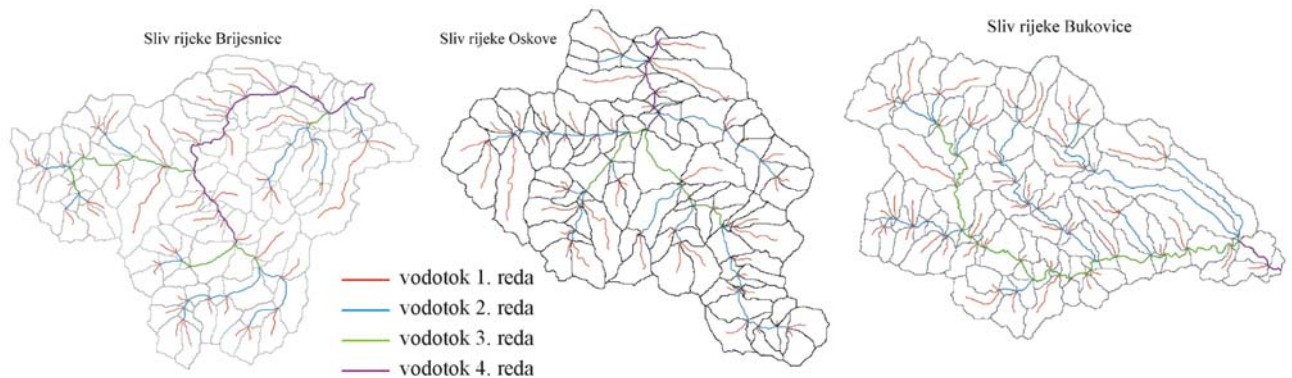


Vodotok	Red $\omega$	Broj vodotoka $N_i$	Ukupna dužina $L_i$ (km)	Prosječna dužina $\bar{L}_i$ (km)	Ukupna površina $A_i$ (km <sup>2</sup> )	Prosječna površina $\bar{A}_i$ (km <sup>2</sup> )
Brijesnica	1	55	26,338	0,479	16,828	0,306
	2	11	11,177	1,016	4,439	0,404
	3	4	5,945	1,486	2,480	0,620
	4	1	7,256	7,256	2,902	2,902
Bukovica	1	53	35,408	0,668	30,705	0,579
	2	9	25,306	0,844	13,145	1,460
	3	2	14,181	7,091	7,464	3,732
	4	1	1,555	1,555	0,918	0,918
Oskova	1	54	36,359	0,673	32,774	0,607
	2	10	19,196	1,920	10,776	1,078
	3	2	6,348	3,174	4,034	2,017
	4	1	3,085	3,085	1,590	1,590

Tablica 4. Karakteristični parametri slivnih površina razmatranih vodotoka

Kako je to pokazano u prethodnoj točki, prvi korak u definiranju GTJH je određivanje Hortonovih morfometrijskih parametara: zakon broja tokova  $R_B$ , zakon površine tokova  $R_A$  i zakon dužine tokova  $R_L$  koji su osnova za definiranje početnih i prijelaznih vjerojatnost, pomoću koji se računaju ordinate GTJH.

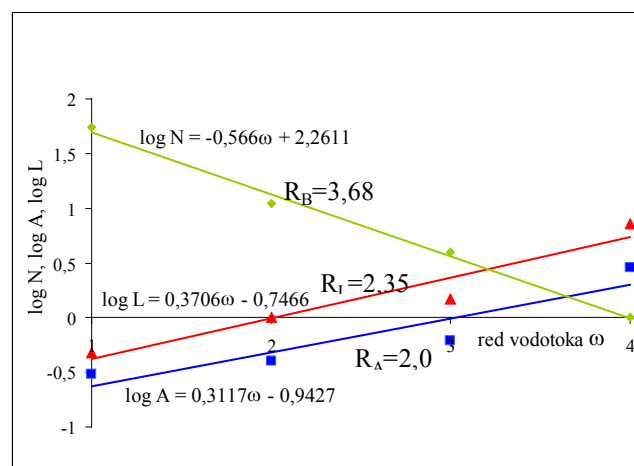
U tu svrhu u ovom je radu korišten software ArcGIS, odnosno programski dodatak ArcHydro, pomoću kojeg su definirani neophodni parametri koji karakteriziraju razmatrane slivne površine, a koriste se za definiranje ordinata GTJH. Dobiveni rezultati prezentirani su u tablici 4 i na slici 6.



Slika 6 . Slivovi rijeka Brijesnice, Bukovice i Oskove sa ucrtanim podslivovima i vodotocima s odgovarajućim redovima

Podaci iz tablice 4 poslužili su dalje za određivanje Hortonovih morfometrijskih parametara, te početnih i prijelaznih vjerojatnoća, pomoću kojih se računaju ordinate GTJH. Dobiveni rezultati prezentirani su u tablici 5.

Kako se Hortonovi morfometrijski parametri određuju za svaki od redova vodotoka u jednom slivnom području, u tablici 5 određene su reprezentativne vrijednosti tih parametara za cjelokupnu slivnu površinu koje ulaze u proceduru proračuna vjerojatnosti stanja i prijelaznih vjerojatnosti. Za ilustraciju procedure, na slici 7. je dat primjer određivanja reprezentativne vrijednosti Hortonovih morfoloških parametara  $R_B$ ,  $R_A$ ,  $R_L$  za slivnu površinu rijeke Brijesnice. Po istoj proceduri određene su i ostale reprezentativne vrijednosti Hortonovih parametara za sve razmatrane slivne površine.



Slika 7. Ilustracija određivanja reprezentativnih vrijednosti Hortonovih morfoloških parametara za sliv rijeke Brijesnice



Prema nekim istraživanjima [Smart, 1972.] vrijednosti Hortonovih morfoloških parametara  $R_B$ ,  $R_L$ ,  $R_A$  obično se kreću u granicama i to  $R_B$  od 3 do 5,  $R_L$  od 1,5 do 3,5 i  $R_A$  od 3 do 6.

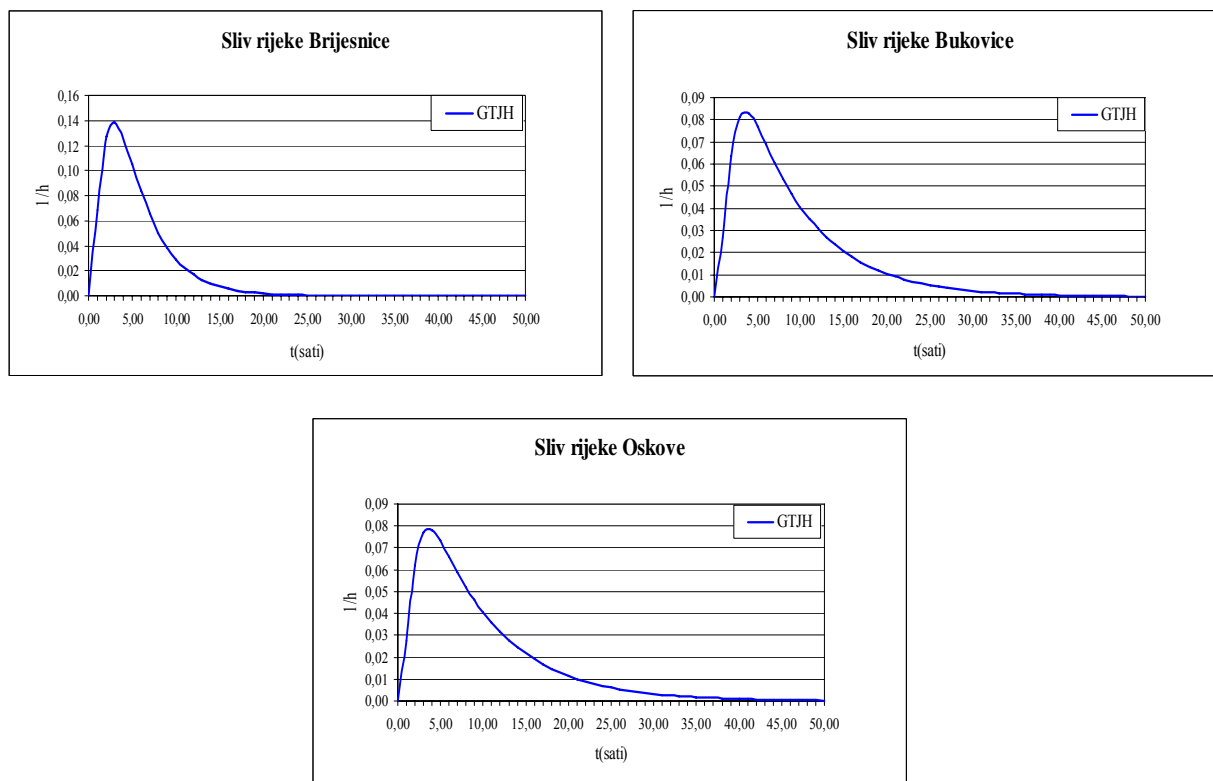
Parametar	Vodotok		
	Brijesnica	Bukovica	Oskova
Hortonovi morfološki parametri $R_B, R_L$ i $R_A$	$R_B = 3,68$ ; $R_L = 2,35$ ; $R_A = 2,05$ .	$R_B = 3,82$ ; $R_L = 1,41$ ; $R_A = 1,26$ .	$R_B = 3,88$ ; $R_L = 1,66$ ; $R_A = 1,42$ .
Vjerojatnosti početnih stanja i prijelazne vjerojatnosti $\theta_j$ i $p_{ij}$ i vjerojatnosti puta $P(s)$	$\theta_1=0,490$ ; $\theta_2=0,273$ ; $\theta_3=0,152$ ; $\theta_4=0,085$ ; $p_{12}=0,780$ ; $p_{13}=0,127$ ; $p_{14}=0,093$ ; $p_{23}=0,807$ ; $p_{24}=0,193$ ; $p_{34}=1,000$ ; $P(s_1) = 0,319$ ; $P(s_2) = 0,073$ ; $P(s_3) = 0,056$ ; $P(s_4) = 0,231$ ; $P(s_5) = 0,063$ ; $P(s_6) = 0,163$ ; $P(s_7) = 0,095$ .	$\theta_1=0,678$ ; $\theta_2=0,224$ ; $\theta_3=0,074$ ; $\theta_4=0,024$ ; $p_{12}=0,750$ ; $p_{13}=0,125$ ; $p_{14}=0,124$ ; $p_{23}=0,763$ ; $p_{24}=0,237$ ; $p_{34}=1,000$ ; $P(s_1) = 0,405$ ; $P(s_2) = 0,102$ ; $P(s_3) = 0,102$ ; $P(s_4) = 0,188$ ; $P(s_5) = 0,070$ ; $P(s_6) = 0,091$ ; $P(s_7) = 0,042$ .	$\theta_1=0,646$ ; $\theta_2=0,236$ ; $\theta_3=0,086$ ; $\theta_4=0,032$ ; $p_{12}=0,746$ ; $p_{13}=0,127$ ; $p_{14}=0,126$ ; $p_{23}=0,759$ ; $p_{24}=0,241$ ; $p_{34}=1,000$ ; $P(s_1) = 0,382$ ; $P(s_2) = 0,099$ ; $P(s_3) = 0,098$ ; $P(s_4) = 0,196$ ; $P(s_5) = 0,074$ ; $P(s_6) = 0,103$ ; $P(s_7) = 0,048$ .

Tablica 5. Pregled karakterističnih parametara za proračun GTJH za sliv rijeke Brijesnice





Sračunati geomorfološki trenutni jedinični hidrogrami za istraživane vodotoke Brijesnice, Bukovice i Oskove prikazani su na slici 8.



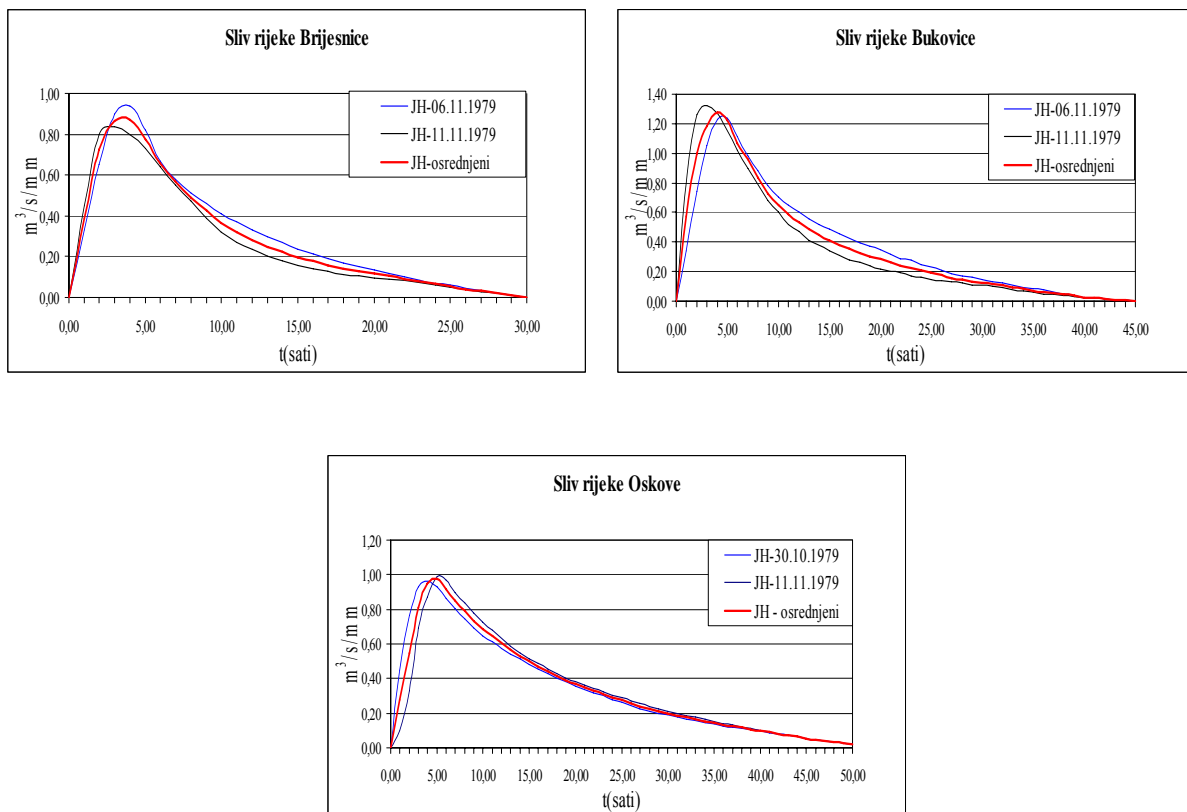
Slika 8. Geomorfološki trenutni jedinični hidrogrami (GTJH) za istraživane vodotoke

#### 4.1. Kalibracija modela geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma

Kako je to pokazano jednadžbom (23) u točki 3, da bi se odredile ordinate GTJH, osim početnih i prijelaznih vjerojatnosti koje su određene na osnovu geomorfoloških karakteristika slivnih površina, potrebno je poznavati i tzv. karakteristične brzine: brzinu tečenja po padinama slivne površine i brzinu tečenja duž vodnih tokova.

Izbor reprezentativnih vrijednosti ovih brzina je dokazano najšire razmatran aspekt u postupku definiranja GTJH. Tako Rodriguez-Iturbe i Valdes [Hall, 2001.] predlažu korištenje prosječne brzine tečenja, a Kirshen i Bras [Hall, 2001.] brzinu putovanja poplavnog vala. Nešto kasnije Franchini i O Connell [Hall, 2001.] su predložili da se brzine određuju u smislu da su one kalibracijski parametri modela. Upravo je taj pristup korišten u ovom radu. Kao osnova za kalibraciju korišteni su ranije određeni T-satni jedinični hidrogrami za sve tri razmatrane slivne površine [Hrelja i dr., 1980.].

T-satni jedinični hidrogrami (po dva za svaku slivnu površinu) određeni su uobičajenim postupkom (zbroy konvolucije - jednadžba 6) na osnovu snimljenih hidrograma otežanja i odgovarajućih hijetograma kiša koje su ih izazvale. Tako određeni T-satni jedinični hidrogrami ( $T = 1$  sat) prikazani su na slici 9.



Slika 9. Jednosatni jedinični hidrogrami i njihove osrednjene vrijednosti za istraživane vodotoke

Za kalibraciju parametara modela, odnosno karakterističnih brzina tečenja po padinama slivne površine i brzina tečenja duž vodnih tokova, odabrane su slivne površine, odnosno jedinični hidrogrami rijeke Brijesnice i Bukovice, dok je jedinični hidrogram rijeke Oskove poslužio za verifikaciju modela.

Naravno, s obzirom da se za razmatrane slivne površine raspolagalo s osrednjenim T-satnim jediničnim hidrogramom te da bi se on mogao usporediti s trenutnim jediničnim hidrogramom određenim na osnovu geomorfoloških karakteristika sliva potrebno je GTJH konvertirati u T-satni jedinični hidrogram ( $T = 1$  sat) poznatom praktičnom procedurom:

$$u(T, t) = \frac{A}{T} \int_{t-T}^t u(0, t) \cdot dt \cong A \cdot \frac{u(0, t-T) + u(0, t)}{2} \quad (28)$$



Kalibracija je urađena tako da su pretpostavljane, odnosno mijenjane brzina tečenja po padinama slivne površine ( $V_o$ ) i brzina tečenja duž vodnih tokova ( $V_s$ ), sve dotle dok se ne postigne najbolja podudarnost između poznatog  $u(I,t)$  hidrograma i  $\hat{u}(I,t)$  određenog na osnovu GTJH. Stupanj točnosti odnosno podudaranja između ova dva hidrograma sračunat je preko srednje kvadratne greške odstupanja  $\varepsilon$ , kao:

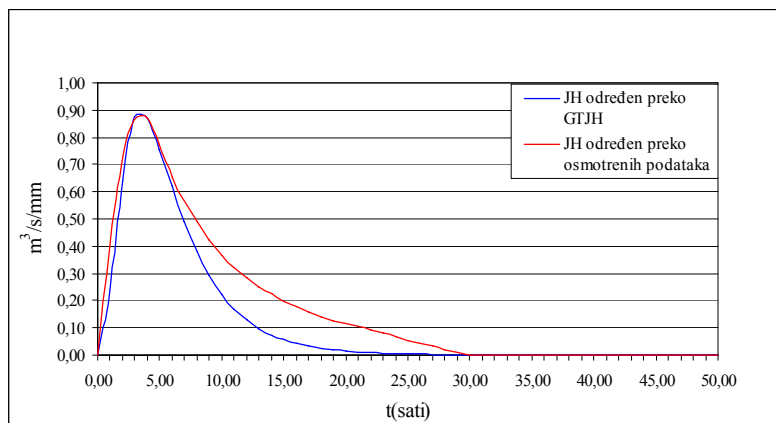
$$\varepsilon = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i - \hat{u}_i}{u_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

gdje su:

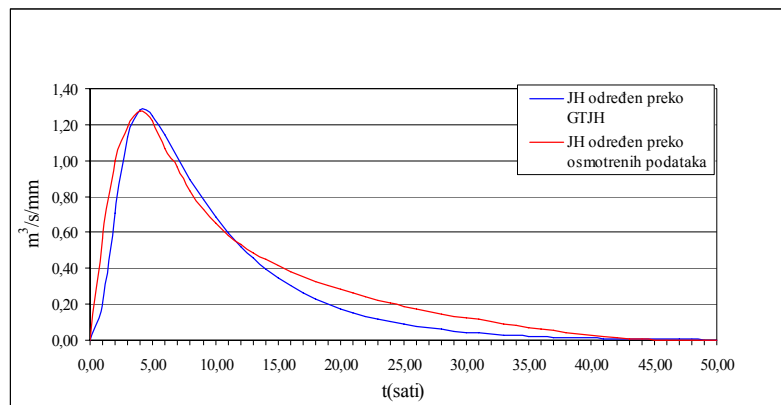
$u_i$  - osmotrena ordinata jediničnog hidrograma;

$\hat{u}_i$  - modelom (GTJH) procijenjena ordinata jediničnog hidrograma  
u vremenu  $T = i$ ; ( $i = 1, 2, \dots, n$ );

Vrijednosti srednjih kvadratnih grešaka date su uz odgovarajuće usporedne grafičke prikaze JH određenog preko osmotrenih podataka i JH određenog preko GTJH. Imajući u vidu dobivene vrijednosti srednjih kvadratnih grešaka od  $\varepsilon = 6,4\%$  za rijeku Bukovicu i  $\varepsilon = 12,6\%$  za rijeku Brijesnicu, može se konstatirati dobro prilagođavanje određenih jediničnih hidrograma preko GTJH, jediničnim hidrogramima određenim preko osmotrenih podataka. Za vizualnu ilustraciju rezultata, na slikama 10 i 11, prikazani usporedni jedinični hidrogrami.



Slika 10. Sliv rijeke Brijesnice: uspoređivanje poznatog  $u(I,t)$  hidrograma i  $\hat{u}(I,t)$  određenog na osnovu GTJH;  $V_o = 0,019$  m/s,  $V_s = 1,2$  m/s,  $\varepsilon = 12,6\%$



Slika 11. Sliv rijeke Bukovice: uspoređivanje poznatog  $u(l,t)$  hidrograma i  $u(l,t)$  određenog na osnovu GTJH;  $V_0 = 0,013 \text{ m/s}$ ,  $V_S = 1,1 \text{ m/s}$ ,  $\varepsilon = 6,4 \%$

Kako je to već spomenuto, u ovom radu su kalibrirane tzv. karakteristične brzine: brzina tečenja po padinama slivne površine i brzina tečenja duž vodnih tokova. Moglo bi se konstatirati da prosječna kalibrirana brzina tečenja po padinama iznosi  $v_0 \cong 0,015 \text{ m/s}$  a brzina tečenja duž vodnih tokova iznosi  $v_s \cong 1,15 \text{ m/s}$ . Kada je riječ o brzini tečenja duž vodnih tokova dobivena brzina od približno  $1,0 \text{ m/s}$  se na primjer uklapa u preporuke autora iz bivšeg SSSR-a koji ocjenjuju da bi ova brzina za male rijeke s dubinama manjim od  $1 \text{ m}$  u ravničarskim predjelima trebala iznositi od  $0,8$  do  $1,2 \text{ m/s}$  [Jovanović, 1974.]. Međutim, ovo treba uzeti samo kao orijentaciju, s obzirom da je poznato da je brzina tečenja duž vodnih tokova funkcija niza hidrauličkih karakteristika razmatranog vodnog toka, te naravno i povratnog perioda vodnog vala.

#### 4.2. Verifikacija modela geomorfološkog trenutnog jediničnog hidrograma

Imajući u vidu rezultate analize definiranja GTJH iz prethodne tačke, proizlazi da bi se model GTJH mogao uspješno koristiti za određivanje GTJH za slivne površine na kojima ne postoje osmatranja hidrograma otjecanja voda i odgovarajućih hijetograma kiša koje su ih izazvale. Međutim, ostaje problem procjene karakterističnih brzina. On se može riješiti korištenjem podataka sa susjednih slivnih površina ili pak, ako i oni nedostaju, korištenjem empirijskih iskustava pretočenih u empirijske formule prisutne u hidrološkoj literaturi.

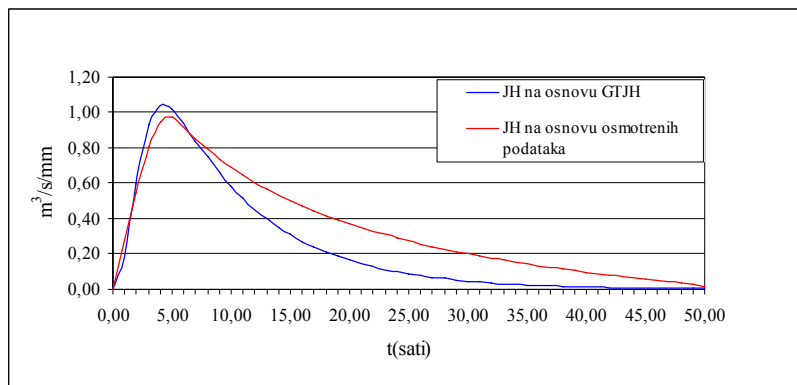
U cilju izvršenja verifikacije primijenjenog modela GTJH odnosno procjene njegove točnosti za konstrukciju GTJH na nekom dugom slivu/lokalitetu odabrana je rijeka Oskova. S obzirom da je ona po svojim geomorfološkim karakteristikama slična rijeci Bukovici (tablica 1) verifikacija je urađena s brzinama koje su dobivene kalibracijom na rijeci Bukovici ( $v_0 = 0,013 \text{ m/s}$ ,  $v_s = 1,1 \text{ m/s}$  – slika 11), iako su mogle biti korištene i brzine dobivene kalibracijom na rijeci Brijesnici, s obzirom da imaju praktično jednake vrijednosti.



Imajući u vidu srednju kvadratnu grešku od  $\varepsilon = 9,3 \%$  koja pokazuje stupanj točnosti između poznatog  $u(1,t)$  hidrograma i  $u(1,t)$  određenog na osnovu GTJH moglo bi se konstatirati dobro slaganje. Međutim, vizualnim uspoređivanjem tih jediničnih hidrograma (slika 12) jasno se uočava ne baš zadovoljavajuće slaganje silaznih (recesijskih) grana hidrograma otjecanja. Razlozi mogu biti različitog karaktera, odnosno porijekla i njihovo razjašnjavanje prelazi potrebe ovog rada, čija je namjera prvenstveno bila uvođenje jedne, za bosanskohercegovačku hidrološku praksu potpuno nepoznate metode definiranja trenutnog jediničnog hidrograma.

Treba imati u vidu i činjenicu da su jedinični hidrogrami koji su poslužili za kalibraciju GTJH određeni na osnovu određenih pretpostavki i principa na kojima se bazira teorija jediničnog hidrograma. Te pretpostavke za jedinične hidrograme kao hidrograme direktnog otjecanja i odgovarajuće kiše koje su ih izazvale ne moraju biti u potpunosti zadovoljene kod prirodnih slivnih površina, što također može biti izvor određenog neslaganja.

Nadalje, rad je urađen na vrlo ograničenom broju osmotrenih hidrograma direktnog otjecanja, odnosno odgovarajućih jediničnih hidrograma, što je najvećim dijelom posljedica oskudnog fonda hidroloških podataka preostalih u Bosni i Hercegovini nakon posljedica ratnih djelovanja u minulom ratnom periodu.



Slika 12. Sliv rijeke Oskove: uspoređivanje poznatog  $u(1,t)$  hidrograma i  $u(1,t)$  određenog na osnovu GTJH;  $V_0 = 0,013 \text{ m/s}$ ,  $V_S = 1,1 \text{ m/s}$ ,  $\varepsilon = 9,3 \%$

## 5. ZAKLJUČAK

Rezultati provedenih analiza određivanja GTJH na slivnim površinama na kojima su izostala sustavna osmatranja otjecanja i odgovarajućih kiša koje su izazvale to otjecanje ukazuju na to da prikazani model GTJH daje, za praktične potrebe, vrlo prihvatljive rezultate u uvjetima potpunog nedostatka mjerenih hidroloških podataka ili općenito tamo gdje su hidrološke informacije o količinama voda vrlo oskudne.

Prikazani model GTJH moguće je lako i uspješno koristiti za procjenu jediničnog hidrograma sliva, odnosno, preko njega, valova velikih voda na neizučeni, vodoprivredno potencijalnim lokalitetima unutar širih hidrološki homogenih regija.



Potrebni geomorfološki podaci za model GTJH mogu se vrlo jednostavno dobiti iz topografskih karata osobito danas kada je GIS tehnologija ušla u normalnu, odnosno široku primjenu.

Preliminarni rezultati dobiveni u ovom radu ukazuju na to da greške procjene traženog GTJH nisu značajne za hidrološku praksu.

## LITERATURA

1. Al-Wagdany, A. S., Rao, A. R.: Estimation of the Velocity Parametar of the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, *Water Resources Management* 11:1-16,(1997)
2. Anđelić, M., Bonacci, O., Đorđević, N., Hrelja, H., i ostali: Maksimalno vjerojatne velike vode-Problemi i metode, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu i Jugoslavensko društvo za hidrologiju, (1986)
3. Bras, R. L.: *Hydrology – An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, (1990)
4. Chow, V. T.: *Handbook of Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill Book Company, USA, (1964)
5. Cudennec, C., Fouad, Y., Sumarjo, G., Duchesne, J.: A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept, *Hydrol. Process.* 18, 603-621, (2004)
6. Fleurant, C., Kartiwa, B., Roland, B.: Analytical model for a Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (AGIUH) *Hydrological Processes*, 20(18), p. 3879-3895.,(2006)
7. Franchini, M., O` Connell, P. E.: An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph, *J. Hydrology*,(1996)
8. Giannoni, F., Roth, G., Rudari, R.: A Semi-Distributed rainfall-Runoff model Based on a Geomorphologic Approach, *Phys. Chem. Earth(B)*, Vol.25, No 7-8, pp 665-671, (2000)
9. Gupta, V.K.,Waymire, E., Wang, C.T.: Representation of an Instantaneous Unit Hydrograph from Geomorphology, *Water Resources Res.* 16(5):855-862 (1980)
10. Hall, M. J., Zaki, A. F., Shahin, M. M. A.: Regional analysis using Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 93-102, (2001)
11. Horton, R. E.: Erosional Development of Streams and Their drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, *Bull. Geol. Soc. Am.* 56:275-370, (1945)
12. Hrelja, H.: Inženjerska hidrologija- autorizovana skripta, Građevinski fakultet Sarajevo, (1991)
13. Hrelja, H.:Razvoj sistema hidrometeorološkog prognoziranja i ranog upozorenja na opasnost od poplava, J.P. za "Vodno područje slivova Jadranskog mora" i J.P. za „Vodno područje slivova rijeke Save“, Sarajevo, (2003)
14. Hrelja, H., Preka, N. i Blagojević, S.: Kvantitativno-kvalitativne karakteristike voda u slivu rijeke Spreče za potrebe izgradnje malih akumulacija, Zavod za hidrotehniku građevinskog fakulteta u Sarajevu, Sarajevo (1980)
15. Jovanović, S.: Parametarska hidrologija, Jugoslovensko društvo za hidrologiju, Beograd, (1974)
16. Nguyen, H. Q.:Rainfall-Runoff modeling in the ungauged Can Le catchment, Saigon river basin, Netherland,( 2006)
17. Ramirez, J.A.: Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, Colorado State University (1998)



18. Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J. B.: The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 15, (1979)
19. Rodríguez-Iturbe, I., González Sanabria, M. and Bras, R. L.: A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph, *Water Resources Research*, 18(4), 877-886.(1982)
20. Sarangi<sup>1</sup>,A., Madramootoo, C. A., Enright, P., Prasher, S.O. and Patel, R.M.:Performance evaluation of ANN and geomorphology-based models for runoff and sediment yield prediction for a Canadian watershed, *Current science*, vol. 89, no. 12, (2005)
21. Schuller, D. J.: Geomorphological characteristics and responses of Indiana watersheds, *Disertation, Faculty of PurdueUniversity*(1999)
22. Smart, J.S.:Quantitative Characterization of Channel Network Structure, *Water Resources Res.* 8(6):1487-1496, (1972)