

# Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne

Mitja Brilly\*, Klaudija Sapač\*, Andrej Vidmar\*, Lidija Globevnik\*, Mira Kobold\*\*, Katarina Zabret\*, Maja Koprivšek\*, Matej Sečnik\*, Darko Anzeljc\*\*\*

## Povzetek

Maja 2014 so na spodnjem delu porečja reke Bosne kot posledica večdnevni nepretrganih padavin nastopile poplave, ki so povzročile za več kot milijardo evrov škode in terjale 86 smrtnih žrtev. Slovenska vlada je sprejela odločitev, da prizadetim območjem BiH pomaga tudi z analizo poplavnega dogodka na porečju reke Bosne in predlaga nekatere ukrepe za blaženje vpliva poplav v prihodnosti. V projektu so iz Slovenije sodelovali: Agencija RS za okolje, Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Inštitut za vode RS. Na osnovi zbranih podatkov je bilo analizirano vremensko dogajanje in podan opis hidroloških razmer z rezultati analize verjetnosti velikosti zabeleženih padavin in pretokov. Za potrebe rekonstrukcije poplavnega dogodka maja 2014 je bil z orodjem HBV-light razvit hidrološki model porečja reke Bosne. Rezultati simulacije kažejo, da so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli 500-letno povratno dobo, ponekod pa celo 1.000-letno. Model reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira vodno bilanco vodotoka in daje osnovo za nadaljnji razvoj, v obstoječi obliki pa je že uporaben za izdelavo napovedi pretokov pri poplavah reke Bosne v spodnjem toku. S celovito analizo se večja poznavanje izrednega hidrološkega dogodka maja 2014 na porečju reke Bosne, z izdelavo hidrološkega modela pa se vzpostavlja prenos znanja in izkušenj med Slovenijo in BiH s področja napovedovanja in spremljanja poplav.

**Ključne besede:** poplava, reka Bosna, hidrološki model, padavine, napoved, povratna doba, HBV-light

**Key words:** flood, Bosna River, hydrological model, precipitation, forecast, return period, HBV-light

## Uvod

Sredi maja 2014 so na spodnjem delu porečja Save nastopile poplave s katastrofalnimi posledicami. Umrlo je 86 ljudi, ocenjene škode pa so presegle eno milijardo evrov. Prizadele so območja na Hrvaškem, v Bosni in Hercegovini (BiH) ter v Srbiji. Poplave se niso pojavile le ob reki Savi, temveč tudi na porečjih njenih pritokov. Poplavljali so Vrbas, Vrbanja, Bosna, Spreča, Usora, Krivaja ter reka Drina. Največ škode so povzročile reka Sava v Brčkem, Orašju in Obrenovcu, reka Bosna v Zavidovičih, Doboju, Maglaju, Modriču in Bosanskem Šamcu, reka Drina v Bijeljini in Zvorniku ter reka Vrbanja v Čelincu in Kotor Varošu.

Slovenska vlada je sprejela odločitev, da pomaga prizadetim območjem Bosne in Hercegovine tudi z analizo poplavnega dogodka ter predlaga nekatere ukrepe za blaženje vpliva poplav v bodoče. Na sestanku predstavnikov hidroloških in vodarskih strok Slovenije ter BiH dne 6. junija 2014 je bilo dogovorjeno, da se analizira poplavni dogodek na reki Bosni ter izdelava hidrološki model porečja. V projektu je iz Slovenije poleg

---

\*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

\*\* Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

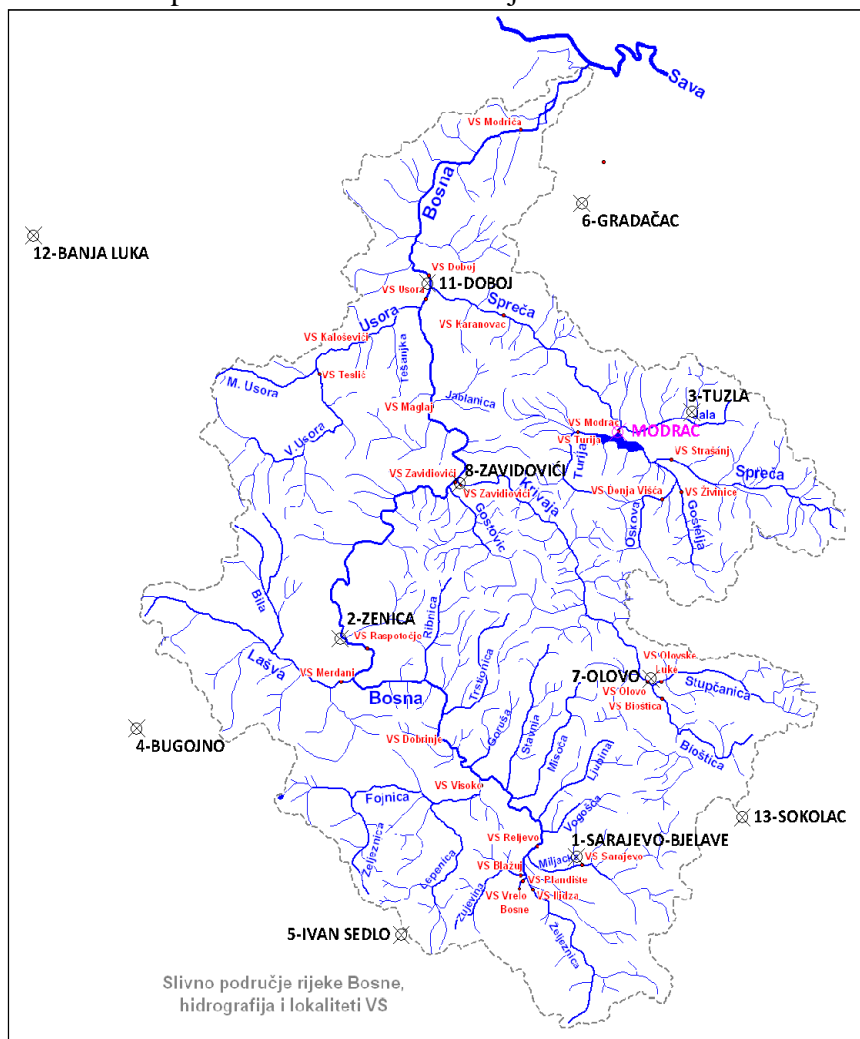
\*\*\* Inštitut za vode Republike Slovenije, Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana, Slovenija.

Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) sodelovala tudi Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FG) in Inštitut za vode Republike Slovenije (IZVRS). V projektu sta iz BiH aktivno sodelovala Republiki hidrometeorološki zavod Republike Srpske (RHMZ RS) in Federalni hidrometeorološki zavod Federacije Bosne i Hercegovine (FHMZ BiH).

S projektom se veča poznavanje izrednega hidrološkega dogodka v maju 2014 na največjem porečju v BiH, to je porečju reke Bosne. Z izdelavo hidrološkega modela reke Bosne pa se vzpostavlja pomemben prenos znanja ter izkušenj Slovenije pri vzpostavljanju sistema spremljanja, napovedovanja in učinkovitejšega obvladovanja poplav v BiH.

## Opis porečja reke Bosne

Porečje reke Bosne (slika 1) po podatkih »Hidrološke studije površinskih voda Bosne i Hercegovine - Sliv rijeke Bosne« glede na orografsko razvodnico obsega 10.420 km<sup>2</sup> (ZV in FHMZ, 2012). Reka teče od juga proti severu. Povirje je v Dinaridih z vršaci, ki presegajo 2.000 m, osrednji del porečja zajema hribovito območje osrednje Bosne, spodnji del toka pa poteka po ravninskem območju poplavnega sveta reke Save. Porečje je tudi po geološki sestavi izredno pestro z značilnimi območji krasa.



Slika 1: Porečje reke Bosne z lokacijami vodomernih in padavinskih postaj (Vir hidrografske podlage z razvodnico in vodomernimi postajami: ZV in FHMZ, 2012).

Povirje reke Bosne opredeljujejo Vrelo Bosne (4 km<sup>2</sup>) in trije vodotoki: Željeznica (480 km<sup>2</sup>), Zujevina (200 km<sup>2</sup>) in Miljacka (410 km<sup>2</sup>). Dolvodno se z leve priključita Fojnica (760 km<sup>2</sup>) in Lašva (960 km<sup>2</sup>), v Zavidovičih pa z desne potok Krivaja (1500 km<sup>2</sup>). V Doboju v reko Bosno z leve strani priteka Usora (850 km<sup>2</sup>), z desne pa reka Spreča (1950 km<sup>2</sup>). Na odseku Bosne, med vtokom Miljacke in Krivaje, v Bosno z desne vteka večje število manjših pritokov prispevne površine do 200 km<sup>2</sup>, ki skupaj tvorijo prispevno površino velikosti približno 1.700 km<sup>2</sup>. Skupna površina porečja desnega brega Bosne je 6.900 km<sup>2</sup> (približno 65 % celotnega porečja).

### Vremensko dogajanje maja 2014 na Balkanu

Poplave na Balkanu maja 2014 so bile posledica izjemnih padavin, nastalih zaradi obsežnega območja nizkega zračnega pritiska, ki se je pomikalo z južnega Jadrana preko Bosne in Hercegovine ter Srbije na Madžarsko. Območje poplav je bilo že pred samim poplavnim dogodkom zasičeno z vodo, saj je na območju Republike Srbije in v Bosni in Hercegovini že v aprilu padla velika količina dežja, na meteoroloških postajah Banja Luka, Doboj in Prijedor celo maksimalna mesečna količina po letu 1961 (Banja Luka 214 mm, Doboj 177,4 mm in Prijedor 163,8 mm). Na nekaterih meteoroloških postajah je padla tudi več kot dvakratna dolgoletna povprečna količina padavin za mesec april. V mesecu aprilu je območje Bosne in Hercegovine prešlo kar sedem ciklonov, že 2. maja pa se je formiral nov višinski ciklon v Genovskem zalivu, ki je predvsem na severu 3. in 4. maja povzročil obilne padavine (RHMZ RS, 2014).

V ponedeljek, 12. maja 2014, je prizadeto območje prešla hladna fronta, ki je s seboj prinesla hladnejši zrak, zlasti v višje plasti atmosfere. Do srede zjutraj se je nad območjem oblikovalo plitvo območje nizkega zračnega tlaka, ki se je začelo poglobljati (DHMZ, 2014). Z zahoda je začel na to območje z višinskimi tokovi dotekati vlažen in nestabilen zrak. Z dotekanjem mrzlega zraka čez Alpe se je v sredo, 14. maja, oblikoval obsežen ciklon s središčem nad BiH. Ciklon je dosegel svoj vrhunec 15. in 16. maja, ko se je center pomaknil proti severovzhodu, oslabil pa je šele v soboto, 17. maja. Posledica so bile dolgotrajne padavine, ki so zajele območja v BiH, Hrvaški in Srbiji. Ciklon je črpal vlago iz Sredozemlja in Črnega morja, hladnejši zrak pa je v višjih predelih povzročal sneg. Procesi v globokem ciklonu so bili zelo intenzivni, ker je bila os ciklona postavljena navpično. Poleg tega je ciklon bolj ali manj miroval, 15. maja pa se je celo premaknil proti zahodu. Razen ekstremne količine padavin so stanje poslabšale nenavadno nizke temperature za ta letni čas in zelo močan veter (Renko, 2014). Na območju osrednjega Balkana se je omenjeni ciklon zadrževal kar tri dni. Hkrati je nad zahodno in delom srednje Evrope vztrajalo območje visokega zračnega tlaka. Preglednica 1 prikazuje podatke o dnevni količinah padavin in vsote dnevni padavin za izbrana obdobja na padavinskih postajah porečja reke Bosne (slika 1).

Intenziteta padavin, ki so zajele porečje Bosne, je bila dokaj zmerna. Podatki urnih izmerjenih vrednosti padavin 15. maja v Zenici nihajo med 0,7 in 10,7 mm. Največjo intenziteto urnih padavin je sicer imelo Sarajevo, kjer je 14. maja v eni uri padlo 11,4 mm dežja. Deževalo je ves čas, od 13. maja ob 12:00 uri do 16. maja zjutraj, padavine vmes niso prenehale. Potem je 16. maja čez dan in 17. maja deževalo le še z zelo zmerno intenziteto. V Tuzli je v 62 urah nepretrganega deževja padlo 229,2 mm padavin. Verjetno je, da se je med 13. in 16. majem talil tudi sneg, ki je v planinah zapadel še aprila oziroma v predhodnih dneh. Možno je tudi, da so bile ponekod dejanske padavine večje od izmerjenih, saj ob močnih vetrovih deževeri ne zajamejo vseh padavin.

Preglednica 1: Dnevne količine padavin in vsote dnevnih padavin za izbrana obdobja na posameznih postajah v mm (vir: FHMZ BiH, RHMZ RS, 2014).

Postaja	Sarajevo-Bjelave	Olovo	Zenica	Zavidovići	Gradačac	Tuzla	Modrac
Datum	[mm]						
1.4. - 30.4. 2014	97	136,5	19,6	170		192,6	
1.5. - 11. 5. 2014	32	27,1	16,5	25,8	91,8	55	
12. 5. 2014	14,1	15,3	4,4	0,8	3,3	4,9	
13. 5. 2014	34,6	5,5	30,2	12,3	21,1	20,6	52
14. 5. 2014	71,3	72,9	53,7	57,1	68,3	92,3	79,5
15. 5. 2014	18	65,8	38,7	33,1	85,1	103,8	76,6
16. 5. 2014	4,6	8	11,4	9	13,6	28,6	14,4
17. 5. 2014	2,4	4,4	3,3	2,4	3,3	2,5	
13.5. 2014 16:00- 16.5. 2014 6:00	116,5	150,4	127,1	107,8	178	229,2	
12.5.-17.5. 2014	145	171,9	141,7	114,7	194,7	252,7	222,5
1. 5.-17.5. 2014	177	156,6	274,6	113,9	382,8	247,8	
1.4.-17. 5. 2014	274	335,5	293,2	310,5	286,5	500,3	
Povprečje 1961-1990	932		782			894	

### Verjetnostna analiza večdnevnih padavin

Povratna doba dogodka na obravnavanih padavinskih postajah v BiH je bila ocenjena s primerjavo vrednosti verjetnostne analize maksimalnih večdnevnih padavin v obdobju 1960–2013 oziroma 2000–2010 in vrednosti maksimalnih večdnevnih padavin aprila in maja 2014 (Anzeljc in Đurović, 2014). Z izrisom izolinij povratnih dob za posamezno trajanje maksimalnih večdnevnih padavin na porečju reke Bosne je prikazana tudi ocena prostorske razsežnosti jakosti padavinskega dogodka (slika 2). Pri analizi so bila uporabljena poročila ter podatki o padavinah, ki sta jih poslala FHMZ BiH in RHMZ RS, ter nekateri padavinski podatki objavljeni na spletnih straneh (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014).

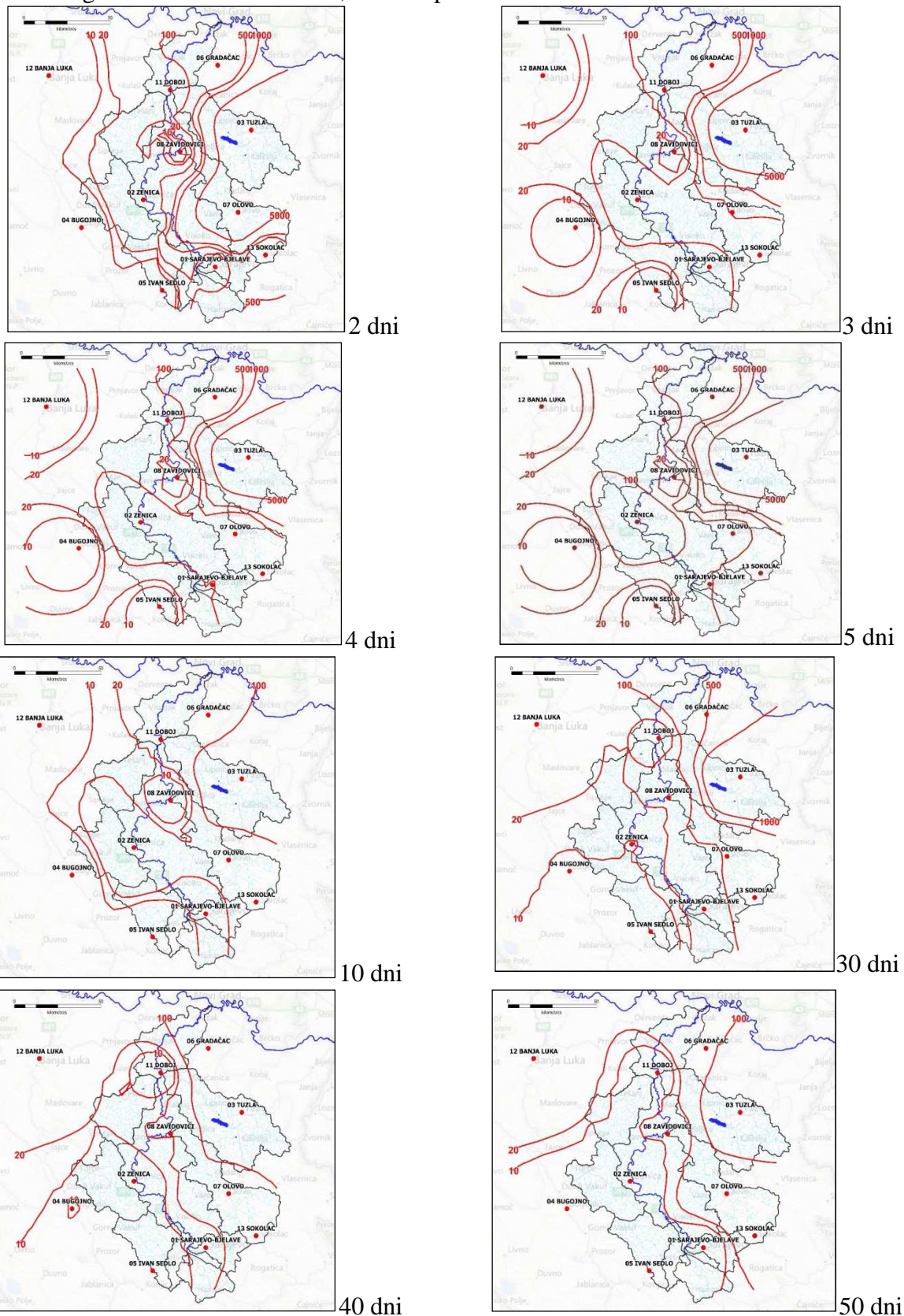
Za vsako leto v obdobju 1960–2013 so bile določene maksimalne večdnevne padavine s trajanjem od 1 do 60 dni. Vrednosti povratnih dob za posamezna trajanja padavin so bila določena po Gumbelovi porazdelitveni funkciji. Izbrane so bile povratne dobe 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1.000, 2.000 in 10.000 let.

V Tuzli je večina večdnevnih padavin dosegla povratno dobo več kot 500 let. V Olovem so 2- in 3-dnevne padavine imele več kot 500-letno povratno dobo, 1-, 4- in 30-dnevne padavine pa 100-letno povratno dobo. Padavine vseh drugih trajanj so imele povratno dobo višjo od 20 let. V Doboju je imela večina večdnevnih padavin povratno dobo med 20 in 50 let, 3-dnevne pa več kot 100 let. Podobno kot v Doboju so tudi v Sarajevu in Zenici večdnevne padavine imele večinoma več kot 20-letno povratno dobo, 3- do 7-dnevne pa celo več kot 100-letno povratno dobo.

Vrednosti povratnih dob na padavinskih postajah so bile prostorsko interpolirane po metodi utežne inverzne razdalje (angl. *inverse distance weighting*) z velikostjo mrežne celice 5 km, inverzno razdaljo na četrto potenco in z upoštevanjem štirih sosednjih postaj (Anzeljc in Đurović, 2014).

V Tuzli so maksimalne 3-dnevne padavine nastopile 14. maja, 4-dnevne 13. maja in 5-dnevne padavine 12. maja 2014, v Olovu so 2-dnevne 500-letne padavine nastopile 14.

maja 2014, v Sarajevu 4-dnevne 100-letne padavine 12. maja 2014 in v Zenici 13. maja 2014. Glede na padavine, ki so zajele več kot polovico porečja reke Bosne, je bila verjetnost dogodka med 100 in 200 let, lokalno pa tudi več kot 500 let.



Slika 2: Izolinije povratnih dob maksimalnih padavin izbranih trajanj aprila in maja 2014 na porečju reke Bosne.

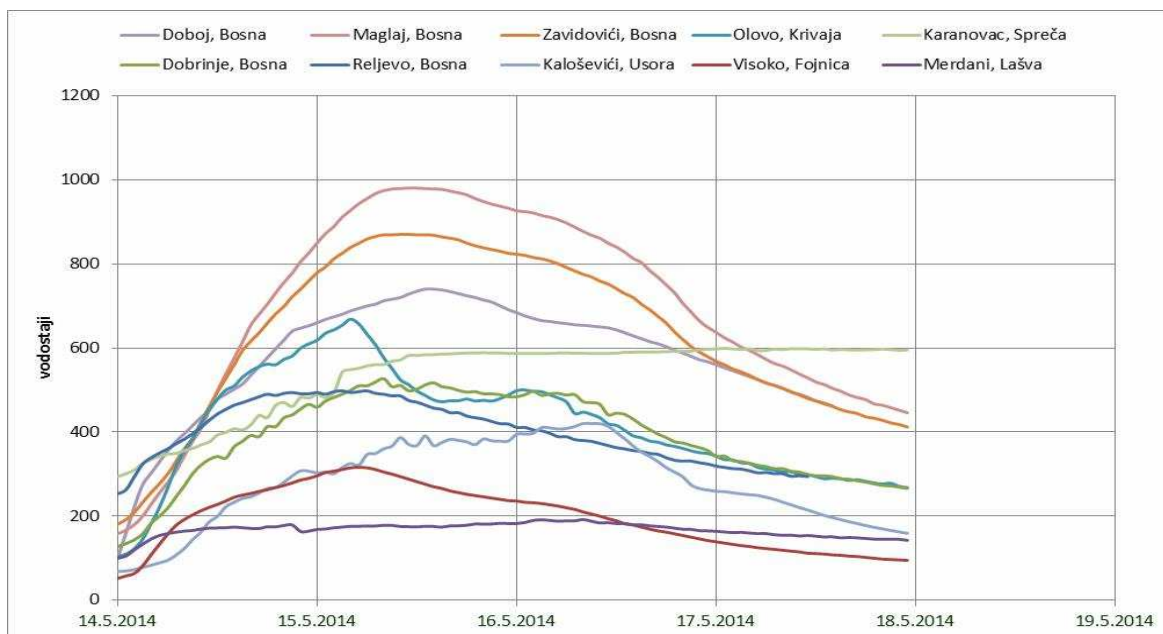
## Opis poplavnega dogodka

Izjemen dogodek maja 2014 na reki Bosni je v posamičnih elementih primerljiv z vsemi izrednimi dogodki poplav, plazov in drobirskih tokov, kot jih poznamo v Sloveniji iz let 1990, 2000, 2007 in 2010 (Kobold, 2011). Dogodki v Sloveniji so bili sicer intenzivni, ampak kratkotrajni z izjemo leta 2000 (Mikoš et al., 2002). Dogodek v Bosni je bil celo intenzivnejši, predvsem pa dolgotrajen. Dolgotrajne in intenzivne padavine so sprožile številne zemeljske plazove ter drobirske tokove. Ti so bili najhujši na območju Željeznog polja. Zemeljske plazove so zasledili tudi na drugih območjih porečja. Analiza RHMZ RS (2014) kaže tudi na izredno velike padavine v osrednjem delu porečja reke Bosne in v spodnjem vzhodnem delu porečja. Sočasno so relativno velike padavine zajele tudi Slavonijo, kar je povzročilo izredne pretoke na manjših vodotokih, ki se neposredno izlivajo v reko Savo (Abdulaj et al., 2014).

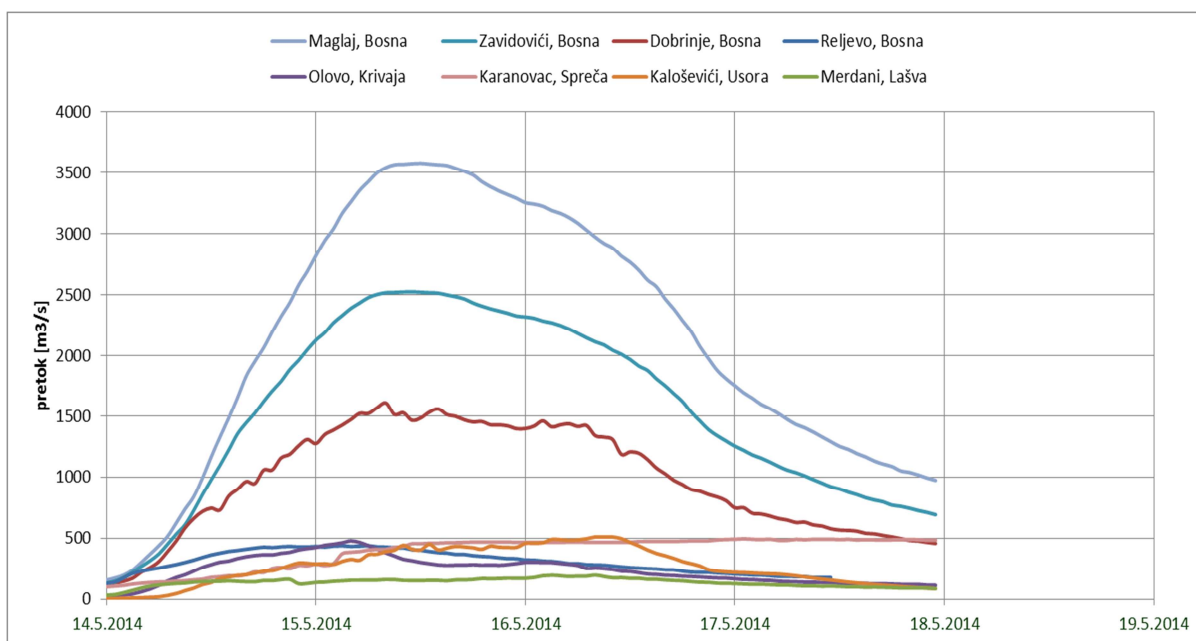
Poplava, ki se je začela oblikovati že v zgornjem delu porečja 13. maja 2014, je dosegla izredno velike vodostaje (preglednica 2). Na zgornjem delu porečja sicer niso presegli vrednosti, doseženih pri izmerjenih zgodovinskih dogodkih. Do sedaj znane maksimalne vrednosti so bile presežene dolvodno od Zenice. V Zenici je bil maksimum presežen za 70 cm, v Doboju za 150 cm. Če se velike količine vode ne bi razlile po poplavnih območjih, bi bile konice poplav še višje (Kupusović, 2014). Bolj kot višina vode pa preseneča njeno trajanje. Tako je v Doboju pretok večji od predhodnega največjega trajal kar dva dni in tri ure (slika 3). Izmerjene pretoke, ki so jih za nekatere vodomerne postaje RHMZ RS in FHMZ BiH zabeležile med 14. in 18. majem 2014, podaja slika 4. Veliko vodomernih postaj pa je bilo med poplavo poškodovanih, zato so podatki izgubljeni.

Preglednica 2: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Republiki Srbski (RHMZ RS, 2014).

Reka	Hidrološka postaja	Kota "0" [m n.v.]	Maks. pred majem 2014		Maj 2014	
			Vodostaj [cm]	Datum	Vodostaj [cm]	Datum
Sava	Gradiška	85,39	855	19. 3. 1977	808	20. 5. 2014
	Srbac	82,81	1024	31. 10. 1974	1012	18. 5. 2014
	Rača	75,3	856		<b>950</b>	17. 5. 2014
Una	Novi Grad - dol.	116,06	576	9. 10. 1955	572	17. 5. 2014
Sana	Prijedor	129,68	511	9. 10. 1955	<b>543</b>	17. 5. 2014
Vrbas	Delibašino selo	141,38	687	23. 9. 1996	<b>837</b>	16. 5. 2014
Vrbas	Banja Luka	151,21	520	23. 9. 1996	<b>632</b>	16. 5. 2014
Vrbanja	Vrbanja	166,22	527	22. 6. 2010	<b>592</b>	16. 5. 2014
Bosna	Doboj	137,01	578	13. 5. 1965	<b>721</b>	15.- 16. 5. 2014



Slika 3: Gladine poplavnih valov na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

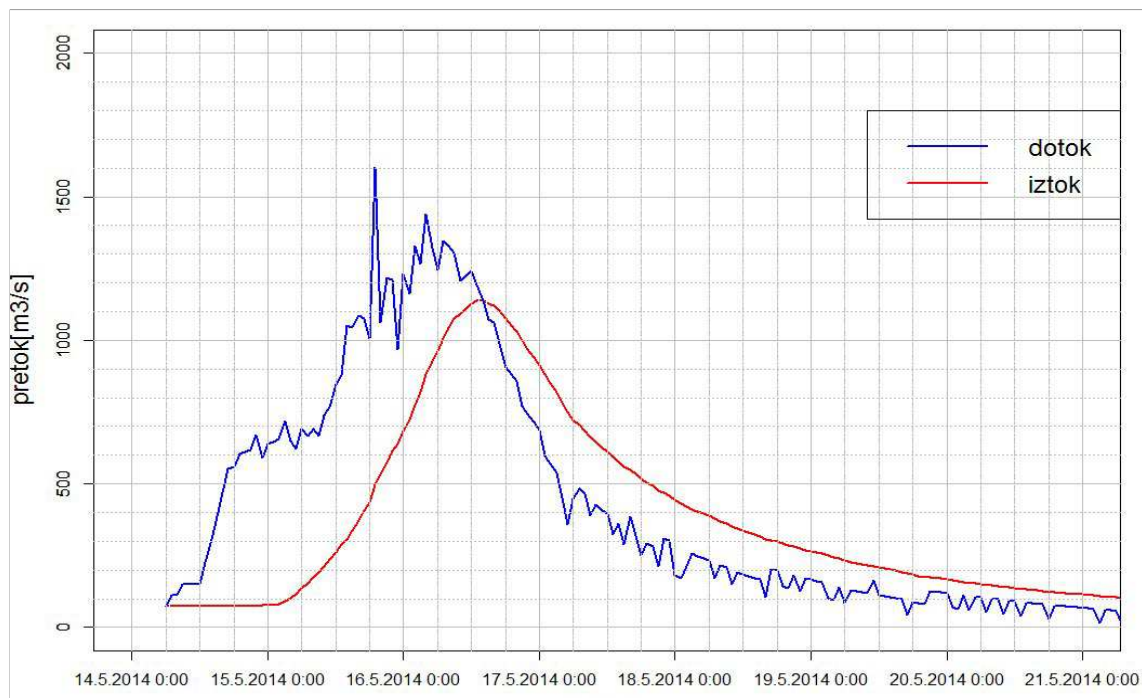


Slika 4: Pretoki na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

Iz slike 3 in pripadajočih podatkov (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014) lahko razberemo čas dvigovanja gladine poplavnega vala, verjetne vplive zadrževanja vode na poplavnih ravninah ter istočasnost nastopa konice poplavnih valov na sotočjih. Zamiki pri pojavu konic so v zgornjem toku reke od 2 do 3 ure. V spodnjem toku je bilo potovanje poplavnega vala podobno kot v zgornjem toku, le da se je pojav največjega pretoka krepko upočasnil zaradi razlivanja vode na poplavna območja. Voda se je v Maglaju začela dvigovati celo prej kot v gorvodnih Zavidovičih. Maksimum je bil v Maglaju dosežen že v

eni uri po doseženem maksimumu v Zavidovičih, v Doboju pa po šestih urah pri sorazmerno enaki razdalji. Reka Krivaja v Olovu je dosegla vrh dve uri pred reko Bosno v Zavidovičih in tako povzročila dvig vala v Maglaju še preden je tja pripotovala najvišja konica vala reke Bosne iz Zavidovičev. V Maglaju je tako konica vala (združena Bosna in Krivaja) trajala kar šest ur.

Na oblikovanje poplavnega vala v Doboju je vplivala tudi pregrada Modrac na Spreči (Tuzlansko jezero). Specifični pretok prispevnega območja nad zadrževalnikom je bil več kot  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  na  $\text{km}^2$ . Pri tem je zanimivo, da so meritve padavin na pregradi pokazale nižje vrednosti kot pa v Zenici. Podatki kažejo maksimalni dotok v zbiralnik Modrac  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  (15. maj 2014 ob 15. uri) in iztok  $1137 \text{ m}^3/\text{s}$  (16. maj 2014 ob 13. uri). Zadrževalnik je zmanjšal maksimalni pretok za 30 % in ga zamaknil za 22 ur (slika 5).



Slika 5: Hidrogram dotoka in iztoka iz zbiralnika Modrac  
(vir podatkov: Spreča d.d. Tuzla, 2014).

### Hidrološki model porečja reke Bosne

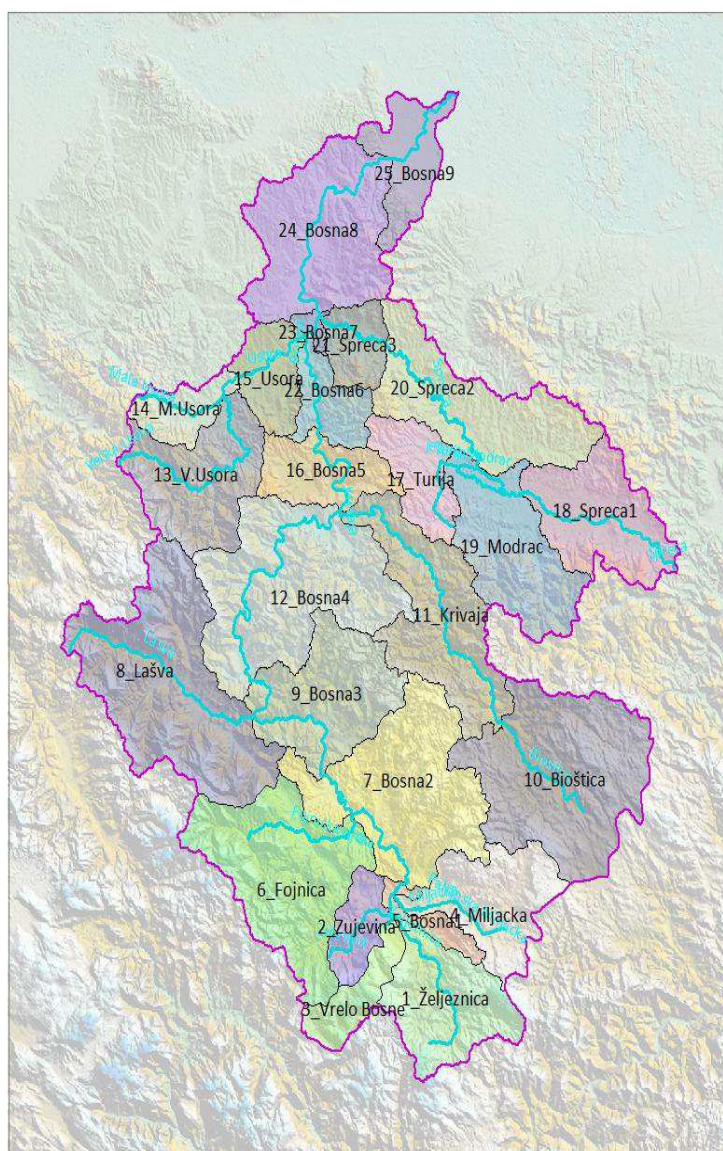
Pretočne hidrograme poplavnega dogodka maja 2014 smo simulirali s pomočjo hidrološkega modela HBV-light. S simulacijo smo analizirali odtočne koeficiente dogodka in določili najbolj verjetne pretoke dolvodno od Maglaja. Hidrološki model HBV-light je delno-porazdeljen konceptualni model za kontinuirano računanje odtoka, ki se uporablja za simulacijo hidroloških dogodkov in izdelavo napovedi. Model je bil razvit na osnovi HBV modela Švedskega inštituta za meteorologijo in hidrologijo na Univerzi v Uppsali leta 1993 z uporabo programskega jezika Microsoft Visual Basic (Seibert in Vis, 2012).

Da bi zagotovili dovolj veliko točnost rezultatov modela tako obsežnega in heterogenega območja, smo celotno porečje Bosne razdelili na podporečja tako, da vsako vsebuje le en velik pritok. Tako je bilo porečje razdeljeno na 25 podporečij s površinami od 30 do  $1.000 \text{ km}^2$  (slika 6). Pri pregledu podatkov smo ugotovili, da so specifični pretoki na Vrelu Bosne 16-krat večji od specifičnih pretokov na sosednjih območjih. To pomeni,



da se v Vrelo Bosne pretaka tudi voda iz kraškega zaledja. Skupna površina porečja reke Bosne z upoštevanjem kraškega zaledja in uporabljenega GIS modela (10.836 km<sup>2</sup>) se zato nekoliko razlikuje od orografsko določenega prispevnega območja (10.420 km<sup>2</sup>) (ZV in FHMZ, 2012).

Vsa podporečja so bila nadalje razdeljena na največ tri višinske cone glede na nadmorsko višino in vegetacijo. Izbrane meje višinskih con so bile: do 700 m, od 700 m do 1400 m in nad 1400 m. Južni del porečja reke Bosne je dokaj gorat, zato imajo podporečja na tem območju po tri cone. Podporečje v ravninskem delu (severni del porečja), kjer nadmorske višine večinoma ne presežejo 700 m, pa ima dve coni. Vsaka cona nadmorske višine pa je bila nato razdeljena še v dve skupini glede na pokrovnost v tako imenovane vegetacijske cone: gozd in polje (ne-gozd).



Slika 6: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji, zajetimi v modelu.

Za zagon modela oziroma za kalibriranje so bili uporabljeni vhodni podatki, pridobljeni od Hidrometeoroloških zavodov Federacije BiH in Republike Srbije:

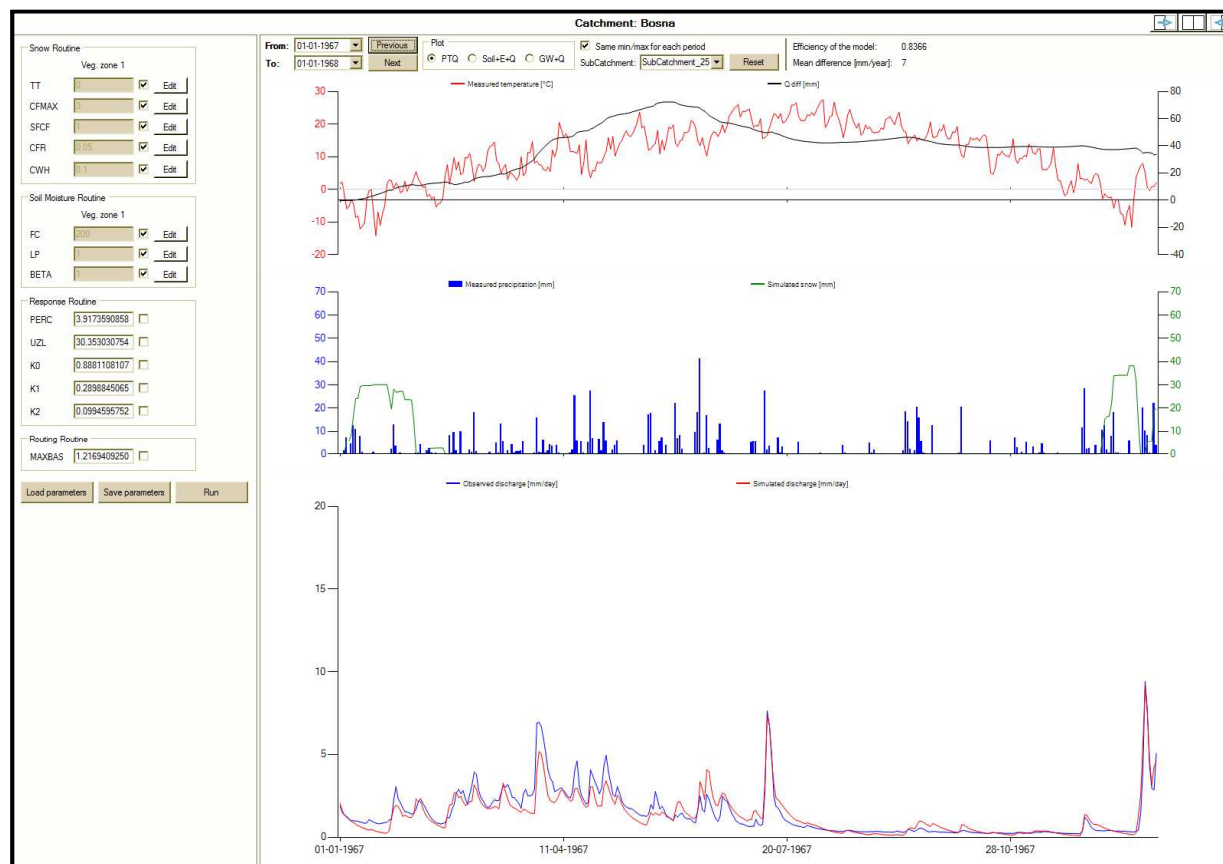
- padavine za enajst postaj,

- temperature za šest postaj,
- pretok za enaintrideset postaj,
- potencialna evapotranspiracija za šest postaj.

V testni fazi smo modelirali s padavinskimi podatki različnih kombinacij vseh postaj glede na razpoložljivost podatkov. Za končno verzijo je bilo izbranih šest postaj, za katere so bili na voljo dnevni in urni podatki o padavinah: Sarajevo-Bjelave, Zenica, Tuzla, Bugojno, Ivan Sedlo in Doboj. Vplivna območja posameznih postaj so bila določena s Thiessenovimi poligoni. Za iste postaje so bili upoštevani tudi podatki o temperaturi zraka in evapotranspiraciji.

Obdobja za umerjanje in preverjanje modela smo izbrali na osnovi pojava velikih pretokov in razpoložljivih podatkov na vseh postajah. Tako smo obdobje od 1. 1. 1964 do 31. 12. 1968 izbrali za obdobje umerjanja, kasnejše obdobje med 1. 1. 1984 in 31. 12. 1988 pa za obdobje preverjanja.

Za umerjanje smo najprej uporabili orodje, ki ga nudi program HBV-light, genetski algoritem GAP. Rezultati umerjanja so enaki za obe obdobji, obdobje kalibracije (1964–1968) in validacije (1984–1988). Koeficienti določenosti in učinkovitosti so izredno dobri za pretoke vzdolž reke Bosne in nekoliko slabši za posamezne pritoke, pri katerih so odtoki padavin zadržani zaradi kraškega značaja ali akumulacije. To so reke Fojnica, Lašva, zgornji tok Krivaje, Usora, Turija in Spreča. Slika 7 prikazuje rezultate simulacije za leto 1967 (rdeča črta: simulirani pretoki; modra črta: merjeni pretoki). Pri prikazovanju rezultatov se zaradi lažjega spremljanja vodne bilance podatki modela skupaj s pretoki prikazujejo v mm na enoto površine.



Slika 7: Kalibracija modela za reko Bosno (rdeča črta: simulirani pretoki; modra črta: merjeni pretoki).

Letni koeficienti odtoka kažejo na precejšen raztros (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Zaradi večje evapotranspiracije lahko pričakujemo postopno zmanjševanje koeficienta po reki navzdol. Večja odstopanja lahko pomenijo tudi neustrezno določene razvodnice, predvsem zaradi krasa. Rezultati modela kažejo, da je prispevna površina Vrela Bosne verjetno podcenjena, Krivaje pri Olovu pa precenjena. Za izboljšanje modela je bilo za umerjanje modela uporabljeno orodje PEST (Doherty, 2012; Doherty, 2005; Lawrence et al., 2009; Zhulu, 2010), s katerim smo dobili boljše rezultate.

Preglednica 3 podaja podatke o verjetnih visokih vodah na postajah reke Bosne in vrednosti, dosežene maja 2014. Verjetne visoke vode povratne dobe od 10 do 100 let so določene v hidroloških študijah RHMZ RS in FHMZ BiH. Visoke vode 500- in 1.000-letne povratne dobe smo določili s pomočjo grafičnega prikaza določenih visokih voda na logaritemski skali, pri čemer smo predpostavili zvezen potek krivulje verjetnostne porazdelitve vzorca.

Glede na podatke, ki jih prikazuje preglednica 3, so pretoki reke Bosne v Maglaju preseglji povratno dobo 500 let, drugod pa več kot 1.000 let. Odočni koeficienti za reko Bosno so se gibali med 0,76 (Bosna Modriča) in 0,91 (Bosna pod vtokom Usore). Odočni koeficient za Bosno v Doboju je bil 0,82.

Preglednica 3: Verjetnosti pojava maksimalnih pretokov na posameznih vodomernih postajah na reki Bosni (Hidrološka študija za BiH, RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

povratna doba [leta]	Modriča	Doboj	Maglaj	Zavidovići	Raspotočje	Dobrinje	Reljevo
	[m <sup>3</sup> /s]						
10	2214	2091	1508	1164	904	600	345
20	2551	2420	1764	1320	1039	717	400
50	2990	2795	2120	1520	1220	880	464
100	3318	3087	2479	1673	1360	1058	510
500*	4148	3936	3272	2091	1700	1375	637
1.000*	4645	4321	3718	2342	1904	1534	714
simulacija 2014 – teoretično najvišje konice vala	4875	4831	3498	2479	2265	1663	820

\*določeno iz odnosa verjetnih visokih voda do 100-letne povratne dobe s pomočjo logaritemske skale

## Zaključki

Izvedene analize, zbir podatkov od leta 1961 do maja 2014, izdelava baze podatkov o pretokih, padavinah in temperaturah na porečju reke Bosne ter hidrološki model so samo hiter vpogled v kompleksen in pester proces poplav reke Bosne. Celostna analiza zahteva tudi zbiranje vrste drugih podatkov o škodi in vodarskih ureditvah, ki so bile izvedene v porečju v zadnjih stotih letih. Vsekakor verjetnost pojava presega 1.000-letno povratno dobo.

Hidrološki model reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira vodno bilanco vodotoka in daje osnovo za nadaljnji razvoj. Model je že sedaj uporaben za izdelavo napovedi poplavnih pretokov reke Bosne v spodnjem toku. Ker je na porečju Bosne prisoten velik lokalni orografski vpliv na padavine, bi bilo možno hidrološki model občutno izboljšati, če bi bilo na razpolago več podatkov o padavinah.

Vsaka katastrofalna poplava je enkratni pojav s posebnimi karakteristikami in razvojem. Poplave reke Bosne maja 2014 so posledica večdnevni neprekinjenih padavin, ki so povzročile izredno visoke specifične pretoke in koeficient odtoka blizu vrednosti 1. Pozitivna okoliščina je, da maksimalni pretoki posameznih pritokov niso sovpadali z največjimi pretoki v strugi reke Save, so pa podaljšali trajanje poplavnega vala. Dogodek zahteva podrobnejšo nadaljnjo analizo posameznih pritokov, še posebej analizo baze podatkov, zbrane pri upravljanju z zbiralnikom Modrac.

## Literatura

- Abdulaj R., Miković N., Oskoruš D. in Vujnović T. (2014). Velike vode donjega toka rijeke Save tijekom svibnja 2014. Hrvatska vodoprivreda 207, 14–16.
- DHMZ (2014). Stoljetna poplava na donjem toku rijeke Save. Državni hidrometeorološki zavod. [http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava\\_sava\\_2014.pdf](http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf) (20. 5. 2014)
- ARSO, ULFGG in IzVRS (2014). Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne. Poročilo. [http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Koncno%20porocilo\\_Analiza%20poplave%20maja%202014%20za%20porecje%20reke%20Bosne.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Koncno%20porocilo_Analiza%20poplave%20maja%202014%20za%20porecje%20reke%20Bosne.pdf)
- Anzeljc, D., Đurović, B. (2014). Analiza večdnevni padavin, ki so maja 2014 povzročile poplave na porečju Bosne. Poročilo IzVRS.
- Doherty, J. (2005). PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual, 5th Edition. Brisbane, Water Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (7. 4. 2013)
- Doherty, J. (2012). Addendum to the PEST Manual. Brisbane, Australia, Water Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (2. 4. 2013)
- Kobold, M. (2011). Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Ujma 25, 48–56.
- Kupusović T. (2014). Poplave, akumulacije, hidroenergija i okoliš, sa izazovima klimatskih promjena, predstavitev, Doboj, Javna tribuna (15.7.2014)
- Lawrence, D., Haddeland, I., Langsholt, E. (2009). Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Directorate: 44 p. <http://195.18.194.201/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Report%202009/report1-09.pdf> (2. 5. 2013)
- Mikoš, M., Vidmar, A., Šraj, M., Kobold, M., Sušnik, M., Uhan, J., Pezdrič, J., Brilly, M. (2002). Hidrološke analize na plazu Stože pod Mangartom. Ujma 16, 326–334.
- Renko T. (2014). Rekordne količine kiša u Slavoniji i regiji. Hrvatska vodoprivreda 207, 12–13.
- RHMZ RS (2014). Meteorološki i hidrološki aspekti poplava u Republici Srpskoj, maj 2014 (Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014). Republički hidrometeorološki zavod RS. [http://www.rHMZ\\_RS.com/assets/images/meteorologija/](http://www.rHMZ_RS.com/assets/images/meteorologija/) (19. 12. 2014)
- Seibert, J., Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrology and Earth System Sciences 16, 11, 3315–3325. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3315/2012/hess-16-3315-2012.pdf> (21. 3. 2013)
- Spreča d.d. Tuzla (2014). Javno preduzeće za vodoprivrednu djelatnost »Spreča« d.d. Tuzla. Podatki o pretokih, vodostajih in padavinah na lokaciji HE Modrac za obdobje februar–maj 2014.
- Zhulu, L. (2010). Getting Started with PEST. Athens, The University of Georgia: 28 p. <http://www.ndsu.edu/pubweb/~zhulin/pdf/teaching/starting%20pest.pdf> (3. 4. 2013)
- ZV in FHMZ (2012). Hidrološka studija površinskih voda Bosne i Hercegovine, Sliv rijeke Bosne. Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, Federalni Hidrometeorološki Zavod.