

KARTE OPASNOSTI OD POPLAVA NA SLIVU RIJEKE KRAPINE

doc.dr.sc. Damir Bekić^a, Vlatko Kadić, dipl.ing.^b, Vedran Ivezić, mag.ing.^b, Igor Kerin, mag.ing.^b

^aSveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za hidrotehniku, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, damir.bekic@grad.hr

^bHidrokonzalt projektiranje d.o.o., Hvarska 9A, 10000 Zagreb, Hrvatska, hidrokonzalt.zagreb@hidrokonzalt.hr

SAŽETAK

Problematika poplava na slivu rijeke Krapine obrađivana je u nekoliko prethodnih elaborata s različitim pristupima hidrološkim i hidrauličkim analizama velikih voda. Preliminarna procjena rizika od poplava je identificirala relativno velika područja na slivu Krapine s potencijalno značajnim poplavnim rizicima. U ovom radu se prikazuju proračuni velikih voda te metodologija izrade karata opasnosti od poplava na slivu Krapine a koji su osnova za izradu karata rizika od poplava i plana upravljanja poplavnim rizicima. Velike vode sliva analizirane su kombinacijom statističke obrade vodomjerenja na hidrološkim stanicama i hidrološko-hidrauličkih proračuna. Pregledom izrađenih karata opasnosti u EU članicama pokazuje se da nema jedinstvene metodologije izrade karata, a ponekad se prikazuju i dodatni parametri opasnosti. Zaključuje se da dominantni utjecaj na pouzdanost karata opasnosti imaju manjak i nepouzdanost ulaznih podataka i mjerenja, dok je odabir složenosti hidrološko-hidrauličkog proračuna manje značajan.

KLJUČNE RIJEČI:

rizici od poplava, karte opasnosti, sliv rijeke Krapine, model otjecanja, hidraulički model

FLOOD HAZARD MAPS FOR THE KRAPINA RIVER BASIN

ABSTRACT

The issue of flooding in the Krapina River basin was treated in several previous studies with different approaches to the hydrological and hydraulic analysed of flood flows. The preliminary flood risk assessment identified relatively large areas of potentially significant flood risk in the Krapina River basin. This paper presents calculations of flood flows and methodology for the development of flood hazard maps in the Krapina River basin which are the basis for the production of flood risk maps and flood risk management plans. Flooding in the basin was analysed by a combination of statistical calculation of flow measurements on gauging stations and hydrologic-hydraulic calculation. The review of flood hazard maps in the EU Member States shows that there is no uniform methodology of maps production, and sometimes additional parameters are presented. It is concluded that the dominant influence on the reliability of flood maps have deficient and unreliable input data and measurements, while the selection of the complexity of hydrologic-hydraulic calculation less significant.

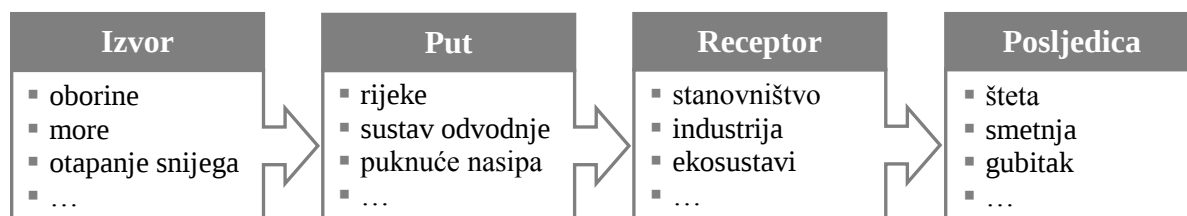
KEYWORDS:

flood risk, flood hazard maps, River Krapina basin, rainfall-runoff model, hydraulic model

1. UVOD

Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o procjeni i upravljanju rizicima od poplava (u nastavku „Direktiva o poplavama“) je temeljni dokument u području upravljanja rizicima od poplava za sve države članice Europske unije (EU). Ključni cilj direktive je uspostava okvira za procjenu i upravljanje poplavnim rizicima s ciljem smanjivanja štetnih posljedica poplava za zdravlje ljudi, okoliš, kulturnu baštinu i gospodarsku aktivnost. Izrada plana upravljanja poplavnim rizicima provodi se kroz niz povezanih koraka. Na temelju preliminarne procjene poplavnih rizika identificiraju se područja s potencijalnom značajnim rizicima od poplava. Za ta područja se nadalje izrađuju karte opasnosti od poplava i karte rizika od poplava, te se tada nakon razmatranja niza mogućih mjera uspostavljaju planovi upravljanja poplavnim rizicima koji su usklađeni na razini vodnog područja. Republika Hrvatska je u Zakonu o vodama (Narodne novine, br. 153/09, 63/11, 130/11, 56/13 i 14/14) i nizom podzakonskih akata definirala pravni okvir za izradu i provedbu plana upravljanja rizicima od poplava.

Opasnost od poplava predstavlja vjerojatnog poplavnog događaja u određenom periodu i na određenom prostoru (Varnes, 1984). Rizik od poplava se definira kao kombinacija vjerojatnosti poplavnog događaja i njegovih potencijalnih štetnih posljedica (Direktiva o poplavama). Procjena poplavnog rizika na nekom području je najčešće kroz pristup „izvor-put-receptor“ (slika 1). Procjena započinje uočavanjem svih izvora poplave, nastavlja se analizom svih putova do receptora, kao što su stanovništvo, industrija itd., a koji su izloženi neželjenim posljedicama. Vjerojatnost poplavnog događaja odnosno opasnost od poplava je sadržana u prva dva koraka ovog pristupa, a rizika od poplava sadrži dodatne informacije o receptorima i posljedicama.



Slika 1. Pristup „izvor-put-receptor“

Budući da se vjerojatnost poplavnog događaja na nekom području prikazuje putem karata opasnosti od poplava, jasna je poveznica da pouzdanost karata opasnosti onda utječe na pouzdanost procjene poplavnih rizika i potencijalnih štetnih posljedica, a u konačnici i na odabir i definiranje mjera za ublažavanje štetnih posljedica. Razumijevanje vjerojatnosti poplave na nekom području je osnovni element u definiranju rizika od poplave.

Ovaj rad prikazuje metodologiju izrade karata opasnosti od poplava na slivu Krapine za područja s potencijalno značajnim poplavnim rizicima. Cilj rada je prikazati tehničke elemente i elemente modeliranja pri izradi karata opasnosti od poplava iz vodotoka s naglaskom na potrebne podloge, na pristup „izvor-put-receptor“ za procjenu poplavnog rizika te na izvore nepouzdanosti pri izradi karata a temeljem rezultata proračuna velikih voda na slivu rijeke Krapine. Izrada karata rizika također je vezana uz ovu tematiku, no elementi izrade karata rizika se ne obrađuju u ovom radu. Rad je nastao u sklopu izrade studentske

dokumentacije za pripremu projekata zaštite od poplava na slivu Krapine za sufinanciranje iz strukturnih fondova Europske unije.

2. UKRATKO O IZRADI KARATA OPASNOSTI U ČLANICAMA EU

2.1. Uzroci i mehanizmi poplava

Kod procjene rizika od poplava sagledavaju se svi mogući uzroci i mehanizmi poplave na promatranom području. Na kopnenom području moguće su poplave iz vodnih tokova, poplave od površinskog dotoka s višeg terena, poplave od podzemnih voda te poplave iz odvodnih sustava, a na obalnom području poplave su moguće uslijed visoke razine mora, morskih oluja i valova. Također poplave su moguće uslijed otkazivanja vodoprivrednih nasipa ili građevina i objekata za akumulaciju i evakuaciju vode (proboj brane, zatajenje opreme, i sl.).

Poplave se uglavnom događaju uslijed meteoroloških prilika koje je teško predvidjeti zbog kaotične prirode atmosferske dinamike, pa se vjerojatnost poplava najčešće određuje analizom povijesnih podataka. Nakon formiranja statističkog niza izračunavaju se empirijske vjerojatnosti kojima se prilagođava teorijska distribucija vjerojatnosti, a njenom ekstrapolacijom dobivaju se poplavni događaji male vjerojatnosti pojave.

Navedeni postupak je uobičajen za poplave iz vodnih tokova i za morske poplave. Određivanje vjerojatnosti poplava od podzemnih voda ili bujičnih poplava nije jednostavan zadatak, pa čak i kada postoje povijesni podaci. Razlog tome je što su uzroci ovih poplava često složena kombinacija meteoroloških uvjeta, kao na primjer veliki intenzitet oborine, zatim geoloških i hidrogeoloških uvjeta te ostalih mehanizama (nedovoljna protočnost kanala, kvar na objektima odvodnje, ljudski faktori). Zbog toga se na kartama opasnosti najčešće prikazuju samo poplave iz vodnih tokova i morske poplave. Ostale vrste poplava (poplave iz sustava odvodnje, poplave od podzemnih voda, bujične poplave, i sl.) se najčešće ne prikazuju jer se rizik povezan s njima ne smatra značajnim i/ili je nedovoljno podataka o povijesnim poplavama na promatranom području. Slijedom navedenog pojednostavljenja ne smije se automatizmom prenijeti informacija da na područjima, koja su na kartama prikazana bez opasnosti, nema nikakvog rizika od poplava, jer karte opasnosti najčešće ne prikazuju sve moguće uzroke i mehanizme poplava.

2.2. Vrste i sadržaj karata opasnosti

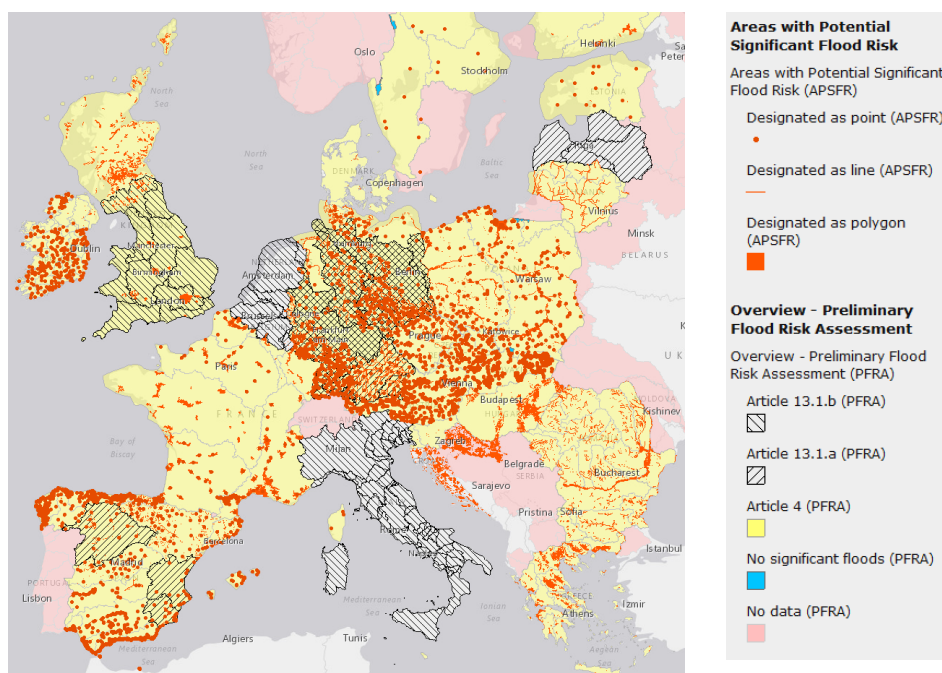
Vjerojatnost poplavnog događaja odnosno opasnost od poplava se prikazuje na kartama opasnosti, a informacije o receptorima i posljedicama poplave (npr. štete, broj ugroženog stanovništva, itd.) se prikazuju na kartama rizika. Unutar ove dvije grupe karata postoje različiti pristupi definiranja opasnosti i rizika, a time i različitih poplavnih karata. Većina europskih zemalja je izradila karte opasnosti za poplave vjerojatnosti pojave 1/30 do 1/10.000 te su prikazale dva ili tri poplavna scenarija. Karte opasnosti su uglavnom dostupne javnosti, ali je različit postupak njihove izrade, objavljivanja, sadržaja i dostupnosti preko javnih servisa. Primjer različitog pristupa država članica EU uočava se kod pregleda izvještaja preliminarne procjene poplavnih rizika (slika 2) i kod sadržaja karata opasnosti od poplava (tablica 1).

Opasnost od poplava može se prikazati različitim parametrima. Obuhvat, dubina i brzina vode su osnovni, a koriste se još i trajnost, volumen i brzina nailaska vodnog vala. Dubina vode je jedan od najvažnijih parametara obzirom na štete od poplava, a brzina vode je važna kod silovitog toka u gornjim dijelovima sliva i kod rušenja nasipa. Poplave se na nizinskim područjima mogu dugo zadržati pa se za procjenu štete uključuje i parametar trajanja poplave,

a također se javljaju i dodatni troškovi poput privremenog smještaja, prekida gospodarskih aktivnosti i prekida u opskrbi. Nadalje, informacije o vremenu dolaska i brzini izdizanja vodnog vala važne su za službe koje provode spašavanje, kao i za procjenu potencijalnog broja žrtava.

Osnovna vrsta karte opasnosti je karta obuhvata koja prikazuje događaje različitih vjerojatnosti pojave kao i povijesne poplave. Obuhvat poplave se prikazuje za tri događaja na jednoj karti, no ponekad samo za jedan događaj (Francuska) iako su proračuni izvršeni za više događaja (Norveška, Danska). Za riječne poplave „srednje“ vjerojatnosti najčešće se prikazuje događaj vjerojatnosti pojave 1/100, dok se za „malu“ vjerojatnost prikazuje događaj vjerojatnosti pojave 1/1.000 ili čak 1/10.000 (Švedska). Za morske poplave „srednje“ vjerojatnosti prikazuje se događaj vjerojatnosti pojave 1/200 (Velika Britanija, Irska).

Neke su države članice izradile zasebne karte opasnosti s prikazom povijesnih poplava. Obuhvat poplave za pojedinačne događaje izrađeni su za Češku (poplave Elbe 1997. i 2002.), za Finsku i za neke dijelove Francuske (van Alphen i Passchier, 2007). Belgija (Flandrija) ima karte „nedavno plavljenih područja“, a najdalje je otišla Irska koja je razvila on-line servis za prikaz lokacija poplavnih događaja za područje cijele države (<http://www.floodmaps.ie>).



Slika 2. Karte EU članica za PFRA/APFSR prema Direktivi o poplavama, zadnji unos svibanj 2014. godine (izvor: Europski informacijski sustav za vode i more, WISE)

Karte dubina vode daju se po pojedinim povratnih razdobljima s različitim paletama boja. Također se izrađuju zasebne karte dubina vode koje nisu posljedica izlivanja/preplavlivanja, već posljedica otkazivanja građevina (proboj nasipa). Budući da lokacija otkazivanja građevine nije unaprijed poznata dobivaju se karte opasnosti za različite scenarije otkazivanja, te se za općeniti uvid u opasnost izrađuje jedna karta s maksimalnim ili prosječnim dubinama od svih računskih scenarija (primjer Nizozemske).

Ostali parametri opasnosti od poplava se također prikazuju ovisno o korisniku i svrsi karte. Brzina vode se prikazuje u Austriji i Luksemburgu, a brzina izdizanja vodnog vala u Belgiji

(Flandriji). U Mađarskoj i Nizozemskoj prikazuje se propagacija vodnog vala. Svi navedeni parametri se prikazuju za pojedinu vjerojatnost pojave.

Karte opasnosti se izrađuju u različitim mjerilima. U Finskoj su karte opasnosti izrađene u mjerilu 1:20.000 ili 1:25.000. U Njemačkoj se karte razlikuju prema korisnicima, pa su tako za širu javnost karte ograničenih informacija u mjerilu 1:5000, dok su za znanstvene organizacije i javnu upravu krupnijeg mjerila. Karte u Bugarskoj su mjerila 1:50.000, a u Poljskoj od 1:25.000 do 1:100.000.

Na kraju pregleda izrade karata opasnosti u EU državama potrebno je naglasiti i različiti pristup uključivanja građevina za obranu od poplava. Kod prikaza obuhvata poplave građevine obrane od poplava se ponekad uključuju a ponekad ne, a kada se uključuju smatraju se trajnim građevinama. U Velikoj Britaniji i Irskoj na kartama obuhvata prikazuje se i rezidualni rizik odnosno obuhvat poplave za slučaj bez sustava obrane od poplava.

Tablica 1. Pregled vrsta, sadržaja i korisnika karata opasnosti i rizika od poplave u državama Europske unije (izvor: de Moel i drugi 2009)

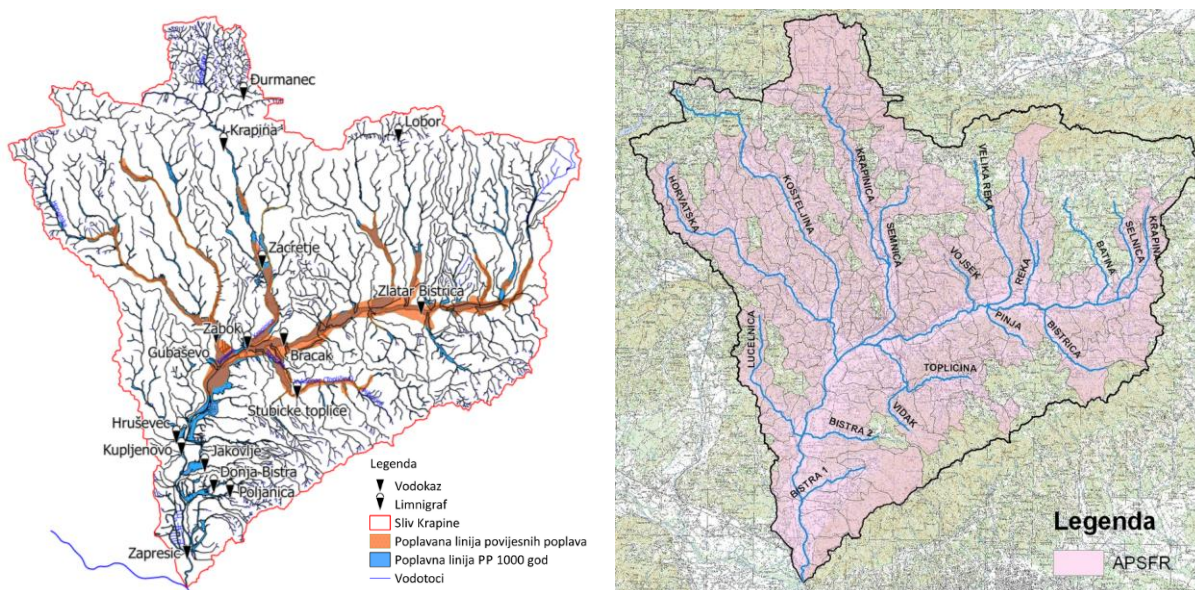
Država	Razno			Vrsta karte								Sadržaj			Korisnici u javnoj upravi					
	Pokrivenost (*)	Izrađivač (**)	Dostupno on-line	Povijesne poplave	Obuhvat poplave	Dubina vode	Ostali parametri (***)	Ugroženost poplavama	Izloženost poplavama	Kvalitativan rizik	Kvantitativan rizik (štete)	Broj događaja na kartama opasnosti	Broj događaja na kartama ugroženosti	Broj računskih događaja (****)	Provedba spašavanja	Prostorno planiranje (preporuke)	Prostorno planiranje (obavezno)	Gradnja	Osiguranje	Procjena/upravljanje rizikom
Flandrija (BE)	1	R	Da	X	X	X	R				X			17					X	X
Francuska	1	R	Da	X	X				X	X		1	1				X	X		
Švicarska	1	R	Da		X	X		X		X		1	4	4	X		X	X		
Nizozemska	1	C	Da			X	V								X					X
Velika Britanija	1	C	Da		X			X	X			2	4–7	4		X			X	
Rumunjska	1	C			X				X					5	X		X			
Slovačka	1	C			X				X					5	X					X
Valonija (BE)	1	R	Da					X					3	3						
Mađarska	1				X		P					2	2	2	X	X				
Irska	1	C	Da	X	X							3				X				X
Litva	1	R		X	X										X		X			
Češka	1	R	Da	X	X							3	3	3	X					
Slovenija	1	C			X								4	4	X					
Estonija	1	C		X																
Grčka	1	C		X																
Njemačka	2	R	Da		X	X		X			X	1–4	4	V			X	X		
Španjolska	2	R		X	X				X	X		3	3	3	X		X			
Italija	2	R	Da		X				X	X		3	3	3			X			
Finska	2	R	Da	X		X							5	5	X	X		X		X
Austrija	2	C			X		V	X				3	5	3		X				
Luksemburg	2	P	Da		X	X	V	X				4	4	4		X				
Poljska	2	R			X	X						2–8	V	V	X		X			
Norveška	2	C			X							1	6	6	X	X				
Portugal	2	L			X										X	X				X
Švedska	2	C	Da		X							2	2	2	X	X				X
Danska	3	C			X							1	2	2						
Latvija	3	C			X							1	V	V	X	X				

Tumač oznaka: (*) 1: cijela država; 2: neke regije/u tijeku; 3: pojedina područja. (**) C: centralna uprava; R: regionalna uprava; L: lokalna uprava; P: projekt. (***) R: brzina podizanja; V: brzina; P: propagacija. (****) S: nekoliko, ali više od jedan; V: različito ovisno o području.

3. METODOLOGIJA

Problematika poplava na slivu rijeke Krapine obrađivana je u nekoliko prethodnih elaborata s različitim pristupima hidrološkim i hidrauličkim analizama velikih voda. U nekoliko prethodnih elaborata i studija analizirane su velike vode i erozijski potencijal na cjelokupnom slivu rijeke Krapine (VRO Zagreb 1988, Hrvatske vode 2004, Barbalić 2006, Tehnoart d.o.o. 2009, IEE 2012). Regulacijski radovi na vodotocima većinom su izrađeni parcijalno i nisu usklađeni u cjelini, tako da danas postoje različiti stupnjevi zaštite od poplava na slivu.

Topografske i meteorološke karakteristike sliva rijeke Krapine pogoduju plavljenju ponajprije nizinskih dijelova sliva na kojem se prvenstveno nalaze naselja, industrija i infrastruktura kao i poljoprivredne površine i šume. Najugroženija područja nalaze se uz tri rijeke: Krapina, Krapinica i Topličina (slika 3). Na rijeci Krapini poplavom najugroženija područja su grad Zabok, Bedekovčina, Zlatar Bistrica, Konjščina, državna cesta Zabok-Konjščina te željeznička pruga. Na rijeci Krapinici poplavom najugroženija područja su Đurmanec i Sv. Križ Začretje sa sigurnošću od događaja vjerojatnosti 1/10, grad Krapina sa sigurnošću od događaja vjerojatnosti 1/50 te državna cesta Zagreb-Macelj sa sigurnošću od događaja vjerojatnosti 1/100. Na rijeci Topličini poplavom su najugroženiji Donja Stubica i Orosavlje sa sigurnošću od događaja vjerojatnosti 1/10, zatim Stubičke Toplice i Gornja Stubica, te državna cesta Zabok-D.Stubica i željeznička pruga Zabok-G.Stubica.



Slika 3. Povijesne poplave (lijevo) i naselja s potencijalno značajnim rizikom od poplava iz preliminarne procjene poplavnih rizika (desno)

Karte opasnosti od poplava na slivu rijeke Krapine je potrebno izraditi za sva područja s potencijalno značajnim rizikom od poplava iz preliminarne procjene (Area of Potentially Significant Flood Risk, APSFR). Slika 3 lijevo prikazuje obuhvate povijesnih poplava iz prethodnih studija i zabilježenih događaja te hidrografsku mrežu i lokacije vodomjernih postaja na slivu. Slika 3 desno prikazuje naselja s potencijalno značajnim rizikom od poplava (APSFR). Uočava se da vodomjerne postaje ne postoje za sve vodotoke iz povijesnih poplava i za sva APSFR područja. Također treba napomenuti da su APSFR definirani na temelju

razmatranja vjerojatnosti i mogućih štetnih posljedica riječnih poplava različitih mehanizama, kao što su nagle promjene uzdužnog pada, intenzivne kratkotrajne oborine, mala protočnost rijeke Krapine za prihvat brdskih voda te neodržavanost i smanjenje protočnog profila nekih pritoka. Budući da mreža vodomjernih postaja na slivu ne obuhvaća sve vodotoke i sva područja APSFR te da su zapisi vodostaja i protoka nedovoljne duljine, karte opasnosti nije moguće prikazati jednostavnim oduzimanjem razina vode iz statističke obrade i razina terena, pa su velike vode na slivu određene hidrološko-hidrauličkim modeliranjem.

U hidrološko-hidrauličkom modeliranju bilo je potrebno definirati pristup modeliranju, definirati prostorne domene i rubne uvjete modela te odabrati relevantne računalne pakete. Budući da jedna kišna epizoda neće formirati velikovodni događaj jednolike vjerojatnosti pojave na svim vodotocima, odabran je pristup da se proračun velikih voda izradi zasebno za svaki predmetni vodotok. Uz izradu karata opasnosti od poplava za sliv rijeke Krapine, u ovom zadatku je bilo potrebno omogućiti i ispitivanje različitih mjera upravljanja rizicima od poplava na područjima s visokim rizicima od poplava kao i na cjelokupnom slivu, pa su odabrani nestacionarni rubni uvjeti modela i hidrodinamički proračuni razina i brzina vode. Analiza velikih voda sliva rijeke Krapine načelno je provedena u tri koraka: statistička obrada mjerenja s hidroloških postaja, izrada hidrološkog modela otjecanja te izrada hidrauličkog modela tečenja.

U prvom koraku izrađena je statistička obrada vodomjerenja koja je uključila ispitivanje homogenosti i duljine nizova vodostaja i protoka s 14 vodomjernih stanica na 10 vodotoka iz baze HIS2000 i baza podataka Hrvatskih voda. Vršni protoci i vodostaji velikih voda dobiveni su obradom nizova godišnjih maksimuma. Obradom satnih zapisa protoka dobiveni su volumeni hidrograma i trajanja hidrograma velikih voda, temeljem kojih je bilo moguće formirati sintetičke hidrograme velikih voda na hidrološkim stanicama. U drugom koraku su proračunati hidrogrami velikih voda za svaki predmetni vodotok usporedbom računskih hidrograma i sintetičkih hidrograma iz prvog koraka. Hidrološkim proračunom se za pojedini poplavni scenarij dobivaju hidrogrami tražene vjerojatnosti pojave na predmetnom vodotoku, dok hidrogrami na pripadajućim pritocima mogu ali i ne moraju imati istu vjerojatnost pojave. U trećem koraku su proračunate razine i brzine vode za svaki predmetni vodotok zasebno, i to prvo od nizvodnih vodotoka prema uzvodnim. Dakle, prvo je izrađen hidraulički model rijeke Krapine.

Za proračun razina i brzina vode velikih voda definirani su dakle nestacionarni rubni uvjeti za svaki predmetni vodotok i za svaki poplavni scenarij na način da su vodostaji na najnižvodnijoj dionici zapravo računski vodostaji iz nizvodnog hidrauličkog modela, a dotoci s pripadajućih podslivova su računski hidrogrami iz hidrološkog proračuna. Prikazanom metodologijom omogućen je hidrodinamički proračun velikih voda različitih vjerojatnosti pojave na svim predmetnim vodotocima te je omogućeno ispitivanje niza mjera za upravljanje rizicima od poplava na slivu.

4. REZULTATI PRORAČUNA

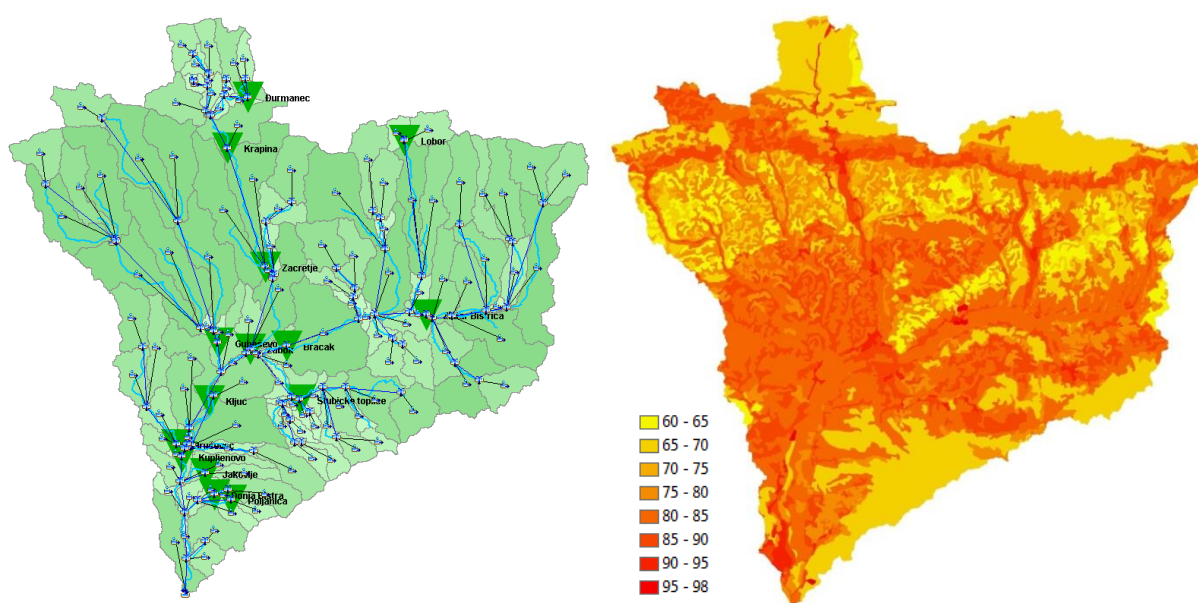
3.2. Hidrološki model otjecanja

Za ovaj zadatak izrađen je jedinstveni hidrološki model otjecanja za cijeli sliv rijeke Krapine. Za napomenuti je da do ovog zadatka hidrološki model otjecanja nije bio izrađen niti za jedan dio sliva. Podslivovi sliva Krapine definirani su podjelom sliva na osnovne podslivove glavnih vodotoka i kanala. Dobiveni osnovni podslivovi dodatno su podijeljeni prema sljedećim kriterijima: prema lokacijama predmetnih vodotoka i kanala, prema lokacijama hidroloških stanica (kontrolne točke), te prema lokacijama planiranih regulacijskih

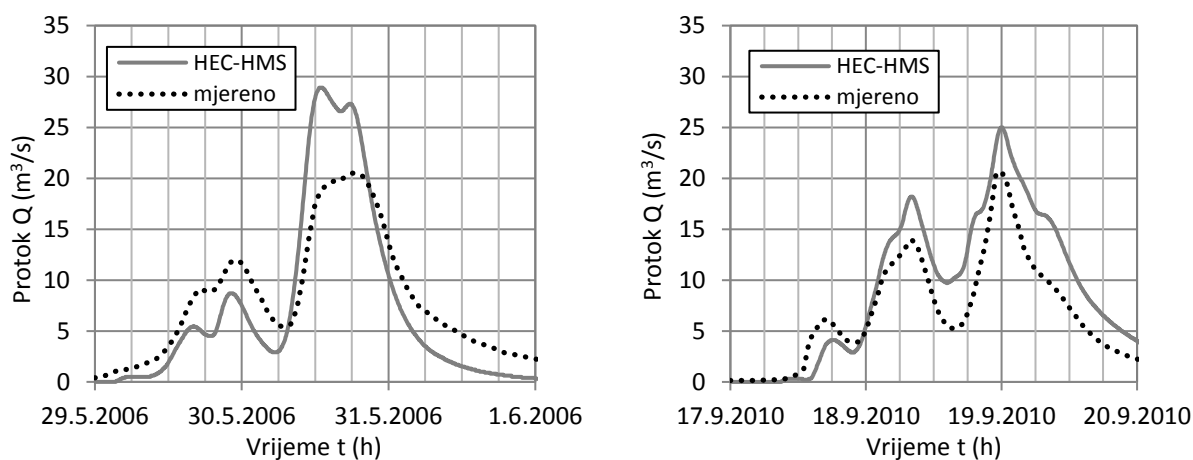
građevina (retencije i akumulacije). Tako je sliv Krapine u hidrološkom modelu definiran s 127 podslivova, 85 vodotoka (poddionice) te uključuje 10 planiranih retencija (slika 4). Geografske karakteristike podslivova (površina, duljina, nagib, težište) definirani su korištenjem HEC-GeoHMS alata na raspoloživom digitalnom modelu terena (DMT) uz kontrolu na topografskim kartama 1:25.000.

Za hidrološki proračun velikih voda korišten je programski paket HEC-HMS sa sljedećim elementima: projektne oborine definirane su kao balansirane 24-satne oborine „frequency storm“ metodom, efektivne oborine procijenjene su SCS metodom, direktno otjecanje proračunato je metodom SCS jediničnog hidrograma, a metodom kinematskog vala proračunata je transformacija vodnog vala duž vodotoka.

CN brojevi krivulja za podslivove procijenjeni su za prosječno stanje vlažnosti tla (slika 4) temeljem podataka o tlu i pokrovu. Hidrološki tip tla (A, B, C, D) definiran je iz pedoloških karata, a tip pokrova definiran je prema podacima iz baze CORINE Land Cover 2006.

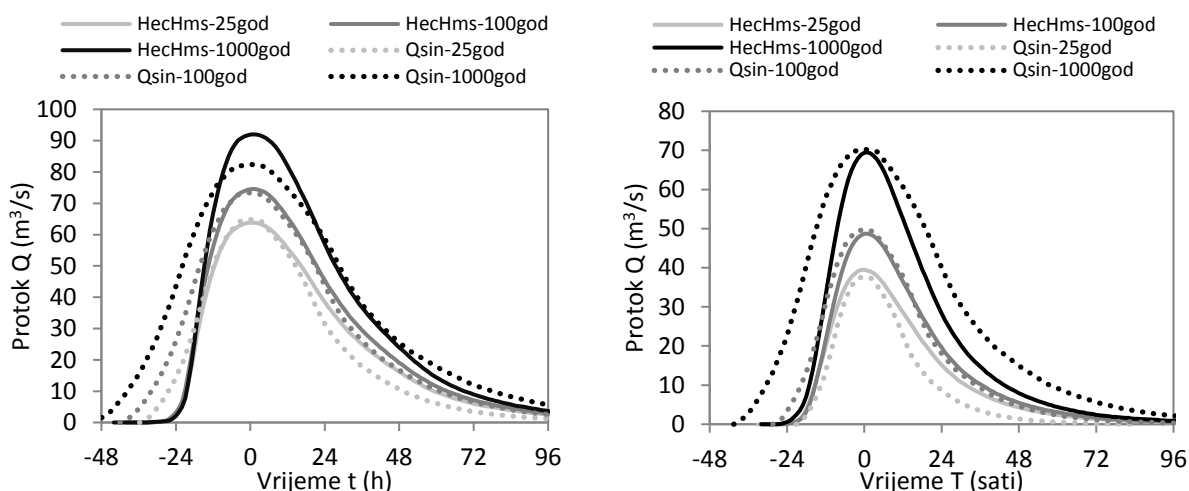


Slika 4. Topološka shema otjecanja u HEC-HMS modelu (lijevo) i karta CN brojeva (desno)



Slika 5. Rezultat kalibracije i verifikacije hidrološkog modela za h.s. Krapina na Krapinici

Parametri za kalibraciju hidrološkog modela su vrijeme zakašnjenja (vrijeme koncentracije) i CN brojevi krivulja za podslivove, a koji su definirani usporedbom računskih i zabilježenih hidrograma na hidrološkim stanicama (slika 5). Kalibracija i verifikacija hidrološkog modela otjecanja i hidrauličkog modela tečenja izrađena je za tri velikovodna događaja s najvećim protocima rijeke Krapine na Kupljenovu iz perioda 2001.-2010.: događaj 2005. za razdoblje od 5.12.2005. do 9.12.2005., događaj 2006. za razdoblje od 29.5.2006. do 2.6.2006., te događaj 2010. za razdoblje od 17.9.2010. do 21.9.2010. Hijetogram oborina kod navedenih velikovodnih događaja definiran je temeljem zabilježenih satnih količina oborine s kišomjerne postaje Krapina i jednoliko je raspodijeljen po slivu.



Slika 6. Primjer usporedbe računskih hidrograma (puno) i sintetičkih hidrograma (točkasto) za h.s. Gubaševo na Horvatskoj (lijevo) i h.s. Stubičke Toplice na Topličini (desno)

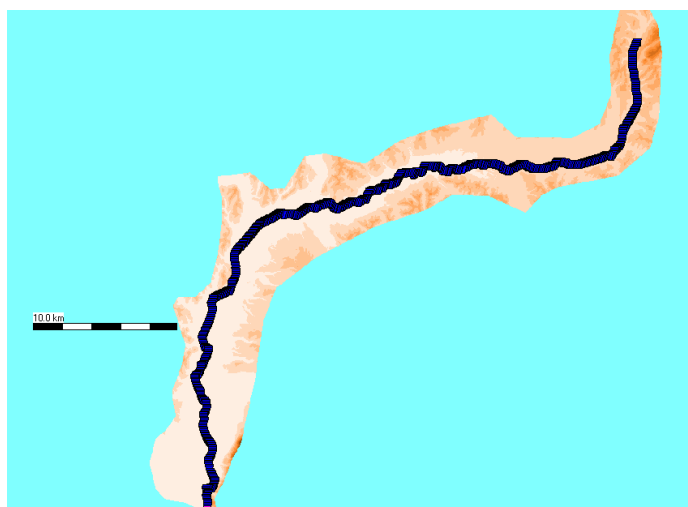
Za proračun velikih voda definirani su računski hijetogrami kao 24-satne balansirane oborine „frequency storm“ metodom na osnovu količina oborine iz ITP funkcija za zonu A na području Zagreba (JVP 1992). Hidrogrami velikih voda proračunati su za svaki predmetni vodotok usporedbom računskih hidrograma i sintetičkih hidrograma iz statističke obrade (slika 6). Kod proračuna hidrograma određene vjerojatnosti pojave korištene su ulazne oborine iste vjerojatnosti pojave i koje su jednoliko raspodijeljene na pripadajućim podslivima. Budući da odnos između oborina i otjecanja nije linearan, kod proračuna hidrograma izvršene su dodatne korekcije računskih parametara, primarno vremena zakašnjenja iz kalibracije modela.

3.3. Hidraulički model tečenja

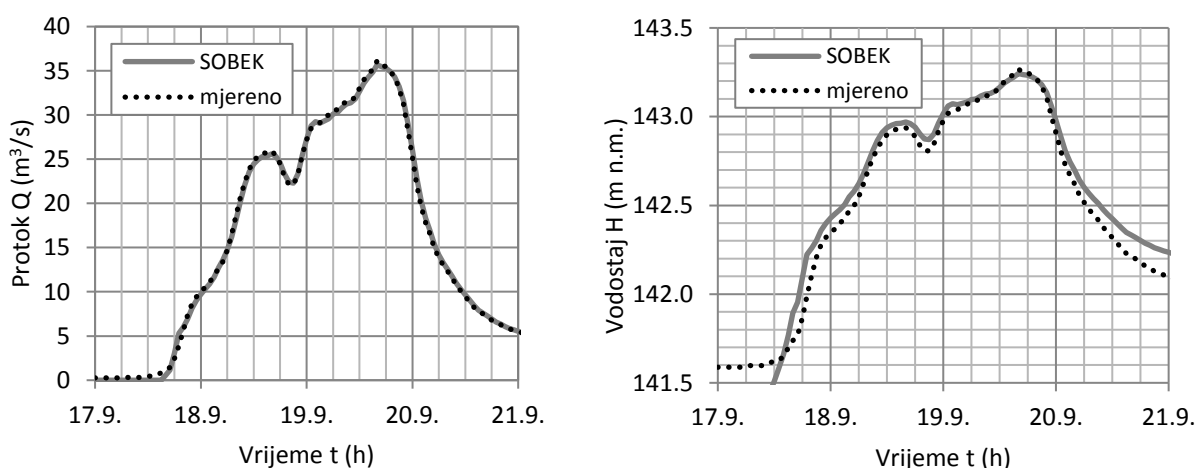
Sliv rijeke Krapine je asimetričan u odnosu na glavni vodotok, rijeku Krapinu, pri čemu su desni pritoci dulji i imaju veće površine sliva, a lijevi pritoci s obronaka Medvednice su kraći i izrazitijeg bujičnog karaktera. Značajni desni pritoci Krapine su vodotoci Lučelnica, Horvatska, Krapinica, Vojsek, Velika Reka, Reka, Batina i Selnica. S lijeve strane ističu se vodotoci Bistra I, Topličina, Pinja i Bistrica. Prema 'Odluci o popisu voda 1. reda' (NN 79/2010), u vode prvog reda na slivu Krapine, svojom slivnom površinom ili prema duljini toka svrstane su: rijeke Krapina, Krapinica i Horvatska, te potoci Topličina i Kosteljina. Hidraulički modeli izrađeni su za sve navedene vodotoke, te za potoke Bistru II, Vidak i

Šemnicu jer se na njima nalaze veća naselja koja se povremeno plave (Jakovlje, Stubičke Toplice, Donja Šemnica).

Za svaki od predmetnih vodotoka izrađen je zaseban hidraulički model te su njihovi rezultati (obuhvat poplave, dubine i brzine vode) na kraju spojeni u iste izlazne datoteke. Za pet vodotoka 1. reda (Krapina, Krapinica, Horvatska, Topličina, Kosteljina) izrađen je 1D2D hidraulički modeli korištenjem SOBEK paketa (slika 7). Na dvanaest manjih vodotoka (Lučelnica, Vojsek, Velika Reka, Reka, Batina, Selnica, Bistra I, Pinja, Bistrica, Bistra II, Vidak i Šemnica) izrađen je 1D hidraulički modeli korištenjem HEC-RAS paketa. Navedeni manji vodotoci imaju veće uzdužne nagibe i relativno uske doline, pa se zbog malih volumena izlivanja i kraćeg zadržavanja vode u inundaciji pretpostavlja da su 1D modeli dovoljne pouzdanosti za proračun razina i brzina vode velikih voda.



Slika 7. Sobek 1D2D model rijeke Krapine



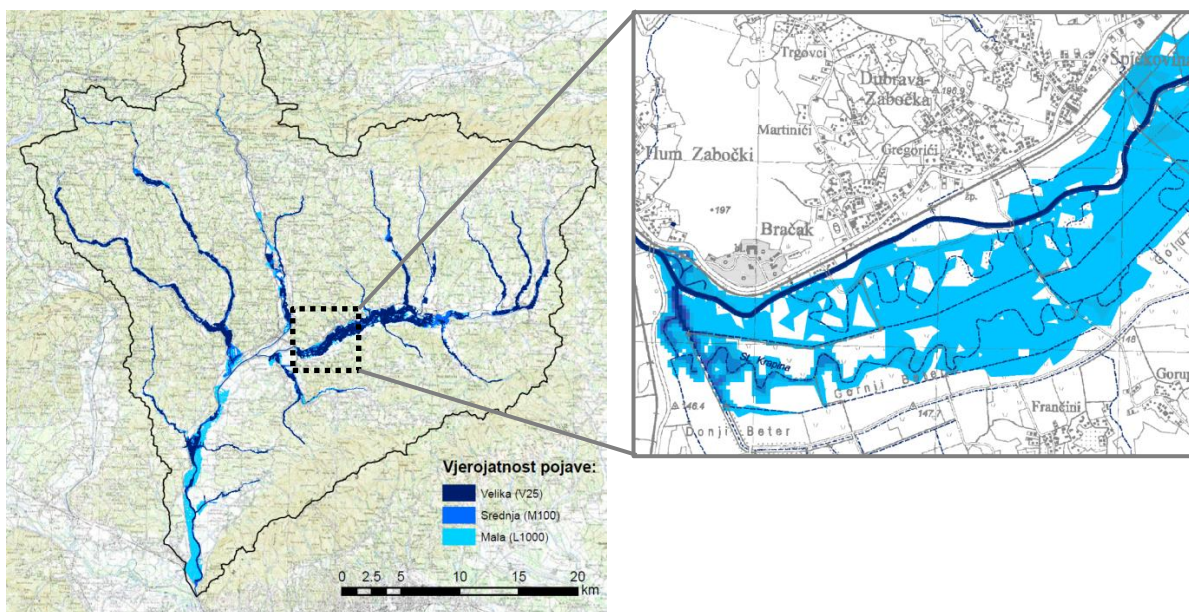
Slika 8. Rezultat kalibracije hidrauličkog modela rijeke Krapinice na h.s. Zabok

Poprečni profili korita definirani su na međusobnoj udaljenosti od 100 m. Za 1D2D modeliranje tečenja po inundaciji definiran je raster prostornog koraka 20 x 20 m za rijeku Krapinu, te raster koraka 10 x 10 m za ostale vodotoke. Nakon definiranja geometrije i izrade hidrauličkog modela, izvršena je kalibracija i verifikacija hidrauličkih modela na vodotocima

usporedbom računskih i izmjerenih protoka i vodostaja na hidrološkim stanicama za povijesne vodne valove iz 2006. i 2010. godine. Za primjer pouzdanosti rezultata razina vode prikazuje se kalibracija 1D2D hidrauličkog modela (SOBEK) za poplavni događaj iz rujna 2010. godine (slika 8). Korištenjem usvojenih računskih parametara modela iz postupka kalibracije i usvojenih rubnih uvjeta protoka i vodostaja proračunate su razine i brzine vode za velike vode 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500 i 1000 godišnjeg povratnog razdoblja.

Rubni uvjeti u hidrauličkom modelu su ulazni hidrogram s pripadajućih podslivova, te računske razine vode iz nizvodnog hidrauličkog modela odnosno razine vode rijeke Save za model rijeke Krapine. Povezivanje hidrološkog i hidrauličkog modela izvršeno je na sljedeći način:

- za podslivove na uzvodnim dijelovima vodotoka - rubni uvjet u hidrauličkom modelu je pripadni hidrogram s podsliva koji se dodaje u točki;
- za podslivove duž vodotoka gdje postoje pritoci - pripadajući dotoci se dodaju u točki na spoju pritoka i vodotoka;
- za podslivove duž vodotoka gdje nema pritoka - pripadajući dotoci se dodaju kao lateralni dotok a koji se u hidraulički model dodaju kroz linearno povećanje dotoka duž vodotoka.



Slika 9. Prikaz obuhvata poplave za cijeli sliv (lijevo) i dubina vode za dio sliva (desno)

Kod karta opasnosti korištene su anvelope maksimalnog obuhvata, razina i brzina vode iz hidrauličkih proračuna s prikazom parametara prema metodologiji iz Twinning projekta „Izrada karata opasnosti od poplava i karata rizika od poplava“. Proračuni velikih voda izrađeni su za poplave različitih vjerojatnosti pojave, a na kartama su prikazani parametri za poplave vjerojatnosti 1/25, 1/100 i 1/1000. Za primjer prikazuje se obuhvat poplave za cijeli sliv i dubine vode za dio rijeke Krapine za događaj vjerojatnosti 1/100 (slika 9). Slika 9 desno pokazuje rezultate dubina vode iz 1D2D modela rijeke Krapine kod Bračaka, tok je s desna na lijevo. Duž lijeve inundacije uočavaju se različiti putove poplave, a sve uslijed izlivanja iz korita na uzvodnoj dionici. Takove rezultate toka vode po inundaciji i dosega poplave moguće je simulirati jedino 2D modelima.

ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metodologija i rezultati izrade karata opasnosti za poplave za sliv rijeke Krapine za APSFR područja iz preliminarne procjene prema zahtjevima Direktive o poplavama. Velike vode proračunate su kombinacijom statističke obrade vodomjerenja uz hidrološko-hidrauličko modeliranje. Nakon pregleda izrade karata opasnosti u EU članicama zaključuje se sljedeće:

- Izbor o vjerojatnostima pojave koje se prikazuju na kartama opasnosti je na državama članicama.
- Na kartama opasnosti se uglavnom prikazuju samo poplave iz vodotoka i morske poplave. Uz prikaz obuhvata, dubine i brzine vode na kartama opasnosti se po potrebi prikazuju i brzina rasta hidrograma, brzina propagacije vodnog vala, trajanje vodnog vala, te opasnost kao kombinacija dubine i brzine vode. Navedeni dodatni parametri su naročito važni kod bujičnih poplava i za poplave u nizinskih područjima.
- Karte opasnosti su izrađene u različitim mjerilima i koriste za različite namjene: za pripremu spašavanja, u prostornom planiranju, za sektor osiguranja te za planove upravljanja poplavnim rizicima.
- Kod nekih EU članica sustavi obrane od poplave se ne uključuju kod izrade karata opasnosti.

Nakon proračuna velikih voda i izrade karata opasnosti za sliv rijeke Krapine moguće je zaključiti sljedeće:

- Mreža hidroloških stanica uglavnom pokriva veće vodotoke na slivu, ali je potrebna provjera konsumpcijskih odnosa na nekim stanicama. No budući da hidrološka mreža ne pokriva sve predmetne vodotoke, hidrogrami velikih voda dobiveni su modeliranjem otjecanja uz korištenje teoretskih hijetograma. Kalibracija i verifikacija modela otjecanja je poželjna, a ponekad i obavezna, ali problem predstavlja mali broj ombrogrfskih stanica na slivu.
- Satna vodomjerenja dostupna su samo za zadnjih 5 do 10 godina, što omogućava verifikaciju modela otjecanja za događaje velike vjerojatnosti pojave. Budući da takva verifikacija nije moguća za događaje male vjerojatnosti, proračun hidrograma velikih voda oslanja se na sintetičke hidrograme čiji su oblici dobiveni značajnim ekstrapolacijama empirijskih vjerojatnosti vremenske baze hidrograma.
- Ne postoji baza povijesnih poplava na slivu.
- Korištenje 1D2D hidrauličkih modela je vremenski puno zahtjevnije ali se njima omogućavaju različiti putovi vode po inundaciji, a time i pouzdanije definiranje obuhvata poplave. Ne preporuča se korištenje 2D modela kod hidrološki neizučenih slivova jer je tada moguće i povećanje greške u procjeni razina vode velikih voda.
- Izrada geometrije korita vodotoka i inundacije predstavlja poseban problem. Vektorski digitalni model reljefa (DMR) postoji za čitav sliv i sastoji od točaka i karakterističnih linija, međutim ne obuhvaća sve linijske objekte na inundaciji i ne obuhvaća korita vodotoka. Geodetski snimci korita postoje u digitalnom obliku na nekim dionicama vodotoka, ali su snimci na većini dionica ili analogni ili sasvim nedostaju.

Na pouzdanost karata opasnosti utječu pouzdanost meteoroloških, hidroloških i geodetskih podloga, te odabir složenosti hidrauličkog modela. Nakon definiranja obuhvata, dubina i brzina vode na slivu rijeke Krapine pokazuje se da na pouzdanost karata opasnosti uglavnom utječe manjak i nepouzdanost podloga, a manje odabir složenosti modela i metode hidrološkog i hidrauličkog proračuna. Naglašava se nedostatnost dugovremenih satnih

vodomjerenja, a poseban problem predstavlja nedostatak geodetskih podloga jer noviji digitalni snimci korita nisu dostupni na većini dionica vodotoka 1. reda. Nadalje, baza s informacijama i obuhvatom povijesnih poplava uvelike bi olakšala verifikaciju hidrološko-hidrauličkih modela i izrađenih karata opasnosti.

Navedene analize provedene su u sklopu izrade studijske dokumentacije za pripremu projekata zaštite od poplava za sufinanciranje iz strukturnih fondova EU. U nastavku će se definirati optimalne mjere upravljanja rizicima od poplava temeljem izračuna smanjenja prosječnih godišnjih šteta te analizom koristi i troškova pojedinih mjera. Za smanjenje nepouzdanosti kod izrade karata opasnosti i rizika od poplava na slivu Krapine potrebno je dakle prikupljanje detaljnijih i pouzdanijih ulaznih podloga, a što bi svakako trebalo provesti uz financijsku podršku strukturnih fondova EU.

LITERATURA

Barbalić, D. (2006): *Određivanje cjelina površinskih voda*, Hrvatske vode, 14 (56/57), 289-296.

de Moel, H., van Alphen, J., Aerts, J.C.J.H., (2009): *Flood maps in Europe – methods, availability and use*, Natural Hazards and Earth System Science, 9, 289–301.

Direktiva 2007/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o procjeni i upravljanju rizicima od poplava

EXCIMAP, (2007): *Handbook on good practices for flood mapping in Europe, European exchange circle on flood mapping*.

Hrvatske vode VGO Sava (2004): *Rizici od poplave na slivu Krapine*, Zagreb.

Institut za elektroprivredu i energetiku d.d. (2012): *Analiza visokovodnog režima sliva Krapine s prijedlogom tipskih rješenja hidrotehničkih objekata i ekološke regulacije vodotoka*, Zagreb.

JVP Hrvatska vodoprivreda, OJ Zagreb (1992): *Vodoprivredna osnova grada Zagreba - Izmjene i dopune*.

Tehnoart d.o.o., (2009): *Hidrološka analiza sliva Krapine s novelacijom hidrotehničkih rješenja*, Zagreb.

USACE U.S. Army Corps of Engineers, (1996): *Engineering and Design, Risk-based Analysis for Flood Damage Reduction Studies*, Manual No. 1110-2-1619.

van Alphen, J. i Passchier, R., (2007): *Atlas of Flood Maps, examples from 19 European countries, USA and Japan*, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, Netherlands, prepared for EXCIMAP.

Varnes, D.J., (1984): *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*, UNESCO Press, Paris.

VRO Zagreb, (1988): *Vodoprivredno rješenje uređenja sliva rijeke Krapine*, Zagreb.