

## Smjernice za definiranje hidrograma velikih voda

Josip Husajina<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Damir Bekić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektroprojekt d.d., [josip.husajina@elektroprojekt.hr](mailto:josip.husajina@elektroprojekt.hr)

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [damir.bekic@grad.hr](mailto:damir.bekic@grad.hr)

### Sažetak

Definiranje projektnog hidrograma velikih voda je temelj za različite mjere i djelatnosti unutar područja zaštite od štetnog djelovanja voda. U hrvatskoj hidrološkoj praksi često se standardne metode koriste nekritički budući da ne postoje smjernice za njihovo korištenje. Postoji potreba za unaprjeđenje postojeće prakse. Primjenom suvremenih spoznaja i metoda analize velikih voda, a posebice metode krivulja učestalosti poplava upotrebom QMED indeksa, planira se izraditi smjernice te razviti novi model za definiranje hidrograma velikih voda.

*Ključne riječi: hidrološki modeli, QMED indeks, hidrogram, velike vode*

## Guidelines for defining a high-water hydrograph

### Abstract

Defining a high-water project hydrograph is the basis for various measures and activities within the field of protection against harmful effects of water. Standard methods are often used uncritically in Croatian hydrological practice since there are no guidelines for their use. There is therefore a pressing need to improve existing practices. By applying modern knowledge and methods of high-water analysis, and especially the method of flood frequency curves using the QMED index, plans are currently prepared to develop guidelines and a new model for defining high-water hydrographs.

*Key words: hydrological models, QMED index, hydrograph, high waters*

## 1 Uvod

Potreba čovjeka za proučavanjem prirodnih procesa kruženja i djelovanja vode u okolini, obranom od djelovanja velikih voda i gradnjom hidrotehničkih sustava postoji od samih početaka razvoja civilizacija kao temelj ostvarivanja uvjeta egzistencije (slika 1.). Izučavanje slivova kao temeljnih jedinica svih hidroloških pojava i procesa predstavlja osnovu za obavljanje ovih djelatnosti [1]. U suvremenom dobu primjenom dostupnih znanja izvodi se aproksimacija stvarnog sustava otjecanja vode sa sliva u obliku sklopa fizikalnih, kemijskih i/ili bioloških procesa koji djeluju s obzirom na ulaznu varijablu ili varijable i pretvaraju ih u izlaznu varijablu ili varijable [2]. Ovaj skup radnji u praksi pojednostavljeno nazivamo hidrološkim modelom. Za modeliranje se koristi određena metoda (hidrološki model) čiji su ulazi efektivne oborine ( $I_{Pe}$ ,  $P_e$ ), određene karakteristike tla te fizička obilježja sliva, a izlaz je hidrogram direktnog otjecanja ( $Q_d$ ). Koriste se različiti hidrološki modeli koji se razlikuju po razini pojednostavljenja, osnovnim pretpostavkama i potrebnim ulaznim parametrima. Definiranje mjerodavnih parametara za uspostavu hidroloških modela, kao i postupci kalibracije u uvjetima kakvi prevladavaju na kontinentalnom području Hrvatske, čine temu ovog doktorskog rada.



Slika 1. Poplava u Zagrebu 1964. godine uzrokovana dugotrajnim kišama u gornjim tokovima rijeke Save

Istraživanje se provodi kroz tri osnovne logičke cjeline: povijesni pregled i detekcija pogrešnih primjena različitih metoda za definiranje hidroloških modela, analiza i ishođenje korekcija za primjenu postojećih metoda te implementacija novijih metoda. Na temelju rezultata kao konačnih produkata navedenih radnji postoji mogućnost za razvojem novog modela. U istraživačkom radu od novijih metoda posebno će se razmatrati krivulja učestalosti poplava upotrebom indeksa medijana maksimalnih godišnjih zabilježenih događaja velikih voda (Priručnik za procjenu poplava, Velika Britanija, QMED-index).

## 2 Važnost područja istraživanja

U Hrvatskoj postoji problem s nedostatkom mjerenja hidroloških podataka na slivovima. Zbog toga se za potrebe dimenzioniranja hidrotehničkih građevina primjenjuju različite teorijske metode koje opisuju hidrološke režime na slivovima. Identifikacija hidroloških režima postaje teža ako su i postojeća mjerenja oskudna i nisu kontinuirana. Unatoč konstantnoj nesigurnosti u predviđanju prirodnih pojava, matematički je moguće statistički definirati procjenitelje koji analiziraju postojeće stanje sustava te dati naznaku trenda njihovih glavnih obilježja. Studije odnosa oborina i otjecanja, tzv. *rainfall-runoff* (RR) modeli, dolaze sve više do izražaja zbog boljih mogućnosti implementacije postojećih podataka. RR modeli čine skup različitih matematičkih principa koji pokušavaju opisati karakteristike riječnog bazena s određenim pretpostavkama koje se temelje na parametrima kao što su oblik krivulje recesije, površina otjecanja, odnos brzog i sporog otjecanja, količina vode u tlu i slično [3]. Ako se ulazni parametri uspješno odaberu i testiraju mogu dobiti traženi smisao u vidu opisivanja regionalnih karakteristika područja.

Iako postoje različite teorijske metode koje su zasad prisutne kao inženjerska praksa u Hrvatskoj, upitna je opravdanost njihove primjene s obzirom na mnogobrojne koeficijente, često nejasne samom korisniku i "zastarjele" tehnike implementacije. Mnoge države imaju potpuno jasan i definiran proces definiranja te kalibracije hidroloških modela ovisno o regijama. U Hrvatskoj takva sustavnost ne postoji pa se u struci odabir tehnike, odnosno, odabir metode predviđanja hidrološkog otjecanja sa sliva prepušta iskustvu samog korisnika. Kroz dosadašnje istraživanje i analizom objavljenih hidroloških studija te vlastitih projekata uočen je veliki prostor za povećanje pouzdanosti hidroloških modela. Bitno je napomenuti da je većina teorijskih metoda kojima se nadalje definiraju hidrološki modeli u domaćoj struci, razvijena u zemljama koje se uvelike razlikuju po meteorološkim i orografskim uvjetima u odnosu na hrvatske prilike. Na taj način, sami koeficijenti, odnosno parametri koji definiraju takve modele su upitne točnosti te mogu prouzročiti značajna odstupanja od stvarnih rezultata ako se ne znaju dobro interpretirati i prilagoditi. Upravo je u tome važnost odabrane teme istraživanja.

Hidrogrami otjecanja sa slivova koji predstavljaju temelj za dimenzioniranje građevina kako za zaštitu od štetnog djelovanja vode tako i za zaštitu voda od štetnog utjecaja čovjeka te njeno korištenje, ako nisu na točan način determinirani mogu izazvati ili ekonomske štete ili štete za ljudski život i materijalna dobra. Također, metode modeliranja hidroloških procesa se godinama sustavno unapređuju i dorađuju paralelno s novim otkrićima i tehnologijama koje omogućuju sve bolje i naprednije analiziranje pojedinih parametara. Analiza i primjenjivost novih spoznaja i postignuća uvelike ovise o daljnjim razradama i ispitivanjima na što raznolikijim područjima i u što raznolikijim uvjetima [4]. Ova činjenica također govori o važnosti

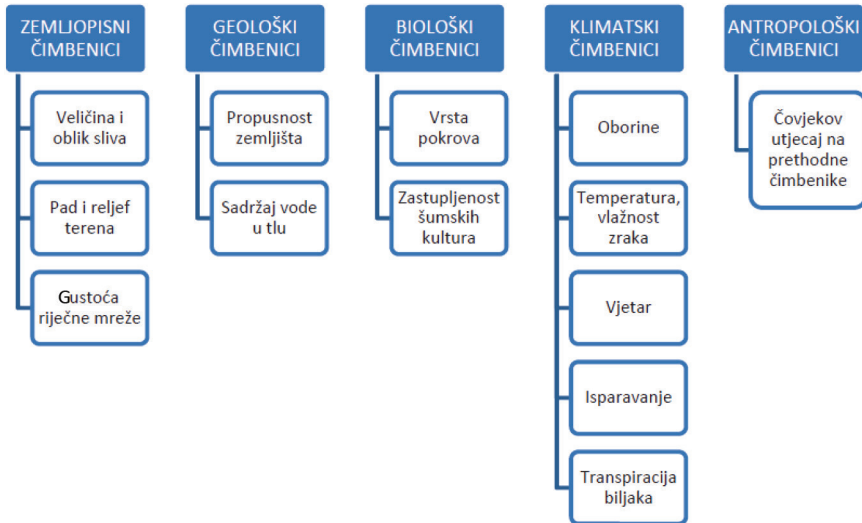
preispitivanja postojećih metoda te upotrebe novih parametara i razvijanja metoda koje u konačnosti definiraju model hidrološkog otjecanja. Cilj istraživačkog rada je determinirati postupak hidrološkog modeliranja za prilike koje prevladavaju na malim slivovima u kontinentalnoj Hrvatskoj analizom, prilagodbom i unaprjeđenjem postojećih metoda s pripadnim ulaznim parametrima. U konačnici shodno novo dobivenim spoznajama i otkrićima kao produktima procesa znanstvenog istraživanja, postoji i mogućnost za definiranje novog hidrološkog modela predviđanja otjecanja na malim slivovima.

### **3 Metodologija**

U proučavanjima hidroloških značajki nekog sliva najvažniji element predstavlja otjecanje. Za pouzdano utvrđivanje dugogodišnjeg vodnog režima nekog vodotoka, pri rješavanju inženjerskih hidrotehničkih – i ne samo hidrotehničkih problema – potrebno je poznavati, odnosno biti upućen u odnose između poznatih podataka o oborinama i otjecanja sa sliva [1]. Ovi podaci se dobivaju iz hidroloških i meteoroloških postaja smještenih na samome proučavanome slivu. U ovome slučaju provodi se statistička obrada dugogodišnjeg niza podataka na temelju koje se definiraju rezultati o otjecanju sa sliva. Te slivove nazivamo izučenim slivovima. Kada na proučavanome slivu ne postoje hidrološke, odnosno meteorološke postaje, pristupa se proračunu izlaznog hidrograma temeljenog na raznim parametrima izraženim preko teorijskih izraza. Te slivove nazivamo neizučenim slivovima. U hrvatskoj inženjerskoj praksi najučestalije teorijske metode za definiranje hidrograma otjecanja s malih slivova su: Srebrenovićeva metoda, racionalna metoda, metoda Ven Te Chowa te metoda jediničnog hidrograma. Mali sliv se definira kao onaj čija je površina manja od 1000 km<sup>2</sup>, a češće se naziv mali sliv odnosi na slivove čija je površina manja od 400 km<sup>2</sup> [1]. Kako bi se mogla odrediti pouzdanost pojedinih metoda na slivovima sličnih karakteristika, potrebno je prikupiti što veći uzorak odnosa rezultata teorijskih metoda sa stvarno zabilježenim i statistički obrađenim podacima. Reprezentativan uzorak je naravno moguće postići samo ako postoji dovoljan broj izučenih slivova na kojima će se verificirati teorijske metode.

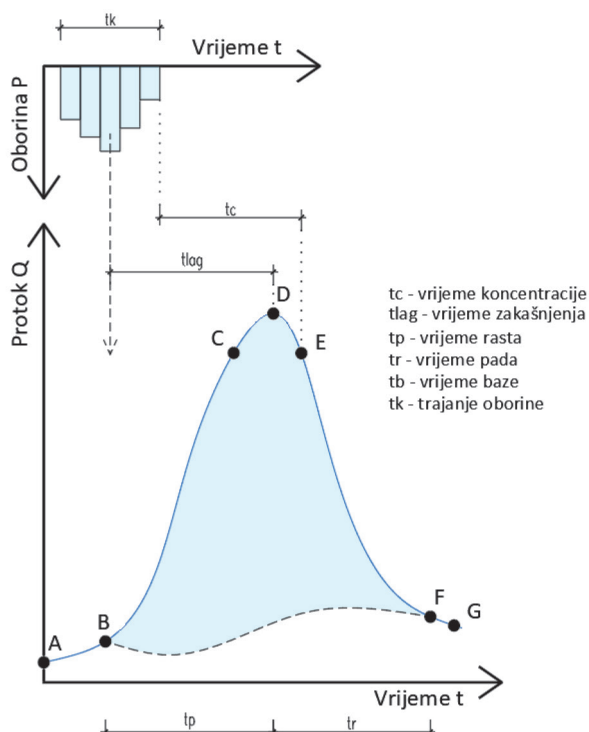
#### **3.1 Analiziranje izučenog sliva**

Otjecanje sa sliva ovisi o nizu čimbenika kao što su: zemljopisni, geološki, biološki, klimatski i antropološki [1].



Slika 2. Čimbenici koji utječu na otjecanje sa sliva [10] (I. Sušan, 2015.)

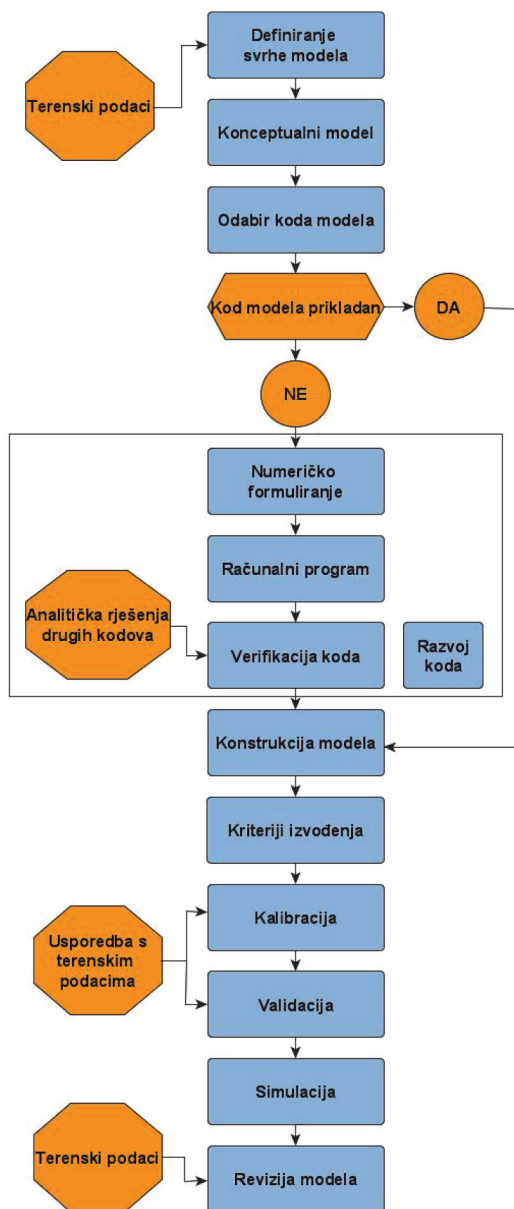
Svi navedeni čimbenici prikazani na slici 2. utječu u konačnici na formiranje hidrograma otjecanja sa sliva te ih je s toga potrebno analizirati i interpretirati u skladu sa zabilježenim hidrološkim i meteorološkim mjerenjima. Uz analiziranje čimbenika koji formiraju hidrogram otjecanja, analizira se i oblik samog hidrograma kao produkta zabilježenih mjerenja sa svojim temeljnim karakteristikama: vremenom rasta, vremenom pada, vremenom baze hidrograma, vršnim protokom, vremenom koncentracije i vremenom zakašnjenja. Ova analiza je ključna radi kasnije usporedbe s teorijski dobivenim hidrogramima. Teorijskim metodama definiranja hidrograma koriste se razni teorijski izrazi kojima se aproksimiraju navedene karakteristike hidrograma i na taj način definiraju njegov oblik (slika 3). Upravo na temelju vrijednosti dobivenih ovim izrazima nadalje se formiraju hidrološki modeli neizučениh slivova.



Slika 3. Hidrogram direktnog otjecanja - teorijski model

### 3.2 Analiziranje teorijskih metoda na izučenom slivu

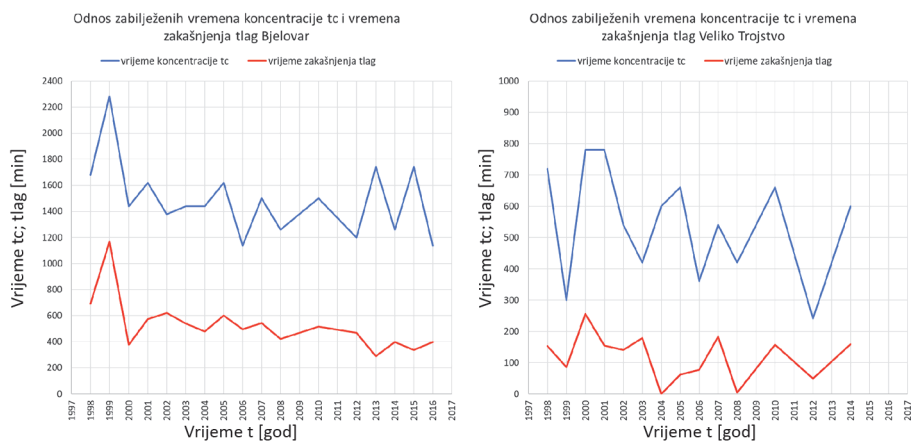
Kako bi se mogla verificirati, odnosno odrediti pouzdanost pojedinih teorijskih metoda definiranja hidrograma otjecanja na slivovima sličnih karakteristika, potrebno je analizirati korelaciju izlaznih rezultata sa zabilježenim stvarnim mjerenjima. Za potrebe ovoga rada bit će prikazana korelacija rezultata dobivenih primjenom jednostavne racionalne metode te metode jediničnog hidrograma u odnosu na stvarno zabilježene vrijednosti iz dugogodišnjeg niza mjerenja. Vrijednosti analiziranih parametara odnosit će se na: utjecaj vremena koncentracije i utjecaj vremena zakašnjenja. Dakle, parametri koji nisu varijabilni u ovim analizama su intenzitet oborine i koeficijent otjecanja, dok su vremena koncentracije odnosno vremena zakašnjenja varijabilni parametri. U daljnjem istraživanju analizirat će se znatno veći broj parametara kao što su: utjecaj intenziteta oborine, utjecaj koeficijentata otjecanja i dr. Nakon odabira prikladne metode i parametara koji su njen sastavni dio, pristupa se izradi hidrološkog modela po modificiranom Refsgaardovom postupku [5], a njegov je dijagram toka prikazan na slici 4.



Slika 4. Dijagram toka metodologije za razvoj hidrološkog modela; modificirani prikaz izradio Josip Husajina prema Refsgaardu (1996.)

## 4 Rasprava

Usporedbom dobivenih hidrograma otjecanja teorijskim putem te hidrograma prema zabilježenim i statistički obrađenim podacima [6], prikazana je analiza korelacije vremena koncentracije i vremena zakašnjenja na primjeru sliva rijeke Bjelovacke (slika 5). Referentni podaci su dobiveni iz dvije hidrološke postaje koje se nalaze na ovome slivu: Bjelovar i Veliko Trojstvo. Površina sliva iznosi 80 km<sup>2</sup> te prema teoriji [1] ubraja se u male slivove. Vrijeme koncentracije je vrijeme potrebno da voda, koja otječe površinski, stigne od najudaljenije točke sliva do izlaznog profila sliva [1]. U praksi se najčešće ovim vremenom smatra vrijeme od kraja hijetograma efektivne oborine do točke infleksije na silaznoj grani hidrograma direktnog otjecanja. Ipak, neki autori su pomnije pristupili diskutabilnom karakteru ovog pojma te ga za male slivove definiraju kao vrijeme od kraja efektivne oborine do kraja hidrograma direktnog otjecanja [7]. Ovakvo poimanje vremena koncentracije se u analizama pokazalo kao točnije [6]. Vremenom zakašnjenja smatra se vrijeme od težišta hijetograma efektivne oborine do vrha hidrograma direktnog otjecanja.



Slika 5. Odnos zabilježenih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja (J. Husajina, 2018.)

Teorijsko vrijeme koncentracije se razmatra prema osam najučestalijih izraza: Kerby, Kirpich, Izzard, Bransby Wiliams, Morgali Linsley, Giandotti Vissentini, FAA te izrazu kinematskog vala. Odnos zabilježenih prosječnih vremena koncentracije s izračunanim vremenima preko navedenih izraza prikazan je u tablici 1.

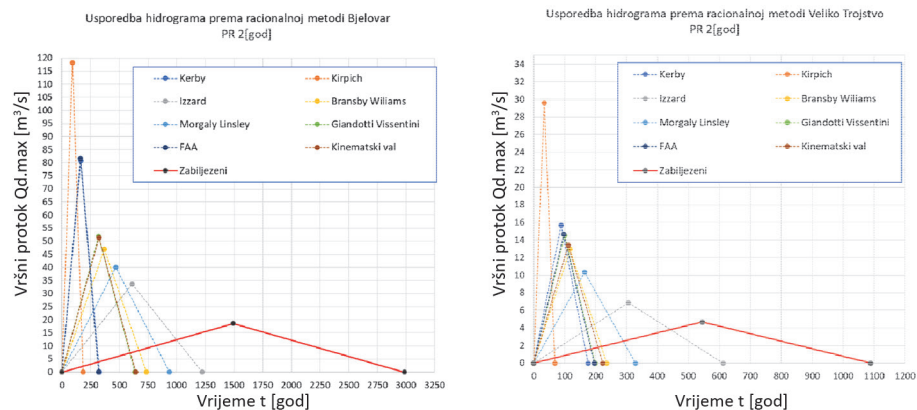


**Tablica 1. Usporedba teorijski dobivenih vremena koncentracije sa zabilježenim prosječnim vremenom koncentracije**

Metoda proračuna vremena koncentracije	Vrijeme koncentracije $t_c$ [min]	
	Veliko Trojstvo	Bjelovar
Kerby	88,04	163,04
Kirpich	33,81	91,77
Izzard PR 2 [god]	306,06	610,64
Izzard PR 10 [god]	191,35	381,36
Izzard PR 50 [god]	142,00	282,83
Izzard PR 100 [god]	127,60	254,08
Bransby Williams	117,46	367,50
Morgali Linsley PR 2 [god]	164,46	468,04
Morgali Linsley PR 10 [god]	132,77	377,65
Morgali Linsley PR 50 [god]	115,86	329,48
Morgali Linsley PR 100 [god]	110,33	313,72
Giandotti Vissnetini	98,99	317,79
FAA	97,50	160,32
Kinematski val PR 2 [god]	111,08	322,34
Kinematski val PR 10 [god]	89,69	260,14
Kinematski val PR 50 [god]	78,28	226,98
Kinematski val PR 100 [god]	74,55	216,13
<b>Zabilježeni prosječni hidrogram</b>	<b>544</b>	<b>1493</b>

Prema teorijskim obrascima uočeno je da su na primjeru sliva rijeke Bjelovacke vremena koncentracije 2,5 – 7 puta manja od prosječnih zabilježenih vremena koncentracije. Posljedično, u daljnjoj razradi teorijskog hidrograma prema racionalnoj metodi iscrtavaju se jednostavni hidrogrami s vremenom baze  $t_b = 2t_c$  u kojima se mogu uočiti velika odstupanja vremena baze hidrograma i vršnog protoka u odnosu na hidrogram formiran iz zabilježenih mjerenja (slika 6).

Što se tiče teorijske metode jediničnog hidrograma, koja u svojoj definiciji izražava vrijeme zakašnjenja kao  $t_{lag} = 0,6 \cdot t_c$ , već u ovome početnom koraku može se primijetiti odstupanje. Naime, ako se vratimo na sliku 5 u kojoj su prikazani zabilježeni odnosi vremena koncentracije i vremena zakašnjenja na primjeru sliva rijeke Bjelovacke, ova relacija bi se zapravo trebala kretati u vrijednostima  $t_{lag} = (0,2-0,35) \cdot t_c$ , **što je više nego dvostruko** manji omjer u odnosu na omjer definiran teorijom. Već ovim razmatranjem se može utvrditi potreba za sustavnom analizom postojećih teorijskih metoda te definiranjem smjernica za izradu modela hidrograma otjecanja.



Slika 6. Usporedba jednostavnih hidrograma otjecanja za različita vremena koncentracije

S druge pak strane, u Velikoj Britaniji se već godinama sustavno razvija metoda definiranja krivulje učestalosti poplava kojom se jasno definiraju ekstremni događaji po povratnim razdobljima upotrebom QMED indeksa. QMED indeks (medijan godišnjih maksimalnih protoka) zapravo predstavlja svojstva specifičnog sliva, odnosno magnitudu mogućeg poplavnog događaja na promatranome slivu. Velika je vjerojatnost da krivulja rasta amplitude poplavnog događaja bude slična na mnogim slivovima koji imaju slične hidrogeološke karakteristike. Prema tome, krivulja rasta za promatrani sliv može biti procijenjena kombinirajući krivulje rasta iz baze sličnih slivova koji se čak nužno ne nalaze unutar istoga geografskog područja [8]. QMED može biti određen ako postoji dovoljno dug niz mjerenja (više od 13 godina). Ako mjerenja ne postoje, onda se određuje regresijskim jednadžbama koje u sebi sadrže obilježja sliva kao što su: površina sliva, koeficijent otjecanja, klasifikacija hidrološke grupe tla, standardna godišnja prosječna oborina. Zbog nepouzdanosti procjene QMED-a iz karakteristika sliva, radi se kalibracija preko sliva donora koji ima slične karakteristike te ujedno sadrži dovoljno dugačak niz hidroloških mjerenja [8]. Upravo je u tome zanimljivost i važnost ovoga dijela istraživačkoga rada. Naime, ako se stvori dovoljno velika baza podataka kojima se definira QMED indeks, mogu se relativno brzo definirati mogući ekstremni događaji na promatranom slivu iteracijom podataka sa drugih slivova donora. Ti slivovi čak ne moraju biti u istom geografskom području već je dovoljno da budu slični u hidrološkome smislu. Navedena metoda može u početnim fazama razvoja poslužiti kao provjera klasičnijim teorijskim metodama definiranja hidroloških događaja koje su sastavni dio ovoga istraživačkoga rada. Ova metoda se osim u Velikoj Britaniji počela primjenjivati i u Sjedinjenim Američkim Državama, Irskoj, Africi, Aziji te još ponekim europskim zemljama s ciljem razvoja softverskog alata koji će sadržavati bazu podataka potrebnu za kalibraciju ove metode [4]. Konačna namjera je dobiti alat za brzo i jednostavno definiranje događaja velikih voda na neizučnim slivovima. Ovime se izražava dodatan doprinos planiranog istraživačkog rada ne samo na razini Hrvatske već i na globalnoj razini.

## 5 Zaključak

U ovome je radu sažeto opisan novi pristup za poboljšanje kvalitete izrade projektnog hidrograma velikih voda na malim slivovima. Metodologija istraživačkog rada bazirat će se na malim slivovima koji se odnose na područje slivova Save, Drave i Dunava. Ti slivovi čine više od polovine slivova u Hrvatskoj te su stoga od posebnog interesa [9]. Znanstveni doprinos predloženog istraživanja ogleda se u implementaciji metoda za definiranje ekstremnih događaja velikih voda koje do sada nisu primjenjivane u Hrvatskoj, a ujedno su od značaja za poboljšanje kvalitete i točnosti izrade projektnih hidrograma i na globalnoj razini. U ovome radu je tek malim dijelom prikazano da gotovo sigurno izlazni rezultati ne mogu biti pouzdani ako se prilikom izrade teorijskih hidroloških modela velikih voda upotrebom različitih teorijskih metoda ne pristupi analitički i kritički. Izradu hidrološkog modela znatno bi olakšale definirane smjernice kojih bi se projektanti pridržavali za potrebe svojih analiza. U ovome ujedno leži stručni doprinos predloženog istraživačkog rada. Iz svega navedenoga nameće se cilj rada koji obuhvaća definiranje smjernica za dobivanje realnijeg hidrograma otjecanja nekog sliva te razvoj nove metode (hidrološkog modela). Pouzdanost rezultata istraživačkog rada ovisit će uvelike o točnosti i kontinuiranosti dostupnih mjerenja na izučenim slivovima. Kako bi se uklonile nepouzdanosti, važno je stvoriti bazu sa što većim brojem obrađenih slivova koji će si sami međusobno poboljšavati točnost parametara na temelju hidrogeoloških sličnosti.

## Literatura

- [1] Žugaj, R.: Hidrologija, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2015.
- [2] Dodge, J.: Linear theory of hydrologic system, Washington, D.C.: USA: Tehnical Buletin No1468., Agricultural Research Service, 1973.
- [3] Željковиć, I.: Identifikacija hidroloških režima otjecanja u kršu konceptualnim i paramteraskim modelima, Split: Sveučilište u Splitu Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, doktorska disertacija, 2015.
- [4] Kjeldsen, T.: How reliable are design flood estimates in the UK?, Journal of Flood Risk Management, pp. 237-246, 2015.
- [5] Refsgaard, J.: Hydrological Modelling and River Basin Management, Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Grenland, Danish Ministry of the Environment, Doctoral Thesis, 2007.
- [6] Husajina, J.: Analiza direktnog otjecanja na slivu rijeke Bjelovarske, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, diplomski rad, 2018.

- [7] McCuen, R.: Uncertainty Analyses of Watershed Time Parameters, Journal of Hydrologic Engineering, pp. 490-498, 2009.
- [8] Mansell, M.G.: Rural and urban hydrology, London: Thomas Telford Publishing, 2003.
- [9] Marušić, J.: Hrvatske vode-djelatnost i način rada, Građevinar, Vol. 51, br. 9, pp. 573-584, 1999.
- [10] Sušan, I.: Razvoj hidrološkog modela otjecanja s malih slivova temeljen na umjetnoj neuronskoj mreži, Rijeka: Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet, doktorska disertacija, 2016.