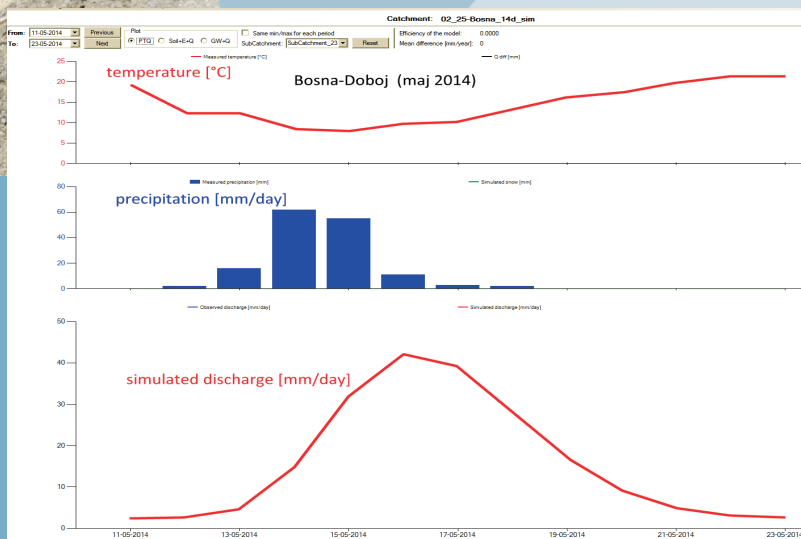




Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne

Poročilo





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

POROČILO

Strokovna ekipa:

Agencija Republike Slovenije za okolje:

Janez Kastelic, univ. dipl. inž. gozd.

Dr. Mira Kobold, univ. dipl. fiz.

Mojca Sušnik, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo:

Prof. dr. Mitja Brilly, univ. dipl. inž. grad.

Mag. Andrej Vidmar, univ. dipl. inž. grad.

Dr. Lidija Globevnik, univ. dipl. inž. grad.

Mag. Maja Koprivšek, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

Matej Sečnik, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

Katarina Zabret, univ. dipl. inž. grad.

Izdelava kart obsega poplav 2014 Gašper Šubelj, TC Vode

Inštitut za vode Republike Slovenije:

Blažo Đurović, univ. dipl. inž. grad.

Darko Anzeljc, univ. dipl. inž. grad.

Ljubljana, oktober 2014

KAZALO VSEBINE

POVZETEK	10
SUMMARY	12
1 UVOD	14
2 POREČJE REKE BOSNE.....	16
3 OPIS VREMENSKEGA DOGAJANJA V MAJU 2014	17
3.1 Regionalna meteorološka situacija in vremenske razmere nad Bosno in Hercegovino	17
3.2 Pregled zabeleženih količin padavin na padavinskih postajah porečja Bosne	23
4 HIDROLOŠKI OPIS	24
4.1 Opis hidroloških razmer maja 2014 na širšem območju	24
4.2 Opis hidroloških razmer na reki Bosni maja 2014.....	27
4.3 Zabeleženi maksimalni vodostaji in pretoki reke Bosne, verjetnostna analiza in poplavni valovi	31
5 VERJETNOSTNA ANALIZA VEČDNEVNIH PADAVIN MAJA 2014.....	35
5.1 Uporabljeni podatki in metoda dela	35
5.2 Rezultati.....	39
6 HIDROLOŠKI MODEL REKE BOSNE in SIMULACIJA DOGODKA MAJA 2014	44
6.1 Opis uporabljenih podatkov in metoda dela.....	44
6.1.1 Izdelava modela	44
6.1.2 Vhodni podatki	49
6.1.3 Umerjanje in preverjanje modela.....	51
6.2 Rezultati simulacije poplave reke Bosne maja 2014	59
7 OBSEG POPLAV VZDOLŽ REKE BOSNE	67
7.1 Opis uporabljenih podatkov in metoda dela.....	67
7.2 Rezultati – obseg poplav vzdolž reke Bosne v maju 2014.....	69
8 ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA ZA NADALJNE DELO	75
8.1 Ustreznost uporabljenih podatkov o padavinah, negotovosti in vrzeli v analizi padavin	75
8.2 Negotovosti v podatkih za hidrološko modeliranje in vrzeli v modeliranju	76
8.3 Priporočila in predlogi za nadaljnje delo.....	79
8.4 Zaključek.....	80
9 VIRI	82
10 PRILOGE.....	86
PRILOGA 1: Poročilo o ogledu terena.....	87

10.1	Prvi terenski obisk od 9. do 11. junija 2014 - opis poplavnega dogodka	88
10.2	Drugi terenski obisk od 2. do 4. julija 2014 - terenske meritve	91
PRILOGA 2: Opis uporabljenega hidrološkega programa.....		93
10.3	Programski paket »HBV-light«	94
10.3.1	Splošen opis.....	94
10.3.2	Struktura modela.....	96
10.3.3	Vhodni in izhodni podatki modela HBV-light	104
10.3.4	Tipi modela HBV-light.....	105
10.3.5	Kalibracija modela	107

KAZALO ZGOŠČENKE

Koncno porocilo ARSO_ ULFGG_ IzVRS okt2014: Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne

Porocilo IzVRS_avg2014: Analiza večdnevni padavin, ki so maja 2014 povzročile poplave na porečju Bosne; vključno s podatki za analizo in izračuni

Podatki in HBV-Bosna_avg2014: Podatki in HBV model porečja reke Bosne

Bosna_HBV-light_okt2014: posodobitev modela HBV za porečje reke Bosne

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah v Srbiji (vir: OGIMET, 2014).....	19
Preglednica 3.2: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah v Bosni in Hercegovini (vir: OGIMET, 2014).	20
Preglednica 3.3: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah na Hrvaškem (vir: OGIMET, 2014).....	20
Preglednica 3.4: Podrobni podatki o padavinah za postajo Loznica ob reki Drini v Srbiji (vir: OGIMET, 2014).	21
Preglednica 3.5: Dnevne količine padavin in vsote dnevnih padavin za izbrana obdobja na posameznih postajah v mm (vir: FHMZ BiH, RHMZ RS).	23
Preglednica 4.1: Maksimalni vodostaji na porečju Save v maju 2014 (vir: Poročilo Savske komisije, 18.5.2014; podatki so bili v času poročanja neuradni; pri podatkih z ** je vir http://www.hidmet.gov.rs).	25
Preglednica 4.2: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Federaciji Bosne in Hercegovine (vir: Agencija za vodno področje rijeke Save, 2014).....	26
Preglednica 4.3: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Republiki Srbski (vir: RHMZ RS, 2014).	26
Preglednica 4.4: Datum in ura začetka naraščanja pretokov, maksimuma in upadanja pretokov na posameznih vodomernih postajah.....	27
Preglednica 4.5: Maksimalni izmerjeni vodostaji in ocena pretokov na reki Savi in reki Bosni v maju 2014.....	31
Preglednica 4.6: Odnos med verjetnimi maksimalnimi pretoki na VP Modriča in VP Doboj.....	33
Preglednica 5.1: Opis padavinskih postaj, za katere so se določile povratne dobe posameznih trajanj padavin (vir podatkov: FHMZ BiH, RHMZ RS, spletni podatki).	36
Preglednica 5.2: Velikosti dnevnih padavin na padavinskih postajah v aprilu in maju 2014 (vir podatkov: FHMZ BiH, RHMZ RS, spletni podatki).	37
Preglednica 5.3: Razporeditev padavin na padavinskih postajah po izbranih obdobjih v aprilu in maju 2014.....	39
Preglednica 5.4: Vrednosti maksimalnih večdnevnih padavin v aprilu in maju 2014.	40
Preglednica 5.5: Datum začetka maksimalnih večdnevnih padavin v aprilu in maju 2014.....	40
Preglednica 5.6: Ocena povratne dobe večdnevnih padavin v aprilu in maju 2014 (glede na obdobje 1960–2013).	41
Preglednica 5.7: Ocena povratne dobe večdnevnih padavin v aprilu in maju 2014 (glede na obdobje 2000–2010).	41
Preglednica 6.1: Seznam podporečij s prispevnimi površinami v km ² , uporabljenimi v hidrološkem modelu.	44
Preglednica 6.2: Površina podporečij in delež površine podporečja v različnih pasovih nadmorske višine.	46
Preglednica 6.3: Seznam padavinskih in temperaturnih postaj ter postaj evapotranspiracije.....	49

Preglednica 6.4: Podatki o vodomernih postajah, upoštevanih pri izdelavi modela (Hidrološki godišnjak SFRJ, 1986).	50
Preglednica 6.5: Podatki o maksimalnih letnih pretokih na posameznih postajah.	52
Preglednica 6.6: Rezultati umerjanja modela z orodjem HBV (genetski algoritem GAP) 1. 1. 1964–31. 12. 1968 in validacija 1.1.1984–31.12.1988.....	56
Preglednica 6.7: Rezultati umerjanja modela – vodna bilanca za posamezne dele porečja.	57
Preglednica 6.8: Rezultati umerjanja modela z orodjem PEST.	58
Preglednica 6.9: Povprečne dnevne padavine prispevnih površin, simuliranih specifičnih pretokov in odtočni koeficienti za izbrane profile na reki Bosni.	60
Preglednica 6.10: Dnevni povprečni simulirani pretoki na izbranih profilih reke Bosne.	61
Preglednica 6.11: Verjetnosti pojava maksimalnih pretokov na posameznih vodomernih postajah na reki Bosni (vir: Hidrološka študija za BiH, RHMZ RS in FHMZ BIH).	62
Preglednica 7.1: Kote dna reke Bosne glede na oddaljenost od ustja (vtok v Savo) in višine kot stoletne vode določena z modelnimi izračuni.	67
Preglednica 7.2: Časovni potek večanja poplavljenih površin in prostornine poplave med Zavidovići in Modričo.	69
Preglednica 8.1: Razpoložljivost dnevnih podatkov o pretokih za 24 postaj na porečju Bosne.	77
Preglednica 8.2: Razpoložljivost dnevnih podatkov o padavinah in temperaturah na porečju Bosne.	78
Preglednica 10.1: Rezultati meritev ekipe ULFGG.....	92
Preglednica 10.2: Rezultati meritev ekipe RHMZ RS.....	92

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Porečje reke Bosne z lokacijami vodomernih in padavinskih postaj. Hidrografska podlaga z razvodnico in vodomernimi postajami je povzeta po »Hidrološka studija površinskih voda Bosne i Hercegovine, Sliv rijeke Bosne« (ZV in FHMZ, 2012).....	16
Slika 3.1: Napovedan indeks izjemnih padavin v obdobju med 14.5. in 19.5.2014 (vir: ECMWF).....	18
Slika 3.2: Skupna napovedana količina padavin za čas od 14.5.2014 06 UTC do 17.5.2014 06 UTC (vir: ARSO, 2014).	18
Slika 3.3: Prikaz izračunanih 6-urnih količin padavin v mm na območju južne Italije in Balkana med 14. in 16. maj 2014 (CFS-Reanalysis, vir: www.wetterzentrale.de).	22
Slika 4.1: Gladine poplavnih valov na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BIH).....	28
Slika 4.2: Pretoki na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BIH).....	28
Slika 4.3: Diagrama dotoka in iztoka iz zbiralnika Modrac (vir podatkov: Spreča d.d. Tuzla, 2014).	30
Slika 4.4: Nivogrami rek Save v Sremski Mitrovici in Šabcu, Bosne v Doboju in Maglaju ter ostalih pritokov reke Save v času med 1.5.2014 in 26.5.2014 (vir podatkov: RHMZ RS).	30
Slika 4.5: Maksimalni specifični pretoki reke Bosne s stoletno povratno dobo (Zavod za vodoprivredo in Federalni hidrometeorološki zavod, 2012).	32
Slika 4.6: Verjetnost pojava maksimalnih pretokov za VP Modriča (vir: ZV in FHMZ, 2012).	33
Slika 4.7: Hidrogrami pretokov pri poplavi januarja 2010 (FHMZ BIH, 2014).	34
Slika 5.1: Razpored dnevni padavin v aprilu in maju 2014.....	36
Slika 5.2: Izolinije povratnih dob nekaterih izbranih maksimalnih več dnevni padavin v aprilu in maju 2014.....	43
Slika 6.1: Kraško prispevno območje Vrele Bosne, določeno glede na geologijo in specifične pretoke na Vrelu Bosne.	45
Slika 6.2: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji, zajetimi v modelu.	46
Slika 6.3: Vegetacijske cone na območju porečja reke Bosne.....	47
Slika 6.4: Višinske cone porečja reke Bosne.....	48
Slika 6.5: Upoštevanje snega v modelu.....	48
Slika 6.6: Porečje reke Bosne s prikazanimi padavinskimi postajami in s Thiessenovimi poligoni.	50
Slika 6.7: Kalibracija modela za reko Bosno.	55
Slika 6.8: Simulirani hidrogrami pretokov na reki Bosni v maju 2014.....	61
Slika 6.9: Simulirani hidrogrami pretokov v maju 2014 na pritokih reke Bosne.	62
Slika 6.10: Krivulja odnosa med konicami simuliranih hidrogramov glede na velikosti prispevni površin.....	63
Slika 6.11: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki na VP Doboju na reki Bosni.	64
Slika 6.12: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Reljevo na reki Bosni.	64

Slika 6.13: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Zavidovići na reki Bosni.	65
Slika 6.14: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Maglaj na reki Bosni.	65
Slika 6.15: Konsumpcijske krivulje prostornin simuliranega poplavnega vala iz dnevni vrednosti padavin na izbranih profilih reke Bosne (datum označen kot MMDDLLLL).....	66
Slika 7.1: Prikaz ocene največjega obsega poplav na digitalnem modelu reliefa (razmerje prikaza dolžin proti višinam je 1:5).....	70
Slika 7.2: Obseg poplav dne 15.5.2014 do profila pri Modrići.	71
Slika 7.3: Interpretacija posnetka satelita Aqua 19.5.2014 (desni posnetek) in istega obdobja leta prej (18.5.2013).	72
Slika 7.4: Posnetek vidnega spektra Landsat 8 pred in po poplavnem dogodku (levo: 6.5 2014; desno: 22.5.2014). Vir: NASA Landsat 8, 2014 – via ESRI ArcGIS Online (imagery.arcgisonline.com). ..	73
Slika 7.5: Obseg poplav oziroma večjih vodnih površin (dne 22.5.2014). Vir: NASA Landsat 8, 22 May 2014 – via ESRI ArcGIS Online, layer produced by GDI (Flood Analysis Landsat 8; http://poplave.gdi.net).	74
Slika 10.1: Člani slovenske skupine strokovnjakov.	88
Slika 10.2: Željezno polje – posledice drobirskega toka.	89
Slika 10.3: Željezno polje - plaz.....	89
Slika 10.4: Ogled sanacije nasipa pri Modrići.	90
Slika 10.5: Posledice poplav v Šamcu.	90
Slika 10.6: Priprave za meritve podslapja na pregradi Modrac.....	91
Slika 10.7: Meritve pretokov z obema inštrumentoma na reki Spreči.....	91
Slika 10.8: Meritve batimetrije dna podslapja pod pregrado Modrac.....	91
Slika 10.9: Okno modela HBV-light.....	95
Slika 10.10: Prikaz razdelitve povodja (Primožič, 2007, str. 9).....	96
Slika 10.11: Shematični prikaz računskih postopkov modela (HBV-light Help).....	97
Slika 10.12: Shema računskega postopka za sneg (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 965).	99
Slika 10.13: Razdelitev skupnega vnosa vode v tla po enačbi 4 (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).	100
Slika 10.14: Vpliv velikosti parametra BETA na odtočni količnik C (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 966).	100
Slika 10.15: Linearna redukcija evapotranspiracije (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).....	101
Slika 10.16: Standardni tip modela HBV-light z dvema rezervoarjema.....	102
Slika 10.17: Transformacija odtoka s filter tehniko s trikotno porazdelitvijo uteži.....	104
Slika 10.18: Možni tipi modela HBV-light (HBV-light Help).	106

POVZETEK

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. Območje poplav je bilo že pred samim poplavnim dogodkom zasičeno z vodo, saj je na območju Republike Srbske v Bosni in Hercegovini že v mesecu aprilu padla velika količina dežja. Prvi izračuni kratkotrajnih padavin, ki so bili na razpolago takoj po dogodku na spletnih straneh, so pokazali intenziteto preko 40 mm/6h med 14. in 15. majem 2014. Poplave so prizadele območja na Hrvaškem, Bosni in Hercegovini ter Srbiji ne le na reki Savi, temveč tudi na njenih pritokih.

Slovenska vlada je sprejela odločitev, da pomaga Bosni in Hercegovini tudi z analizo poplavnega dogodka na porečju reke Bosne. Prvi terenski obisk z uvodnim sestankom slovenske ekipe in ekip iz Bosne in Hercegovine je potekal med 9. in 11. junijem 2014. Na uvodnem sestanku s predstavniki hidroloških zavodov in vodarskih organizacij obeh entitet BiH smo se dogovorili o načinu sodelovanja ter o obsegu in vrstah podatkov za izdelavo naloge. Skupaj smo si ogledali tudi posledice poplav in zbrali informacije o poteku dogodka. Drugi obisk terena v času med 2. in 4. julijem 2014 je bil posvečen meritvam pretokov z dvema avtomatskima merilcema pretokov. Sodelovale so ekipe ARSO, ULFGG, FHMZ BIH in RHMZ RS. Izmerjeni so bili pretoki Spreče, Usore, Fojnice, Krivaje in reke Bosne v Modriči, Doboju, Maglaju, Zavidovičih, Raspotočju in Reljevu.

Vsaka katastrofalna poplava je enkratni pojav s posebnimi karakteristikami in razvojem. Poplave na porečju reke Bosne maja 2014 so bile posledica večdnevni nepretrganih padavin, ki so povzročile izredno visoke specifične pretoke in koeficiente odtoka. S primerjavo vrednosti verjetnostne analize maksimalnih večdnevni padavin v obdobju 1960–2013 oziroma 2000–2010 in vrednosti maksimalni večdnevni padavin v aprilu in maju 2014, je bila ocenjena povratna doba dogodka na obravnavanih padavinskih postajah v Bosni in Hercegovini. Ugotavljamo, da so v Tuzli skoraj vse več-dnevne padavine dosegle povratno dobo več kot 500 let. V Olovem so dvo in tri-dnevne padavine imela več kot 500-letno povratno dobo, ena, štiri in 30-dnevne pa 100-letno povratno dobo. Vse druge padavine so imele povratno dobo višjo od 20 let. V Doboju je imela večina več-dnevni padavin povratno dobo med 20 in 50 let, tri-dnevna pa več kot 100 let. Podobno kot v Doboju so tudi v Sarajevu in Zenici več dnevne padavine imele večinoma več kot 20 let, tri do sedem-dnevne pa celo več kot 100-letno povratno dobo. Zaključimo lahko, da je glede na padavine, ki so zajele več kot polovico porečja reke Bosne, verjetnost dogodka bila med 100 in 200 let, lokalno pa tudi več kot 500 let.

Hidrološki model reke Bosne je bil razvit z orodjem HBV-Light za potrebe rekonstrukcije poplavnega dogodka maja 2014. Simulirani so pretočni hidrogrami na izbranih profilih vzdolž reke Bosne in na Krivaji, Usori, Spreči ter Lašvi. Rezultat simulacije za reko Bosno v Zavidovičih v času konice poplavnega vala 15. maja 2014 je pokazal, da je bil najvišji pretok 2479 m³/s. Konica vala v Maglaju je po simulaciji dogodka dosegla skoraj 3500 m³/s, Doboju 4830 m³/s in Modriči 4874 m³/s. Na izlivu v reko Savo je reka Bosna dosegla največji pretok 4900 m³/s. Ugotavljamo, da so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli povratno dobo 500 let, drugod pa več kot 1000 let.

Odtočni koeficienti za reko Bosno pod Maglajem so se gibali med 0.70 in 0.91 (odtok med 14. in 17. Majem 2014 glede na padavine 12. do 17. maja 2014). Odtokni koeficient za Bosno v Doboju je bil 0.82. Med 9. in 22. majem 2014 je skozi dolino reke Bosne pri Zavidovičih steklo skoraj 1000 mio m³ vode, pri Maglaju 1389 mio m³, pri Doboju (pod Sprečo) 2032 mio m³ in pri Modriči 2172 mio m³ vode. Poplave so dosegle največji obseg (glede na stanje maksimalnih pretokov) 15. maja 2014 med 12. in 15. uro, ko je bila površina poplave med Zavidoviči in Modričo velika 99 km², prostornina poplavne vode pa 401 mio m³. V času konice poplavnega vala se je v dolini reke Bosne med Zavidoviči in Modričo skoraj cel dan zadrževalo cca 400 mio m³ poplavne vode. To je skoraj enako prostornini v enem dnevu pretekle vode skozi profil pri Modriči. Hidrološki model reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira poplavni dogodek maja 2014 in daje vpogled na vodno bilanco vodotoka. Model je uporaben za izdelavo napovedi poplavnih pretokov reke Bosne tudi v prihodnje. Predlagamo, da se razvije tudi hidravlični model glavnega toka reke Bosne in reke Save. Enak pristop za analizo poplav maja 2014 lahko uporabimo tudi za porečja Une, Vrbasa in Drine.

S to nalogo se večja poznavanje izrednega hidrološkega dogodka na porečju reke Bosne maja 2014, ki je največje porečje v BiH. Z izdelavo hidrološkega modela reke Bosne se vzpostavlja pomemben prenos znanja ter izkušenj Slovenije pri vzpostavljanju sistema spremljanja in napovedovanja poplav v BiH.

SUMMARY

In mid-May 2014 flooding in the Sava river basin occurred, having catastrophic consequences. Due flood 86 people died and estimated damage exceeded one billion Euros. The catchment area was already saturated with water since April due to large amounts of rain. The first calculations of short-term rainfall, which was available immediately after the event on websites, showed the intensity of over 40 mm/6h between 14 and 15 May 2014. Floods affected areas in Croatia, Bosnia and Herzegovina and Serbia, not only on the river Sava but also on its tributaries.

The Slovenian government has decided to help Bosnia and Herzegovina also with an analysis of a flood event in the catchment area of the Bosna river. The first field visit with an introductory meeting of the Slovenian team and teams from Bosnia and Herzegovina took place between 9 and 11 June 2014. At the initial meeting with representatives of hydrological institutions and water management organizations from both entities of Bosnia and Herzegovina, we agreed on arrangements for cooperation and the volume and types of data to conduct the study. We also visited affected areas along the river Bosna and gathered information about the event. The second field visit was between 2 and 4 July 2014. Participating teams ARSO, ULFGG, FHMZ BIH and RHMZ RS jointly performed flow measurements with two automatic samplers. The discharges were measured at the rivers Spreča, Usora, Fojnica and along the river Bosna at Modriča, Doboj, Maglaj, Zavidovići, Raspotočje and Reljevo.

Every catastrophic flood is unique phenomenon with its own characteristics and evolution. Floods on the Bosna catchment in May 2014 happened after continuous precipitation which spanned over five days. Continuous precipitation resulted in extremely high river flows and surface runoffs. With comparison of precipitation maximum values obtained through probability analysis in periods 1960-2013 and 2000-2010 and maximum precipitation values in April and May 2014, the return period of precipitation on meteorological monitoring stations in Bosnia and Herzegovina were assessed. It was found out that in Tuzla almost all multiple-day rainfall reached 500-year return period. In Olov, two and three-day rainfall had more than 500-year return period while one, four and 30-day rainfall had 100-year return period. All other durations had a return period of more than 20 years. In Doboj most of the multi-day precipitation periods had return period between 20 and 50 years. Similarly than in Doboj, multi-day precipitation in Sarajevo and Zenica had mostly more than 20-year return period, three to seven-day rainfall even more than 100 years. It can be concluded that, regarding the rainfall which affected more than half of the catchment area of Bosnia, the probability of an event was between 100 and 200 years, locally even over 500 years.

We built a hydrological model of the river Bosna for the purpose of reconstruction of the flood event in May 2014. The model has been developed with the HBV-Light programme, with which we simulated the flow hydrographs at selected profiles along the river Bosnia and its tributaries, Krivaja, Usora, Spreča and Lašva. The results of the simulation of the hydrograph of the river Bosnia in Zavidovići show that the maximum flow on 15 May 2014 reached 2479 m³/s. In the simulation of the event, the peak discharge at Maglaj reached nearly 3500 m³/s, at Doboj 4830 m³/s and at Modriča 4874 m³/s. At the mouth of the Sava river, the river Bosna reached the maximum flow of 4900 m³/s. We find that the flow of the

river Bosnia in Maglaj exceeded the return period of 500 years, in other parts more than 1000 years.

Between 14 and 17 May, surface runoff coefficients for the river Bosna downstream of Maglaj were between 0.70 and 0.91, as a consequence of precipitation between 12 and 17 May. The surface runoff coefficient in Doboj was at 0.82. Between 9 and 22 May, almost one thousand million m³ of water overflowed the valley at Zavidovići, around 1389 million m³ at Maglaj, 2032 million m³ at Doboj (downstream of Spreča confluence) and 2172 million m³ at Modriča. The floods reached their maximum volume (regarding to the state of maximum flows) on 15 May between 12:00 and 15:00 when total flooded surface was estimated at 99 km², with a volume of 401 million m³. At the time of the flood wave maximum, almost 400 million m³ of flood-water were flooding the valley during the day – the near-equal volume of water flowing through the monitoring profile at Modriča in one day. The hydrological model sufficiently and successfully simulates the flood event of May 2014 and gives an insight to river water balance. The model is also useful for the future predictions of flood levels for the Bosna river. We also suggest to develop the hydrological model of the main flow of the rivers Bosna and Sava. The same methodological approach used for May 2014 flood can be used for the river catchments of Una, Vrbas and Drina as well.

This study improves the understanding of the May 2014 exceptional hydrological event in the Bosna river catchment, the largest catchment in BiH. Hydrological model for the Bosna river establishes an important transfer of Slovenian knowledge and experience in establishing the monitoring and flood forecasting system in BiH.

1 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, Bosni in Hercegovini ter Srbiji. Poplave so se pojavile ne le ob reki Savi, temveč tudi na porečjih njenih pritokov. Poplavljali so Vrbas, Vrbanja, Bosna, Spreča, Usora, Krivaja ter reka Drina. Največ škode je povzročila reka Sava v Brčkem, Orašju in Obrenovcu, reka Bosna v Zavidovičih, Doboju, Maglaju, Modriču in Bosanskem Šamcu, Drina v Bijelini in Zvorniku ter 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 tudi v bodoče. Na sestanku med predstavniki hidroloških in vodarskih strok Slovenije ter Bosne in Hercegovine (BiH) dne 6. junija 2014 je bilo dogovorjeno, da se analizira poplavni dogodek na reki Bosni ter izdelava hidrološki model porečja. V projektu iz Slovenije je poleg Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) sodelovala tudi Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (ULFGG) in Inštitut za vode Republike Slovenije (IzVRS). V projektu sta iz BiH aktivno sodelovala Republički 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 in napovedovanja poplav v BiH.

Na prošnjo RHMZ RS in FHMZ BIH so se v začetku julija opravile tudi simultane hidrološke meritve pretokov reke Bosne s sodobnim ultrazvočnim merilcem pretokov. Na ta način se tudi na področju sodobne hidrometrije med državama prenaša znanje in potrjuje ustreznost protokolov merjenja in spremljanja hidroloških parametrov.

Cilj projekta je bila tudi analiza dosega poplav v maju 2014 in analiza območij zemeljskih plazov s pomočjo daljinsko zaznanih podatkov. Žal so bila v obdobju največjega dosega poplav s sateliti posneta le območja poplav ob reki Savi in na izlivnem delu reke Bosne v Savo. Osrednje dele porečja reke Bosne, kjer so se pojavili tudi večji zemeljski plazovi in drobirski tokovi, je zato treba obdelati s pomočjo drugih metod analize.

Da bi se seznanili z razmerami na terenu in opravili meritve, smo slovenski strokovnjaki obiskali porečje reke Bosne dvakrat, to je od 9. do 11. junija ter 2. do 4. julija 2014. Ob prvem obisku smo se na delovnem sestanku z RHMZ RS in FHMZ BIH srečali tudi s predstavniki vodnogospodarskih in geodetskih služb BiH. Skupaj smo si ogledali poplavljeni območje vzdolž reke Bosne in Spreče ter območje drobirskih tokov in zemeljskih plazov na Željeznem polju. Ob drugem obisku so se izvajale prej omenjene simultane meritve pretokov. Poročilo o obeh obiskih porečja Bosne je v prilogi 1. Strokovnjaki iz BiH so zbrali in nam posredovali vse razpoložljive zgodovinske meteorološke in hidrološke podatke, obstoječe hidrološke študije in digitalne prostorske podatke. Pred začetkom modeliranja smo ves pridobljeni material smiselno uredili v tematske mape, meteorološke in hidrološke podatke

pa zapisali v relacijsko podatkovno bazo ter vzpostavili enoten digitalni sistem prostorskih podatkov.

Informacije o izjemnem meteorološkem in hidrološkem dogodku maja 2014 na zahodnem Balkanu smo pridobili tudi iz poročil objavljenih na spletu, iz strokovnih člankov o poplavah v maju 2014 in iz baz podatkov, ki so dostopne na spletu.

Poročilo je sestavljeno iz več poglavij. Najprej je opisana regionalna meteorološka situacija v maju 2014. Sledi opis vremenskih razmer s pregledom zabeleženih količin padavin na padavinskih postajah v BiH. V četrtem poglavju so podani opisi hidroloških razmer na reki Savi in na reki Bosni. Za razumevanje izjemnosti dogodka so iz nacionalnih hidroloških študij povzeti do sedaj največji zabeleženi vodostaji. V petem in šestem poglavju so opisane metode dela in podani rezultati analize verjetnosti velikosti zabeleženih padavin in pretokov. Opisani so tudi z modelom simulirani hidrogrami pretokov vzdolž reke Bosne ter prostornine visokovodnih valov. S pomočjo zabeleženih najvišjih kot poplavne vode, podatkov o digitalnem modelu terena in interpretacije vodnih površin iz Landsat satelita je bil izdelan približek največjega obsega poplav 15. maja 2014 vzdolž reke Bosne ter obseg poplav sedem dni kasneje.

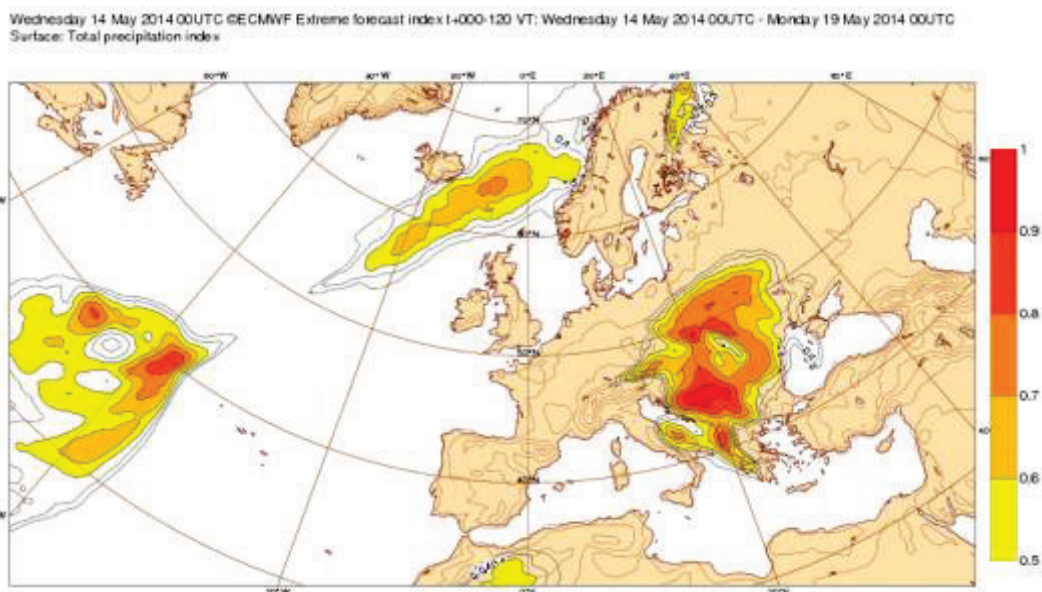
3 OPIS VREMENSKEGA DOGAJANJA V MAJU 2014

3.1 Regionalna meteorološka situacija in vremenske razmere nad Bosno in Hercegovino

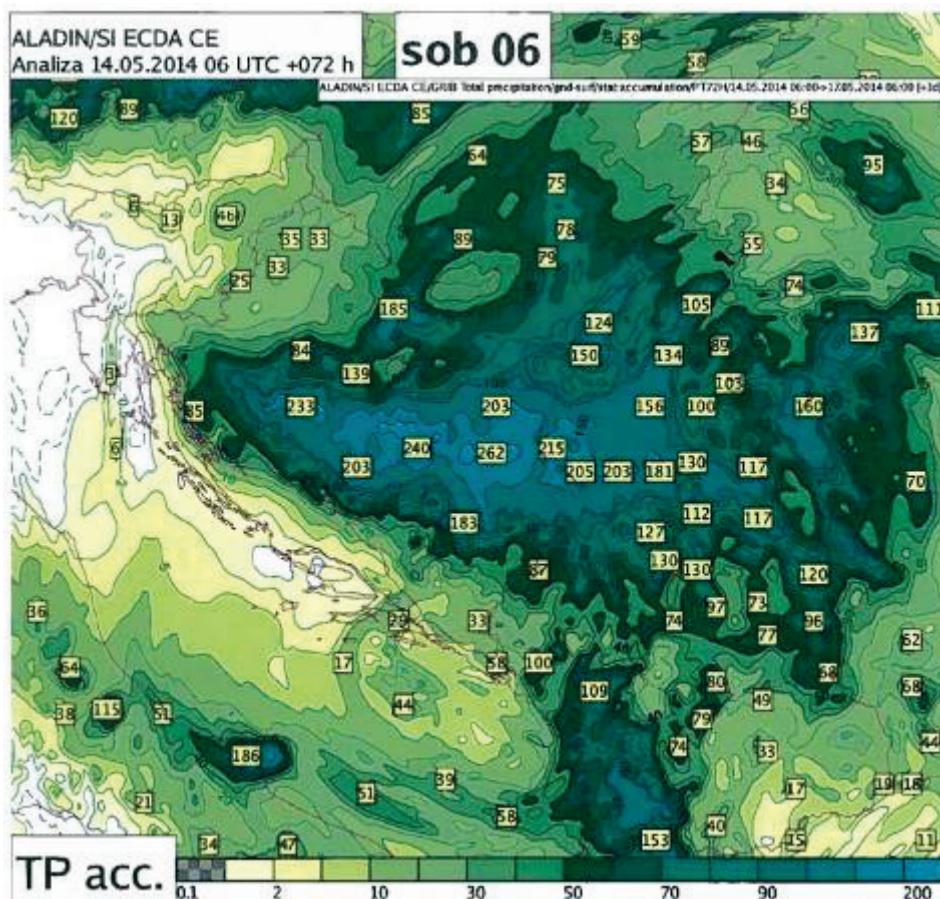
Poplave na Balkanu maja 2014 so posledica izjemnih padavin (Slika 3.1) zaradi obsežnega območja nizkega zračnega pritiska, ki se je pomikalo z južnega Jadrana preko Bosne in Hercegovine in Srbije na Madžarsko. Območje poplav je bilo že pred samim poplavnim dogodkom zasičeno z vodo, saj je na območju Republike Srbske v Bosni in Hercegovini že v mesecu aprilu padla velika količina dežja, na meteoroloških postajah Banja Luka, Doboj in Prijedor celo maksimalna mesečna količina od leta 1961 dalje (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 (7) ciklonov, že 2. maja pa se je formiral nov višinski ciklon v Genovskem zalivu, ki je povzročil obilne padavine 3. in 4. maja, posebno na severu (RHMZ RS, 2014).

V ponedeljek 12. maja 2014 je prizadeto območje prešla hladna fronta, ki je pripeljala 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 (DMHZ, 2014). Z zahoda je začel v to območje z višinskimi tokovi dotekati vlažen in nestabilen zrak. Z dotekanjem mrzlega zraka čez Alpe v sredo 14. maja se je oblikoval obsežen ciklon s središčem nad Bosno in Hercegovino. 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 območje v BiH, Hrvaški in Srbiji. Ciklon je črpal vlago iz Sredozemlja in Črnega morja, hladnejši zrak pa je v višjih predelih povzročal sneg. Procesu v globokem ciklonu so bili zelo intenzivni, ker je bila os ciklona postavljena pokonci. Dodatno je ciklon bolj ali manj miroval, 15. maja 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.

Opisana vremenska situacija je povzročila obilne in dolgotrajne padavine in obsežne poplave na osrednjem Balkanu ter močan veter v srednji Evropi, na severu Balkana ter ob srednjem Jadranu. Izračuni s pomočjo modela ALADIN (Slika 3.2) so za najbolj kritično obdobje med 14.5.2014 06 UTC in 17.5.2014 06 UTC kazali na izjemno obilne padavine. Na območju severne in osrednje Bosne in Hercegovine ter zahodne Srbije je bilo napovedano med 150 in 250 litrov dežja na m² v obdobju 72 ur. Žal se je napoved tudi uresničila. Po poročanju kolegov meteorologov iz Srbije še isti dan naj bi v časovnem intervalu 36 ur padlo več kot 200 litrov dežja na m², kar je nekajkrat več kot je povprečje za cel mesec maj (ARSO, 2014).



Slika 3.1: Napovedan indeks izjemnih padavin v obdobju med 14.5. in 19.5.2014 (vir: ECMWF).



Slika 3.2: Skupna napovedana količina padavin za čas od 14.5.2014 06 UTC do 17.5.2014 06 UTC (vir: ARSO, 2014).

Po podatkih s spletne strani OGIMET so največjo količino padavin v časovnem intervalu med 13.5.2014 06 UTC in 17.5.2014 06 UTC zabeležili na meteorološki postaji Tuzla, in sicer 250 mm. Nad 100 mm padavin v štirih dneh so zabeležili še na naslednjih meteoroloških postajah: Loznica 220 mm, Beograd 190 mm, Smederevska Palanka 150 mm, Novi Sad 145 mm, Zenica 136 mm, Sarajevo 130 mm, Sremska Mitrovica 125 mm, Ivan Sedlo 115 mm,

Osijek 110 mm, Niš 107 mm, Zrenjanin 102 mm in Gradište 100 mm. Največje dnevne količine padavin pa so izmerili na naslednjih meteoroloških postajah: Loznica 110 mm, Valjevo in Beograd 108 mm, Smederevska Palanka in Tuzla 95 mm, vse dne 15. maja 2014 ob 06:00 UTC.

Za primerjavo, največja izmerjena dnevna količina padavin v obdobju 1961–2010 na postaji Loznica je 92.3 mm, na postaji Valjevo 94.7 mm, na postaji Beograd 94 mm in na postaji Smederevska Palanka 129.3 mm. Absolutno največja zabeležena dnevna količina padavin v Srbiji je bila 211.1 mm, izmerjena 10. oktobra leta 1955 v Negotinu, največja mesečna količina padavin pa 308.9 mm junija 1954 v Sremski Mitrovici (RHMZ Srbije, 2014).

Podatke o 24-urnih padavinah za meteorološke postaje v Srbiji, Bosni in Hercegovini ter na Hrvaškem prikazujejo Preglednica 3.1, Preglednica 3.2 in Preglednica 3.3. Natančnejše podatke o padavinah med 13. in 15. majem na postaji Loznica podaja Preglednica 3.4.

Preglednica 3.1: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah v Srbiji (vir: OGIMET, 2014).

Meteorološka postaja	24-urne padavine [mm]				VSOTA (13.5.14 06UTC – 17.5.14 06UTC)
	14.5.2014 06:00 UTC	15.5.2014 06:00 UTC	16.5.2014 06:00 UTC	17.5.2014 06:00 UTC	
Palić	5	27.1	21.5	3.9	57.5
Sombor	0	25	12.3	12.7	50
Novi Sad Rimski S.	0.3	86.9	31.2	26.7	145.1
Zrenjanin	2.3	67.7	19	12.6	101.6
Kikinda	2	42.3	27.6	6.2	78.1
Banatski Karlovac	1.9	59.7	25.4	1.7	88.7
Vršac	1.5	36	----	0.9	38.4
Loznica	50.6	110	52.6	5.4	218.6
Sremska Mitrovica	5.8	69.1	28.7	22.2	125.8
Valjevo	31.8	108.2	43.9	3.1	187
Beograd / Surčin	10.9	94	46	18	168.9
Beograd	20.9	107.9	44.4	17	190.2
Kragujevac	21.5	40.6	27.9	1.2	91.2
Smederevska Palanka	21.1	95.3	30.1	1.7	148.2
Veliko Gradište	6.2	51.4	22.9	2	82.5
Negotin	17.7	40.6	12.6	0.2	71.1
Zlatibor	38.1	37.2	20.8	2.8	98.9
Sjenica	33.9	19.2	4.8	5.8	63.7
Pozega Užička	38.9	----	----	2.6	41.5
Kraljevo	----	48.5	12.4	1.9	62.8
Kopaonik	7	37.5	49.4	4.2	98.1
Kruševac	17.4	18.2	----	0.4	36
Čuprija	22.7	----	35.4	0.9	59
Niš	2.3	74.5	25.9	4.3	107
Leskovac	2.4	41.3	12.5	5.2	61.4
Dimitrovgrad	14.4	16.1	0.4	9.2	40.1
Vranje	23	----	5.9	1	29.9

Preglednica 3.2: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah v Bosni in Hercegovini (vir: OGIMET, 2014).

Meteorološka postaja	24-urne padavine [mm]				VSOTA (13.5.14 06UTC – 17.5.14 06UTC)
	14.5.2014 06:00 UTC	15.5.2014 06:00 UTC	16.5.2014 06:00 UTC	17.5.2014 06:00 UTC	
Bihać	4.1	1	25.4	49.2	79.7
Sanski Most	12.7	8.2	----	----	20.9
Banja Luka	----	21.7	32.1	36	89.8
Bugojno	43.7	10.7	14.3	1.6	70.3
Zenica	47.9	51.8	31.9	4.9	136.5
Gradačac	----	----	----	13.3	13.3
Tuzla	49.2	94.8	89.6	15	248.6
Livno	29.7	2.5	1.2	0.3	33.7
Mostar	43.9	0.2	0.3	0.6	45
Ivan Sedlo	79.7	27.7	7.1	----	114.5
Bjelašnica	33.2	25.2	11.4	2.4	72.2
Sarajevo-Bejelave	72.6	41	13.4	2.9	129.9
Neum	0	0.1	0	0	0.1

Preglednica 3.3: 24-urne padavine in vsota padavin od 13.5.2014 06:00 UTC do 17.5.2014 06:00 UTC na meteoroloških postajah na Hrvaškem (vir: OGIMET, 2014).

Meteorološka postaja	24-urne padavine [mm]				VSOTA (13.5.14 06UTC – 17.5.14 06UTC)
	14.5.2014 06:00 UTC	15.5.2014 06:00 UTC	16.5.2014 06:00 UTC	17.5.2014 06:00 UTC	
Rijeka / Kozala	1.3	Tr	Tr	Tr	1.3
Parg	6.8	0	0.8	1.3	8.9
Karlovac	10.8	Tr	2.5	14.4	27.7
Krapina	2.9	Tr	15.1	8.5	26.5
Puntijarka	6.7	0	7.8	5.3	19.8
Zagreb / Grič	1.8	0	30.3	3.5	35.6
Zagreb / Maksimir	1	Tr	27.1	3.4	31.5
Zagreb / Plešo	3.5	0	2.2	3.9	9.6
Sisak	8.3	0	14.3	13.8	36.4
Varaždin	10.6	0	8.1	13	31.7
Križevci	1.2	0	23.9	7.6	32.7
Bjelovar	2.5	Tr	23.8	13.5	39.8
Bilogora	4.1	0.1	19.7	20	43.9
Daruvar	2.7	3.1	32.7	30.8	69.3
Osijek / Cepin	1.3	47.3	25.3	15.4	89.3
Osijek / Klisa	3.2	53.5	41.6	14.2	112.5
Pula Aerodrome	0	Tr	Tr	0.8	0.8
Pazin	0	1.1	0	0.4	1.5
Mali Lošinj	0	0	0.4	0.8	1.2
Rijeka / Omišalj	6.7	0.1	0.2	0.1	7.1
Rab	Tr	Tr	0.3	Tr	0.3
Senj	2.1	Tr	4.7	0.9	7.7

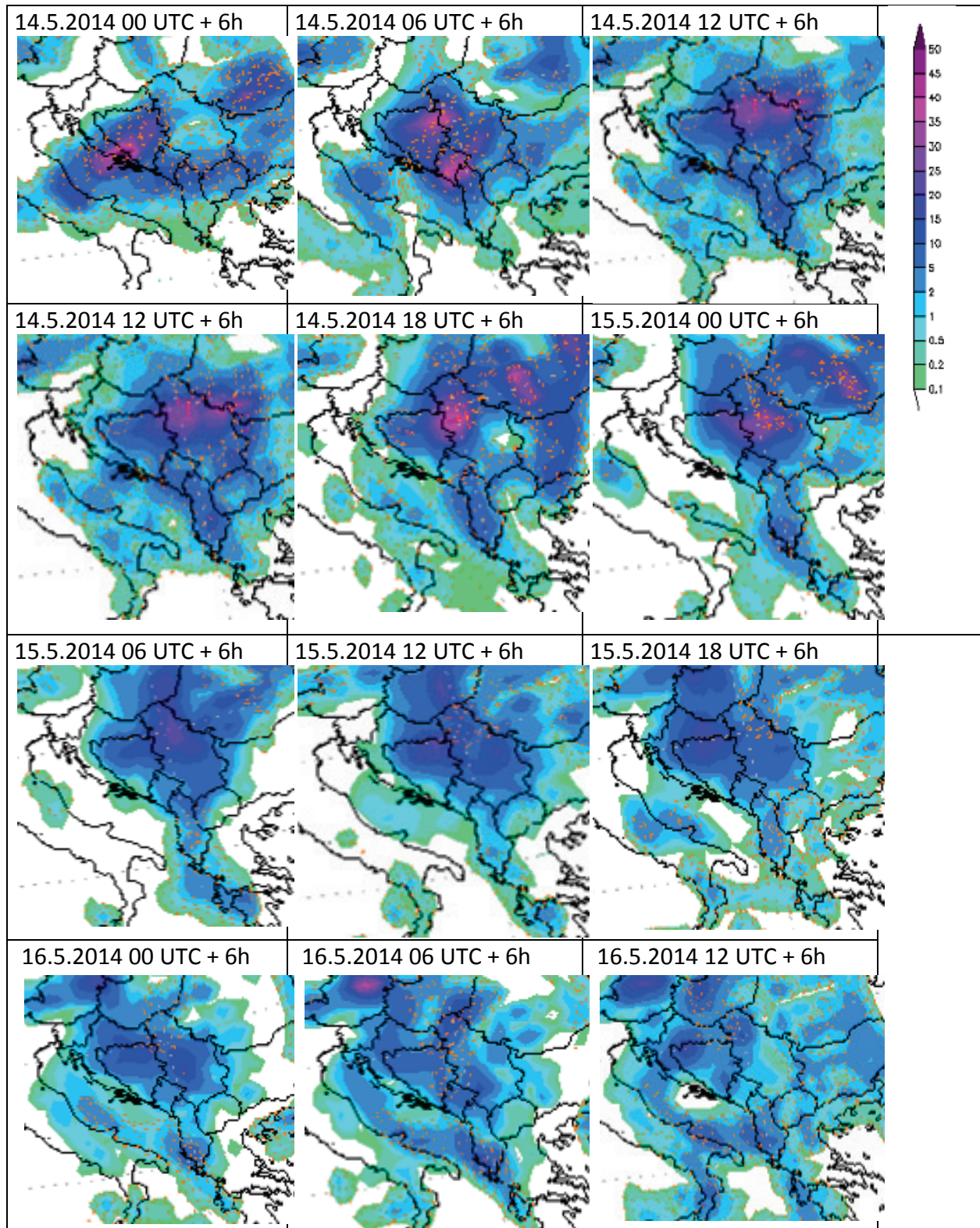
Zavižan	1.2	1.6	18.4	14.3	35.5
Ogulin	23.7	0.1	17	16	56.8
Gospić	3.3	0.4	15.6	10.1	29.4
Slavonski Brod	1.4	18.8	29.9	9.5	59.6
Gradište	5.6	51.6	32.4	9.6	99.2
Zadar Puntamika	4	0	0.7	0.6	5.3
Zadar / Zemunik	5.8	Tr	Tr	0.1	5.9
Šibenik	7.1	0.1	0	Tr	7.2
Komiža	10.8	1.4	0.5	0.7	13.4
Palagruža	1	0	0	0	1
Split / Resnik	36.8	0	0	Tr	36.8
Split / Marjan	21.8	0	0	0.1	21.9
Hvar	27.6	0	0.2	0	27.8
Lastovo	----	----	----	----	0
Makarska	24.9	6.2	0.5	Tr	31.6
Ploče	50	3	0.1	0.3	53.4
Dubrovnik / Gorica	15.9	9.2	0	0	25.1
Dubrovnik / Čilipi	9	3.4	0.4	0.1	12.9

Opomba: Tr pomeni manj kot 1 mm padavin

Preglednica 3.4: Podrobni podatki o padavinah za postajo Loznica ob reki Drini v Srbiji (vir: OGIMET, 2014).

datum	13.5.2014	13.5.2014	13.5.2014	13.5.2014	14.5.2014	14.5.2014	14.5.2014
ura	6:00	12:00	18:00	24:00	6:00	9:00	12:00
padavine [mm]/čas	0.0/24 h	0.3/6 h	6.0/12 h	3.0/6 h	50.6/24 h 44.0/12 h	0.0/3 h	33.0/6 h
datum	14.5.2014	14.5.2014	14.5.2014	15.5.2014	15.5.2014	15.5.2014	
ura	15:00	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	
padavine [mm]/čas	0.0/3 h	62.0/12 h	0.0/3 h	26.0/6 h	0.0/3h	48.0/12 h 110.0/24 h	

Slika 3.3 prikazuje za celotno regijo izračunane 6-urne padavine za nazaj (CFS-Reanalysis) od 14. maja 2014 00:00 UTC do 16. maja 2014 12:00 UTC (vir: www.wetterzentrale.de). Iz slike je razvidno, da so bile padavine najbolj intenzivne od 14.5.2014 00 UTC do 15.5.2014 06 UTC, kar potrjujejo tudi podatki z meteoroloških postaj (preglednice 3.1, 3.2 in 3.3). Po izračunu je bila najvišja intenziteta padavin preko 40 mm/6h. Če pogledamo podrobnejše podatke za meteorološko postajo Loznica (Preglednica 3.4), ki je imela največje zabeležene 24-urne padavine, pa vidimo, da so bile največje zabeležene 6-urne padavine 33 mm (14.5.2014 12 UTC), največje 12-urne padavine pa 62 mm (14.5.2014 18 UTC).



Slika 3.3: Prikaz izračunanih 6-urnih količin padavin v mm na območju južne Italije in Balkana med 14. in 16. maj 2014 (CFS-Reanalysis, vir: www.wetterzentrale.de).

3.2 Pregled zabeleženih količin padavin na padavinskih postajah porečja Bosne

Padavinsko obdobje se je začelo že meseca aprila 2014 in nadaljevalo v maju. Največ padavin je padlo v obdobju med 13. in 16. majem 2014 kot prikazuje Preglednica 3.5. Lokacije padavinskih postaj prikazuje Slika 2.1.

Največje padavine so bile izmerjene v Tuzli, sledi Gradačac in Olovo. V Sarajevu, Tuzli in Zavidovičih so bile izmerjene sicer manjše padavine kot v vzhodnem delu porečja, vendar še vedno znatne.

Preglednica 3.5: Dnevne količine padavin in vsote dnevnih padavin za izbrana obdobja na posameznih postajah v mm (vir: FHMZ BIH, RHMZ RS).

	Sarajevo-Bjelave	Olovo	Zenica	Zavidovići	Gradačac	Tuzla	Modrac
	[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	

Padavine so zajele celotno porečje z relativno zmerno intenziteto. 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 nepretrgoma od 13. maja 12. ure do 16. maja zjutraj. 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 229.9 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 dežmeri ne zajamejo vseh padavin.

4 HIDROLOŠKI OPIS

4.1 Opis hidroloških razmer maja 2014 na širšem območju

Glede na poročilo Savske komisije že med poplavami (ISRBC, 2014) so največje do sedaj izmerjene vodostaje presegle reka Bosna, Jala, Sana in Vrbas v Bosni in Hercegovini, reka Sava na Hrvaškem ter reka Sava, Drina, Jadar, Kolubara in Tamnava v Srbiji (Preglednica 4.1). Na rekah, ki so presegle absolutne maksimalne vodostaje, pretoki večinoma niso bili izmerjeni. Izjema je reka Sava v Sremski Mitrovici. Tu je bil pri vodostaju 810 cm izmerjen pretok $6485 \text{ m}^3/\text{s}$. Reka Sava je imela ta vodostaj en dan po maksimalnem vodostaju, ki je sicer znašal 854 cm. V maju 2014 izmerjen pretok je do sedaj največji izmerjeni pretok na tem mestu, ki je prejšnji rekord presegel za $205 \text{ m}^3/\text{s}$ (prejšnji rekord je znašal $6280 \text{ m}^3/\text{s}$). Pretoki letošnjih poplav so bili izmerjeni še na vodomernih postajah Bezdán in Bogojevo na Donavi, kjer je dosegel polovico absolutne maksimalne vrednosti, in sicer $4360 \text{ m}^3/\text{s}$ in $4690 \text{ m}^3/\text{s}$ (www.hidmet.gov.rs, Operativni bilteni).

Podatke o vodostajih za območje Federacije Bosne in Hercegovine smo zbrali iz obvestil, ki jih je izdala Agencija za vodno področje rijeke Save, in iz podatkov monitoringa iste agencije. Za območje Republike Srbske smo podatke povzeli iz poročila, ki ga je izdal RHMZ RS (2014). Maksimalne vodostaje na območju Federacije Bosne in Hercegovine prikazuje Preglednica 4.2. Na spletnih straneh monitoringa Agencije za vodno področje rijeke Save so bili že med dogodkom dostopni podatki o pretokih Une na hidroloških postajah Kralje in Kulen Vakuf in podatek o pretoku reke Sane na postaji Sanski Most, s tem da je bil pretok $644 \text{ m}^3/\text{s}$ izmerjen pri vodostaju 512 cm (Preglednica 4.2).

Podatke o vodostajih na rekah v Republiki Srbski je objavil RHMZ Republike Srbske v svojem poročilu o poplavah (Preglednica 4.3). Edini objavljeni pretok ob maksimalnem vodostaju na območju Republike Srbske je bil na reki Savi na hidrološki postaji Gradiška dne 20.5.2014. Pretok pri vodostaju 806 cm je bil $2016 \text{ m}^3/\text{s}$ (Operativni bilten 20.5.2014, RHMZ RS). Pridobili smo še podatke o pretokih na ostalih rekah v Republiki Srbski od 23.5.2014 dalje (spletna stran RHMZ RS). Hrvaški Državni hidrometeorološki zavod je ocenil, da je bil največji pretok Bosne ob izlivu v Savo $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, Vrbasa pa $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (DHMZ, 2014).

Preglednica 4.1: Maksimalni vodostaji na porečju Save v maju 2014 (vir: Poročilo Savske komisije, 18.5.2014; podatki so bili v času poročanja neuradni; pri podatkih z ** je vir <http://www.hidmet.gov.rs/>).

Država	Reka	Hidrološka postaja	Maks. pred majem 2014		Maj 2014	
			Vodostaj [cm]	Datum	Vodostaj [cm]	Datum
Bosna in Hercegovina	Bosna	Reljevo	527	20.12.1968	498	
	Bosna	Doboj	578	13.5.1965	730	15.5.2014
	Bosna	Zenica	530	12.1968	600	
	Bosna	Maglaj	740	3.7.2005	>775	
	Miljacka	Sarajevo	285	10.2003	250	
	Jala	Tuzla	710	06.2001	850	
	Una	Bihač	174	12.1982	122	
	Una	Kralje	655	12.1982	496	
	Sana	Sanski Most	530	25.10.1955	517	
	Sana	Prijedor	511	9.10.1955	546	
	Vrbas	Delibašino Selo	687	23.9.1996	760	16.5.2014
	Sava	Gradiška	855		808	
Hrvaška	Sava	Jasenovac	907	18.1.1970	859	19.5.2014
	Sava	Stara Gradiška	898	30.10.1974	801	20.5.2014
	Sava	Mačkovac	1023	30.10.1974	953	20.5.2014
	Sava	Davor	1037	30.10.1974	1010	18.5.2014
	Sava	Slavonski Kobaš	937	30.10.1974	941	18.5.2014
	Sava	Slavonski Brod	883	31.10.1974	939	18.5.2014
	Sava	Slavonski Šamac	777	18.1.1970	891	17.5.2014
	Sava	Županja	1064	19.1.1970	1193*	17.5.2014
	Una	Hrvatska Kostanjica	537	10.10.1955	504	18.5.2014
Srbija	Sava	Jamena	1048	1.4.2005	1240	17.5.2014
					855	17.5.2014
	Sava	Sremska Mitrovica	800	26.10.1974	854**	18.5.2014
	Sava	Šabac	590	25.3.1981	660	18.5.2014
					586	23.5.2014
	Sava	Beograd	738	16.4.2006	590**	22.5.2014
	Drina	Bajina Bašta	857	20.12.1958	481	15.5.2014
	Drina	Radalj	609	18.11.1979	623	15.5.2014
	Lim	Brodarevo	508	17.11.1979	211	16.5.2014
	Lim	Prijepolje	464	17.11.1979	158	16.5.2014
	Jadar	Lešnica	406	21.6.2001	447	16.5.2014
	Kolubara	Slovac	500	13.5.1965	571	15.5.2014
Ljig	Bogovađa	586	27.9.2001	573	15.5.2014	
Tamnava	Čemanov most	444	20.3.1981	508	15.5.2014	

*ocenjena vrednost; ** vir: <http://www.hidmet.gov.rs/>

Preglednica 4.2: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Federaciji Bosne in Hercegovine (vir: Agencija za vodno področje rijeke Save, 2014).

Reka	Hidrološka postaja	Vodostaj [cm]	Pretok [m ³ /s]	Datum
Sava	Slavonski Brod	939		18.5.2014
	Slavonski Šamac	884		17.5.2014
	Županja	1168		17.5.2014
Una	Kulen Vakuf	221	206	17.5.2014
	Kralje	497	490	17.5.2014
	Bosanska Krupa	267		17.5.2014
Sana	Sanski Most	512	644	16.5.2014
Sanica	Hrustovo	365		16.5.2014
Vrbas	Gornji Vakuf	47		16.5.2014
	Daljan	196		16.5.2014
	Kozluk	302		16.5.2014
Bosna	Otes	283		15.5.2014
	Ljubnići	368		15.5.2014
	Kakanj	485		15.5.2014
	Raspotočje	492		16.5.2014
	Zavidovići	995		15.5.2014
	Maglaj Poljice	869		15.5.2014
Spreča	Karanovac	605		15.5.2014
	Modrac	507		17.5.2014
Usora	Kaloševiči	393		16.5.2014
Tinja	Srebrenik	405		15.5.2014
Drina	Goražde	177		15.5.2014

Preglednica 4.3: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Republiki Srbski (vir: 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		950	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	543	17.5.2014
Vrbas	Delibašino selo	141.38	687	23.9.1996	837	16.5.2014
Vrbas	Banja Luka	151.21	520	23.9.1996	632	16.5.2014
Vrbanja	Vrbanja	166.22	527	22.6.2010	592	16.5.2014
Bosna	Doboj	137.01	578	13.5.1965	721	15.-16.5.2014

4.2 Opis hidroloških razmer na reki Bosni maja 2014

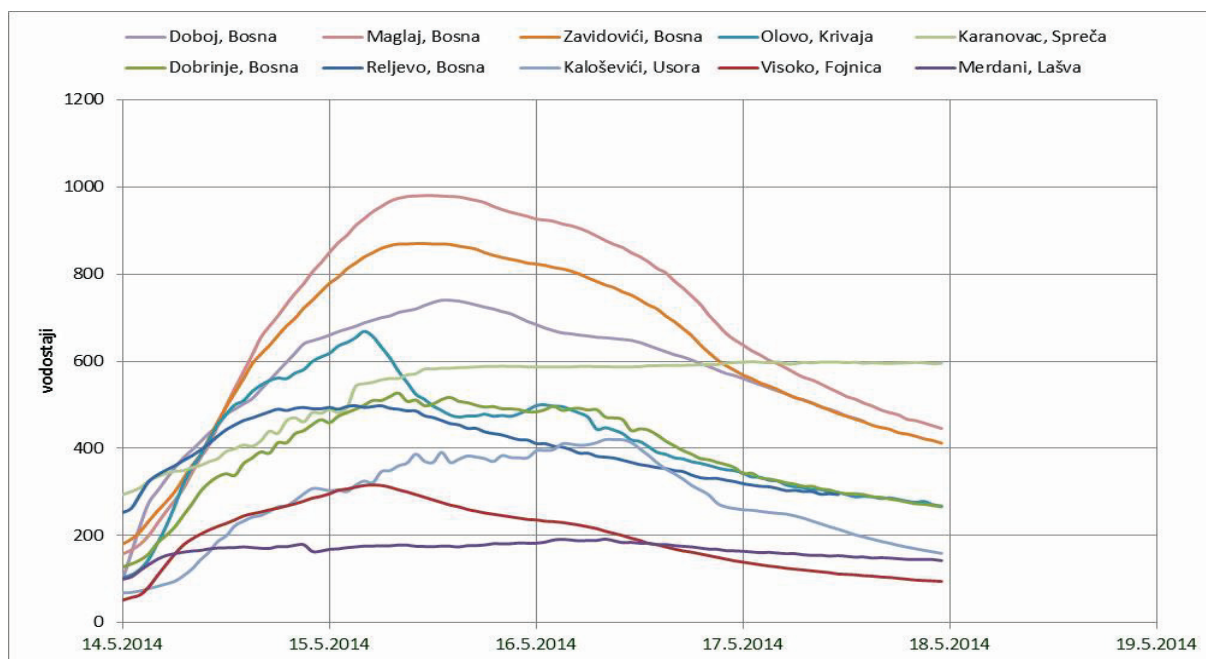
Izjemen dogodek v maju 2014 na reki Bosni je v posamičnih elementih primerljiv z vsemi izrednimi dogodki poplav, plazov in drobirskih tokov, kot jih poznamo v Sloveniji iz let 1990, 2000, 2007 in 2010 (Kobold, 2011). Dogodki v Sloveniji so bili lahko sicer intenzivni, ampak kratkotrajni z izjemo leta 2000 (Mikoš et al., 2002). Dogodek v Bosni je bil celo bolj intenziven, predvsem pa dolgotrajen. Namreč, dolgotrajne in intenzivne padavine so sprožile številne zemeljske plazove ter drobirske tokove. Ti so bili najhujši na območju Željeznog polja. Zemeljske plazove zasledimo 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 visoke vodostaje. 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 4.1). Diagram pretokov, ki so jih za nekatere vodomerne postaje iz vrednotili na RHMZ RS in FHMZ BIH med 14. in 18. majem 2014, podaja Slika 4.2. Veliko vodomernih postaj je bilo med poplavo poškodovanih, zato so podatki izgubljeni.

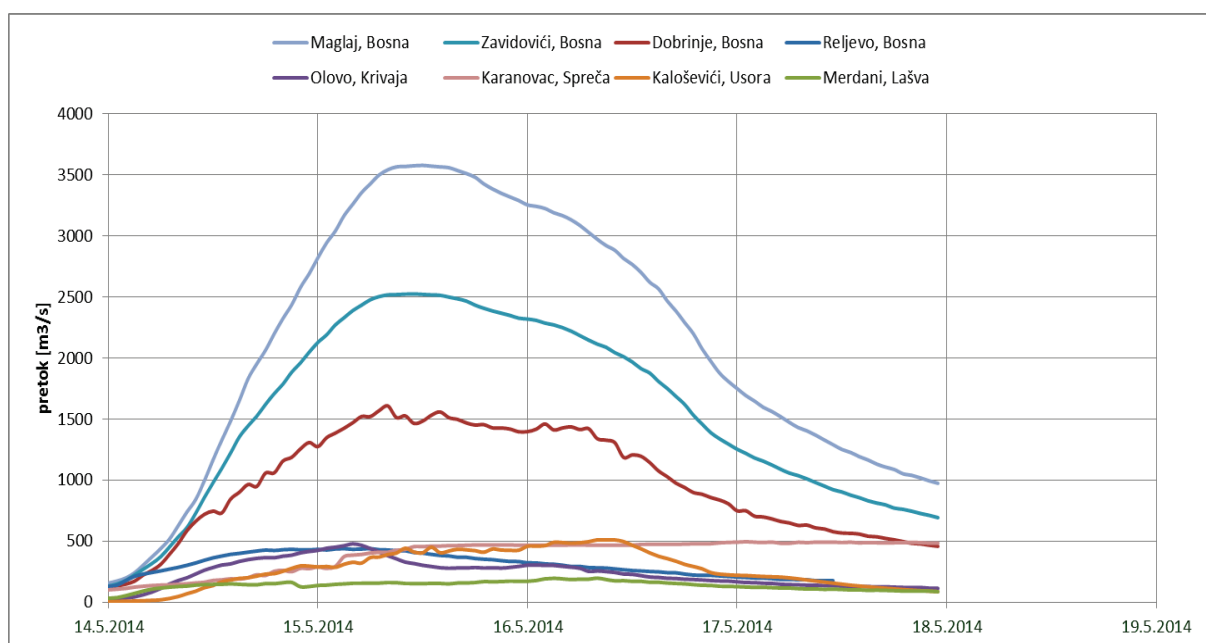
V preglednici 4.4 so podane časovne komponente naraščanja pretokov, konic in umirjanja vala.

Preglednica 4.4: Datum in ura začetka naraščanja pretokov, maksimuma in upadanja pretokov na posameznih vodomernih postajah.

Reka in vodomerna postaja	Začetek naraščanja vala	Konica vala			Umirjanje upadanja vala		
		datum:	13.5.	15.5.	16.5.	17.5.	18.5.
Bosna, Reljevo	13:00	18:00 (14.5.) - 6:00 (15.5.)			6:00		
Bosna, Dobrinje	14:00	7:00				2:00	
Bosna, Zavidoviči	18:00	7:00 - 13:00			22:00		
Bosna, Maglaj	16:00	8:00 – 14:00				4:00	
Bosna, Dobj		13:00				0:00	
Spreča, Karanovac	0:00	12:00....hidrogram raven					
Lašva, Merdani	12:00		1:00				1:00
Krivaja, Olovo	17:00	5:00			7:00		
Usora, Kalosevići	23:00	23:00 (14.5.) – 1:00 (16.5)....hidrogram skoraj raven					



Slika 4.1: Gladine poplavnih valov na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BIH).



Slika 4.2: Pretoki na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BIH).

Iz Preglednica 4.4 in Slike 4.1 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 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 celo začela prej dvigovati kot v gorvodnih Zavidovičih. Maksimum je bil v Maglaju dosežen že v eni uri po Zavidovičih, v Doboju pa po šestih urah ob 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.

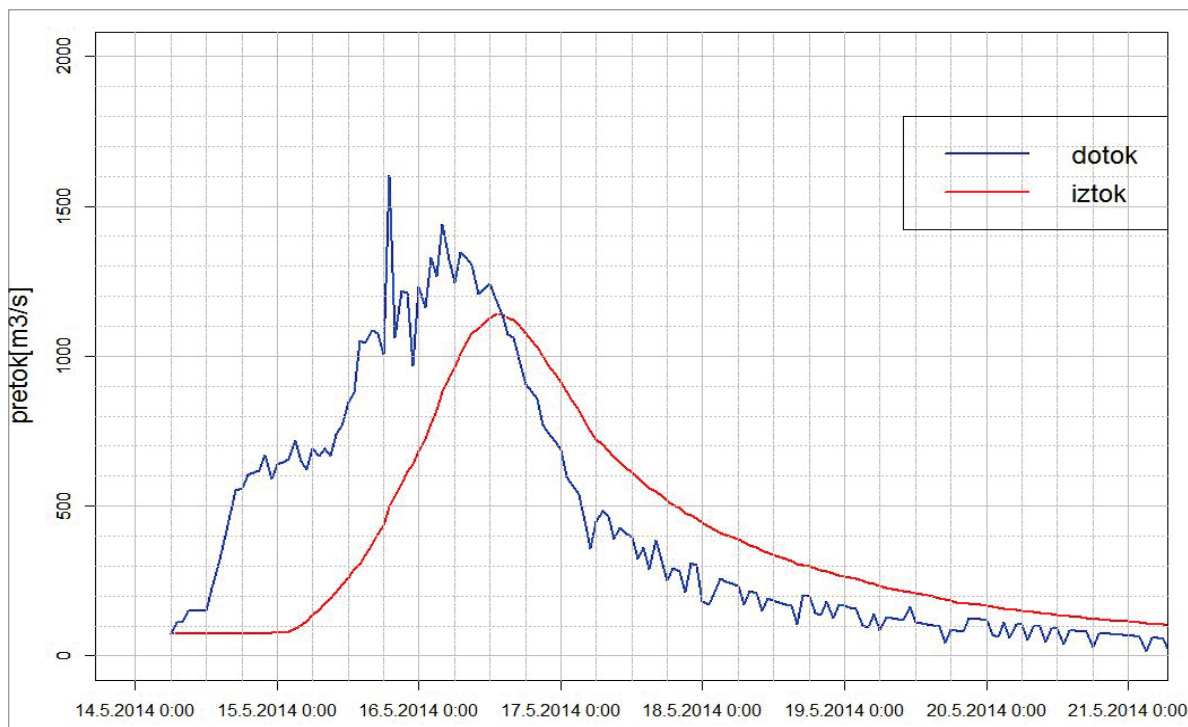
Reka Sava ne kaže katastrofalnih gladin v Slavonskem Brodu, ki se nahaja po reki navzgor od mesta Bosanski Šamac, čeprav so bile tu registrirane najvišje izmerjene gladine vode (Abdulaj et al., 2014; Kupusović, 2014). Očitno so visoki pretoki reke Bosne najprej zajezili Savo, nato pa pretoki reke Save reko Bosno. To je bil tudi dodaten vzrok za povečanje gladin reke Bosne pred Šamcem, ki so verjetno zadrževale tudi odtekanje vode iz območja pod Modričo.

Na oblikovanje poplavnega vala v Doboju je vplivala tudi pregrada Modrac na Spreči (Tuzlansko jezero). Prispevno območje nad zadrževalnikom je dalo več kot $1 \text{ m}^3/\text{s}$ na km^2 specifičnega pretoka. 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 4.3).

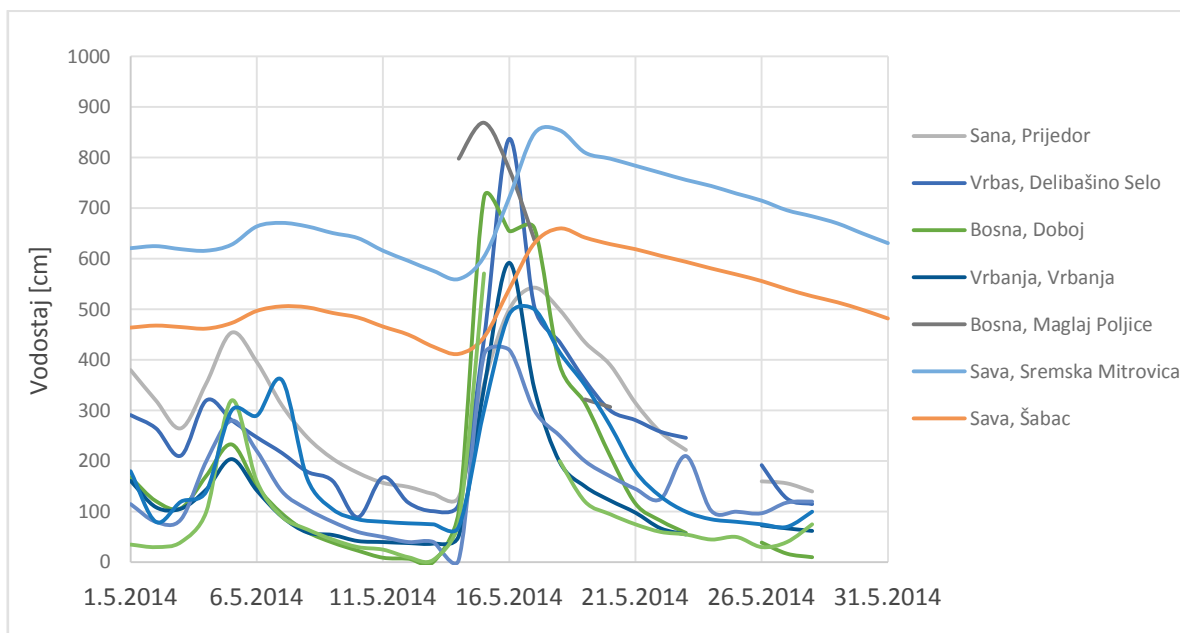
V Zavidovičih in Maglaju je bila konica poplavnega vala dolga šest ur, sam val pa se je enakomerno dvignil in tudi začel padati. Po Maglaju se je voda začela močno razlivali. Poplavni val reke Bosne v Doboju se od oblike vala v Zavidovičih in Maglaju razlikuje. Sama konica je sicer trajala do dve uri, vendar ima precej razpotegnjeno obliko tako pri dvigovanju kot pri upadanju. Vzrok je razbremenjevanje voda po poplavnih površinah. Poplavni val reke Spreče se je delno zadržal v zadrževalniku, delno pa razlival po površinah pod pregrado. Maksimalni pretok Spreče na sotočju z reko Bosno ni presegel $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sava pri Bosanskem Šamcu, to je izlivu reke Bosne, je začela naraščati 14. maja in dosegla maksimum 17. maja (Abdulaj et al., 2014), ko je pod mostom na reki Savi izmerjen pretok $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri tem ni bil merjen del pretoka po poplavnem območju na desni strani reke. Sočasno je bil pri Gunji dolvodno izmerjen za $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ manjši pretok, kar pomeni, da se je poplavno območje dolvodno od Šamca še naprej polnilo z vodo.

Za primerjavo podajamo merjene nivograme Save v Sremski Mitrovici in Šabcu, Bosni v Doboju in Maglaju ter na ostalih pritokih reke Save v času med 1. majem 2014 in 26. majem 2014 (Slika 4.4). Oblika vala reke Save je povsem drugačna od ostalih nivogramov. To kaže na razliko med odtočnimi lastnostmi velikih nižinskih rek in rekami, ki imajo hudourniški značaj, to je hiter porast pretokov in njihovo hitro upadanje. Posebej pri manjših vodotokih je izrazil tudi predhodni poplavni val v začetku maja 2014.



Slika 4.3: Diagrama dotoka in iztoka iz zbiralnika Modrac (vir podatkov: Spreča d.d. Tuzla, 2014).



Slika 4.4: Nivogrami rek Save v Sremski Mitrovici in Šabcu, Bosne v Doboju in Maglaju ter ostalih pritokov reke Save v času med 1.5.2014 in 26.5.2014 (vir podatkov: RHMZ RS).

4.3 Zabeleženi maksimalni vodostaji in pretoki reke Bosne, verjetnostna analiza in poplavni valovi

Maksimalne do sedaj zabeležene vodostaje reke Bosne po posameznih postajah in zabeležene v maju 2014 prikazuje Preglednica 4.1, Preglednica 4.2, Preglednica 4.3 in Slika 4.1. Slika 4.2 prikazuje hidrograme; pretoke, kot so bili ocenjeni na podlagi pretočnih krivulj v veljavi. Same pretoke se ob dogodku maja 2014 ni merilo. Preglednica 4.5 podaja najvišje kote poplavne vode glede na vodostaje in uradne kote »0« vodomerov. Kote »0« vodomerov so povzete iz Hidrološkega godišnjaka 1972.

Največja letna pretoka pred dogodkom maja 2014 sta se pojavila leta 1965 in 1968 (Preglednica 4.3). Leta 1965 so se največji pretoki pojavili na osrednjem in spodnjem delu toka, leta 1968 pa v povirju reke Bosne. Vodostaji na reki Bosni so maja 2014 presegli vse do tedaj izmerjene vodostaje.

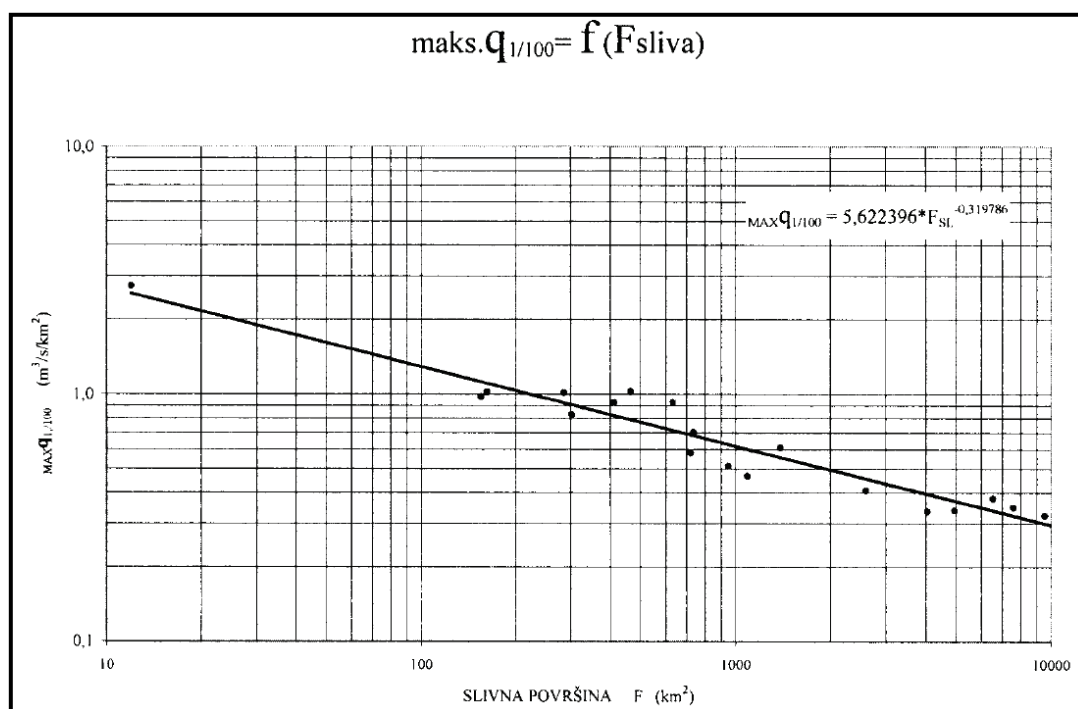
Preglednica 4.5: Maksimalni izmerjeni vodostaji in ocena pretokov na reki Savi in reki Bosni v maju 2014.

Reka	Hidrološka postaja	Kota "0" vodomera (iz HG 1972) [m n.v.]	Vodostaj [cm]	Ocena najvišje kote poplavne vode v maju 2014 (mn.v.)	Pretok [m ³ /s]	Datum
Sava*	Srbac	82.81	1012	92.93		18.5.2014
Sava*	Slavonski Brod	81.80	939	91.2		18.5.2014
Sava*	Slavonski Šamac	80.64	891	89.55	6000	17.5.2014
Sava	Sremska Mitrovica (6485 m³/s pri vodostaju 810 cm)	72.22	854	80.60		ni prelivanja
Sava	Šabac	72.61	~570	78.30		ni prelivanja
Bosna	Bosanski Šamac					
Bosna	Modriča					
Bosna	Doboj (3400 m³/s pri vodostaju 578 cm)	137.01	721**	144.22		15.5.2014 začetek vrha in trajanje: 13:00, 2 uri
Spreča	Karanovac	150.06	595***		~590 ne pada, se celo dvigne do 605	15.5.2014 12:00, ne pada
Usora	Kaloševiči		393*** 420		~505	15.5.2014; 12:00 16.5.2014; 10:00
Bosna	Maglaj		~990		~3600 2050 m ³ /s pri vodostaju 740 cm	15.5.2014 začetek vrha in trajanje: 8:00, 6 ur

Krivaja	Olovo				~495	15.5.2014 10:00, strmo pade
Bosna	Zavidovići	200.71	~870 (po grafu) 995 po študiji	209.41	~2510	15.5.2014 začetek vrha in trajanje: 7:00, 5 uri
Bosna	Dobrinje	411.95	~520	417.15	~1510	15.5.2014 8:00
Bosna	Reljevo	478.46	~500	483.5	~430	14.5.2014 18:00 trajanje 12 ur

*Maksimalni izmerjeni vodostaji in pretoki na reki Savi na Hrvaškem (vir: DHMZ Hrvaška, 2014); ** povzeto po RHMZ RS; *** BiH Agencija za vodno področje rijeke Save

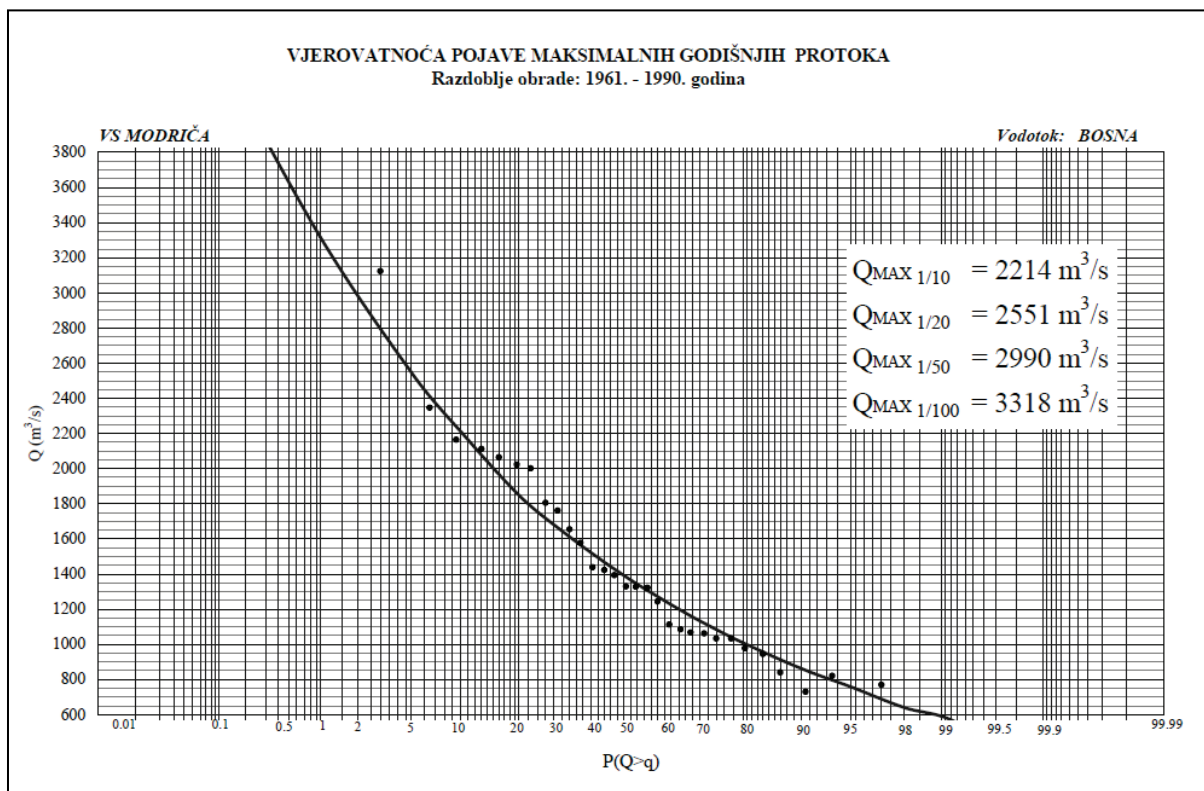
Za oceno značilnosti ocenjenih pretokov (Slika 4.2) lahko uporabimo enačbo določitve specifičnega pretoka s stoletno povratno dobo glede na velikost prispevne površine. Krivuljo sta določila Zavod za vodoprivredno in Federalni hidrometeorološki zavod (ZV in FHMZ, 2012). Odnos je prikazan grafično in kot enačba (Slika 4.6).



Slika 4.5: Maksimalni specifični pretoki reke Bosne s stoletno povratno dobo (Zavod za vodoprivredno in Federalni hidrometeorološki zavod, 2012).

V hidroloških elaboratih so podrobno obdelane posamezne postaje. Najbližja vodomerna postaja (VP) na reki Bosni pred sotočjem z reko Savo je Modriča. Postaja je bila postavljena leta 1896 in je 27 km oddaljena od sotočja z reko Savo. Postaja nima limnigrafa, zato so se

opazovanja vršila ročno enkrat na dan. Z veliko boljšimi podatki razpolaga VP Doboj, postaja je postavljena 44 km gorvodno od sotočja. Povečanje pretokov med VP Doboj in VP Modriča znaša od 5.4 % do 7.5 % (preglednica 4.6). Med postajama ni večjih pritokov. Pretočne krivulje za obe postaji so bile izdelane na osnovi meritev pretokov do okoli 400 m³/s.

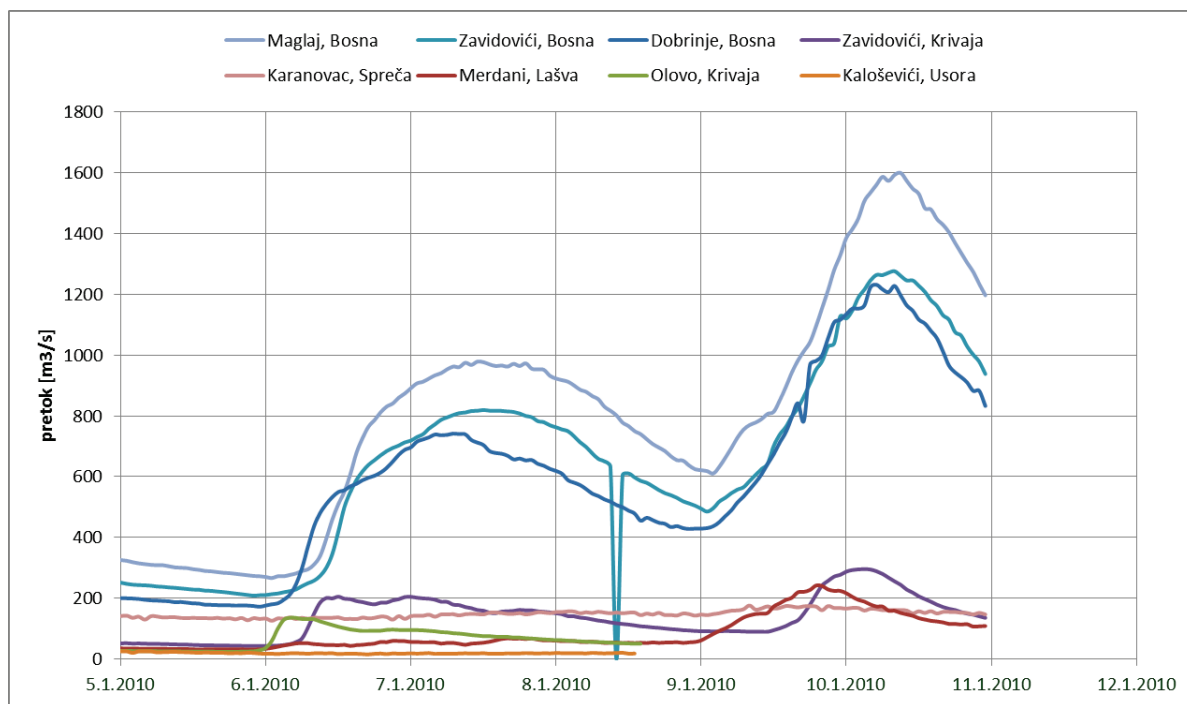


Slika 4.6: Verjetnost pojava maksimalnih pretokov za VP Modriča (vir: ZV in FHMZ, 2012).

Preglednica 4.6: Odnos med verjetnimi maksimalnimi pretoki na VP Modriča in VP Doboj.

leta	Qmaks VP Modriča [m ³ /s]	Qmaks VP Doboj [m ³ /s]	% povečanja (Qmaks Modriča/Qmaks Doboj)
10	2214	2091	5.9 %
20	2551	2420	5.4 %
50	2990	2795	7.0 %
100	3318	3087	7.5 %

V elaboratu niso posebno obdelane in analizirane posamezne poplave, ne sovpadanje maksimalnih pretokov v glavni strugi s pritoki. Hitrosti potovanja poplavnih valov vzdolž toka reke niso podane. Za analizo lastnosti načina sovpadanja velikih pretokov (koincidence) in hitrosti potovanja valov vzdolž toka smo uporabili podatke o poplavah leta 2010. Zanje obstajajo podatki o urnih vrednostih pretokov, ki smo jih za namene izdelave te študije dobili od FHMZ BIH (2014).



Slika 4.7: Hidrogrami pretokov pri poplavi januarja 2010 (FHMZ BIH, 2014).

Iz podatkov in slike 4.7 je razvidno, da se je poplavni val leta 2010 oblikoval zaradi sovpadanja konic poplavnega vala reke Bosne in reke Krivaje na sotočju pri Zavidovičih. Reka Lašva je dala maksimalne pretoke še pred nastopom poplavnega vala v reki Bosni. Podatki za reko Usoro niso na razpolago za drugi poplavni val, pri prvem pa je poplavni val reke Usore prispel v reko Bosno 30 ur pred maksimumom. Reka Spreča ima zaradi vpliva zbiralnika Modrac in obsežnega poplavnega območja skoraj popolnoma izravnani pretok, ki je pretoke reke Bosne povečal za 10 %.

Iz omenjene analize ugotavljamo, da je hidrološki sistem reke Bosne kompleksen. Maksimalni pritoki so pogojeni s sovpadanjem poplavnih valov in trajanjem padavin oziroma so pod močnim vplivom kraških območij porečja. Omenjen pojav se lepo vidi iz pretokov reke Lašve, ki se pri prvem poplavnem valu (7. januar 2010) niso bistveno povečali, njen relativno majhen poplavni val pa je sovpadel s poplavnim valom reke Bosne. Pri drugem dogodku so pretoki vode močno narasli in oblikovali poplavni val, ki je dosegel strugo reke Bosne 10 ur pred konico poplavnega vala v reki Bosni.

5 VERJETNOSTNA ANALIZA VEČDNEVNIH PADAVIN MAJA 2014

5.1 Uporabljeni podatki in metoda dela

S primerjavo vrednosti verjetnostne analize maksimalnih večdnevni padavin v obdobju 1960–2013 oziroma 2000–2010 in vrednosti maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014, je bila ocenjena povratna doba dogodka na obravnavanih padavinskih postajah v Bosni in Hercegovini. Z izrisom izolinij povratnih dob za posamezno trajanje maksimalnih večdnevni padavin je prikazana tudi ocena prostorske razsežnosti jakosti padavinskega dogodka. 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.

Analiziranih je bilo 11 padavinskih postaj, za katere so bili poleg arhivskih podatkov o dnevnih padavinah na voljo tudi podatki o padavinah v aprilu in maju 2014. Njihove lokacije glede na porečje reke Bosne in njeno celotno hidrografska mrežo prikazuje Slika 2.1, njihove geografske koordinate (lokacije), nadmorske višine in obdobja razpoložljivosti podatkov podaja Preglednica 5.1.

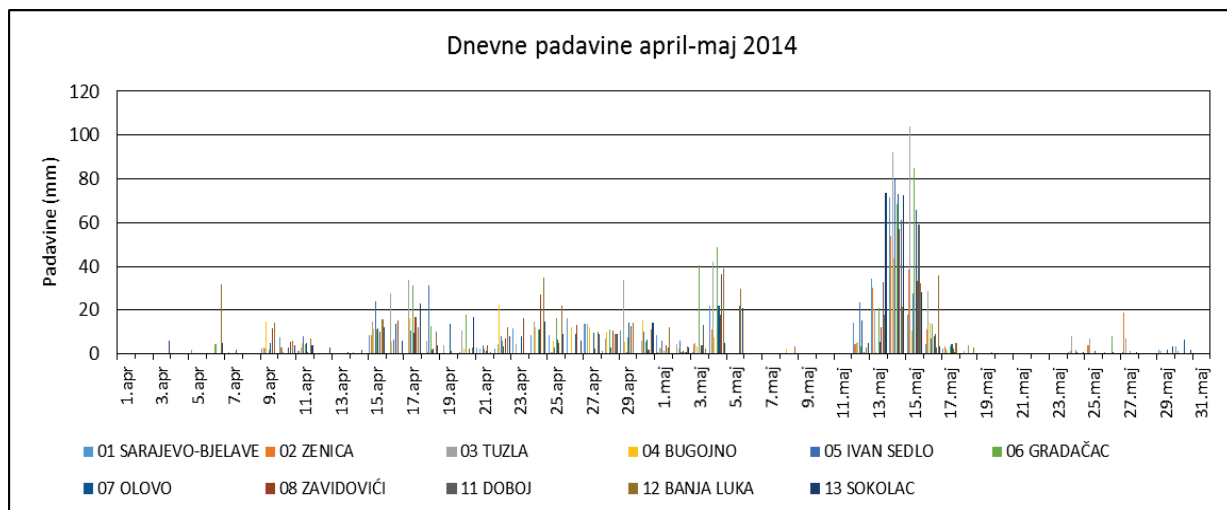
Za vsako leto obdobja 1960–2013 so bile določene maksimalne večdnevne padavine s trajanjem 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50 in 60 dni. Vrednosti povratnih dob za posamezna trajanja padavin so določena po Gumbelovi porazdelitveni funkciji. Izbrane povratne dobe so 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 2000 in 10000 let.

Večina postaj ima podatke za več kot 40 let, medtem ko imajo padavinske postaje Olovo, Zavidovići in Sokolac podatke le za 8 oziroma 11 let. Pri uporabi niza podatkov v razponu od 40 do 54 let so rezultati korektni do povratne dobe ca. 200 let. Dobljene višje povratne dobe več dnevnih padavin na teh postajah oziroma na postajah, ki imajo niz podatkov dolg največ 11 let, je treba obravnavati z zadržkom.

S primerjavo vrednosti verjetnostne analize maksimalnih večdnevni padavin za obdobje 1960–2013 in vrednosti maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014 je bila nato ocenjena povratna doba dogodka v maju 2014. Za določitev dnevnih padavin, ki so padle v aprilu in maju 2014, smo uporabili različne vire in metodo odmerjanja vrednosti iz grafične podlage, metodo dopolnjevanja manjkajočih podatkov dnevnih padavin na podlagi razporeditev padavin na sosednjih postajah ob znani mesečni količini in metodo ocenjevanja količin in razporeditve padavin z napovedanih padavin. Zbrane in vrednotene dnevne vrednosti padavin podaja Preglednica 5.2, prikazuje pa Slika 5.1. Iz teh vrednosti so bile nato izračunane večdnevne količine padavin v aprilu in maju 2014.

Preglednica 5.1: Opis padavinskih postaj, za katere so se določile povratne dobe posameznih trajanj padavin (vir podatkov: FHMZ BiH, RHMZ RS, spletni podatki).

Padavinska postaja	Lokacija padavinskih postaj			Obdobje padavinskih podatkov		Št. let s podatki
	Lat	Long	nadmorska višina	dnevne	urne	
01 SARAJEVO-BJELAVE	43°52'04"	18°25'22"	630	1960-2013	april-maj 2014	54
02 ZENICA	44°11'57"	17°54'02"	344	1960-2013	april-maj 2014	54
03 TUZLA	44°32'31"	18°41'06"	305	1960-2013	april-maj 2014	54
04 BUGOJNO	44°03'43"	17°27'02"	562	1960-2013	april-maj 2014 ⁽¹⁾	53
05 IVAN SEDLO	43°45'03"	18°02'10"	967	1960-2013	april-maj 2014 ⁽¹⁾	49
06 GRADAČAC	44°51'32"	18°26'30"	230	1960-2013	april-maj 2014 ⁽²⁾	52
07 OLOVO	44°07'74"	18°35'22"	543	2006-2013 ⁽⁵⁾	2006-2014	8
08 ZAVIDOVIĆI	44°26'08"	18°10'02"	-	2003-2013 ⁽⁵⁾	2003-2014	11
11 DOBOJ	44°44'19"	18°05'42"	147	1961-1990, 2000-2010	maj 2014 ^{(3), (4)}	41
12 BANJA LUKA	44°48'29"	17°12'46"	153	1960-1962 ⁽²⁾ , 1973-1996 ⁽²⁾ , 2000-2010	april-maj 2014 ⁽³⁾	38
13 SOKOLAC	43°55'34"	18°47'21"	913	2000-2010	april-maj 2014 ^{(3), (4)}	11
<i>(1) Podatki pridobljeni s spletne strani www.ogimet.com (primer je podan v prilogi H-a)</i>						
<i>(2) Podatki pridobljeni s spletne strani www.tutiempo.net (primer je podan v prilogi H-b)</i>						
<i>(3) Podatki pridobljeni iz poročila »Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014«</i>						
<i>(4) Podatki ocenjeni na podlagi sosednjih padavinskih postaj</i>						
<i>(5) Dnevni podatki vrednoteni iz urnih podatkov</i>						



Slika 5.1: Razpored dnevni padavin v aprilu in maju 2014.

Preglednica 5.2: Velikosti dnevnih padavin na padavinskih postajah v aprilu in maju 2014 (vir podatkov: FHMZ BiH, RHMZ RS, spletni podatki).

	1	2	3	4 ⁽¹⁾	5 ⁽¹⁾	6	7	8	11	12	13	(5)
2014	SARAJEVO-BJELAVE	ZENICA	TUZLA	BUGOJNO	IVAN SEDLO	GRADAČAC	OLOVO	ZAVIDOVIČI	DOBOJ	BANJA LUKA	SOKOLAC	MODRAC
1.apr	0	0	0	-	0	0 ⁽²⁾	0	0	-	-	-	0
2.apr	0	0	0	-	0	0 ⁽²⁾	0.1	0	-	-	-	0
3.apr	0	0	0	-	0	0 ⁽²⁾	0.1	0	-	-	6	0
4.apr	0	0	0	-	0	0 ⁽²⁾	0	0	-	-	-	0
5.apr	0.4	2.1	0.4	-	-	0 ⁽²⁾	0.5	0.1	-	-	-	0
6.apr	0	0	0	-	-	4.57 ⁽²⁾	0	0	-	32	5	0.6
7.apr	0	0.2	1	-	0	0.25 ⁽²⁾	0	2	-	-	-	1.5
8.apr	0	0	0	-	0	0 ⁽²⁾	0	0	-	-	-	2.1
9.apr	2.3	3	2.3	15	0	2.03 ⁽²⁾	4.9	11.6	-	14	-	3.5
10.apr	7.3	2.7	1	0	-	0 ⁽²⁾	2.8	5.7	-	6	4	10
11.apr	1.3	1.5	2.9	4.8	7.9	4.57 ⁽²⁾	5	1	-	7	4	0
12.apr	0	0.2	0.2	0	-	0 ⁽²⁾	0	0.2	-	-	3	1
13.apr	0.5	0.4	0.1	0	-	0 ⁽²⁾	0.1	0	-	-	1	0
14.apr	0	1	0.5	0	0	0 ⁽²⁾	0	1.7	-	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	10.2
15.apr	8.5	8.5	14.8	11.7	24.1	11.18 ⁽²⁾	11.7	10.1	-	16 ⁽³⁾	12 ⁽³⁾	2.7
16.apr	0	0	27.7	5.6	6.3	0 ⁽²⁾	13.6	15.3	-	0 ⁽³⁾	6 ⁽³⁾	34.4
17.apr	0	0	34	16.3	10.4	31.24 ⁽²⁾	9.4	16.8	-	12 ⁽³⁾	23 ⁽³⁾	10.9
18.apr	0	0	6.2	1	31.2	12.95 ⁽²⁾	2.1	2.2	-	10 ⁽³⁾	4 ⁽³⁾	2.5
19.apr	0	0	4.1	0	-	0.25 ⁽²⁾	13.6	1.2	-	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	0
20.apr	0.7	0	10.4	2.3	-	17.78 ⁽²⁾	0	2.2	-	3 ⁽³⁾	17 ⁽³⁾	1.9
21.apr	3	0	2.4	0	4.1	2.29 ⁽²⁾	1.2	4.1	-	1 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	6.3
22.apr	2.2	0	4.3	22.4	7.9	6.1v	3.2	6.8	-	12 ⁽³⁾	8 ⁽³⁾	1
23.apr	11.7	0	4.4	0	-	0 ⁽²⁾	7.9	16.3	-	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	17.5
24.apr	8.8	0	14.6	12.2	-	11.18 ⁽²⁾	11.3	27.2	-	35 ⁽³⁾	15 ⁽³⁾	10.5
25.apr	8.5	0	0.9	6.1	3	16.51 ⁽²⁾	6.3	5	-	22 ⁽³⁾	9 ⁽³⁾	10.4
26.apr	16.1	0	0	12.2	-	0 ⁽²⁾	9.3	13.4	-	0 ⁽³⁾	6 ⁽³⁾	
27.apr	13.8	0	13.6	12.2	-	0 ⁽²⁾	9.7	2.2	-	10 ⁽³⁾	9 ⁽³⁾	2.4
28.apr	1.3	0	7.2	10.2	0	11.18 ⁽²⁾	3	10.6	-	9 ⁽³⁾	9 ⁽³⁾	19.1
29.apr	10.4	0	33.8	5.3	0.8	7.37 ⁽²⁾	14.2	12.5	-	14 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾	12.1
30.apr	0.2	0	5.8	15.5	10.2	5.59 ⁽²⁾	6.5	1.8	-	11 ⁽³⁾	14 ⁽³⁾	0.2
1.maj	8.6	0.6	3.1	2.3	5.8	1.2	0	3.7	3 ⁽³⁾	12.1 ⁽³⁾	-	3.8
2.maj	0	0	4.2	2.5	6.1	0.9	1.4	0.2	1 ⁽³⁾	3.5 ⁽³⁾	3 ⁽³⁾	27.4
3.maj	0.6	4.4	5.2	3.6	-	40.8	3.7	4	13 ⁽³⁾	2.5 ⁽³⁾	-	17.4
4.maj	22.1	11.4	42.1	7.6	-	48.9	21.9	17.6	36.2 ⁽³⁾	38.9 ⁽³⁾	5.1 ⁽³⁾	23.5
5.maj	0.3	0.1	0.1	0.5	-	0	0.1	0.2	22.2 ⁽³⁾	29.9 ⁽³⁾	20.7 ⁽³⁾	0
6.maj	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	-	0
7.maj	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	-	0.2
8.maj	0.4	0	0.3	2.3	0.5	0	0	0.1	-	3.6 ⁽³⁾	0.4 ⁽⁴⁾	0
9.maj	0	0	0	-	0.5	0	0	0	-	-	-	0
10.maj	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	-	0
11.maj	0	0	0	-	-	0	0	0	-	-	-	3
12.maj	14.1	4.4	4.9	5.3	23.6	3.3	15.3	0.8	-	3 ⁽³⁾	5 ⁽⁴⁾	0
13.maj	34.6	30.2	20.6	0.8	0	21.1	5.5	12.3	32.9 ⁽³⁾	17.7 ⁽³⁾	73.4	52
14.maj	71.3	53.7	92.3	43.7	79.8	68.3	72.9	57.1	61.2 ⁽³⁾	21.7 ⁽³⁾	72.3	79.5
15.maj	18	38.7	103.8	10.7	27.7	85.1	65.8	33.1	59 ⁽⁴⁾	32.1 ⁽³⁾	28.1	76.6

16.maj	4.6	11.4	28.6	14.2	7.1	13.6	8	9	3 ⁽⁴⁾	36 ⁽³⁾	3.4	14.4
17.maj	2.4	3.3	2.5	1.5	0	3.3	4.4	2.4	1 ⁽⁴⁾	5 ⁽³⁾	-	0
18.maj	0	0.1	1.5	0.5	0	4	0.2	-	-	3 ⁽³⁾	-	0
19.maj	0	0	0	0.3	-	0	0	-	-	1 ⁽³⁾	-	0
20.maj	0	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-	0
21.maj	0	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-	0
22.maj	0	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-	0
23.maj	0	0	0	-	-	0	0.1	-	-	-	-	0.6
24.maj	0.6	1.5	7.8	-	-	1.8	0.6	-	-	-	1 ⁽⁴⁾	18.5
25.maj	0	3.8	7.2	-	-	0	1.3	-	-	-	0 ⁽⁴⁾	0
26.maj	0.7	0.5	0.5	-	-	8.3	0.9	-	-	-	0.5 ⁽⁴⁾	1
27.maj	0.7	18.8	7.2	-	-	1.1	0.2	-	-	-	1 ⁽⁴⁾	4.5
28.maj	0	0	0	-	-	0	0	-	-	-	0 ⁽⁴⁾	0
29.maj	2.1	0.4	1.5	-	-	0	1.7	-	-	-	3.5 ⁽⁴⁾	6.4
30.maj	3.3	1.4	0	-	-	0	6.5	-	-	-	2 ⁽⁴⁾	0
31.maj	0	0	0	-	-	0	0	-	-	-	-	0
(1)	Podatki pridobljeni na spletni strani www.ogimet.com											
(2)	Podatki pridobljeni na spletni strani www.tutiempo.net											
(3)	Podatki pridobljeni iz poročila »Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014«											
(4)	Podatki ocenjeni na podlagi sosednjih padavinskih postaj											
(5)	Podatki pridobljeni iz HE Modrac											

5.2 Rezultati

Razporeditev padavin na padavinskih postajah po izbranih obdobjih v aprilu in maju 2014 (vsote na podlagi vrednosti, ki jih podaja Preglednica 5.2) prikazuje Preglednica 5.3. Količina padavin, izmerjenih na HE Modrac, se ujema s količino padavin na padavinski postaji Tuzla, s čimer lahko potrdimo velikostni razred padavin na tem območju.

Vrednosti maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014 za posamezne padavinske postaje prikazuje Preglednica 5.4. Z barvo so označene tiste padavine, ki imajo povratno dobo 20–50 let, 20–100 let in 500–1000 let. Povratne dobe sicer prikazujeta Preglednica 5.6 in Preglednica 5.7; prva (Preglednica 5.6) podaja oceno povratne dobe zabeleženih vrednosti maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014 za obdobje 1960–2013, druga (Preglednica 5.7) pa za obdobje 2000–2010. Preglednica 5.5 za te vrednosti podaja tudi datum začetka maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014.

Preglednica 5.3: Razporeditev padavin na padavinskih postajah po izbranih obdobjih v aprilu in maju 2014.

Padavinska postaja		VSOTA PADAVIN V OBDOBJU (mm)				
		1.4.2014 - 30.4.2014	1.5.2014 - 17.5.2014	1.4.2014 - 17.5.2014	1.5.2014 - 31.5.2014	1.4.2014 - 31.5.2014
		<i>30 dni</i>	<i>17 dni</i>	<i>47 dni</i>	<i>31 dni</i>	<i>61 dni</i>
01	SARAJEVO-BJELAVE	97.0	177.0	274.0	184.4	281.4
02	ZENICA	19.6	158.2	177.8	184.7	204.3
03	TUZLA	192.6	307.7	500.3	333.4	526.0
04	BUGOJNO	152.8	95.0	247.8	95.8	248.6
05	IVAN SEDLO	105.9	151.1	257.0	151.1	257.0
06	GRADAČAC	145.0	286.5	431.5	301.7	446.7
07	OLOVO	136.5	199.0	335.5	210.5	347.0
08	ZAVIDOVIĆI	170.0	140.5	310.5	140.5	310.5
11	DOBOJ	-	232.5	232.5	232.5	232.5
12	BANJA LUKA	214.0	206.0	420.0	210.0	424.0
13	SOKOLAC	155.0	211.4	366.4	219.4	374.4
	MODRAC	160.8	297.8	458.6	328.8	489.6

Preglednica 5.4: Vrednosti maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014.

	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13
Št.dni	SARAJEVO-BJELAVE	ZENICA	TUZLA	BUGOJNO	IVAN SEDLO	GRADAČAC	OLOVO	ZAVIDOVIĆI	DOBOJ	BANJA LUKA	SOKOLAC
1	71.3	53.7	103.8	43.7	79.8	85.1	72.9	57.1	61.2	38.9	73.4
2	105.9	92.4	196.1	54.4	107.5	153.4	138.7	90.2	120.2	68.8	145.7
3	123.9	122.6	224.7	68.6	114.6	174.5	146.7	102.5	153.1	89.8	173.8
4	138.0	134.0	245.3	70.1	131.1	188.1	159.5	111.5	156.1	107.5	178.8
5	142.6	138.4	250.2	74.7	138.2	191.4	167.5	113.9	157.1	112.5	182.2
6	145.0	141.7	252.7	76.2	138.2	195.4	171.9	114.7	157.1	115.5	182.2
7	145.0	141.8	254.2	76.7	138.2	198.7	172.1	114.7	157.1	118.5	182.2
8	145.0	141.8	254.2	80.6	138.7	198.7	172.1	114.7	157.1	120.9	182.2
9	145.0	141.8	254.2	96.1	139.2	198.7	172.1	114.7	157.1	130.9	182.6
10	145.4	141.8	254.2	98.4	139.2	198.7	172.1	114.8	157.1	130.9	182.6
15	170.0	162.0	302.1	121.3	145.3	284.4	197.6	145.9	228.5	200.9	211.4
20	211.8	168.2	365.6	149.0	162.1	310.6	229.3	173.2	232.5	245.0	246.0
30	253.7	184.7	446.9	209.2	218.7	405.6	297.9	266.7	232.5	340.0	328.0
40	273.6	184.7	501.2	248.3	257.0	430.7	335.0	308.4	232.5	391.0	357.0
50	275.6	200.2	523.1	248.6	257.0	441.9	338.6	310.5	232.5	424.0	366.4
60	281.4	204.3	526.0	248.6	257.0	446.7	347.0	310.5	409.9	424.0	374.4
<i>Opomba: osenčenje zgornjih vrednosti pove dosežen rang povratne dobe padavin</i>											
	500-10000	100-200	20-50	2-10							

Preglednica 5.5: Datum začetka maksimalnih večdnevni padavin v aprilu in maju 2014.

	1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	13
Št.dni	SARAJEVO-BJELAVE	ZENICA	TUZLA	BUGOJNO	IVAN SEDLO	GRADAČAC	OLOVO	ZAVIDOVIĆI	DOBOJ	BANJA LUKA	SOKOLAC
1	14.5.	14.5.	15.5.	14.5.	14.5.	15.5.	14.5.	14.5.	14.5.	4.5.	13.5.
2	13.5.	14.5.	14.5.	14.5.	14.5.	14.5.	14.5.	14.5.	14.5.	4.5.	13.5.
3	13.5.	13.5.	14.5.	14.5.	14.5.	13.5.	14.5.	13.5.	13.5.	14.5.	13.5.
4	12.5.	13.5.	13.5.	14.5.	12.5.	13.5.	12.5.	13.5.	13.5.	13.5.	12.5.
5	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	13.5.	13.5.	13.5.	12.5.
6	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	11.5.	13.5.	12.5.	12.5.	12.5.	12.5.	11.5.
7	11.5.	12.5.	12.5.	12.5.	10.5.	12.5.	12.5.	11.5.	11.5.	12.5.	10.5.
8	10.5.	11.5.	11.5.	22.4.	9.5.	11.5.	11.5.	10.5.	10.5.	28.4.	9.5.
9	9.5.	10.5.	10.5.	22.4.	8.5.	10.5.	10.5.	9.5.	9.5.	27.4.	8.5.
10	8.5.	9.5.	9.5.	22.4.	7.5.	9.5.	9.5.	8.5.	8.5.	26.4.	7.5.
15	1.5.	13.5.	2.5.	16.4.	2.5.	3.5.	3.5.	15.4.	1.5.	21.4.	2.5.
20	26.4.	11.5.	27.4.	15.4.	27.4.	28.4.	26.4.	15.4.	28.4.	27.4.	26.4.
30	18.4.	1.5.	17.4.	17.4.	17.4.	17.4.	16.4.	16.4.	18.4.	17.4.	16.4.
40	8.4.	21.4.	15.4.	9.4.	7.4.	9.4.	9.4.	8.4.	8.4.	9.4.	6.4.
50	8.4.	8.4.	8.4.	1.4.	1.4.	8.4.	11.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.
60	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.	1.4.
<i>Opomba: osenčenje zgornjih vrednosti pove dosežen rang povratne dobe padavin</i>											
	500-10000	100-200	20-50	2-10							

Preglednica 5.6: Ocena povratne dobe večdnevni padavin v aprilu in maju 2014 (glede na obdobje 1960–2013).

Padavinska postaja		št. let	Večdnevne padavine (št. dni), povratna doba (let)																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	50	60	
01	SARAJEVO-BJELAVE	54/54	10	20	50	100	100	50	20	20	20	10	10	20	20	10	5	5	
02	ZENICA	54/54	10	50	200	200	200	100	100	50	50	50	25	20	10	5	5	2	
03	TUZLA	54/54	200	10000	10000	10000	10000	10000	2000	2000	500	500	500	1000	2000	500	200	200	
04	BUGOJNO	53/54	2	2	5	2	2	2	2	2	5	2	5	5	10	10	5	5	
05	IVAN SEDLO	49/54	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
06	GRADAČAC	52/54	20	200	200	200	200	100	100	50	50	50	200	200	500	200	100	50	
07	OLOVO	8/54	100	10000	500	200	50	50	50	25	25	25	50	50	100	50	50	25	
08	ZAVIDOVIĆI	11/54	5	5	10	10	10	10	10	5	5	5	10	5	20	20	10	5	
11	DOBOJ	41/54	5	25	100	50	50	25	20	20	20	20	50	20	10	5	5	20	
12	BANJA LUKA	38/54	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	10	20	50	50	50	20	
13	SOKOLAC	11/54	5	100	200	200	200	200	100	50	50	50	25	50	200	100	25	25	
<i>Opomba: osenčenje zgornjih vrednosti pove dosežen rang povratne dobe padavin</i>																			
			500-10000	100-200	20-50	2-10													

Preglednica 5.7: Ocena povratne dobe večdnevni padavin v aprilu in maju 2014 (glede na obdobje 2000–2010).

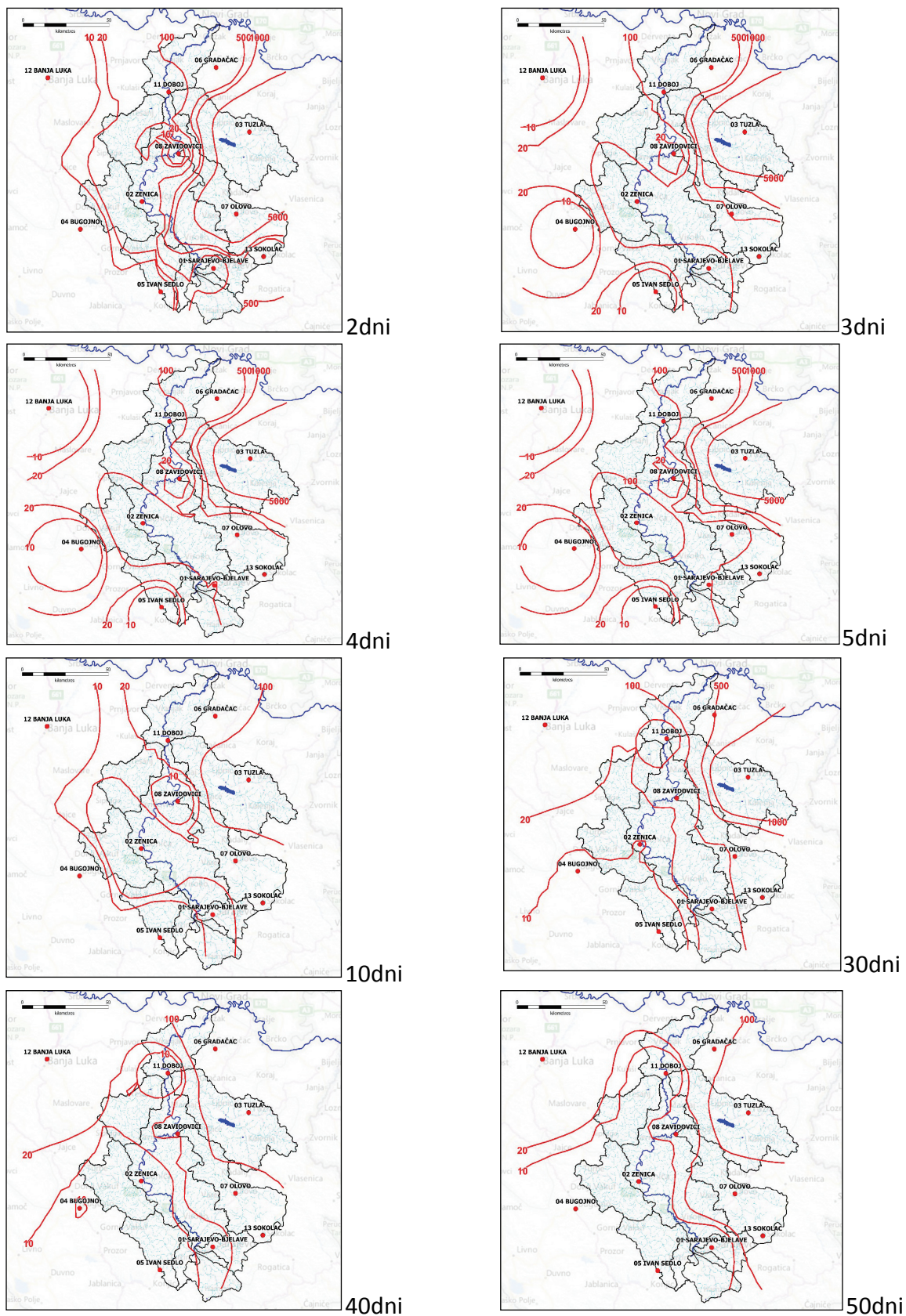
Padavinska postaja		št. let	Večdnevne padavine (št. dni), povratna doba (let)																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	50	60	
01	SARAJEVO-BJELAVE	11/11	5	10	20	50	50	20	20	10	10	5	5	10	10	5	5	5	
02	ZENICA	11/11	5	50	200	200	200	100	50	50	50	25	20	10	5	5	2	2	
03	TUZLA	11/11	50	200	200	200	100	200	200	200	100	50	50	50	50	20	20	20	
04	BUGOJNO	11/11	2	2	5	2	5	2	2	2	5	2	5	5	10	20	5	5	
05	IVAN SEDLO	11/11	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
06	GRADAČAC	11/11	20	20	25	25	25	20	20	20	20	20	50	50	50	25	20	20	
11	DOBOJ	11/11	5	10	10	10	10	10	5	5	5	5	10	5	5	5	2	5	
<i>Opomba: osenčenje zgornjih vrednosti pove dosežen rang povratne dobe padavin</i>																			
			500-10000	100-200	20-50	2-10													

Ugotovimo lahko, da je v Tuzli večina več-dnevni padavin dosegla povratno dobo več kot 500 let. V Olovem so dvo in tri-dnevne padavine imela več kot 500-letno povratno dobo, ena, štiri in 30-dnevne pa 100-letno povratno dobo. Vse druge padavine so imele povratno dobo višjo od 20 let. V Doboju je imela večina več-dnevni padavin povratno dobo med 20 in 50 let, tri-dnevna pa več kot 100 let. Podobno kot v Doboju so tudi v Sarajevu in Zenici več-dnevne padavine imele večinoma več kot 20 let, tri do sedem-dnevne pa celo več kot 100-letno povratno dobo.

V Tuzli so maksimalne tri-dnevne padavine nastopile 14. maja, štiri-dnevne 13. maja in pet-dnevne padavine 12. maja 2014, V Olovu dvo-dnevne 500-letne padavine 14. maja 2014, v Sarajevu štiri-dnevne 100-letne 12. maja 2014 in v Zenici 13. maja 2014. **Zaključimo lahko, da je glede na padavine, ki so zajele več kot polovico porečja reke Bosne, verjetnost dogodka bila med 100 in 200 let, lokalno pa tudi več kot 500 let.**

Iz primerjave rezultatov verjetnostne analize za obdobje 1960–2013 (Preglednica 5.6) in 2000–2010 (Preglednica 5.7) vidimo, da iz krajšega niza podatkov na vseh primerjanih sedmih postajah glede na daljši niz podatkov dobimo enake ali višje vrednosti padavin pri enaki povratni dobi. Ocenjujemo, da bi bile povratne dobe večdnevni padavin aprila in maja 2014 na lokacijah padavinskih postaj s krajšim nizom podatkov, Zavidovići, Olovo in Sokolac, morda lahko celo nekoliko višje.

Vrednosti povratnih dob na padavinskih postajah (Preglednica 5.6) so prostorsko interpolirane po metodi utežne inverzne razdalje («inverse distance weighting» - z velikostjo mrežne celice 5 km, inverzno razdaljo na četrto potenco in z upoštevanjem štirih sosednjih postaj) in prikazane na sliki 5.2.



Slika 5.2: Izolinije povratnih dob nekaterih izbranih maksimalnih več dnevni padavin v aprilu in maju 2014.

6 HIDROLOŠKI MODEL REKE BOSNE in SIMULACIJA DOGODKA MAJA 2014

6.1 Opis uporabljenih podatkov in metoda dela

Pretočne hidrograme 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). Podrobna predstavitev modela in programa za umerjanje je v prilogi 2 tega poročila.

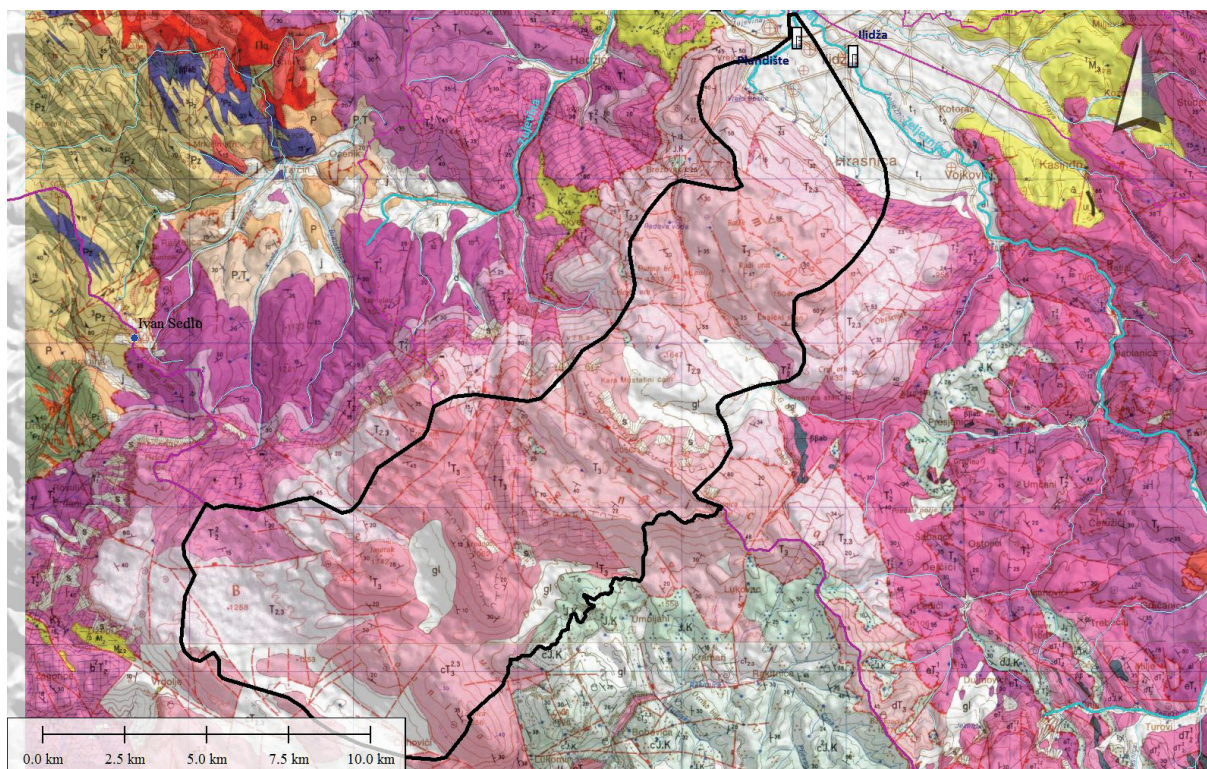
6.1.1 Izdelava modela

Da bi zagotovili dovolj točen model tako obsežnega in heterogenega območja, smo porečje razdelili na podporečja, ki so tako velika kot je to le mogoče, da pokrivajo območje le enega velikega pritoka. Kot rezultat je bilo porečje razdeljeno na 25 podporečij s površinami od 30 do 1000 km² (Preglednica 6.1, Slika 6.2). 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. Slika 6.1 prikazuje najbolj verjetno območje kraškega zaledja Vrela Bosne. V preglednici 6.1 so tako podane površine podporečij, ki smo jih uporabili v hidrološkem modelu. Skupna površina porečja reke Bosne z upoštevanjem kraškega zaledja in uporabljenega GIS modela (10836 km²) se zato razlikuje od orografsko določenega prispevnega območja 10420 km² (VZ in FHMZ, 2012).

Preglednica 6.1: Seznam podporečij s prispevnimi površinami v km², uporabljenimi v hidrološkem modelu.

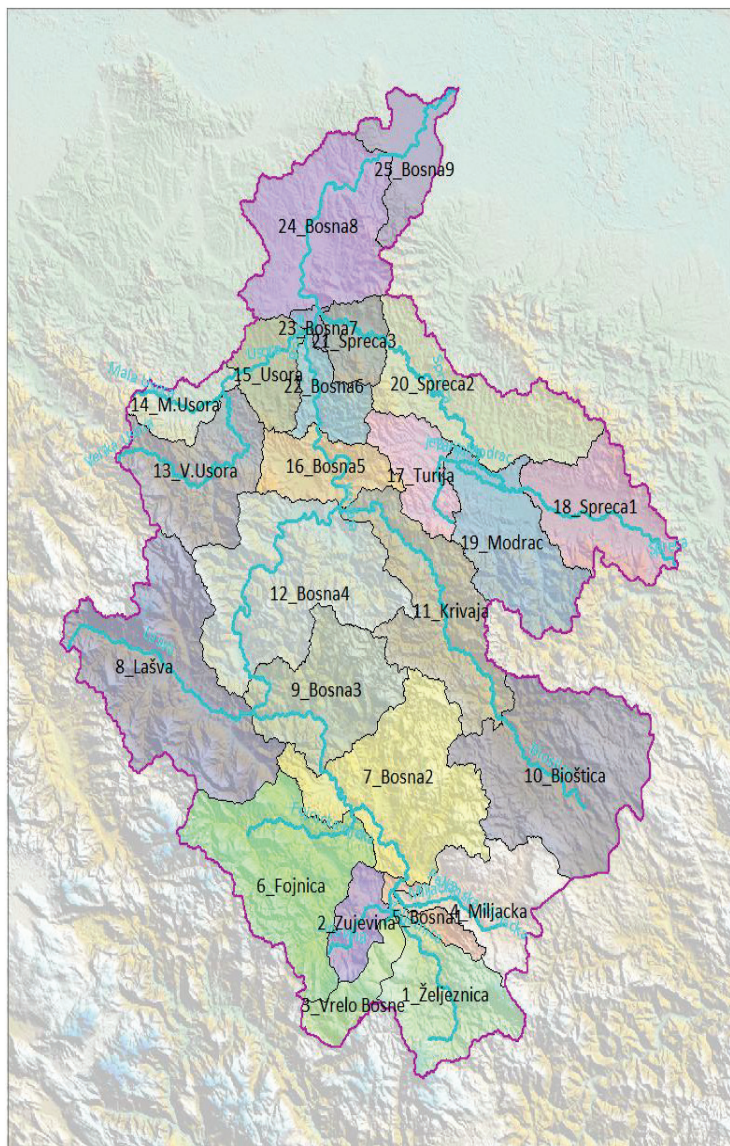
Številka podporečja	Ime podporečja	Vodotok	Površina podporečja [km ²]
1	Željeznica	Željeznica	433.43
2	Zujevina	Zujevina	155.19
3	Vrelo Bosne	Bosna	169.14
4	Miljacka	Miljacka	412.91
5	Bosna1	Bosna	84.13
6	Fojnica	Fojnica	729.36
7	Bosna2	Bosna	773.76
8	Lašva	Lašva	958.18
9	Bosna3	Bosna	518.46
10	Bioštica i Stupčanica	Krivaja	890.73
11	Krivaja	Krivaja	603.42
12	Bosna4	Bosna	892.00
13	V_Usora	Usora	480.72
14	M_Usora	Usora	158.93
15	Usora	Usora	206.72
16	Bosna 5	Bosna	266.34

17	Turija	Turija	233.03
18	Spreča1	Spreča	463.30
19	Modrac	Spreča	495.87
20	Spreča2	Spreča	596.49
21	Spreča3	Spreča	160.10
22	Bosna6	Bosna	182.29
23	Bosna7	Bosna	29.38
24	Bosna8	Bosna	690.79
25	Bosna9	Bosna	251.54
		Vsa podporečja	10836.20



Slika 6.1: Kraško prispevno območje Vrele Bosne, določeno glede na geologijo in specifične pretoke na Vrele Bosne.

Vsa podporečja so bila razdeljena v cone glede na nadmorsko višino (3 cone) in glede na vegetacijo. Višinske cone so do 700 metrov, od 700 do 1400 metrov in nad 1400 metrov. Južni del porečja reke Bosne je dokaj gorat, zato imajo podporečja na tem območju po tri cone nadmorske višine (Preglednica 6.2). Podporečje v ravninskem delu (sevni del porečja), kjer nadmorske višine večinoma ne presežejo 700 m, smo razdelili na dve coni nadmorskih višin (Slika 6.4). Vsaka cona nadmorske višine pa je bila nato razdeljena še v dve skupini glede na pokritost tal (Slika 6.3) v tako imenovane vegetacijske cone: gozd in polje (ne-gozd).



Slika 6.2: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji, zajetimi v modelu.

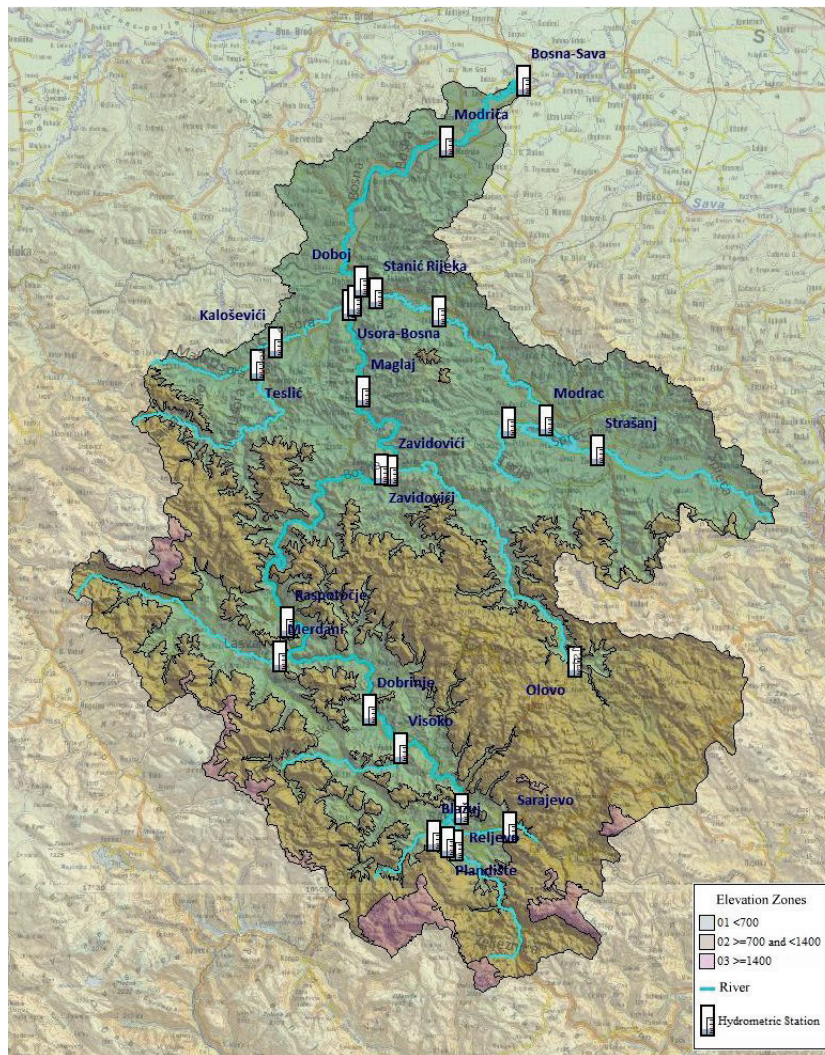
Preglednica 6.2: Površina podporečij in delež površine podporečja v različnih pasovih nadmorske višine.

Št. podporečja	Ime podporečja	Površina podporečja [km ²]	01 < 700 m	02 ≥ 700 m < 1400 m	03 ≥ 1400 m	01 < 700 m	02 ≥ 700 m < 1400 m	03 ≥ 1400 m
			[km ²]	[km ²]	[km ²]	[%]	[%]	[%]
1	Željeznica	433.43	43.43	312.49	77.51	0.10	0.72	0.18
2	Zujevina	155.19	71.75	77.00	6.44	0.46	0.50	0.04
3	Vrelo Bosne	169.14	11.42	62.26	95.46	0.07	0.37	0.56
4	Miljacka	412.91	44.47	335.09	33.35	0.11	0.81	0.08
5	Bosna1	84.13	48.12	34.01	2.00	0.57	0.40	0.02
6	Fojnica	729.36	238.98	431.59	58.79	0.33	0.59	0.08
7	Bosna2	773.76	281.57	489.38	2.80	0.36	0.63	0.00
8	Lašva	958.18	318.31	571.28	68.59	0.33	0.60	0.07
9	Bosna3	518.46	225.93	292.53		0.44	0.56	
10	Bioštica	890.73	25.73	865.00		0.03	0.97	

11	Krivaja	603.42	310.19	293.23		0.51	0.49	
12	Bosna4	892.00	500.82	391.17		0.56	0.44	
13	V.Usora	480.72	285.35	195.38		0.59	0.41	
14	M.Usora	158.93	143.23	15.69		0.90	0.10	
15	Usora	206.72	206.72			1.00	0.00	
16	Bosna5	266.34	261.95	4.39		0.98	0.02	
17	Turija	233.03	232.41	0.63		1.00	0.00	
18	Spreca1	463.30	442.22	21.08		0.95	0.05	
19	Modrac	495.87	393.95	101.93		0.79	0.21	
20	Spreca2	596.49	587.29	9.20		0.98	0.02	
21	Spreca3	160.10	158.36	1.73		0.99	0.01	
22	Bosna6	182.29	180.81	1.48		0.99	0.01	
23	Bosna7	29.38	29.38			1.00		
24	Bosna8	690.79	690.79			1.00		
25	Bosna9	251.54	251.54			1.00		
Σ		10836.2	5984.72	4506.55	344.94	0.55	0.42	0.03

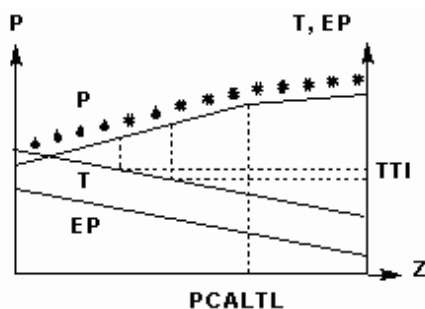


Slika 6.3: Vegetacijske cone na območju porečja reke Bosne.



Slika 6.4: Višinske cone porečja reke Bosne.

Delitev na cone nadmorske višine in vegetacije je še posebej pomembna zaradi upoštevanja snega. Ta postopek shematično opiše Slika 6.5.



Z = nadmorska višina

PCALTL = mejna vrednost za popravek po višini

P = padavine

T = temperatura

Slika 6.5: Upoštevanje snega v modelu.

Upoštevanje snega temelji na preprosti povezavi stopinje-dan. V tem postopku je mejna vrednost temperature (TT), ki je po navadi blizu 0°C , uporabljena za definicijo temperature, pri kateri se začne taljenje snega. Mejna vrednost temperature se po navadi določi glede na to, ali pada sneg ali dež. Znotraj intervala mejnih vrednosti temperature (TTI) se predpostavi,

da so padavine mešanica snega in dežja (linearno zmanjševanje od 100 % snega na spodnjem koncu do 0 % na zgornjem koncu).

Taljenje snega in ponovno zamrzovanje vode je preračunano z uporabo spodnje formule:

$$\text{Taljenje snega} = CFMAX \cdot (T - TT)$$

$$\text{Zamrzovanje staljene vode} = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T)$$

CFMAX = faktor taljenja
CFR = faktor zamrzovanja
TT = mejna vrednost temperature

Predpostavlja se, da masa snega zadržuje vodo vse dokler njena količina ne preseže sposobnosti zadrževanja (podana s parametrom WCH) snega. Ko temperatura pade pod TT, voda ponovno zamrzne glede na zgoraj zapisano formulo.

Za gozdna in ne-gozdna območja se uporabljajo različni faktorji taljenja in zamrzovanja.

6.1.2 Vhodni podatki

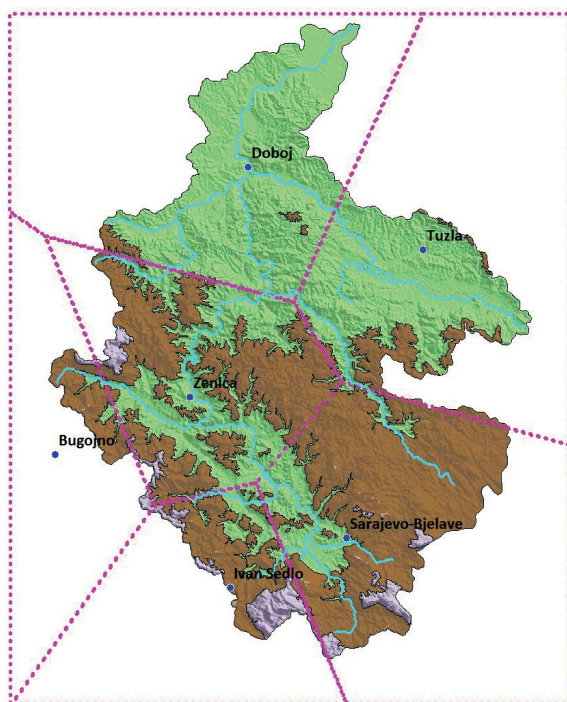
Vhodni podatki, ki so potrebni za kalibriranje oziroma za zagon modela:

- padavine za enajst postaj (Preglednica 6.3),
- temperatura za šest postaj,
- pretok za enaintrideset postaj (Preglednica 6.4),
- potencialna evapotranspiracija za šest postaj.

V testni fazi smo modelirali s padavinskimi podatki različnih kombinacij vseh postaj (Preglednica 6.3) glede na razpoložljivost podatkov. Za končno verzijo je bilo izbranih šest postaj, za katere smo razpolagali z dnevnimi in urnimi podatki o padavinah: Sarajevo-Bjelave, Zenica, Tuzla, Bugojno, Ivan Sedlo in Doboj (Slika 6.6). Vplivna območja posameznih postaj smo določili s Thiessenovimi poligoni. Za iste postaje smo upoštevali tudi podatke o temperaturah in evapotranspiraciji.

Preglednica 6.3: Seznam padavinskih in temperaturnih postaj ter postaj evapotranspiracije.

Št. postaje	Ime postaje	Lat	Long	nadmorska višina	Uporabljeno v kalibraciji modela
01	SARAJEVO-BJELAVE	43°52'04"	18°25'22"	630	X
02	ZENICA	44°11'57"	17°54'02"	344	X
03	TUZLA	44°32'31"	18°41'06"	305	X
04	BUGOJNO	44°03'43"	17°27'02"	562	X
05	IVAN SEDLO	43°45'03"	18°02'10"	967	X
06	GRADAČAC	44°51'32"	18°26'30"	230	
07	OLOVO	44°07'74"	18°35'22"	543	
08	ZAVIDOVIĆI	44°26'08"	18°10'02"	-	
11	DOBOJ	44°44'19"	18°05'42"	147	X
12	BANJA LUKA	44°48'29"	17°12'46"	153	
13	SOKOLAC	43°55'34"	18°47'21"	913	



Slika 6.6: Porečje reke Bosne s prikazanimi padavinskimi postajami in s Thiessenovimi poligoni.

Preglednica 6.4: Podatki o vodomernih postajah, upoštevanih pri izdelavi modela (Hidrološki godišnjak SFRJ, 1986).

Hidrološka postaja	Kota_0	Porečje	Vodotok	Cum_VS_F (skupna površina porečja)	SL_F (vmesna prispevna površina)	Pripomba
01-Ilidža	495.32	Željeznica	Željeznica	431.73	433.43	
02-Blažuj	503.01	Zujevina	Zujevina	149.30	155.19	
03-Plandište	490.47	Vrelo Bosne	Bosna	168.79	169.14	
04-Sarajevo	538.93	Miljacka	Miljacka	349.32	412.91	
05-Reljevo	478.46	Bosna1	Bosna	1254.79	84.13	
06-Visoko	413.87	Fojnica	Fojnica	727.69	729.36	
07-Dobrinje	392.04	Bosna2	Bosna	2757.92	773.76	
08-Merdani	357.52	Lašva	Lašva	955.73	958.18	
09-Raspotočje	312.61	Bosna3	Bosna	4234.56	518.46	
10-Olovo	527.16	Bioštica	Krivaja	890.73	890.73	
11-Zavidovići_K	204.32	Krivaja	Krivaja	1493.19	603.42	
12-Zavidovići_B	200.71	Bosna4	Bosna	5121.96	892.00	
13-Teslić	203.14	V.Usora	V.Usora	478.33	480.72	
14-Kaloševiči	150.00	M.Usora	Usora	639.65	158.93	
15-Usora-Bosna		Usora	Usora	846.37	206.72	sotočje Usore in Bosne
16-Maglaj		Bosna5	Bosna	6887.05	266.34	
17-Turija	200.00	Turija	Turija	233.03	233.03	
18-Strašanj	200.76	Spreča1	Spreča	463.30	463.30	
19-Modrac	182.47	Modrac	Spreča	1192.20	495.87	
20-Karanovac	150.06	Spreča2	Spreča	1788.69	596.49	
21-Stanić Rijeka	139.72	Spreča3	Spreča	1945.53	160.10	
22-Usora	140.16	Bosna6	Bosna	7915.71	182.29	
23-Doboje	137.01	Bosna7	Bosna	9893.87	29.38	

24-Modriča	98.97	Bosna8	Bosna	10584.66	690.79	
25-Bosna-Sava		Bosna9	Bosna	10836.20	251.54	Sotočje Bosne in Save
26-Vrelo Bosne	491.80		Bosna			
27-Bioštica	536.26		Bioštica			
28-Olovske luke	543.51		Stupčanica			
29-D. Višća	229.77		Oskova			
30-Živinice	200.00		Gostilja			
31-KS Modrac			Spreča			

Podatki o temperaturi in padavinah so bili pripravljene z enodnevnim časovnim korakom. Časovni korak podatkov o evapotranspiraciji je po navadi večji kot ta v modelu, zato je potrebna prilagoditev časovnemu koraku modela, kar pa model naredi avtomatično. V tem primeru so povprečne mesečne vrednosti (mm/dan) transformirane v enodnevni časovni korak z linearno interpolacijo in nato modificirane z upoštevanjem ETF faktorja z uporabo formule:

$$\text{Potencialna evapotranspiracija} = E_{pot} \cdot (1 + ETF \cdot (T - T_{norm})), \quad (6.1)$$

kjer je E_{pot} standardna vrednost potencialne evapotranspiracije, T dejanska temperatura in T_{norm} normalna temperatura posameznega dne v letu.

6.1.3 Umerjanje in preverjanje modela

Obdobja za umerjanje in preverjanje modela smo izbrali na osnovi pojava velikih pretokov in razpoložljivih podatkov na vseh postajah (Preglednica 6.5). Tako smo obdobje 1. 1. 1964 – 31. 12. 1968 izbrali za obdobje umerjanja, kasnejše obdobje od 1. 1. 1984 – 31. 12. 1988 pa za obdobje preverjanja.

Za umerjanje smo najprej uporabili orodje, ki ga nudi program HBV-light, genetski algoritem GAP. Rezultati so prikazani v preglednici 6.6. 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 6.7 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, tudi pretoki, prikazujejo v mm na enoto površine.

Rezultate povprečne vodne bilance izračunane za obdobje umerjanja z orodjem GAP (1964–1968) prikazuje Preglednica 6.7. Zanimivi so podatki o letnem koeficientu odtoka. Podatki kažejo na precejšen raztros. 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 verjetno prispevna površina Vrela Bosne podcenjena, Krivaje pri Olovu pa precenjena.

Boljše rezultate umerjanja smo dobili z uporabo orodja PEST (Doherty, 2012; Doherty, 2005; Lawrence et al., 2009, Zhulu, 2010), ki so prikazani v Preglednici 6.8.

Preglednica 6.5: Podatki o maksimalnih letnih pretokih na posameznih postajah.

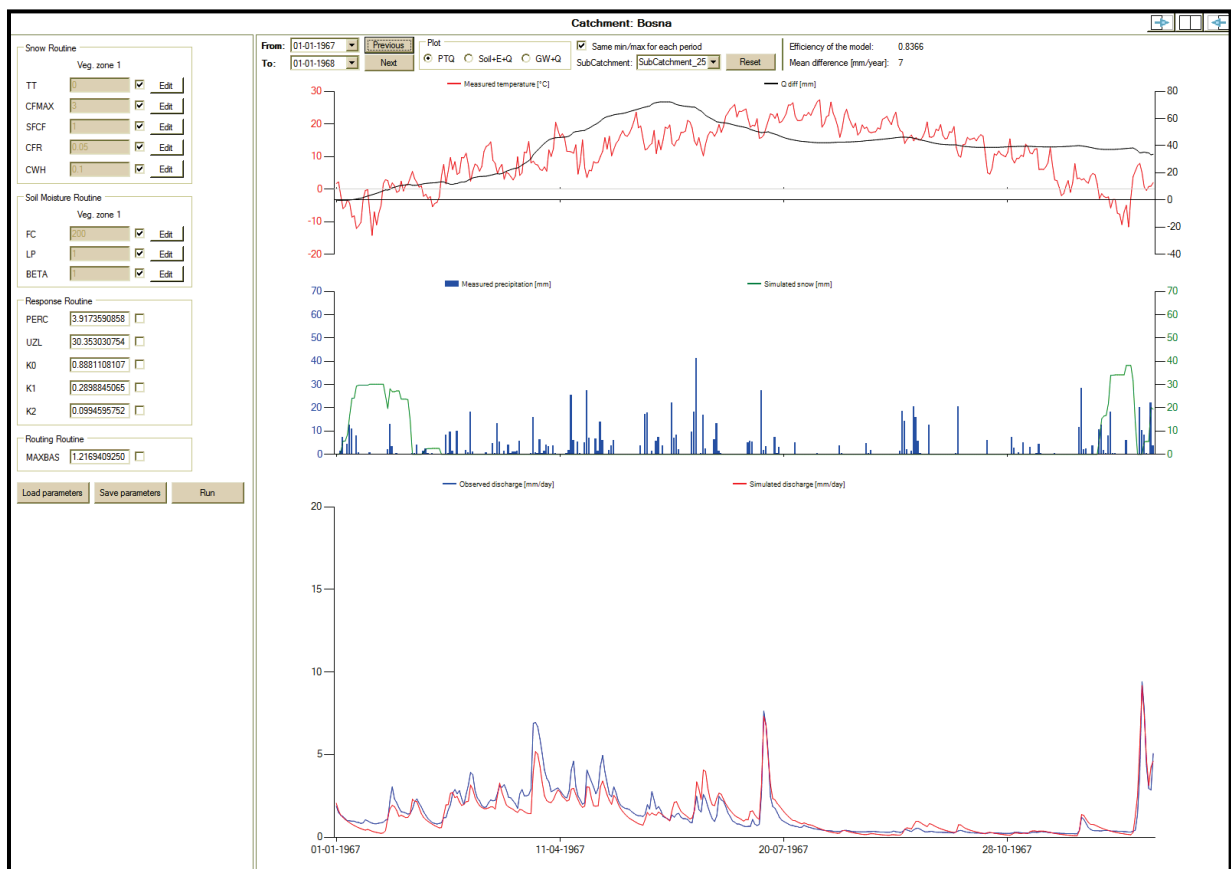
Leto	01-Ilidža	02-Blažuj	03-Plandište	04-Sarajevo	05-Reljevo	06-Visoko	07-Dobrinje	08-Merdani	09-Raspotočje	10-Olovo	11-Zavidovići_K	12-Zavidovići_B	13-Teslić	14-Kaloševiči
1951			20	35.1	160									
1952			28	111	327									
1953			28	70.2	302									
1954			23	48.3	274									
1955			23	92.8	252									
1956			20	68.2	171									
1957			18	45.7	127									
1958			24	52.6	237									
1959			24	46.5	164									
1960			18	38.3	127									
1961			20	46.5	210		300	59.7	383.9	76	212	489.4	132	176
1962			24	82.9	252		517.1	103	726.8	115	324	951.4	172	230
1963			17	35.9	193	77.5	337.4	61.3	479.7	59.4	166	532.8	84.3	112
1964			26	67.3	264	173	488.2	150	506.5	123	328	758.4	145	193
1965			22	85.9	289	186	613.9	206	950.1	484	821	1386	296	396
1966	67.9	21	18	47.4	165	77.3	271.6	73.9	368.7	174	304	469.6	172	230
1967	113	31	18	63.5	165	175	342.6	130	608.1	325	373	725.5	82.5	110
1968	166	51	21	138	287	251	1027	320	1196	144	262	1350	149	199
1969		21	17	37.5	124	72.5	208.1	74.9	357.3	60.6	163	506.6	193	258
1970		31	19	71.5	252	176	622.8	174	701.8	91.9	234	965.7	213	284
1971		22	18	36.6	193	114	307.3	68.4	373.9	62.9	121	457.7	38.8	54.8
1972		12	14	36.6	98.9	72.8	169.2	57.2	251.5	75.7	221	399	291	393
1973		25	18	59.5	160	78.9	280.9	63.9	343.1	91.9	214	425.3	286	252
1974		40	21	109	314	125	395.7	70.2	722.9	85.2	238	770.2	177	220
1975		23	18	62.2	213	147	345.2	64.8	484.9	117	200	586.6	127	148
1976		26	17	44.8	194	225	514.2	152	696.4	106	435	962.1	126	135
1977		23	16	49.8	224	93.1	324.7	82.7	402.4	84	231	498	51.9	79
1978		38	19	76.2	232	232	387.5	118	605.1	110	541	873.9	87.4	114
1979		35	17	54.2	240	94.5	345.2	66.4	454.6	90.7	171	518.2	46.1	63.5
1980		20	15	34	149	62.6	240.8	80.6	434.1	67.8	192	568.5	103	117
1981		23	15	50.9	162	125	267.1	117	484.1	113	273	626.6	129	174
1982		24	14	34	168	152	366.1	74	434.1	95.7	266	556.5	109	181
1983		22	15	34	170	198	334.9	113	515	84	191	732	60	118
1984		52	19	83.4	342	259	468.1	80.6	586.1	208	377	857.3	103	112
1985		21	15	29.3	126	65.7	200.8	109	358	90.1	167	694.1	195	298
1986		24	15	58	252	94.5	379.5	76.4	508.1	123	150	643	98.3	243
1987		42	16	112	262	144	322.2	96.6	453.9	192	346	723	118	158
1988		19	15	22.5	115	67.1	235.7	60.8	322.4	68.9	133	467.1	98.3	117
1989		95	16	104	252		461	52.8	739.1	122	236	1079	143	211
1990		45	13	50	109		245.6	48.5	499.6	88.8	345	664.5	66.9	91.3
2000					275									
2001		16			167			129	511.6	144	468	1005		
2002		55			227			96.7	687	120	347	778.1		

2003		64		71.4	304			44.3	638.6	136	318	629.4		
2004				48.3	216			199	721.3	162	198	958.4		
2005		33		48.7	219			107	698.3	124	582	1382		
2006	80.7	31		19.3	201	119		80.5	511.6	142	289	712.1		224
2007	67.8	30	18	36	253	127		57.2	566.8	123	266	795.4		166
2008	80.3	28	17	36	182	188		140	461.2	54.9	134	721		116
2009	84.2	21	18	47.5	282	71.7		112	437.4	86.5	163	638.1		154
2010					246			158	1064	132	259	1151		357
2011														
2012														
2013														
2014														
MAKS	166	95	28	138	342	259	1027	320	1196	484	821	1386	296	396

Preglednica 6.5 (nadaljevanje): Podatki o maksimalnih letnih pretokih na posameznih postajah.

Leto	16-Maglaj	17-Turija	18-Strašanj	19-Modrac	20-Karanovac	21-Stanić Rijeka	22-Uсора	23-Doboj	24-Modriča	26-Vrelo Bosne	27-Bioštica	28-Olovske luke	29-D_ Višća	30-Živinice
1951					194									
1952					263									
1953					246									
1954					208									
1955					335									
1956					360									
1957					118									
1958					260									
1959					321									
1960					205									
1961	718.2			226	272		969.1	1018	1096	18	44.8	30.7		
1962	1045			240	413		1399	1905	2067	21	67.9	46.8		
1963	784.2			126	203		844.9	878.7	944.5	15	35.1	26.6		
1964	1018			61.6	188		1238	1255	1355	21	72.2	49.7		
1965	1925			211	424		2274	2533	2911	18	284	134		
1966	787.7			74	123		816.1	844.7	1067	16	68.3	81.7	35.4	42.6
1967	910			74	118		967.3	1067	1153	16	193	124	46.3	56.1
1968	1681		50	139	301		1948	1995	2018	20	123	106	59.5	44.3
1969	714.7		39	89.6	270	465	1082	1207	1292	17	43	30	41.3	38.1
1970	1130		64	108	174	330	1704	1725	2002	19	79.6	37.2	36.8	46.1
1971	571	50	38	84.9	111		590.4	653	704.2	18	34.6	20.8	23.3	22.8
1972	585.1	68	42	113	208		1073	1421	1606	14	49.5	42.9	65.7	57.1
1973	552.3	21	36	78.4	115		676.3	745.5	819.7	16	50.9	58.5	18.7	22.1
1974	925.6	81	41	120	184		930.4	872	1056	20	68.3	61.1	44.6	54
1975	710.4	32	40	81.1	118		914.5	944.8	1019	16	110	74.5	41.7	48.6
1976	954.4	44	44	95.9	151		1051	1163	1262	16	83.8	40.6	43.3	36.7
1977	631	30	42	71.2	127		659.8	754.8	819.7	16	53.6	27.4	36.7	41.2
1978	1519	89	43	132	237		1545	1722	1917	18	110	89.2	50.4	60.8
1979	681.4	89	42	78.4	113		704.9	776	829.9	17	57.9	26.4	17.2	48
1980	793.3	64	44	88.5	163		842.4	898.9	961.9	15	49.5	32.8	32.4	41
1981	925.6	91	46	171	287		1270	1437	1578	14	77.1	48.1	31.8	46.9
1982	697.4	68	35	79.3	109		828.1	954.4	1033	14	65.2	69	46.8	36.5
1983	1164	112	41	103	132		1251	1328	1438	15	53.6	27.4	33.5	62.4
1984	1578	74	44	90.3	206		1644	1740	1805	19	170	134	29.3	70.4
1985	1118	63	46	142	296		1274	1570	1761	15	49.5	60.5	63	77
1986	871.8	94	54	188	320		955.3	1001	1113		91.7	62	72.4	133
1987	1379	67	68	278	452		1748	1878	1994		189	74.5	107	142
1988	655.7		44	159	237		769.9	962	1000		38.1	34.2	38.8	75.5
1989	1323		51	142	205		1393	1488	1611		95.3	77.3	28	64.4
1990	921.8		18	61.5	77.7		1012	1119	1208		68.3	34.5	12.6	52.1
2000								948						
2001	1528							2553			69.9	127		
2002	974.5			130				1147			55	68.8		
2003	903.1			18.1	66			965			66.8	55.7		

2004	1186			124	171			1590			95.3	77.3		
2005	2243			196	214			1740			65.2	60.6		
2006	986.9			139	184			1405			64.5	74.5		
2007	1045			94.1	146			1184		19	36.9	59.1		
2008	850				131			787		16	24.3	39.7		
2009	788.6							1079		19	49.5	48.5		
2010	1449							1914						
2011								366						
2012								1057						
2013								1431						
2014								1441						
MAKS	2243	112	68	278	452	465	2274	2553	2911	21	284	134	107	142



Slika 6.7: Kalibracija modela za reko Bosno.

Preglednica 6.6: Rezultati umerjanja modela z orodjem HBV (genetski algoritem GAP) 1. 1. 1964–31. 12. 1968 in validacija 1.1.1984–31.12.1988.

Hidrološka postaja	Porečje	Umerjanje modela za obdobje 1.1.1964–31.12.1968				Validacija modela za obdobje 1.1.1984–31.12.1988			
		Koeficient določenosti	Učinkovitost modela	Spearmanov koeficient	Koeficient odtoka	Koeficient določenosti	Učinkovitost modela	Spearmanov koeficient	Koeficient odtoka
Ilidža	Željeznica	0.4	0.3	0.6	0.55	0.0	0.0		0.52
Blažuj	Zujevina	0.4	-0.5	0.7	0.80	0.3	-1.7	0.8	0.80
Plandišče	Vrelo Bosne	0.3	-1.2	0.7	0.84	0.3	-1.8	0.7	0.86
Sarajevo	Miljacka	0.3	-0.1	0.7	0.63	0.5	0.0	0.8	0.59
Reljevo	Bosna1	0.6	0.4	0.8	0.74	0.7	0.6	0.9	0.70
Visoko	Fojnica	0.4	-1.7	0.6	0.86	0.4	-3.8	0.7	0.86
Dobrinje	Bosna2	0.6	0.4	0.8	0.85	0.7	-0.1	0.9	0.82
Merdani	Lašva	0.6	0.5	0.8	0.55	0.5	0.2	0.8	0.51
Raspotočje	Bosna3	0.7	0.5	0.9	0.84	0.8	0.4	0.9	0.81
Olovo	Bioštica	0.3	0.1	0.7	0.62	0.5	-0.2	0.8	0.57
Zavidovići_K	Krivaja	0.4	0.4	0.8	0.60	0.6	0.5	0.9	0.56
Zavidovići_B	Bosna4	0.8	0.7	0.9	0.78	0.7	0.6	0.9	0.75
Teslić	V.Usora	0.3	0.3	0.8	0.55	0.4	0.3	0.8	0.48
Kaloševiči	M.Usora	0.3	0.3	0.8	0.53	0.4	0.3	0.8	0.48
Usora-Bosna	Usora	0.3	0.3	0.8	0.54	0.4	0.3	0.8	0.49
Maglaj	Bosna5	0.8	0.8	0.9	0.65	0.7	0.7	0.9	0.67
Turija	Turija				0.55	0.4	0.4	0.7	0.51
Strašanj	Spreca1	0.4	-0.4	0.7	0.55	0.4	0.3	0.8	0.52
Modrac	Modrac	0.3	-0.1	0.6	0.55	0.4	0.3	0.7	0.52
Karanovac	Spreca2	0.4	0.2	0.7	0.55	0.4	0.4	0.8	0.52
Stanić Rijeka	Spreca3				0.54	0.0	0.0		0.53
Usora	Bosna6	0.8	0.8	0.9	0.64	0.7	0.7	0.9	0.65
Doboj	Bosna7	0.8	0.8	0.9	0.62	0.8	0.8	0.9	0.62
Modriča	Bosna8	0.8	0.8	0.9	0.62	0.8	0.8	0.9	0.62
Bosna-Sava	Bosna9	0.8	0.8	0.9	0.62	0.8	0.8	0.9	0.62

Legenda: *Koeficient določenosti (determinacijski koeficient)* linearnega regresijskega modela (K_d) je kvocient varianc simuliranih vrednosti in opazovanih vrednosti odvisne spremenljivke. [$K_d^2 = \text{kvocient vsote kvadrata razlike med srednjo vrednostjo simuliranih vrednosti in srednjo vrednostjo merjenih in vsote kvadrata razlike med merjeno vrednostjo in srednjo vrednostjo merjenih vrednosti}$]; $K_d = 0$: slaba določenost; $K_d = 1$: popolna določenost; *Koeficient učinkovitosti (K_u)*: koeficient, ki primerja izračunane (simulirane) vrednosti z merjenimi [$K_u = 1 - (\text{vsota kvadratov razlik simuliranih in merjenih vrednosti}) / \text{vsota kvadratov razlik merjenih vrednosti s srednjo vrednostjo}$]; $K_u = 1$: popolna učinkovitost; $K_u = 0$: simulacija je dobra (slaba) kot je predikcija s konstantno vrednostjo; $K_u < 0$: zelo slaba predikcija; *Spearmanov koeficient (K_s)*: predstavlja kakovost opisa povezanosti med spremenljivkama; je posebna oblika Pearsonovega koeficienta, v kateri so merjene vrednosti pred izračunom koeficientov preoblikovane v range. $K_s = 0$: slaba določenost; $K_s = 1$: popolna določenost;

Preglednica 6.7: Rezultati umerjanja modela – vodna bilanca za posamezne dele porečja.

Številka podporečja	Hidrološka postaja	Podporečje	Vodna bilanca [mm/leto]:									Koeficient odtoka	
			Vsota modeliranega Q	Vsota merjenega Q	Vsota padavin	Vsota dejanske evapotranspiracije	Vsota potencialne evapotranspiracije	Zaloga v vrhnjem sloju zemljine	Zaloga v zgornjem sloju zemljine	Zaloga v spodnjem sloju zemljine	Modeliran koeficient odtoka	Merjen koeficient odtoka	
1	Ilidža	Željeznica	714	724	995	312	347	0.00	0.15	0.85	0.72	0.99	
2	Blažuj	Zujevina	801	781	1337	268	308	0.00	0.13	0.87	0.60	1.03	
3	Plandište	Vrelo Bosne	1256	1249	1416	244	299	0.00	0.06	0.94	0.89	1.01	
4	Sarajevo	Miljacka	588	568	978	298	349	0.00	0.18	0.82	0.60	1.03	
5	Reljevo	Bosna1	731	803	978	335	349	0.00	0.13	0.87	0.75	0.91	
6	Visoko	Fojnica	758	750	1369	264	304	0.01	0.07	0.92	0.55	1.01	
7	Dobrinje	Bosna2	618	652	966	329	350	0.01	0.10	0.89	0.64	0.95	
8	Merdani	Lašva	551	580	816	321	362	0.03	0.06	0.91	0.68	0.95	
9	Raspotočje	Bosna3	544	583	830	305	365	0.01	0.09	0.90	0.65	0.93	
10	Olovo	Bioštica	444	447	977	277	349	0.03	0.15	0.82	0.45	0.99	
11	Zavidovići_K	Krivaja	578	561	924	283	353	0.01	0.26	0.73	0.63	1.03	
12	Zavidovići_B	Bosna4	479	624	831	316	365	0.01	0.09	0.90	0.58	0.77	
13	Teslić	V.Usora	759	671	881	309	365	0.03	0.26	0.71	0.86	1.13	
14	Kaloševiči	M.Usora	744	634	957	351	365	0.03	0.28	0.69	0.78	1.17	
15	Usora-Bosna	Usora	683	634	957	364	364	0.03	0.26	0.71	0.71	1.08	
16	Maglaj	Bosna5	484	588	952	359	362	0.01	0.13	0.86	0.51	0.82	
17	Turija	Turija	494	NaN	936	329	351	0.00	0.26	0.74	0.53		
18	Strašan	Spreca1	416	489	928	324	351	0.00	0.00	1.00	0.45	0.85	
19	Modrac	Modrac	505	406	928	340	351	0.00	0.39	0.61	0.54	1.25	
20	Karanovac	Spreca2	460	410	937	343	351	0.00	0.33	0.67	0.49	1.12	
21	Stanić Rijeka	Spreca3	467	NaN	957	276	351	0.00	0.32	0.68	0.49		
22	Usora	Bosna6	495	594	957	354	354	0.01	0.15	0.84	0.52	0.83	
23	Doboj	Bosna7	488	556	957	341	351	0.01	0.18	0.81	0.51	0.88	
24	Modriča	Bosna8	466	573	957	351	352	0.01	0.18	0.81	0.49	0.81	
25	Bosna-Sava	Bosna9	456	573	957	350	351	0.01	0.18	0.81	0.48	0.80	

Preglednica 6.8: Rezultati umerjanja modela z orodjem PEST.

Hidrološka postaja	Porečje	Umerjanje modela za obdobje 1.1.1961–31.12.1990				
		Koeficient določenosti	Učinkovitost modela	Spearmanov koeficient	Koeficient odtoka - merjeni	Koeficient odtoka - simulirani
Ilidža	Željeznica	0.63	0.63	0.9	0.76	0.70
Blažuj	Zujevina	0.62	0.62	0.8	0.54	0.55
Plandišče	Vrelo Bosne	0.75	0.75	0.9	0.82	0.82
Sarajevo	Miljacka	0.58	0.58	0.8	0.55	0.52
Reljevo	Bosna1	0.73	0.72	0.9	0.79	0.77
Visoko	Fojnica	0.71	0.71	0.9	0.57	0.55
Dobrinje	Bosna2	0.77	0.77	0.9	0.66	0.68
Merdani	Lašva	0.65	0.64	0.9	0.70	0.67
Raspočje	Bosna3	0.80	0.80	0.9	0.73	0.74
Olovo	Bioštica	0.52	0.52	0.8	0.42	0.40
Zavidovići_K	Krivaja	0.61	0.61	0.8	0.59	0.59
Zavidovići_B	Bosna4	0.77	0.76	0.9	0.77	0.77
Teslić	V.Usora	0.46	0.46	0.7	0.82	0.82
Kaloševiči	M.Usora	0.47	0.47	0.7	0.75	0.77
Usora-Bosna	Usora	0.46	0.46	0.7	0.75	0.74
Maglaj	Bosna5	0.75	0.74	0.9	0.65	0.67
Turija	Turija	0.36	0.35	0.6	0.43	0.45
Strašanj	Spreca1	0.51	0.50	0.8	0.47	0.45
Modrac	Modrac	0.54	0.54	0.7	0.43	0.45
Karanovac	Spreca2	0.60	0.60	0.8	0.45	0.45
Stanić Rijeka	Spreca3	0.65	0.64	0.8	0.69	0.44

6.2 Rezultati simulacije poplave reke Bosne maja 2014

Pojav poplave maja 2014 smo simulirali z dnevnim časovnim korakom za obdobje april-maj 2014. Simulacija z urnimi vrednostmi je dala vprašljive rezultate, verjetno zaradi nepopolnih nizov podatkov. Povprečne dnevne padavine za prispevna območja vodomernih postaj na reki Bosni ter rezultate simulacije specifičnih pretokov za te profile prikazuje Preglednica 6.9. Rezultate simuliranih pretokov za iste profile za obdobje od 9. do 22. maja 2014 pa prikazujeta Slika 6.8 in Preglednica 6.10. Rezultate simulacije odtočnega hidrograma na postajah pritokov reke Bosne in v njenem zgornjem delu prikazuje Slika 6.9.

Krivuljo odnosa med konicami simuliranih hidrogramov glede na velikost prispevne površine vzdolž reke Bosne in njenih pritokov prikazuje Slika 6.10. Spreča in Krivaja imata nekoliko višje konice glede na prispevne površine, vendar enaka relativna povečanja pretokov glede na delež povečanja prispevne površine. Reka Usora ima glede na velikosti prispevnih površine manjše odtokov od reke Bosne, kar se odraža na zmanjšanem naklonu krivulje po vtoku Usore v reko Bosno. Nasprotno, povečanje naklona krivulje opazimo na reki Bosni po vtoku Krivaje v Zavidovičih in po vtoku reke Spreče v Doboju. Razlog, kot rečeno, so višji odtoki glede na prispevno površino na Spreči in Krivaji.

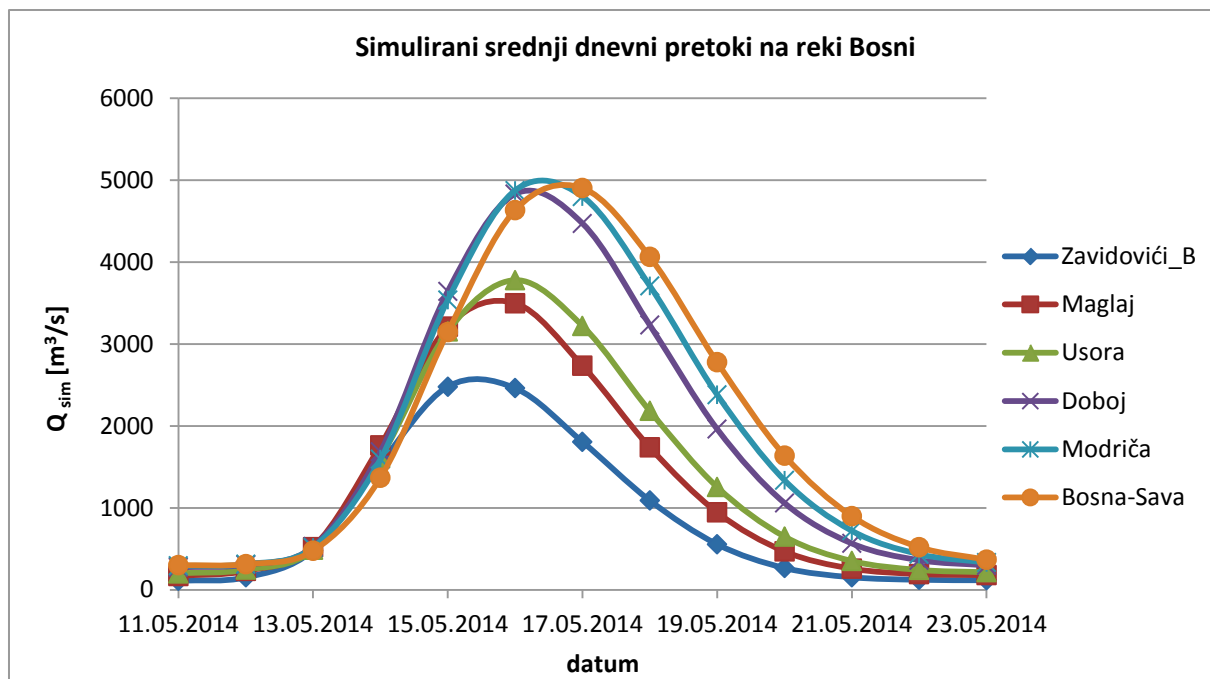
Simulirane hidrograme odtokov za izbrane postaje na reki Bosni prikazujejo tudi Slika 6.11, Slika 6.12, Slika 6.13 in Slika 6.14. Parametri modela so umerjeni na zabeležene pretoke do leta 1990, ki niso bili nikoli tako veliki kot leta 2014, tako da so dejanske konice pretokov na nekaterih mestih verjetno bile nekoliko nižje od simuliranih zaradi razlivanja vode. Zelo dobro se ujemata hidrograma simuliranih pretokov in pretokov, ki so bili določeni iz pretočnih krivulj FHMZ BIH na vodomernih postajah Zavidoviči in Maglaj (Slika 6.13 in Slika 6.14). Kumulativne krivulje prostornin simuliranih hidrogramov za izbrane postaje na reki Bosni podaja Slika 6.15.

Preglednica 6.11 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 1000 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 6.11, so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli povratno dobo 500 let, drugod pa več kot 1000 let. Odtočni koeficienti za reko Bosno so se gibali med 0.76 (Bosna Modriča) in 0.91 (Bosna pod vtokom Usore). Odtočni koeficient za Bosno v Doboju je bil 0.82.

Preglednica 6.9: Povprečne dnevne padavine prispevnih površin, simuliranih specifičnih pretokov in odtočni koeficienti za izbrane profile na reki Bosni.

Padavine [mm/dan]	Datum	Bosna vtok v Savo	Modriča	Doboj	Usora	Maglaj	Zavidovići
1	9.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
2	10.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	11.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	12.5.2014	7.1	7.2	7.5	8.2	10.6	10.3
5	13.5.2014	21.6	21.6	21.6	22.6	25.7	27.1
6	14.5.2014	66.7	66.6	66.5	62.8	63.1	65.4
7	15.5.2014	49.6	48.8	46.4	36.7	28.6	32.2
8	16.5.2014	11.2	11.1	11.0	8.3	8.6	8.8
9	17.5.2014	3.0	3.0	3.0	3.0	2.4	2.4
10	18.5.2014	0.8	0.7	0.5	0.2	0.1	0.1
11	19.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	20.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	21.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	22.5.2014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
skupaj	12.5.-17.5	159.2	158.3	156.0	141.6	139.2	146.4
Specifični odtoki [mm/dan]	Datum	Bosna vtok v Savo	Modriča	Doboj	Usora	Maglaj	Zavidovići
1	9.5.2014	2.9	2.7	2.6	2.3	2.2	1.9
2	10.5.2014	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1	1.9
3	11.5.2014	2.4	2.4	2.4	2.2	2.1	1.9
4	12.5.2014	2.5	2.6	2.7	2.7	2.9	2.5
5	13.5.2014	3.8	4.2	4.6	5.3	6.5	8.1
6	14.5.2014	10.9	13.0	14.7	17.6	22.1	26.0
7	15.5.2014	25.1	28.9	31.8	34.4	40.3	41.8
8	16.5.2014	36.9	39.8	42.2	41.2	43.9	41.5
9	17.5.2014	39.1	39.2	39.1	35.2	34.3	30.4
10	18.5.2014	32.4	30.3	28.2	23.8	21.8	18.4
11	19.5.2014	22.1	19.4	17.1	13.7	11.9	9.4
12	20.5.2014	13.1	10.9	9.2	7.1	5.9	4.5
13	21.5.2014	7.2	5.9	4.9	3.8	3.2	2.6
14	22.5.2014	4.2	3.5	3.2	2.6	2.4	2.1
skupaj	14.5.-17.5.	112.0	120.9	127.8	128.4	140.6	139.7
skupaj	14.5.-18.5.	144.4	151.2	156	152.2	162.4	158.1
Odtočni koeficient	padavine: 12. 17.5 odtok: 14.5.-17.5.	0.70	0.76	0.82	0.91	1.01	0.96
Odtočni koeficient	padavine: 12. 17.5 odtok: 14.5.-18.5.	0.91	0.96	1.00	1.07	1.17	1.08



Slika 6.8: Simulirani hidrogrami pretokov na reki Bosni v maju 2014.

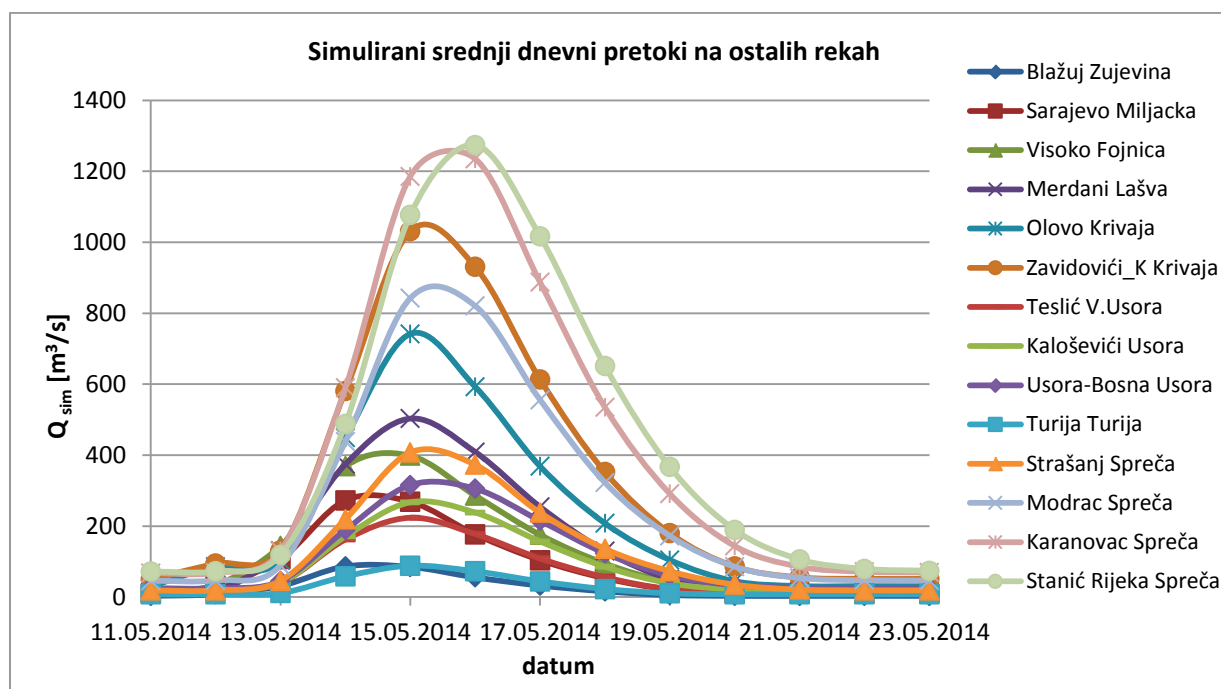
Preglednica 6.10: Dnevni povprečni simulirani pretoki na izbranih profilih reke Bosne.

Pretoki [m ³ /s]	Datum	Bosna vtok v Savo	Modriča	Doboj	Usora	Maglaj	Zavidovići
1	9.5.2014	362	333	320	213	176	113
2	10.5.2014	315	301	280	203	171	111
3	11.5.2014	300	292	275	201	170	111
4	12.5.2014	312	313	306	245	231	151
5	13.5.2014	476	517	527	488	521	481
6	14.5.2014	1367	1593	1686	1610	1761	1541
7	15.5.2014	3146	3536	3643	3154	3213	2479
8	16.5.2014	4634	4874	4831	3779	3498	2461
9	17.5.2014	4902	4800	4472	3221	2736	1806
10	18.5.2014	4062	3709	3231	2183	1738	1090
11	19.5.2014	2777	2382	1962	1254	945	556
12	20.5.2014	1639	1337	1059	649	469	266
13	21.5.2014	899	720	565	351	258	153
14	22.5.2014	520	435	361	243	192	122

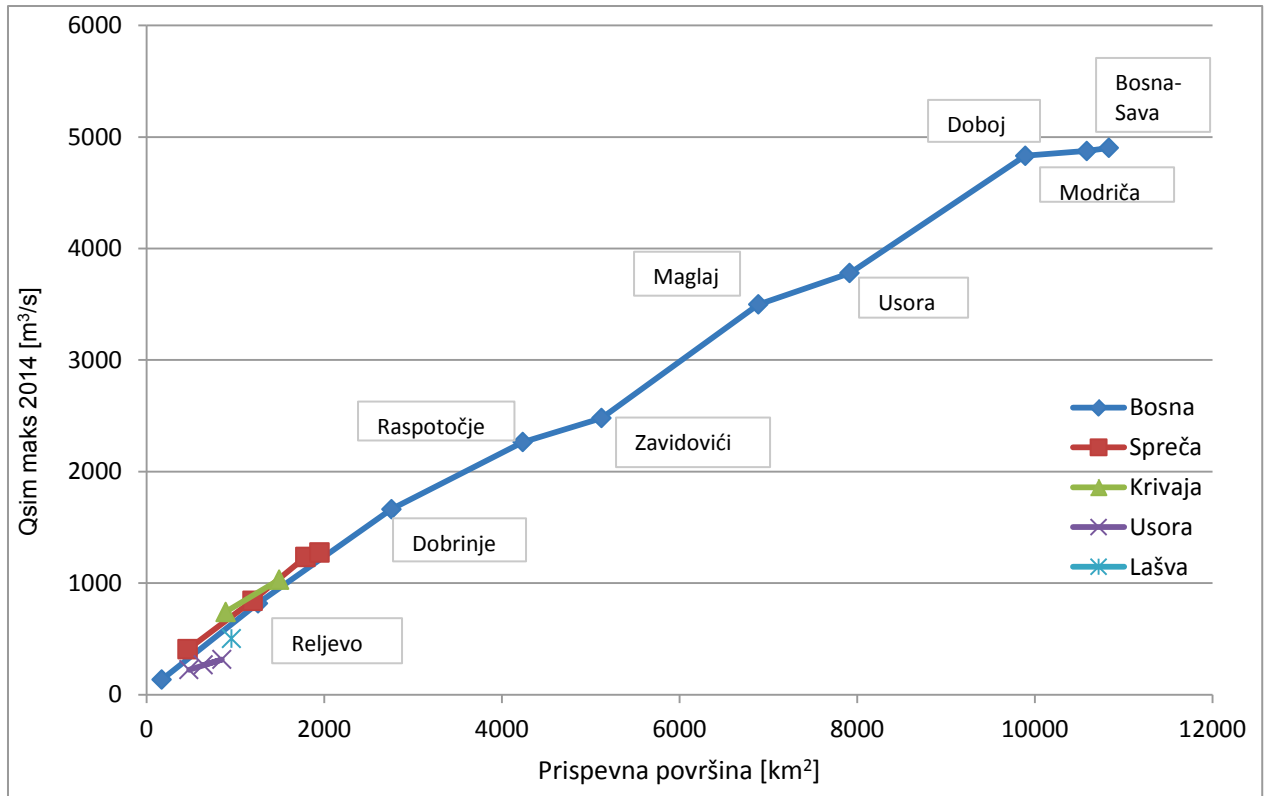
Preglednica 6.11: Verjetnosti pojava maksimalnih pretokov na posameznih vodomernih postajah na reki Bosni (vir: Hidrološka študija za BiH, RHMZ RS in FHMZ BiH).

povratna doba (leta)	Modriča	Doboj	Maglaj	Zavidovići	Raspotočje	Dobrinje	Reljevo
	[m ³ /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
1000*	4645	4321	3718	2342	1904	1534	714
simulacija 2014 – teoretično najvišje konice vala	4875	4831	3498	2479	2265	1663	820

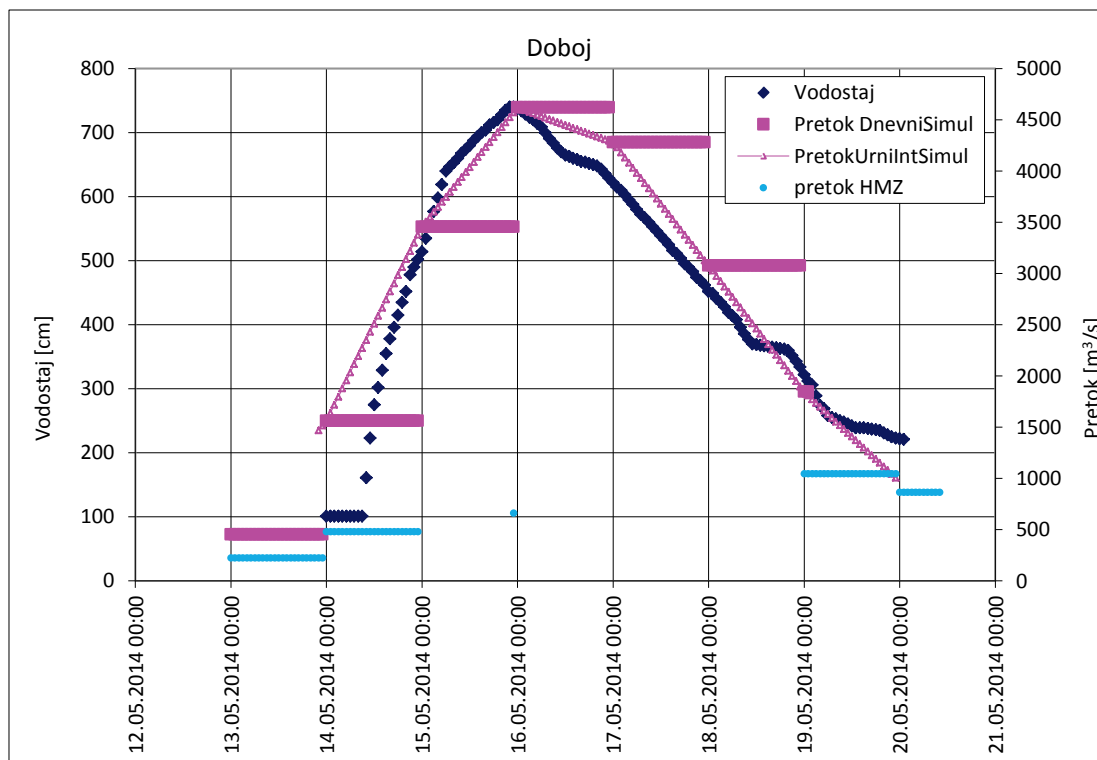
Legenda: *določeno iz odnosa verjetnih visokih voda do 100 letne povratne dobe s pomočjo logaritemske skale.



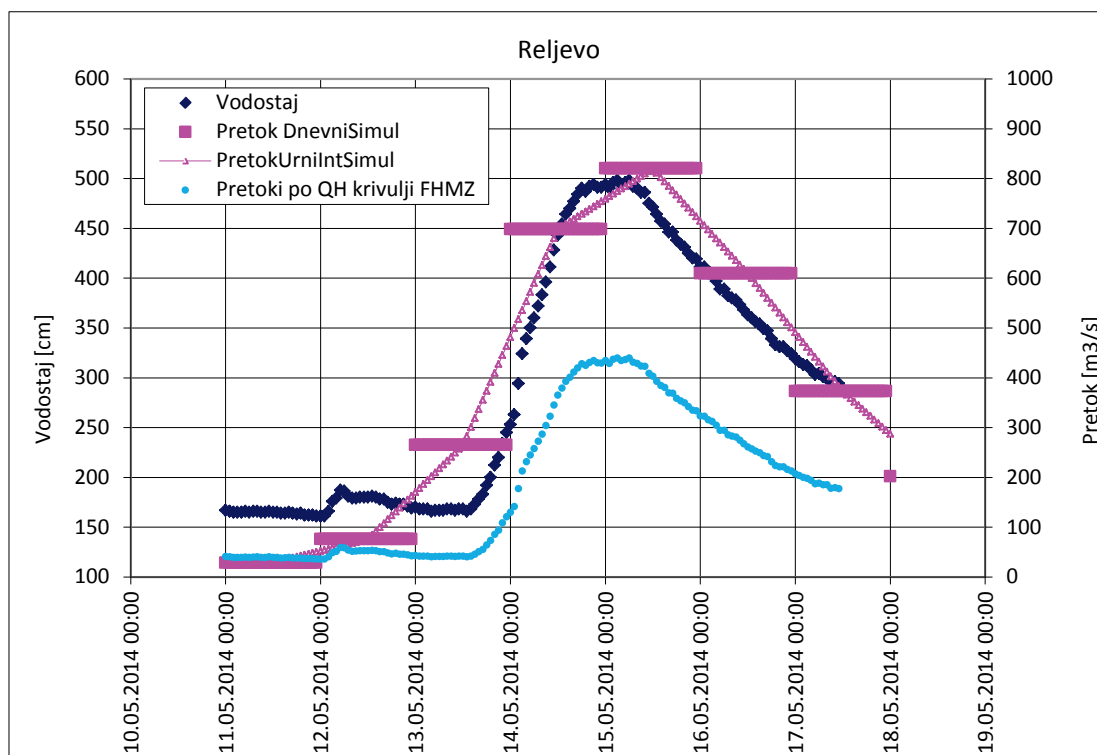
Slika 6.9: Simulirani hidrogrami pretokov v maju 2014 na pritokih reke Bosne.



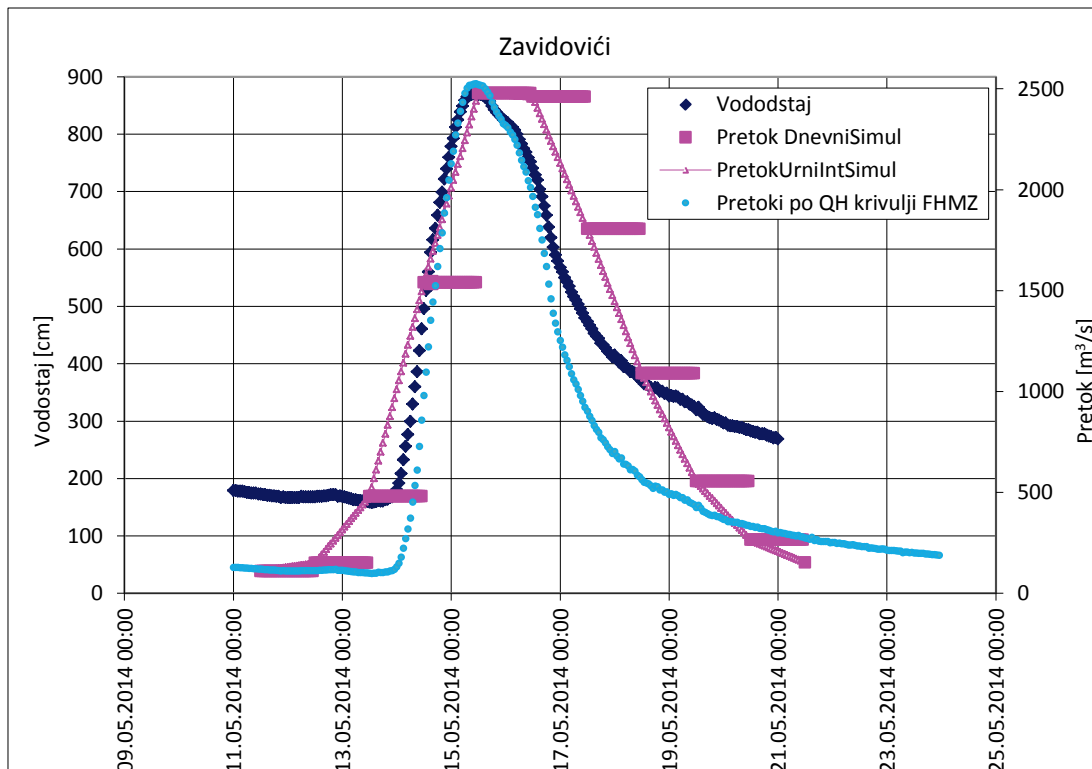
Slika 6.10: Krivulja odnosa med konicami simuliranih hidrogramov glede na velikosti prispevnih površin.



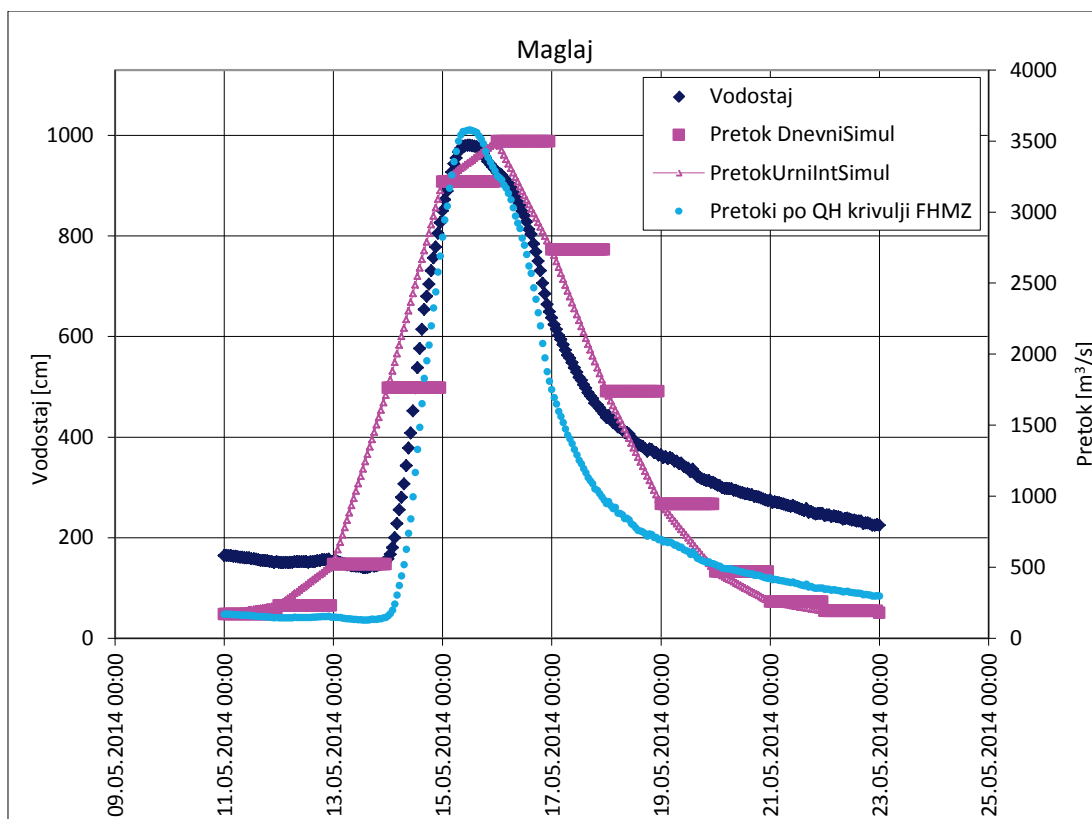
Slika 6.11: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki na VP Dobož na reki Bosni.



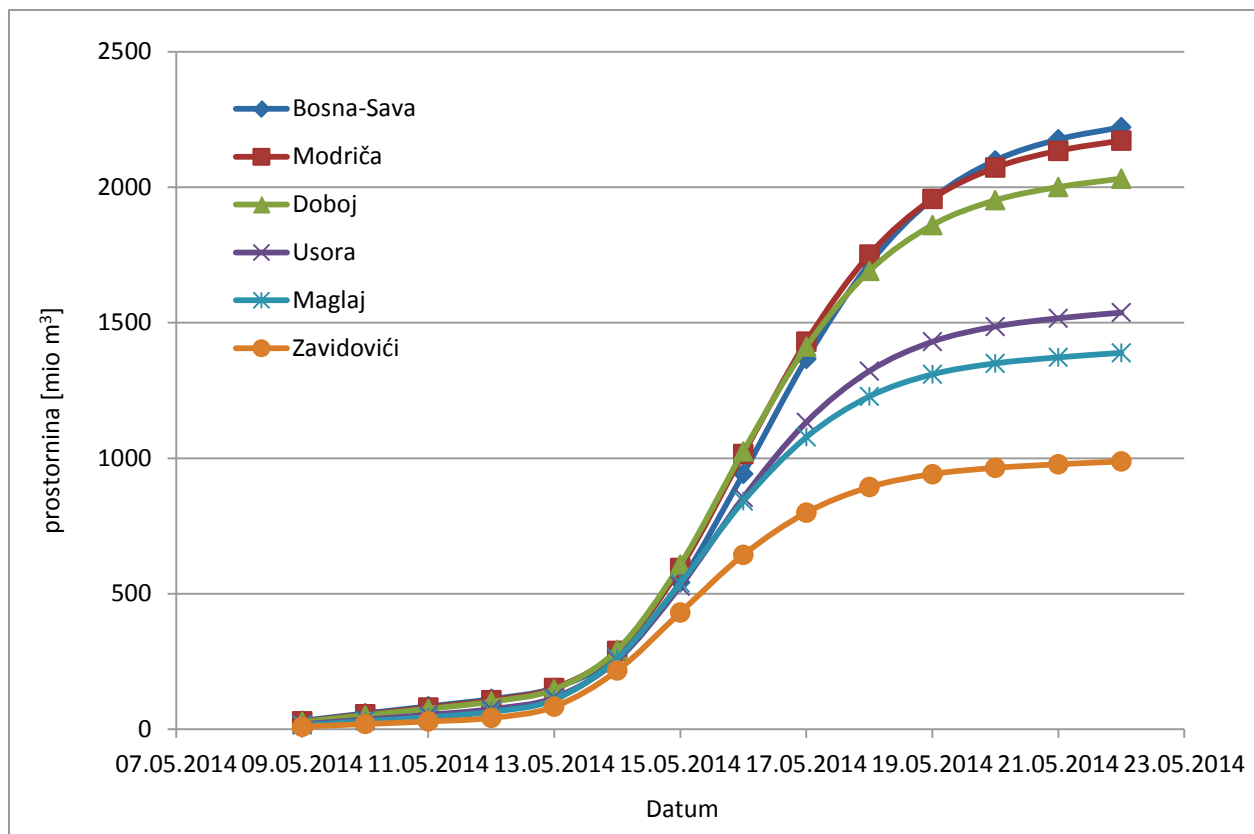
Slika 6.12: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Reljevo na reki Bosni.



Slika 6.13: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Zavidovići na reki Bosni.



Slika 6.14: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Maglaj na reki Bosni.



Slika 6.15: Konsumpcijske krivulje prostornin simuliranega poplavnega vala iz dnevni vrednosti padavin na izbranih profilih reke Bosne (datum označen kot MMDDLLLL).

Med 9. in 22. majem 2014 je skozi dolino reke Bosne pri Zavidovičih steklo skoraj 1000 mio m³ vode, pri Maglaju 1389 mio m³, pri Doboju (pod Sprečo) 2032 mio m³ in pri Modriči 2172 mio m³ vode.

7 OBSEG POPLAV VZDOLŽ REKE BOSNE

7.1 Opis uporabljenih podatkov in metoda dela

Največji obseg so imele poplave 15. maja 2014. Za izračun površine največjega obsega poplav med Zavidovići in Modričo smo izdelali digitalni model reliefa (DMR). DMR je narejen iz podatkov o višini terena v dolini reke Bosne, ki smo ga pridobili od RHMZ RS v oblika TIN, ga spremenili v raster resolucije 5 m ter združili s podatki o terenu izven doline v resoluciji 25 m. Obseg poplav 15. maja 2014 je interpretiran iz podatkov o višinah največje zabeležene poplavne vode na vodomernih postajah Zavidovići, Maglaj, Doboj in na reki Bosni pri Modriči (glede na višino mostu) in reki Savi pri Bosanskem Šamcu (poglavje 4). Za oceno višine poplavne vode na vmesnih profilih smo upoštevali padec gladine poplavne vode ob stoletnih poplavah. Preglednica 7.1 prikazuje kote dna reke Bosne glede na oddaljenost od ustja (vtok v Savo) in višine kot stoletne vode določena z modelnimi izračuni. RHMZ RS nam je poslal georeferirano 2D sliko obsega stoletnih poplav, ki je rezultat modela za reko Bosno. Linijo smo združili z digitalnim modelom terena in določili kote stoletne poplave vzdolž toka.

Iz preseka reliefa in ploskve poplavne vode v dolini je izračunana tudi površina poplave med Zavidovići in Modričo ter prostornina med ploskvijo in terenom. Za kontrolo smo pridobili tudi razpoložljive satelitske podatke Landsat 8 in Aqua.

Preglednica 7.1: Kote dna reke Bosne glede na oddaljenost od ustja (vtok v Savo) in višine kot stoletne vode določena z modelnimi izračuni.

Št. (Slika 7.1)	Stacionaža [m]	Višina dna [m n.v.]	Višina vode pri Q100	Višina vode 15.5.2014
	0			89.5
1	1035	82.3	88.0	90.5
2	1747	83.6	90.1	91.0
3	6749	86.9	92.7	93.8
4	11567	90.6	96.5	97.8
5	16150	93.8	100.2	101.7
6	20673	99.2	104.0	105.5
7	23780	102.4	107.9	108.8
8	27923	105.4	111.4	112.3
9	29877	106.7	112.9	114.0
10	31597	108.2	113.6	115.8
11	34359	110.8	115.5	118.0
12	39166	113.9	119.0	121.8
13	40671	114.4	119.7	122.6
14	42580	115.3	121.4	124.2
15	44740	117.4	123.4	126.1
16	47754	119.6	126.4	128.7
17	50584	122.2	127.8	131.1
18	52165	123.5	129.9	132.4
19	55803	127.0	134.8	137.0

20	58482	129.1	136.0	138.5
21	61057	131.6	136.3	140.0
22	62886	132.1	137.7	141.6
23	66284	134.8	142.4	144.5
24	70189	138.1	146.5	149.0
25	71885	140.0	148.7	150.9
26	75897	144.3	152.0	155.5
27	80674	149.3	159.1	161.0
28	84286	155.2	163.0	165.2
29	90672	162.6	171.3	172.5
30	95142	168.9	176.6	178.1
31	100670	172.1	182.6	185.1
32	104319	179.8	186.5	189.6
33	110663	189.0	196.5	197.6
34	115396	194.8	202.6	203.6
35	120524	202.4	210.1	210.0

7.2 Rezultati – obseg poplav vzdolž reke Bosne v maju 2014

Največji obseg poplav je prikazan na digitalnem modelu reliefa (Slika 7.1, Slika 7.2). Gre za stanje maksimalnih pretokov 15. maja 2014 med 12:00 in 15:00, ko je bila površina poplave med Zavidovići in Modričo velika 99 km², prostornina poplavne vode pa 401 mio m³. Rast poplavljenih površin in pripadajoče prostornine poplave med Zavidovići in Modričo od 14. maja 2014 ob 15:00 do 15. maja 2014 ob 12:00 prikazuje Preglednica 7.2. V času konice poplavnega vala se je v dolini reke Bosne med Zavidovići in Modričo skoraj cel dan zadrževalo cca 400 mio m³ poplavne vode. To je skoraj enako prostornini v enem dnevu pretekle vode skozi profil pri Modriči (16. maja 2014 je bil pretok velik 4875 m³/s), 421 mio m³ vode.

Preglednica 7.2: Časovni potek večanja poplavljenih površin in prostornine poplave med Zavidovići in Modričo.

	F [km ²]	V [mio m ³]
14.5.2014 15:00	84.9	255.9
15.5.2014 0:00	89.5	298.9
15.5.2014 12:00	99.0	401.7
16.5.2014 12:00	96.0	395.5

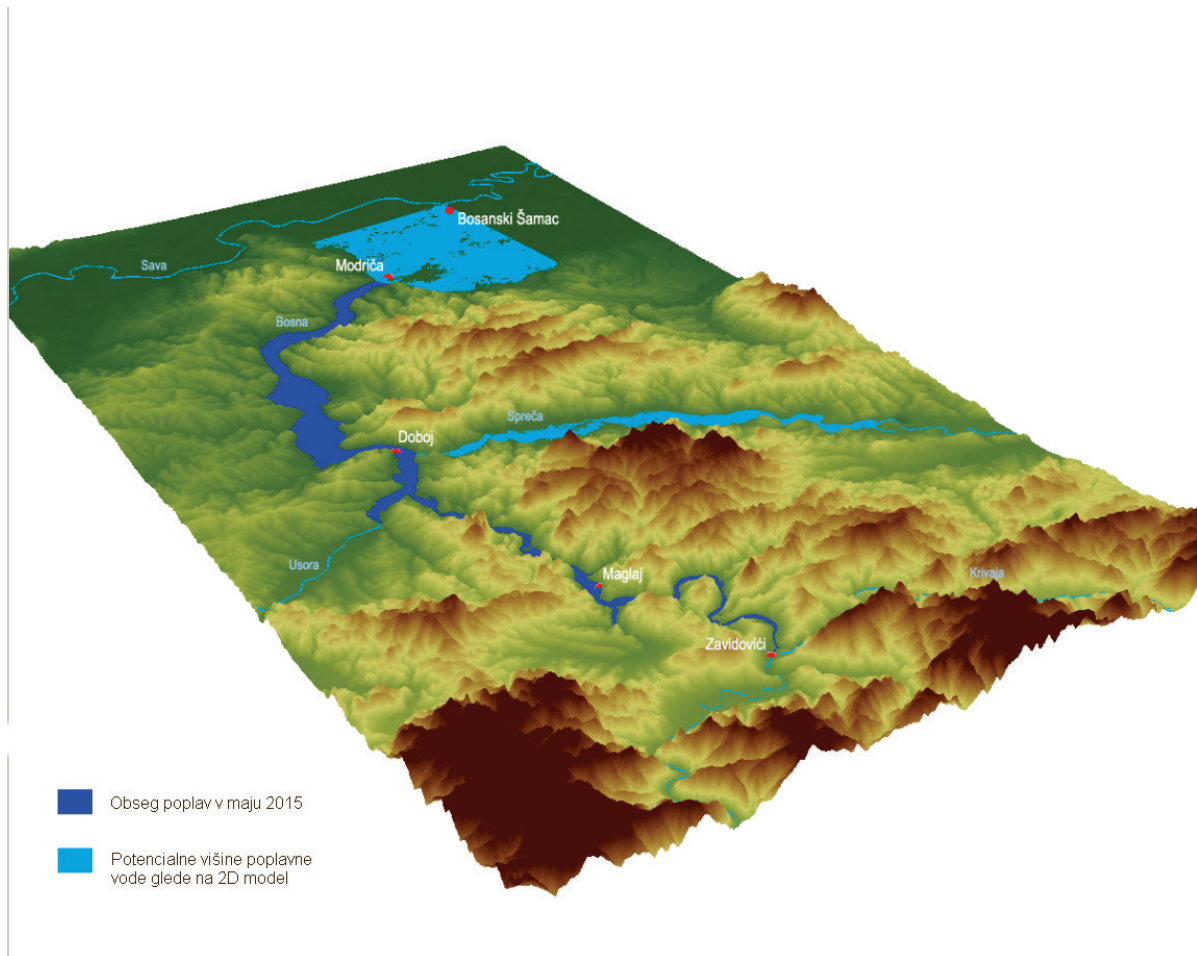
Stanje 19. maja 2014 prikazuje Slika 7.3. Območje je posnel satelit Aqua (desna stran slike). Leva stran slike kaže stanje istega obdobja prejšnjega leta (18. maj 2013). Modro siva barva na desnem posnetku kaže, da se je poplava dne 19. maja 2014 že umaknila iz večjega dela doline reke Bosne, medtem ko še vztraja ob reki Savi (modra barva).

Obseg poplav oziroma večjih vodnih površin dne 22. maja 2014 prikazujeta Slika 7.4 in Slika 7.5. Podatki so povzeti iz posnetkov Landsat 8 (vsi spektri). Posnetek je zajet sedem dni po višku poplavnega vala vzdolž reke Bosne, poplavna voda pa se še vedno zadržuje na poplavni ravnici ob reki Savi. Na tem območju se poplave pojavljajo vsako sezono oziroma vsaj dvakrat letno. Slika 7.4 prikazuje tudi posnetek vidnega spektra Landsat 8 pred in po poplavnem dogodku (levo: 6. maj 2014; desno: 22. maj 2014). Temno modra barva predstavlja vodne površine (desno spodaj je viden zadrževalnik Modrac oziroma Modračko ali Tuzlansko jezero). Vidne so poplave reke Save in Bosne pri Bosanskem Šamcu. Izrazita je tudi močnejša siva barva ob reki Bosni na desnem posnetku. Ta verjetno predstavlja še vidne ostanke odloženega blata ali peska na poplavnih območjih. Za nadaljnjo analizo bi bilo primerno pregledati še nevidne spektre posnetka in tako določiti vlažnost prsti, kar nakazuje na obseg poplav.



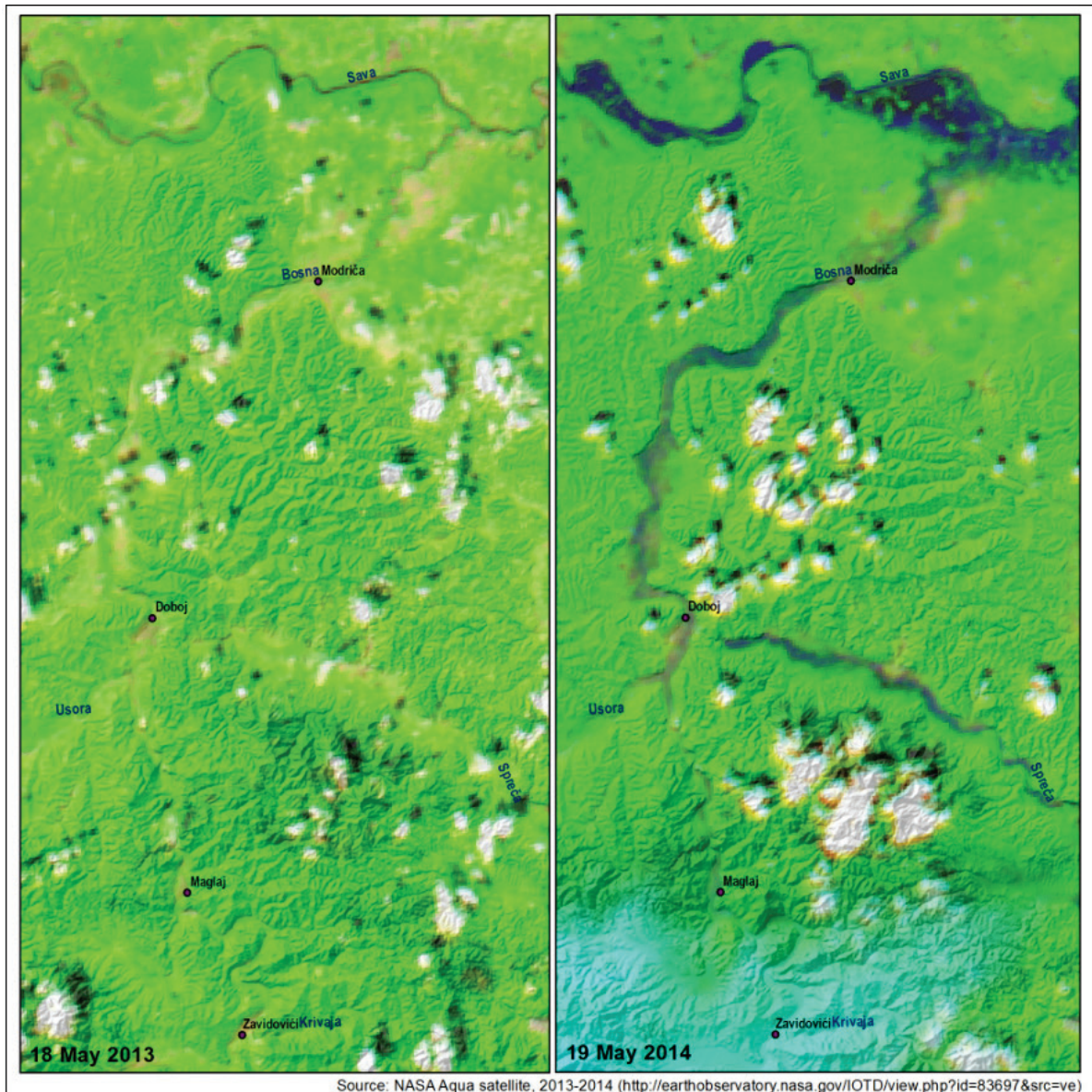
Slika 7.1: Prikaz ocene največjega obsega poplav na digitalnem modelu reliefa (razmerje prikaza dolžin proti višinam je 1:5).

V spodnjem levem kotu slike v območju planin leži dolina Željezno polje (reka Željeznica je desni pritok reke Bosne). Na tem območju so se pojavili številni zemeljski plazovi. Drobirski tok je povsem preoblikoval dolino.



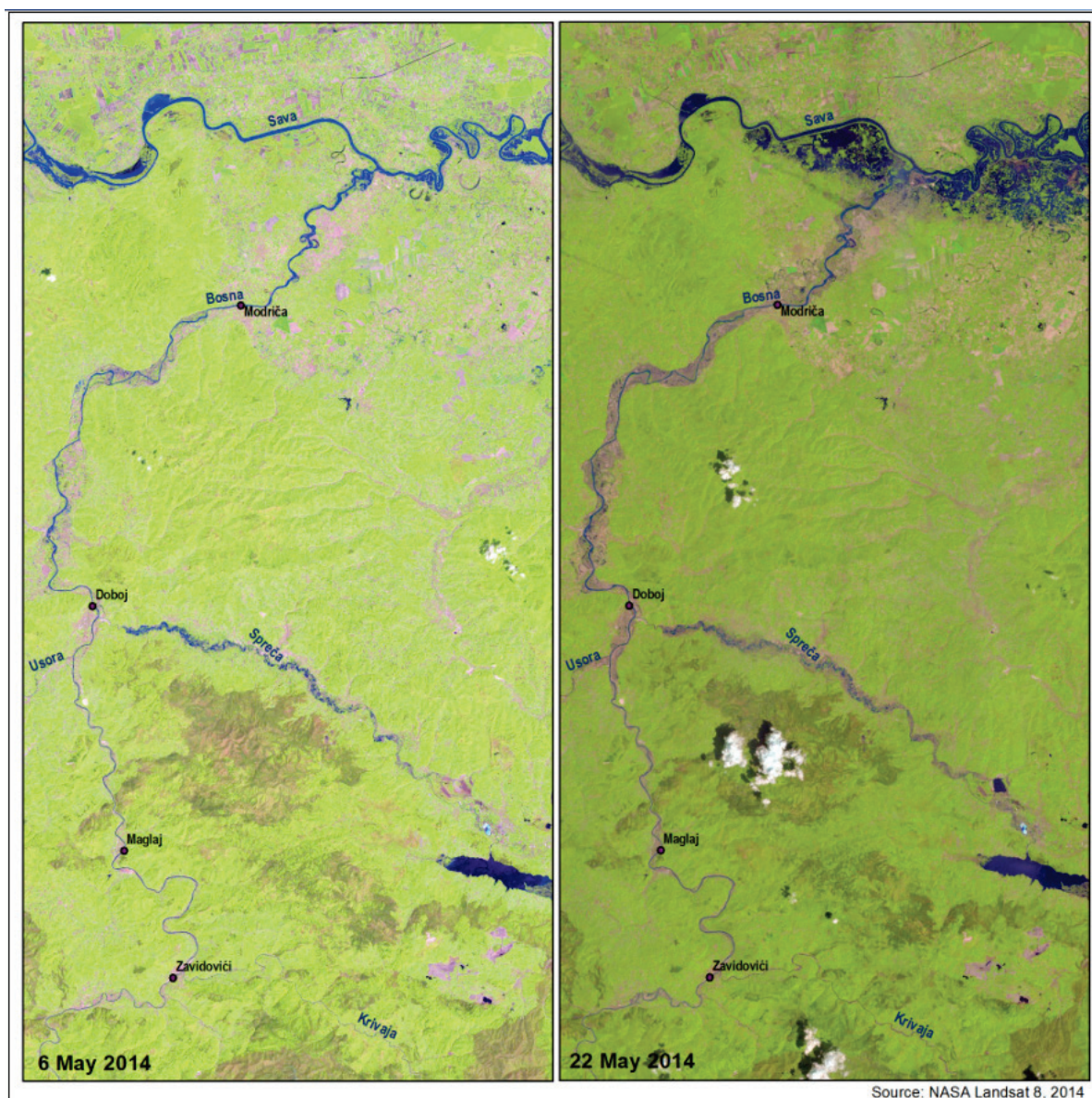
Slika 7.2: Obseg poplav dne 15.5.2014 do profila pri Modriči.

Slika 7.2 prikazuje obseg poplav, ki je interpretiran iz podatkov o višinah največje zabeležene poplavne vode na vodomernih postajah Zavidovići, Maglaj, Doboj in na reki Bosni pri Modriči (glede na višino mostu) in reki Savi pri Bosanskem Šamcu ter povprečnih padcev dna struge. Na območju pod Modričo je izrisan potencialen obseg poplave, to je višina vode po modelu, če v dolini ne bi bilo preprek. Enako velja za obseg poplav v dolini Spreče, ki so izrisane kot podaljšana 2D ravnina višinskih kot poplave na reki Bosni nad Modričo.



Slika 7.3: Interpretacija posnetka satelita Aqua 19.5.2014 (desni posnetek) in istega obdobja leta prej (18.5.2013).

Modro siva barva (Slika 7.3) na desnem posnetku kaže sledove poplave vzdolž reke Bosne, modra ob reki Savi pa obstoječe poplave 19. maja 2014.



Slika 7.4: Posnetek vidnega spektra Landsat 8 pred in po poplavnem dogodku (levo: 6.5 2014; desno: 22.5.2014). Vir: NASA Landsat 8, 2014 – via ESRI ArcGIS Online (imagery.arcgisonline.com).

Temno modra barva (Slika 7.4) predstavlja vodne površine (desno spodaj je viden zadrževalnik Modrac oziroma Modračko ali Tuzlansko jezero). Vidne so poplave reke Save in Bosne pri Bosanskem Šamcu. Izrazita je tudi močnejša siva barva ob reki Bosni na desnem posnetku, ki kaže na sledove poplave 15. maja 2014. Podatki so povzeti iz posnetkov Landsat 8 (vsi spektri). Posnetek je zajet sedem (7) dni po višku poplavnega vala vzdolž reke Bosne, poplavna voda pa se še vedno zadržuje ob poplavni ravnici ob reki Savi.



Slika 7.5: Obseg poplav oziroma večjih vodnih površin (dne 22.5.2014). Vir: NASA Landsat 8, 22 May 2014 – via ESRI ArcGIS Online, layer produced by GDI (Flood Analysis Landsat 8; <http://poplave.gdi.net>).

8 ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA ZA NADALJNE DELO

8.1 Ustreznost uporabljenih podatkov o padavinah, negotovosti in vrzeli v analizi padavin

Podatki, pridobljeni s strani FHMZ BiH in RHMZ RS v digitalni obliki:

- a. Olovo - urne vrednosti padavin za dneve 24.3., 24.6, 24.9. 2006 in 19.11.2008 so bile zelo verjetno podane v desetinkah mm (ostale vrednosti so podane v mm), zato so bile spremenjene v mm.
- b. Zavidovići - urne vrednosti padavin za dneve 10.5.2007, 22., 26., 31. 10.2007 so bile zelo verjetno podane kumulativno, izračunani so bili prirastki in ti so bili upoštevani.

Podatki, pridobljeni iz poročila »Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014« (RHZ RS, maj 2014):

- c. Vrednosti dnevnih padavin aprila 2014 za Banjo Luko in Sokolac so bile ocenjene na podlagi podanih grafov (sl. 3.11 in sl. 3.14).
- d. Vrednosti dnevnih padavin 1.-5. maja 2014 za Banjo Luko, Doboj in Sokolac so bile ocenjene na podlagi grafa.
- e. Vrednosti dnevnih padavin 17. maja 2014 za Sokolac so bile ocenjene po sliki.

Ocenjene vrednosti dnevnih padavin:

- f. Nekaj vrednosti dnevnih padavin v maju 2014 za Doboj in Sokolac je bilo ocenjenih na podlagi primerjave razporeditve padavin in količine padavin, podanih za april in maj 2014 v poročilu RHZ RS (maj, 2014).
- g. Dnevne vrednosti padavin, pridobljene s spletnih mest www.ogimet.com in www.tutiempo.net, pri čemer ni znano, kako natančne so te vrednosti.

Verjetnostna analiza:

- h. Za postaje Olovo, Zavidovići in Sokolac je število uporabljenih podatkov le 8 oziroma 11. Glede na primerjavo rezultatov nizov 2000–2010 z 1960–2013 na postajah z daljšim nizom ocenjujemo, da bi bile povratne dobe večdnevnih padavin aprila in maja 2014 na teh lokacijah lahko celo nekoliko višje od prikazanih.
- i. Za izračun v okviru verjetnostne analize je bilo na postaji Olovo treba dodati podatke za 2 leti, saj je izračun možen le s številom podatkov 10 in več (dodani/ponovljeni so bili podatki večdnevnih padavin za leti 2008 in 2012),
- j. Pri uporabi niza podatkov 40-54 let menimo, da so rezultati korektni do povratne dobe ca. 200 let. Rezultate višjih povratnih dob je potrebno interpretirati bolj kritično.
- k. Pri interpretaciji rezultatov analize je treba upoštevati ne le število podatkov, ampak tudi njihovo nehomogenost glede na vir podatkov in način meritve.

Dnevne padavine - vsota padavin v 24 urah nima enake osnove pri vseh virih podatkov:

- l. Vrednosti dnevnih padavin se beležijo ob 8:00 uri in predstavljajo seštevek za preteklih 24 ur.
- m. Podatki zajemajo padavine od 0:00 do 24:00 istega dne.

Prostorska porazdelitev:

- n. Izris izolinij povratnih dob za posamezno trajanje maksimalnih večdnevni padavin pomeni oceno prostorskega porazdeljevanja jakosti padavinskega dogodka.

Na postaji Doboj ni bilo pridobljenih podatkov o dnevni padavinah za april 2014, zato so maksimalne večdnevne padavine s trajanjem 20-50 dni verjetno nekoliko podcenjene.

Kljub vrzelim v analizi, ugotavljamo:

- Vrednosti padavin v aprilu in maju 2014 so bile v primerjavi z zabeleženimi v zadnjih 50 letih izjemne, predvsem na vzhodnem delu porečja Bosne.
- Razen na postajah Bugojno, Ivan Sedlo in Zavidovići, so na vseh obravnavanih postajah povratne dobe večdnevni padavin dosegle oziroma presegle 50 let vsaj pri enem od trajanj več dnevni padavin.
- Povratna doba več dnevni padavin presega 5000 let na padavinskih postajah Tuzla in Olovo, 200 let pa dosega oziroma presega tudi na postajah Zenica, Gradačac in Sokolac.
- Iz rezultatov analize verjetnosti več dnevni padavin razberemo, da je bila predhodna namočenost porečja zelo visoka, saj dosežene povratne dobe 20 in 30-dnevni maksimalni padavin na nekaterih padavinskih postajah presegajo celo 1 do 3-dnevne, ki so pri porečju s tako velikostjo običajno merodajne za nastanek visokovodnega vala. Poenostavljeno povedano gre za to, da so na 20 in 30-dnevne maksimalne padavine z veliko povratno dobo padle še maksimalne 1 do 3-dnevne padavine z veliko povratno dobo, ki so po vsej verjetnosti odtekle brez večje infiltracije.

8.2 Negotovosti v podatkih za hidrološko modeliranje in vrzeli v modeliranju

Za simulacijo pretokov reke Bosne in njenih pritokov v maju 2014 smo zbrali in uredili vse razpoložljive zgodovinske podatke o pretokih, padavinah in temperaturah na porečju reke Bosne. Podatki o povprečnih dnevni pretokih so na razpolago za 24 vodomernih postaj. Preglednica 8.1 prikazuje za vsako vodomerno postajo razpoložljivost podatkov po letih. Večina postaj ima podatke za obdobje 1961–1990. Razpoložljivost podatkov je za kalibracijo in verifikacijo modela ustrezna.

Veliko manj je na razpolago podatkov o dnevni padavinah in temperaturah, saj je vseh postaj, ki ležijo na porečju reke Bosne ali v njeni soseščini, za polovico manj. Padavinske postaje so Sarajevo-Bjelave, Zenica, Tuzla, Bugojno, Ivan Sedlo, Gradačac, Olovo, Zavidovići, Doboj, Banja Luka, Sokolac in Ljubovija. Pri kalibraciji hidrološkega modela, kjer smo morali imeti na razpolago tudi podatke o povprečnih dnevni temperaturah, smo lahko uporabili podatke le za šest (6) postaj. Le te prikazuje Preglednica 8.2. Žal je zaradi redke mreže padavinskih postaj na porečju Bosne vrzel teh podatkov velika.

Preglednica 8.1: Razpoložljivost dnevnih podatkov o pretokih za 24 postaj na porečju Bosne.

leto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1951			x	x	x															x				
1952			x	x	x															x				
1953			x	x	x															x				
1954			x	x	x															x				
1955			x	x	x															x				
1956			x	x	x															x				
1957			x	x	x															x				
1958			x	x	x															x				
1959			x	x	x															x				
1960			x	x	x															x				
1961			x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1962			x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1963			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1964			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1965			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1966	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1967	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x
1968	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x
1969		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x
1970		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x
1971		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1972		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1973		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1974		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1975		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1976		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1977		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1978		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1979		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1980		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1981		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1982		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1983		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1984		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1985		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1986		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1987		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
1988		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x
1989		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x
1990		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x
2000					x																			x
2001		229			x			x	x	x	x	x			x									x
2002		x			x			x	x	x	x	x			x			x						x
2003		x		x	x			x	x	x	x	x			x			x	x					x
2004				x	x			x	x	x	x	x			x			x	x					x
2005		x		x	x			x	x	x	x	x			x			x	x					x
2006	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x			x	x		x	x					x
2007	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x			x	x		x	x					x
2008	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x			x	x		x	x					x
2009	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x			x	x		x	x					x
2010					218			x	x	x	x	x			x	x								x
2011																								x
2012																								x
2013																								x
2014																								147

Legenda: X = 365 ali 366 dnevnih podatkov v letu; 1-Ilidža Željeznica, 2-Blažuj Zujevina, 3-Plandišče Bosna, 4-Sarajevo Miljacka, 5-Reljevo Bosna, 6-Visoko Fojnica, 7-Dobrinje Bosna, 8-Merdani Lašva, 9-Raspotočje Bosna,

10-Olovo Krivaja, 11-Zavidovići_K Krivaja, 12-Zavidovići_B Bosna, 13-Teslić V.Usora, 14-Kaloševiči Usora, 15-Usora-Bosna Usora, 16-Maglaj Bosna, 17-Turija Turija, 18-Strašanj Spreča, 19-Modrac Spreča, 20-Karanovac Spreča, 21-Stanić Rijeka Spreča, 22-Usora Bosna, 23-Doboj Bosna, 24-Modriča Bosna

Preglednica 8.2: Razpoložljivost dnevnih podatkov o padavinah in temperaturah na porečju Bosne.

leto	1	2	3	4	5	11
1961	x	x	x	x	x	x
1962	x	x	x	x	x	x
1963	x	x	x	x	x	x
1964	x	x	x	x	x	x
1965	x	x	x	x	x	x
1966	x	x	x	x	x	x
1967	x	x	x	x	x	x
1968	x	x	x	x	x	x
1969	x	x	x	x	x	x
1970	x	x	x	x	x	x
1971	x	x	x	x	x	x
1972	x	x	x	x	x	x
1973	x	x	x	x	x	x
1974	x	x	x	x	x	x
1975	x	x	x	x	x	x
1976	x	x	x	x	x	x
1977	x	x	x	x	x	x
1978	x	x	x	x	x	x
1979	x	x	x	x	x	x
1980	x	x	x	x	x	x
1981	x	x	x	x	x	x
1982	x	x	x	x	x	x
1983	x	x	x	x	x	x
1984	x	x	x	x	x	x
1985	x	x	x	x	x	x
1986	x	x	x	x	x	x
1987	x	x	x	x	x	x
1988	x	x	x	x	x	x
1989	x	x	x	x	x	x
1990	x	x	x	x	x	x

Legenda: X = 365 ali 366 dnevnih podatkov v letu; 1-Sarajevo-Bjelave, 2-Zenica, 3-Tuzla, 4-Bugojno, 5-Ivan Sedlo, 11-Doboj

Ugotovljeno je, da je na porečju Bosne prisoten velik lokalni orografski vpliv na padavine. Določena podporečja imajo tako majhno modelsko ujemanje, učinkovitost in posledično zaupanje. To velja predvsem za pritoke reke Bosne iz zahodne strani (n.p.r.Usora). Zaključimo lahko, da imamo premalo podatkov o padavinah, in da bi bilo možno hidrološki model občutno izboljšati, če bi jih bilo na razpolago vsaj toliko kot podatkov o pretokih, to je vsaj še 8 do 10 več.

8.3 Priporočila in predlogi za nadaljnje delo

Pri izvedbi verjetnostne analize padavin se je izkazalo, da so podatki iz preteklosti težko dosegljivi v digitalni obliki. Predlagamo, da se vse analogne podatke prenese v digitalno obliko. Primer so podatki »Meteorološkega godišnjaka« I in II ter »Hidrološkega godišnjaka SHZ SFRJ« za območje BiH. Te publikacije so na voljo na različnih lokacijah in so izhajale že v začetku 20. stoletja.

Predlagamo, da se pri vsaki vodomerni postaji postavi še avtomatski dežemer in merilec temperature. Dežemere se postavi tudi drugod po porečju na način, da se dobijo padavinski podatki, ki bodo reprezentativni za posamezna podporečja. To pomeni okoli 50 dežemerov oziroma približno 1 dežemer/200 km² prispevne površine.

Izboljšati je treba meritve pretokov z uporabo sodobne hidrometrijske opreme ADP in izvajati meritve pri visokih vodostajih.

Na osnovi vsaj dvoletnih boljših reprezentativnih meritev padavin in pretokov ob različnih hidroloških stanjih bo možno ponovno kalibrirati hidrološki model porečja Bosne na manjši časovni korak in višjo stopnjo zaupanja. Avtomatsko kalibracijo modela bi lahko izvedli tudi na urnem koraku v kombinaciji z GAP (genetic algoritem).

Opis padavinskega dogodka maja 2014 na porečju Bosne bi lahko izvedli tudi z analizo urnih padavin oz. dejanskih padavin po prispevnih površinah vsake vodomerne postaje. Na ta način bi bolj verodostojno predstavili jakost dogodka na majhnih prispevnih območjih.

Na osnovi poznavanja urnih padavin oziroma natančnejših dnevnih padavin za vsako vodomerno postajo bi lahko določili odtočne koeficiente za manjše površine ter rekonstruirali urni potek poplavnih valov vzdolž Bosne in na njenih pritokih.

Določili bi lahko tudi povratne dobe prostornin odtokov in povratne dobe maksimalnih pretokov.

Izvedeno analizo je možno izvesti tudi za ostala prizadeta porečja, to je Vrbas, Uno in Drino.

Nadgradnja analiz v tej študiji je izdelava hidravličnega modela reke Bosne. V prvi fazi se uporabi podatke o digitalnem modelu terena (TIN zapis, DMR zapis za celico 20 m) doline reke Bosne in podatki o geometriji profilov reke Bosne na vodomernih postajah.

8.4 Zaključek

Izpeljane analize, izdelava baze podatkov in hidrološki model so samo hiter vpogled v kompleksen in pester proces poplav reke Bosne. Celostna analiza zahteva zbiranje vrste drugih podatkov o škodi in vodarskih ureditvah, ki so bile izvedene v porečju v zadnjih stotih letih. Vsekakor verjetnost pojava presega 1000-letno povratno dobo.

1. »Hidrološka študija reke Bosne« je bila izhodišče za delo in analize. Študija daje celosten vpogled v hidrološke značilnosti porečja in vodnega režima, po drugi strani pa so tu zbrani vsi razpoložljivi podatki od leta 1961 do danes in so osnova za kakršno koli hidrološko analizo. Analizo bi bilo treba razširiti in poglobiti z:
 - bolj podrobno analizo oblikovanja posameznih večjih poplav v porečju,
 - analizo režima podzemnih voda,
 - bolj točnim določanjem razvodnic in predvsem razvodnic Vrela Bosne,
 - opredeliti sovpadanje poplavnih valov v glavni strugi in pritokih,
 - določiti vpliv zajezev na sotočjih.
2. 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 v spodnjem toku.
 - Usposobiti kadre v hidrometeoroloških službah za uporabo in razvoj modelov.
 - Potreben bo še njegov razvoj za simulacije s časovnim korakom ene ure.
 - Za hitrejše izvajanje simulacij za potrebe napovedi poplav je potrebno izdelati dodatno programsko opremo za avtomatsko pripravo vhodnih podatkov in poganjanje izračunov.
 - Za nadaljnji razvoj modela in razvoj službe za napovedi je pomembna posodobitev hidrološke in meteorološke službe in njeno opremljanje s sodobno mersko opremo.
 - Potrebno je tudi povečati število merilnih mest in začeti z meritvami in opazovanji snežne odeje.
 - Predvsem je potrebno povečati število padavinskih merskih postaj, da bi se lahko ustrezno ocenili vplivi orografskih dejavnikov na porazdelitev padavin.
 - Nujna je nabava meteorološkega radarja.
3. Razviti je treba hidravlični model glavnega toka reke Bosne in reke Save. Na osnovi podrobnih posnetkov terena je treba natančneje opredeliti količine razlite vode na posameznih lokacijah in izpeljati analizo vseh zgodovinskih poplavnih dogodkov na reki. Ugotoviti je treba tudi vse meteorološke pogoje, ki so privedli do posameznega poplavnega dogodka v preteklosti.

4. Izdelati je treba podobne modele za porečja Une, Vrbasa in Drine.
5. Vsaka katastrofalna poplava je enkraten pojav s posebnimi karakteristikami in razvojem. Poplave reke Bosne v maju 2014 so posledica večdnevni nepretrganih padavin, ki so povzročile izredno visoke specifične pretoke in koeficient pretoka 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 bolj podrobno nadaljnjo analizo posameznih pritokov, še posebej baze podatkov, zbrane pri upravljanju z zbiralnikom Modrac. Zaključimo lahko tudi:
 - Pristojne službe odgovorne za sanacijo škode so predvsem na prometnicah odreagirale zelo hitro in dobro.
 - Poplavljenе objekte je treba obnoviti po načelih »protipoplavne gradnje«. Večjo težavo in dodatno škodo v poplavnih območjih je povzročila uporaba hidrofobnih fasadnih oblog in zaščite. Hidrofobne obloge niso preprečile vdora vode v konstrukcijo in nato v notranjost stavbe. Žal so taki ometi nato zavirali sušenje objektov po poplavi.
 - Poplavljanjem posameznih območij so botrovale tudi preozke mostne odprtine in zapiranje poplavnih območij z nasipi cest in železnice. Reki je treba dati več prostora. Poleg razširitve struge na nekaterih območjih je treba dvigniti stopnjo zaščite gosto naseljenih mestnih središč vsaj na povratno dobo 1000 let.
6. Na plazovitih območjih priporočamo uporabo lahke montažne gradnje objektov na čvrsto povezanih temeljih. Konstrukcija takšnih objektov tudi v primerih večjih premikov temeljev objekta ni poškodovana. Po potrebi se lahko objekt tudi premesti in se ga postavi na nove temelje.

9 VIRI

Abdulaj R., Miković N., Oskoruš D. in Vujnović T., 2014, Velike vode donjeg toka rijeke save tijekom svibnja 2014, Hrvatska vodoprivreda, br 207.

Aghakouchak, A., Habib, E. 2010. Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. International Journal of Engineering Education 26, 4: 963–973
http://amir.eng.uci.edu/publications/10_EduHBV_IJEE.pdf (Pridobljeno 1. 3. 2013.)

ARSO, 2014. Poplave na osrednjem Balkanu.

http://www.meteo.si/uploads/probase/www/tmp/dmets/media/poplave-osrednji_Balkan-201405.pdf (Pridobljeno 05.06.2014).

Bergström, S. 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modeling. Nordic Hydrology 22, 2: 123–136

<http://www.oocities.org/haniskywalker/bergstrom1991.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Bergström, S. 1995. The HBV Model. V: Singh, V. P. (ur.). Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton, Colorado, Water Resources Publications: 443–476.

Brilly, M., Šraj, M., Vidmar, A., Primožič, M., Koprivšek, M. 2012. Climate change impact on flood discharge, Hydrology Report, Part 2. Osebna komunikacija. (31. 1. 2013.)

DHMZ, 2014. Stoljetna poplava na donjem toku rijeke Save.

http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf (Pridobljeno 20. 5. 2014.)

Doherty, J. 2005. PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition. Brisbane, Water Numerical Computing.

<http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (Pridobljeno 7. 4. 2013.)

Doherty, J. 2012. Addendum to the PEST Manual. Brisbane, Australia, Water Numerical Computing.

<http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (Pridobljeno 2. 4. 2013.)

HBV-light help. Pomoč v sklopu programa.

Hidrološki godišnjak 1972. Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija. Savezni hidrometeorološki zavod. Beograd 1974.

Hidrološki godišnjak 1986. Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija. Savezni hidrometeorološki zavod. Beograd 1988.

IHMS. 1999. Integrated Hydrological Modelling System. Manual, Version 4.5. Norrköping, Sweden, Swedish Meteorological and Hydrological Institute: 121 str.

ISRBC, 2014. Flood of May 2014: the largest flood in the region in the known history. Poročilo Savske komisije. http://savacommission.org/news_detail/148. (Pridobljeno 18. 5. 2014.)

Kobold, M., 2011. Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Ujma, št. 25, str. 48-56.

Kobold, M., Sušelj, K., Štravs, L., Brilly, M. 2003. Razvoj evropskega poplavnega prognostičnega sistema. V: 14. Mišičev vodarski dan 2003, Zbornik referatov. Maribor, VGB Maribor: 39–47.

http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/knji%C5%BEnica/publikacije/Razvoj_evropskega_poplavnega.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Kobold, M., Sušelj, K. 2005. Padavinske napovedi in njihova nezanesljivost v hidrološkem prognoziranju. V: Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004, Zbornik predavanj. Ljubljana, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko: 61–75.

http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG_05_Kobold_Suselj.pdf (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Kotar, A. 2013. Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Kotar): 75 str.

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 str.

<http://195.18.194.201/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Report%202009/report1-09.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201, 1–4: 272–288.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169497000413> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

Mikoš, M., Vidmar, A., Šraj, M., Kobold, M., Sušnik, M., Uhan, J., Pezdič, J., Brilly, M., 2002. Hidrološke analize na plazu Stože pod Mangartom, Ujma, št. 16, str. 326-334.

Nash, J. E. in J. V. Sutcliffe (1970): River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (3), 282-290.

OGIMET, Professional information about meteorological conditions in the world. <http://www.ogimet.com/resynops.phtml.en> (Pridobljeno 6. 5. 2014.)

Podatki o padavinah (3. poglavje) s spletnih strani:

- <http://www.ogimet.com/cgi-bin/g sodres?lang=en&mode=1&state=Bosn&ind=&ord=REV&ano=2014&mes=05&day=15&ndays>
- http://www.tutiempo.net/en/Climate/Banja_Luka/01-1973/132420.htm
- <https://www.meteoblue.com/en/bosnia-and-herzegovina/weather-zavidovi%C4%87i/archive>

Primožič, M. 2007. Umerjanje modela HBV za porečje reke Save v Sloveniji. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Primožič): 81 str.

Renko T., 2014. Rekordne količine kiša u Slavoniji i regiji, Hrvatske vode, št. 207, 2014.

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. (iste vsebine tudi na: http://www.rHMZ_RS.com/assets/images/meteorologija/)

RHMZ Srbije, 2014. Klimatologija. Normale za sinoptičke stanice. http://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_srednjaci.php

Seibert, J. 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. Hydrology and Earth System Sciences 4, 2: 215–224
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/45/96/PDF/hess-4-215-2000.pdf> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Seibert, J. 2005. HBV light version 2, User's manual. Stockholm, Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology: 16 str.
http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV_manual_2005.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2013.)

Seibert, J., Beven, K. J. 2009. Gauging the ungauged basin: how many discharge measurements are needed? Hydrology and Earth System Sciences 13, 6: 883–892
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/883/2009/hess-13-883-2009.html> (Pridobljeno 1. 5. 2013.)

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> (Pridobljeno 21. 3. 2013.)

Skahill, B. E., Doherty, J. 2006. Efficient accomodation of local minima in watershed model calibration. Journal of Hydrology 329, 1–2: 122–139.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406000734> (Pridobljeno 2. 5. 2013.)

Solomatine, D. P., Dibike, Y. B., Kukuric, N. 1999 Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 44, 6: 879-894.
http://iahs.info/hsj/440/hysj_44_06_0879.pdf (Pridobljeno 5. 5. 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.

»Support to the elaboration of hydrology plan for Bosna river basin - hydrodynamic mathematical modelling - hydro-dynamic and advection-dispersion models of propagation of water wave and wave of incidental pollutions along watercourse of river Bosna«, Eptisa, 2009.

Urne in dnevne padavine, temperature, evapotranspiracija za različna obdobja in meteorološke postaje ter njihova lokacija, FHZ BiH in RHZ RS, 2014.

Wetterzentrale, padavinske karte za nazaj

<http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html>

Zhulu, L. 2010. Getting Started with PEST. Athens, The University of Georgia: 28 str.
<http://www.ndsu.edu/pubweb/~zhulin/pdf/teaching/starting%20pest.pdf> (Pridobljeno 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, 2012.

10 PRILOGE

To poročilo je bilo izdelano v okviru projekta »Analiza poplavnega dogodka v maju 2014 v Bosni in Hercegovini za reko Bosno v okviru dodatne pomoči Republike Slovenije«, ki ga je financirala vlada Republike Slovenije in vodila Agencija RS za okolje v juniju in juliju 2014

PRILOGA 1: Poročilo o ogledu terena

10.1 Prvi terenski obisk od 9. do 11. junija 2014 - opis poplavnega dogodka

Skupino strokovnjakov je vodil Janez Kastelic (ARSO). V skupini so bili Mira Kobold (ARSO), Darko Anzeljc (IzVRS), Blažo Djurović (IzVRS), Mitja Brilly (UL FGG), Andrej Vidmar (UL FGG) in Lidija Globevnik (UL FGG), Slika 10.1.



Slika 10.1: Člani slovenske skupine strokovnjakov.

Na uvodnem sestanku s predstavniki hidroloških zavodov in vodarskih organizacij obeh entitet BiH dne 9.6.2014 smo se dogovorili o načinu sodelovanja ter o obsegu podatkov, ki jih je treba pridobiti. Zapisnik sestanka je bil pripravljen v slovenskem in bosanskem jeziku.

Splošni in hiter vtis ob ogledu terena je bil, da so posledice poplavnega dogodka in erozijskih pojavov vzdolž reke Bosne primerljive s posledicami ujme v Sloveniji leta 1990. Pojav zemeljskih plazov in drobirskega toka na Željeznem polju je podoben pojavu zemeljskega plazov v Logu pod Mangartom leta 2000 in pojavu drobirskega toka v Železnikih leta 2007. Poplave in plazovi v maju 2014 na porečju Bosne so imeli torej velike razsežnosti in katastrofalne posledice.

Ugotovili smo tudi, da so v roku treh tednov, kolikor jih je minilo od glavnine dogodka, razmere precej normalizirale. Nekatera polja, ki so bila poplavljenjena, so bila že preorana in ponovno posejana s kmetijskimi pridelki. Veliko poškodovanih cest je že bilo saniranih, pohoštvo iz poplavljenih hiš pa že odpeljano načasne deponije. Sledi najvišje kote poplav

so se sicer na objektih še dobro videle. Prebivalci so se na območja prizadeta z zemeljskimi plazovi vračali vsaj podnevi in reševali osebna imetja. Zemeljski plazovi so najbolj prizadeli območje Želznog polja (Slika 10.2, Slika 10.3), ki ni bilo dostopno več kot dva tedna, so že uredili tudi prevozno cesto.

Ogled porečja v okolici Sarajeva je pokazal, da so bili pretoki vodotokov v povirju zelo visoki, vendar voda ni prestopila brežin. Visoke vode so mestoma sicer poškodovale obrežne utrditve, vendar do strnjenih poplav ni prišlo vse do območja pred Zavidoviči. Tam v reko Bosno priteče Krivaja. V Zavidovičih so bili pod vodo kletni in pritlični prostori stanovanjskih stavb vzdolž reke Bosne. V mestu je odneslo tudi skoraj nov kolesarski most. Potopljeno je bilo tudi naseljeno območje sotočja reke Bosne in Krivaje. Dotok reke Krivaje je torej znatno povečal pretoke reke Bosne, sama Krivaja pa je povzročila poplave že v mestu Olovo. Tam je odplavilo les iz skladišča žage, kar je začasno skoraj zamašilo izlivni del Krivaje v Zavidovičih. Razdejanje je bilo opazno tudi vzdolž toka reke Krivaje. Porušen je bil tudi most čez Krivajo.

Reka Bosna je nato poplavljala vse do izliva v reko Savo. Znatno so bila poplavljena mesta Maglaj, Dobo, Modriča in Šamac. Poplavljali so tudi pritoki. Na reki Spreči, ki se v reko Bosno izliva v Doboju, je zgrajena večja pregrada z vodnim zadrževalnikom Modrac. Voda iz zadrževalnika se redno uporablja za vodooskrbo industrijskih obratov v Tuzli (rudnik soli, termoelektrarna), zato ima dober hidrološki in meteorološki monitoring. Zapis gibanja vodostajev je pomemben pokazatelj za analizo dogodka v maju 2014. Ugotovili smo, da je prelivanje visoke vode preko pregrade poškodovalo podslapje pregrade, iz zadrževalnika pa se je v času dogodka izpuščalo več vode kot jo je vanjo priteklo. Pretoki Spreče so bili torej po naših prvih opazovanjih večji kot bi bili pri naravnem odtekanju vode. Voda je sicer poplavljala celotno ravnico ob Spreči do Doboja.



Slika 10.2: Željezno polje – posledice drobirskega toka.



Slika 10.3: Željezno polje - plaz.

Katastrofalne razmere so bile prisotne tudi v porečju reke Usore, ki pa ga žal nismo obiskali.

Večje razdejanje je povzročilo prelivanje vode čez glavno cesto Dobo – Sarajevo nad starim železnim mostom (ostanek ozkotirne železnice na južni vpadnici). Most je bil zgrajen s tremi stebri v strugi, med katerimi so se zapletle velike količine drevja in vejevja ter drugih nanosov. Ustvarjen je bil zamašek, ki je močno upočasnil tok vode ter dvignil vodno gladino. Voda je prelivala cesto, tekla po ravnici proti mestu Dobo in ga poplavlila iz zaledne strani.

Zaradi visoke nivelete glavne ceste, ki loči mesto od reke Bosne in ceste, ki je pravokotno nanjo speljana preko reke Bosne proti dolini Spreče, voda iz mesta ni mogla odtekati. Odtekla je šele takrat, ko je bil narejen preboj ceste pri trgovskem centru Tuš (nad križiščem obeh omenjenih cest). Preboj ceste so izvedli v času upadanja gladine reke Bosne. Z »umetno« povišano gladino reke Bosne na železnem mostu pred mestom (gorvodna stran) je bil oteženo tudi odtekanje reke Usore. Ta se v reko Bosno izliva 1200 metrov gorvodno od železnega mostu. Tako je mesto Doboj poplavljala tudi voda iz reke Usore.



Slika 10.4: Ogljed sanacije nasipa pri Modriči.



Slika 10.5: Posledice poplav v Šamcu.

Na poti proti Šamcu smo si ogledali tudi na novo zgrajeno naselje pri Modriču, ki leži na poplavnem območju reke Bosne. Območje je velikokrat poplavljenno zaradi slabega odtekanja zalednih voda, pred Bosno pa je bilo leta 2010 zaščiteno z nasipom. Nasip je med poplavo maja 2014 popustil (Slika 10.4). Naselje je bilo hipoma pod zelo visoko vodo (več kot 2 m). Poplava je povzročila štiri smrtne žrtve.

Izredno prizadeto je bilo tudi mesto Bosanski Šamac pri vtoku reke Bosne v reko Savo (Slika 10.5). Ustje reke Bosne v Savo ni posebej urejeno oziroma regulirano. Med mestom in reko Bosno je zgrajen visokovodni nasip, ki je delno presekalo nekdanjo široko razlivno območje reke Bosne pri Savi. Reka Sava namreč ob visokih voda zajezuje vodo v reki Bosni. Reka je še v bližnji preteklosti pogosto spreminjala glavni tok, premikal se je tudi položaj sotočja s Savo. V preteklosti je torej reka Bosna tekla tudi čez predele, kjer je danes zgrajeno mesto Bosanski Šamac. Visokovodni nasip je bil projektiran na gladine reke Save in zaradi nje zajezene gladine reke Bosne. Žal se je pri dogodku maja 2014 zgodilo, da sta imeli istočasno obe reki, tako reka Sava kot reka Bosna, izredno velike pretoke. Reka Bosna torej ni mogla odtekati, zaradi velikih pretokov, ki jih je imela tudi sama, pa je prelila nasip nad mestom Bosanski Šamac. Od tam je kot hitro deroča reka tekla v diagonalni smeri preko naselja proti reki Savi. Zaradi visokih gladin v reki Savi se je voda v mestu zadržala še dober teden.

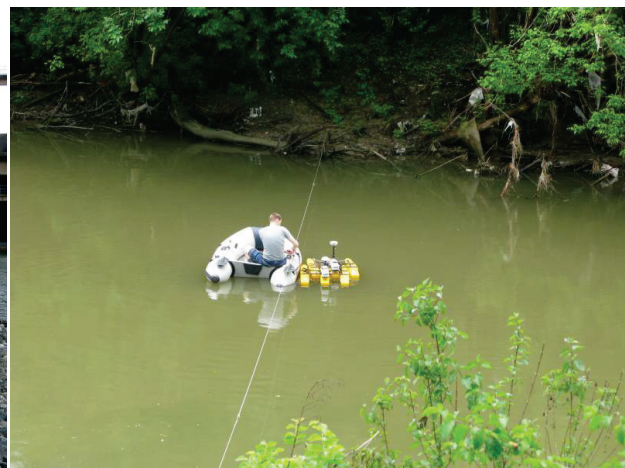
10.2 Drugi terenski obisk od 2. do 4. julija 2014 - terenske meritve

Drugi obisk terena v času med 2. in 4. julijem 2014 je bil posvečen meritvam pretokov in podslapja pod pregrado Modrac (Slika 10.8). Na terenu so bili Janez Kastelic (ARSO), Mitja Brilly (ULFGG), Andrej Vidmar (ULFGG) in Matej Sečnik (ULFGG). Pri pregradi Modrac sta se ekipi pridružila predstavnika FHMZ BIH, Julijus Baždarević in Mirsad Šiljak ter predstavnik uprave akumulacije Modrac Muhamed Gegić. Prvi dan so bile opravljene meritve globin podslapja pregrade. Prevezli so se tudi podatki o opazovanjih in meritvah vodostajev in pretokov na pregradi med poplavo maja 2014 (Slika 10.6).

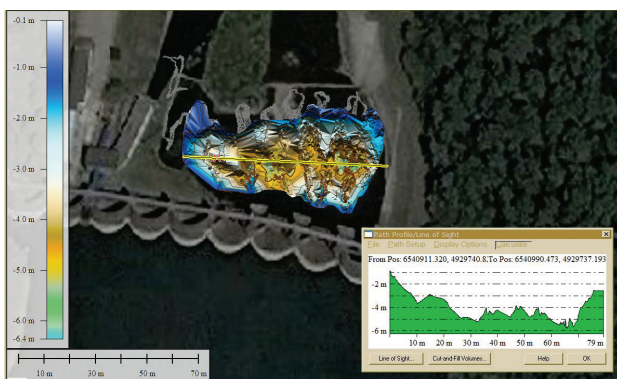
Naslednji dan sta se pri meritvah pretokov reke Spreče in zgornjega dela reke Bosne pridružila predstavnika RHMZ RS Darko Borojević in Dragan Despot. Meritve so se izvajale z dvema ADV merilcema pretokov (Slika 10.7). Tretji dan so se meritve izvajale še na vodomernih postajah Usore in spodnjega dela reke Bosne.



Slika 10.6: Priprave za meritve podslapja na pregradi Modrac.



Slika 10.7: Meritve pretokov z obema inštrumentoma na reki Spreči.



Slika 10.8: Meritve batimetrije dna podslapja pod pregrado Modrac.

Rezultate dvojnih meritev, to je meritev obeh ekip, prikazujeta Preglednica 10.1 in Preglednica 10.2. Dvojne meritve so se izvedle na desetih (10) lokacijah od 13-ih izmerjenih s strani ekipe ULFGG. Razlike so bile pri vseh meritvah manjše kot 2.5 %, kar kaže na dobro umerjene merilne sonde in protokole merjenj pri obeh ekipah. Razlika je večja le pri

vodomerni postaji na Usori v Tesličih in sicer 14 %. Ekipa ULFGG je tu izmerila 4.4 m³/s, ekipa RHMZ RS pa 3.8 m³/s. Razlika 0.6 m³/s je verjetno posledica merilne natančnosti. Sonda ULFGG namreč meri odboje zvoka v vodi s tremi laserskimi žarki, sonda RHMZ RS pa z enim.

Preglednica 10.1: Rezultati meritev ekipe ULFGG.

Št merit.	Vodomerna postaja	Vodotok	Št. ponovitev meritve	Datum	H [cm]	Q _{popv} [m ³ /s]
1	Karanovac	Spreča	7	3.7.2014	97	9,45
2	Stanić Rijeka	Spreča	4	3.7.2014	69	8,70
3	Doboj	Bosna	2	3.7.2014	66	130,82
4	Maglaj	Bosna	2	3.7.2014	125	108,79
5	Zavidovići	Krivaja	2	3.7.2014	44	24,18
6	Zavidovići	Bosna	2	3.7.2014	144	84,19
7	Raspotočje	Bosna	2	3.7.2014	124	71,18
8	Visoko	Fojnica	4	3.7.2014	139	17,27
9	Reljevo	Bosna	3	3.7.2014		23,29
10	Teslić	V.Usora	2	4.7.2014		4,37
11	Kaloševići	Usora	2	4.7.2014	45	4,80
12	Doboj	Bosna	2	4.7.2014		116,38
13	Modriča	Bosna	2	4.7.2014		126,26

Preglednica 10.2: Rezultati meritev ekipe RHMZ RS.

Br.	Hidrološka stanica	Rijeka	Broj ponovljenih mjerjenja	Datum	Vodostaj H(cm)	Proticaj m ³ /s
1	Stanić Rijeka	Spreča	4	3.07.2014	69	8.655
2	Doboj	Bosna	4	3.07.2014	66	133.652
3	Maglaj	Bosna	2	3.07.2014	125	110.329
4	Zavidovići	Krivaja	4	3.07.2014	44	24.616
5	Zavidovići	Bosna	2	3.07.2014	144	82.714
6	Raspotočje	Bosna	4	3.07.2014	124	72.643
7	Teslić	Usora	4	4.07.2014		3.790
8	Kaloševići	Usora	3	4.07.2014	45	2.487
3	Doboj	Bosna	4	4.07.2014		114.059
10	Modriča	Bosna	2	4.07.2014		123.504

PRILOGA 2: Opis uporabljenega hidrološkega programa

10.3 Programski paket »HBV-light«

10.3.1 Splošen opis

Model HBV (Slika 10.9) je konceptualni hidrološki model, ki omogoča simulacijo odtoka na podlagi časovnih serij podatkov o padavinah, temperaturi zraka in potencialni evapotranspiraciji. Razvit je bil na Švedskem meteorološkem in hidrološkem inštitutu (SMHI) v Norrköping-u. Prvi uspešen zagon je doživel leta 1972 in po 20 letih postal standardno orodje za simulacijo odtoka v nordijskih državah ter bil uporabljen v več kot 30 ostalih državah (Bergström, 1995). Opis modela je povzet po diplomu Kotar, 2013.

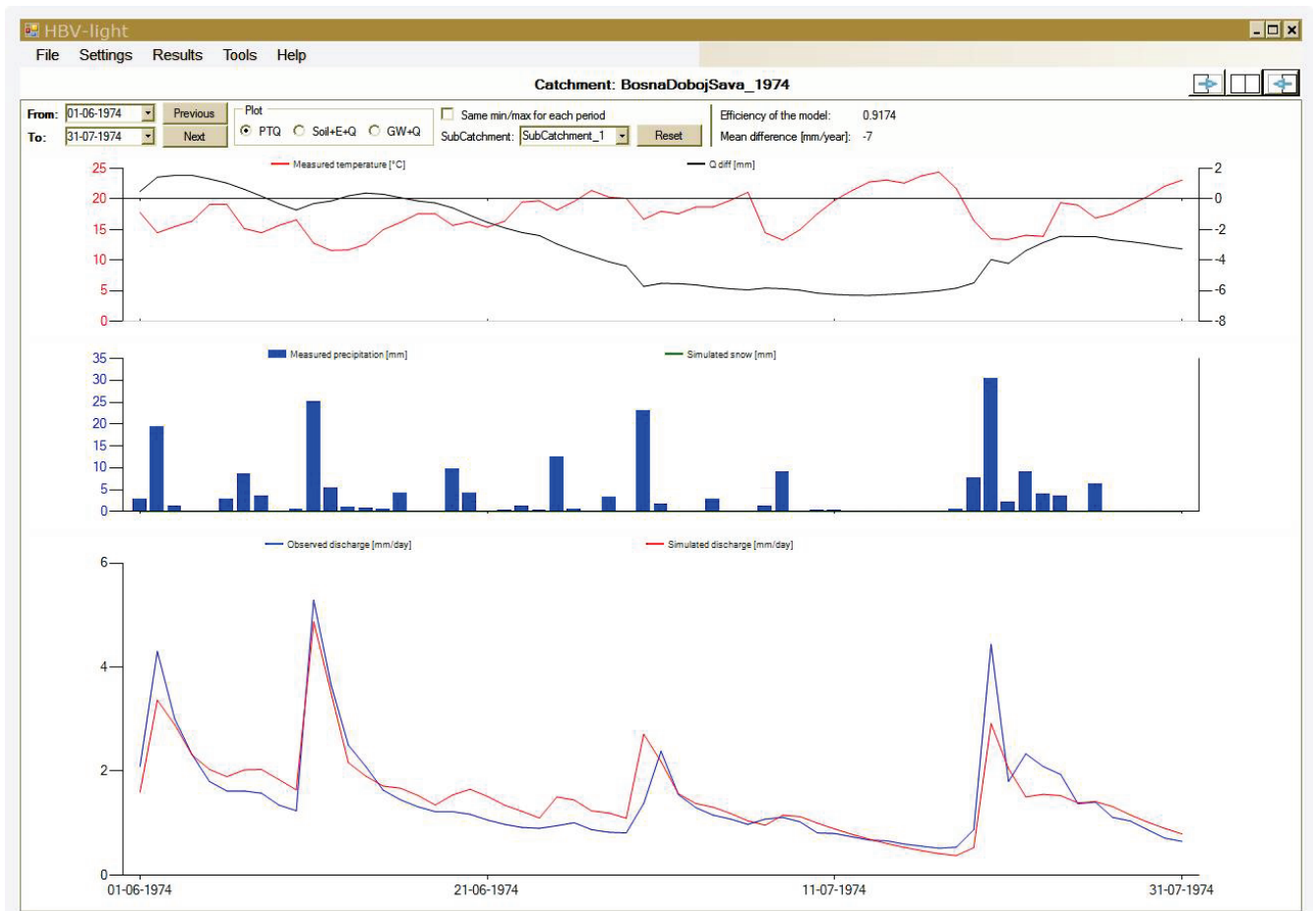
Model HBV temelji na enačbi vodne bilance:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes), \quad (10.3.1.)$$

kjer so P padavine, E evapotranspiracija, Q odtok, SP snežna odeja, SM vlaga v tleh, UZ zaloga vode v zgornjem rezervoarju, LZ zaloga vode v spodnjem rezervoarju, lakes pa prostornina jezera.

HBV model danes obstaja v več različicah, ki se razlikujejo po kompleksnosti in uporabnosti (Aghakouchak in Habib, 2010). Na SMHI so osnovni točkovni model razvili v distribuiranega, njihova zadnja verzija pa je HBV-96 (Lindström et al., 1997). Razvoj programa je tekel tudi drugje, na Univerzi v Uppsali je bil leta 1993 z uporabo programskega jezika Microsoft Visual Basic izdelan HBV-light (Seibert in Vis, 2012). V diplomski nalogi (Kotar, 2013) je uporabljena najnovejša verzija programa HBV-light, ki je bila razvita na Univerzi v Zürich-u. Glavna motivacija za njen nastanek je bila zagotoviti uporabniku prijazen model, namenjen predvsem izobraževanju študentov na višjih ravneh študija in uporabi v raziskovalnih projektih (Seibert in Vis, 2012). Grafični vmesnik modela HBV-light je prikazan na sliki 10.3.1.

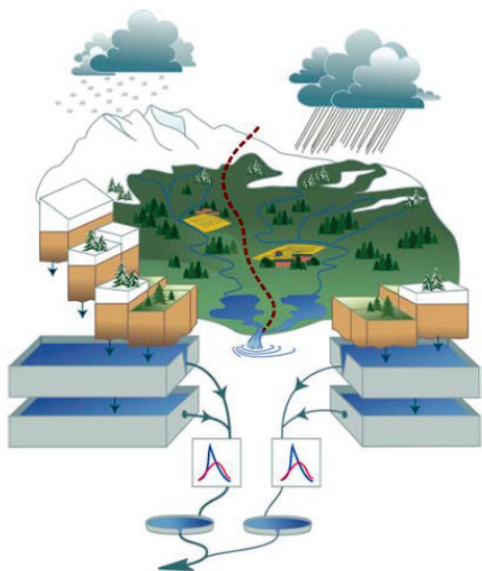
Model HBV-96 je že bil implementiran v slovenskem prostoru. V okviru razvoja evropskega poplavnega prognostičnega sistema sta bila umerjena del porečja Save in porečje Savinje (Kobold et al., 2003), na porečju Savinje je bila izdelana tudi analiza občutljivosti modela HBV na vhodne padavinske podatke (Kobold in Sušelj, 2005). Reko Savo na območju Slovenije je v diplomski nalogi umeril Primožič (2007), model HBV pa je bil tudi orodje pri študiji vpliva klimatskih sprememb na rečni režim celotnega porečja Save (Brilly et al., 2012).



Slika 10.9: Okno modela HBV-light.

10.3.2 Struktura modela

Model HBV opišemo kot delno distribuiran model, kar pomeni, da povodje lahko razdelimo na več podpovodij, vsako podpovodje pa še na različna višinska in vegetacijska območja. Velika jezera znatno vplivajo na dinamiko odtoka, zato jih modeliramo posebej (Lindstöm et al., 1997). Primer razdelitve povodja prikazuje Slika 10.10.



Slika 10.10: Prikaz razdelitve povodja (Primožič, 2007, str. 9).

HBV-light omogoča razdelitev podpovodja na največ 3 vegetacijska in 20 višinskih območij. Možno je tudi upoštevati pokritost tal z jezeri ali ledeniki. Vegetacijska in višinska območja definiramo z deleži površin, ki jih posamezne elevacijsko-vegetacijske enote zavzemajo.

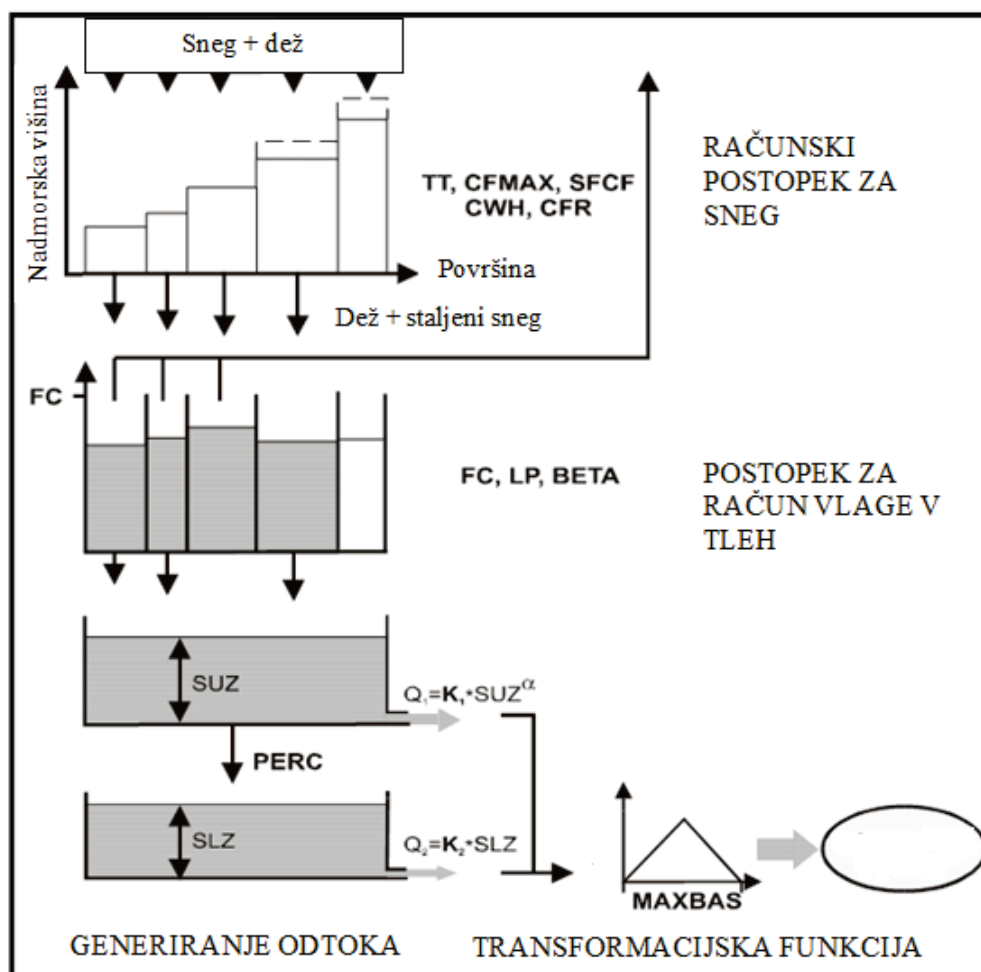
Od osnovne verzije se HBV-light razlikuje predvsem v začetku simulacije. Pri HBV-96 modelu je uporabnik definiral začetne vrednosti spremenljivk, HBV-light pa uporablja »ogrevalno obdobje«, v katerem se standardne začetne vrednosti razvijejo do ustreznih vrednosti glede na meteorološke in pogoje in vrednosti parametrov (Seibert in Beven, 2009). V večini primerov zadošča, če je »ogrevalno obdobje« dolgo eno leto (Seibert in Vis, 2012).

Vhodni podatki v model so časovne serije padavin in temperatur zraka ter ocene potencialne evapotranspiracije. Časovni korak za padavine in temperature je običajno en dan, vendar je možna tudi uporaba krajših časovnih korakov (IHMS 1999, Bergström 1995). Za umerjanje modela potrebujemo še časovne serije merjenih pretokov na iztoku iz podpovodij.

Model HBV je sestavljen iz štirih glavnih računskih postopkov (IHMS, 1999):

- računa akumulacije in taljenja snega,
- računa vlage v tleh,
- generiranja odtoka in
- transformacijske funkcije.

Shematični prikaz strukture modela z računskimi postopki in parametri modela je prikazuje Slika 10.11.



Slika 10.11: Shematični prikaz računskih postopkov modela (HBV-light Help).

V nadaljevanju so opisani računski postopki in parametri modela HBV-light, kot jih predstavi Seibert (2005, 2012).

Račun akumulacije in taljenja snega

Vhodni podatki pri računskem postopku za sneg so padavine in temperatura zraka, izhodni pa snežna odeja in staljeni sneg. Nastopajo naslednji parametri:

- TT [°C] ... temperaturni prag, pod katerim se predpostavi, da so padavine snežne,
- $CFMAX$ [mm/Δt/°C] ... faktor taljenja snega,
- $SFCF$ [-] ... korekcijski faktor za sneg,
- CFR [-] ... faktor zmrzovanja,
- CWH [-] ... kapaciteta vode v snegu.

Sneg se računa za vsako vegetacijsko območje posebej. Računski postopek temelji na predpostavki, da so padavine snežne, če je temperatura zraka nižja od TT , v nasprotnem primeru pa so padavine dežne. TT se zato običajno giblje okrog 0°C . Količina padavin, ki se smatrajo za sneg, se množi s parametrom $SFCF$, s katerim kompenziramo napake pri meritvi količine snega ter zajamemo vpliv izhlapevanja iz snežne odeje, ki sicer ni eksplicitno simulirano.

Ko temperatura zraka naraste nad mejno vrednost TT , nastopi taljenje snega (M). Faktor $CFMAX$ določa količino staljenega snega v časovnem intervalu, ki jo povzroči zvišanje temperature zraka za 1°C nad TT :

$$M(t) = CFMAX (T(t) - TT). \quad (10.3.2)$$

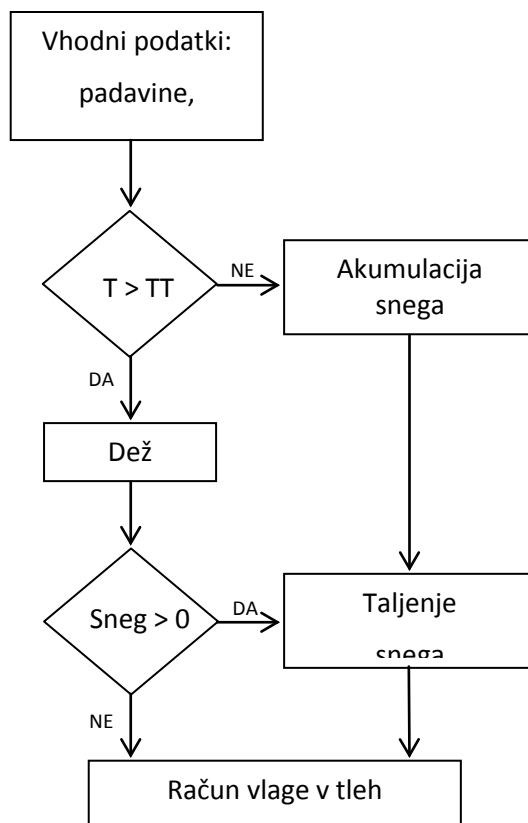
$CFMAX$ se v nekaterih verzijah HBV lahko upošteva kot spremenljiv parameter, na primer za primere, ko dež pada na že obstoječo snežno odejo in je zaradi dodatne toplote v toplejšem dežju količina staljenega snega večja (Aghakouchak in Habib, 2010). V verziji HBV-light je parameter $CFMAX$ konstantne vrednosti.

Staljeni sneg in dež se zadržujeta v snežni odeji dokler ne presežeta določenega deleža vodnega ekvivalenta snežne odeje. Delež določa vrednost faktorja CWH , ki je običajno 0,1. Če temperatura zraka ponovno pade pod TT , se izračuna količina ponovno zamrznjene vode (R) s pomočjo koeficienta CFR :

$$R(t) = CFR (TT - T(t)). \quad (10.3.3)$$

Model omogoča tudi upoštevanje vpliva severno in južno orientiranih pobočij na taljenje snega. Vpliv je zajet v parametru $CFSlope$, s katerim se $CFMAX$ pomnoži v primeru južnih pobočij in deli v primeru severnih. V porečjih z ledeniki lahko simuliramo tudi taljenje ledenikov, in sicer s parametrom $CFGlacier$. Računski postopek je podoben kot pri taljenju snega, le da se $CFMAX$ pomnoži še z vrednostjo $CFGlacier$, ki poveča količino staljene vode.

Shemo računskega postopka za sneg je prikazuje Slika 10.11. Računskemu postopku za sneg sledi račun vlage v tleh.



Slika 10.12: Shema računskega postopka za sneg (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 965).

Račun evapotranspiracije in vlage v tleh

Vhodni podatki za račun so potencialna evapotranspiracija, padavine in staljeni sneg, izhodni pa dejanska evapotranspiracija, vlaga tal in učinkovite padavine. Postopek temelji na treh parametrih:

- FC [mm] ... največja količina vode v tleh oz. poljska kapaciteta
- LP [-] ... faktor redukcije potencialne evapotranspiracije
- BETA [-] ... parameter oblike, ki določa prispevek k odtoku

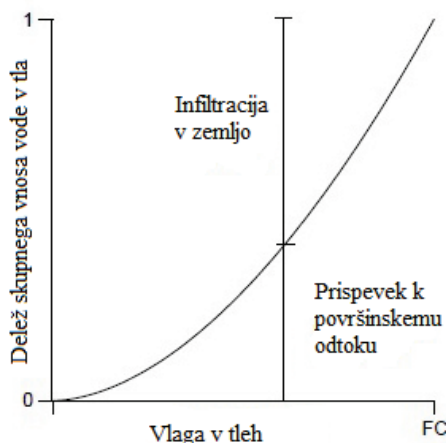
Vsota dežnih padavin (P) in staljenega snega (M) predstavlja skupni vnos vode v tla, ki se razdeli na dva dela (Slika 10.13). En del se infiltrira v zemljo, preostanek pa prispeva k površinskemu odtoku in je znan tudi pod imenom učinkovite padavine (P_{eff}). Velikost odtoka je v modelu izračunana na podlagi razmerja med trenutno vlago v tleh (SM) in poljsko kapaciteto (FC):

$$\frac{P_{eff}(t)}{(P(t) + M(t))} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{BETA} \quad (10.3.4)$$

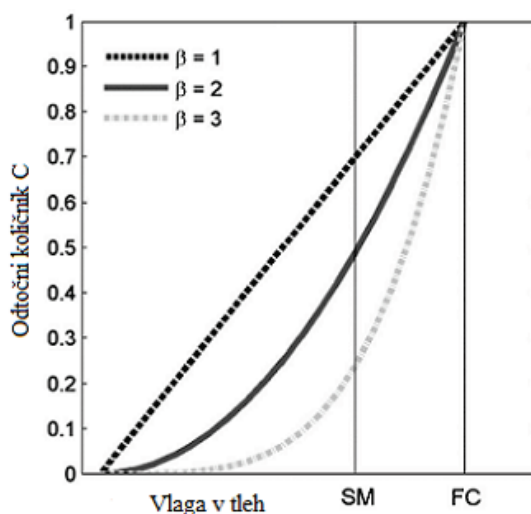
Pri neki vrednosti vlage v tleh parameter BETA, imenovan tudi koeficient oblike, določa delež vode, ki prispeva k odtoku. Slika 10.14 prikazuje vpliv velikosti parametra BETA na odtočni količnik, ki je definiran kot razmerje med učinkovitim padavinami in skupnim vnosom vode v tla:

$$C = \frac{P_{eff}}{P + M} \quad (10.3.5)$$

Večja vrednost BETA pomeni manjši odtočni količnik oziroma manjši odtok. Opazimo tudi, da z naraščanjem količine vlage v tleh odtočni količnik narašča, ker tla ne morejo več sprejeti enake količine vode (Aghakouchak in Habib, 2010).



Slika 10.13: Razdelitev skupnega vnosa vode v tla po enačbi 4 (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).

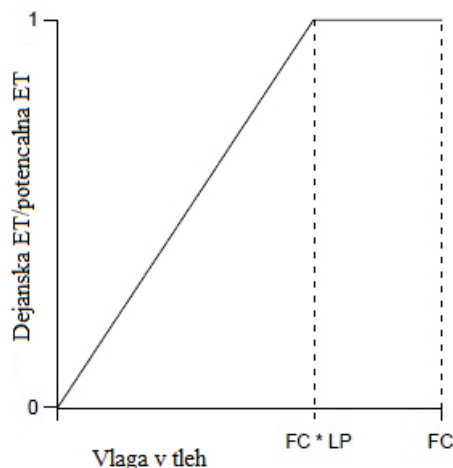


Slika 10.14: Vpliv velikosti parametra BETA na odtočni količnik C (prirejeno po Aghakouchak in Habib, 2010, str. 966).

Slika 10.15 prikazuje vlogo parametra LP. Če je trenutna vlaga v tleh večja od zmnožka FC in LP, je dejanska evapotranspiracija ET_{act} enaka potencialni ET_{pot} . V nasprotnem primeru je uporabljena linearna redukcija potencialne evapotranspiracije:

$$ET_{act} = ET_{pot} \frac{SM}{FC LP} \quad (10.3.6)$$

Dejanska evapotranspiracija je torej odvisna od namočenosti tal in je manjša od potencialne, če so tla suha.



Slika 10.15: Linearna redukcija evapotranspiracije (prirejeno po Bergström, 1995, str. 449).

Ker je potencialna evapotranspiracija običajno podana s povprečnimi dnevnimi vrednostmi za vsak mesec, je potencialna evapotranspiracija za določen dan v mesecu izračunana glede na odstopanje temperature zraka od dolgoletnega povprečja:

$$ET_{pot}(t) = (1 + CET (T(t) - T_M)) ET_{pot,M}, \quad (10.3.7)$$

pri čemer je CET korekcijski faktor, T_M dolgoletna povprečna temperatura zraka, ET_{pot} potencialna evapotranspiracija, M pa povprečna dnevna vrednost evapotranspiracije za izbrani mesec. Pri tem obstaja še omejitev:

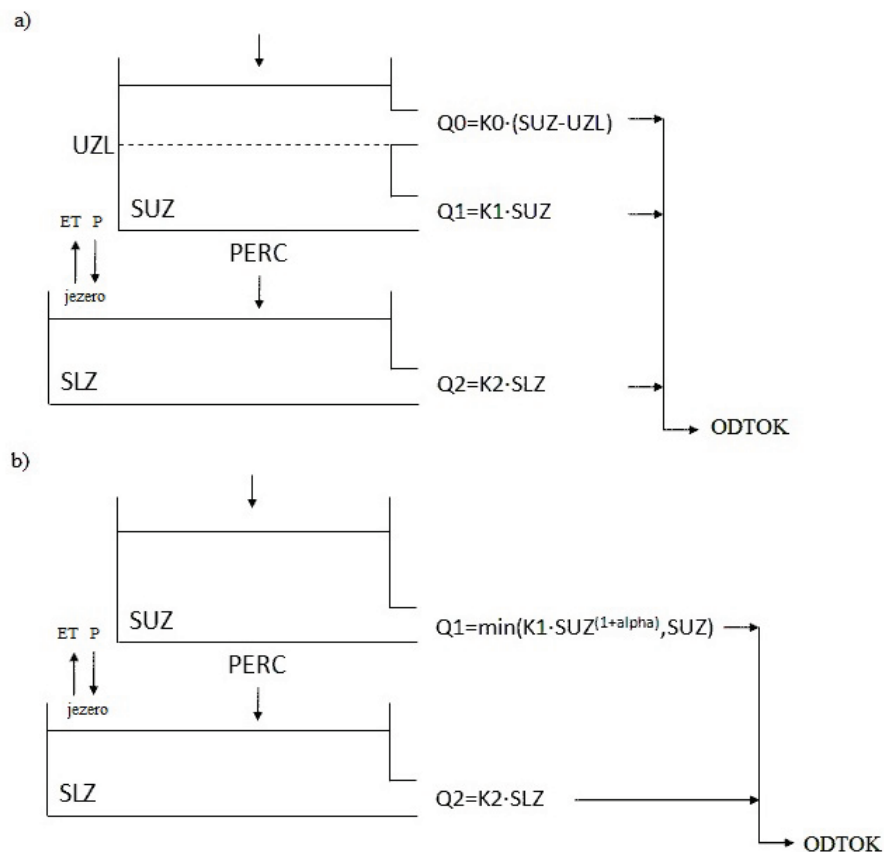
$$0 \leq ET_{pot}(t) \leq 2 ET_{pot}. \quad (10.3.8)$$

Generiranje odtoka

Vhodni podatki za račun odtoka so učinkovite padavine iz predhodnega računskega postopka in potencialna evapotranspiracija, izhodni pa odtok in višina podzemne vode. Parametri, ki določajo generiranje odtoka, so:

- PERC [mm/ Δt] ... maksimalno pronicanje v spodnji rezervoar
- ALPHA [-] ... koeficient nelinearnosti
- UZL [mm] ... mejna vrednost v zgornjem rezervoarju
- K0 [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za zgornji del zgornjega rezervoarja
- K1 [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za spodnji del zgornjega rezervoarja
- K2 [Δt^{-1}] ... recesijski koeficient za spodnji rezervoar

Sistem za računanje odtoka je sestavljen iz dveh rezervoarjev, ki se nahajata eden nad drugim in sta med seboj povezana (Slika 10.15). Zgornji rezervoar simulira hitrejšo komponento odtoka oziroma direktni odtok, spodnji pa počasnejši bazni odtok. Pri računu se upošteva tudi vpliv direktnih padavin in izhlapevanja z jezer in drugih mokrih območij, če so definirana v modelu.



Slika 10.16: Standardni tip modela HBV-light z dvema rezervoarjema.

Efektivne padavine iz predhodnega računskega postopka se dodajo k zalogi v zgornjem rezervoarju, iz katerega voda pronica v spodnjega s konstantno vrednostjo parametra PERC. Spodnji rezervoar ima en sam iztok Q_2 , katerega velikost določa recesijski parameter K_2 . Ta iztok predstavlja bazni odtok. Pri visokih vsebnostih vlage v tleh samo pronicanje ne zagotavlja popolnega praznjenja zgornjega rezervoarja, zato se pojavi tudi iztok iz zgornjega rezervoarja. SUZ je zaloga vode v zgornjem rezervoarju, SLZ pa zaloga vode v spodnjem.

Možni sta dve različici zgornjega rezervoarja, linearna in nelinearna. Pri linearni različici (Slika 10.15 a) ima zgornji rezervoar dva iztoka (Q_0 in Q_1). Zgornji je aktiviran, če zaloga vode preseže mejno vrednost UZL , njegova velikost pa je določena z recesijskim parametrom K_0 . Velikost spodnjega iztoka določa recesijski parameter K_1 . Končni rezultat odtoka je vsota pretokov iz vseh treh iztokov:

$$Q(t) = Q_2 + Q_1 + Q_0 = K_2 SLZ + K_1 SUZ + K_0 \max(SUZ - UZL, 0). \quad (10.3.9)$$

Najvišji iztok predstavlja najhitrejši odtok, najnižji pa najpočasnejšega, kar v modelu zagotovimo z ustreznimi velikostmi recesijskih koeficientov:

$$K_0 > K_1 > K_2. \quad (10.3.10)$$

Viški pretokov se torej simulirajo kot vsota $Q_0 + Q_1 + Q_2$, srednji pretoki kot vsota $Q_1 + Q_2$, ob nizkih pretokih pa je aktiviran le iztok iz spodnjega rezervoarja Q_2 .

Pri drugi različici linearna iztoka iz zgornjega rezervoarja nadomestimo z enim nelinearnim (Slika 10.15 b). V tem primeru sta parametra UZL in KO nadomeščena s koeficientom nelinearnosti $ALPHA$, ki poleg recesijskega koeficienta $K1$ določa velikost odtoka iz zgornjega rezervoarja $Q1$:

$$Q1 = K1 SUZ^{1+ALPHA}. \quad (10.3.11)$$

Skupni odtok tako znaša:

$$Q(t) = Q2 + Q1 = K2 SLZ + K1 SUZ^{1+ALPHA}. \quad (10.3.12)$$

Računski postopek za generiranje odtoka temelji na metodi linearnega rezervoarja, kjer je odtok s povodja proporcionalen zalogi vode:

$$Q(t) = k S(t), \quad (10.3.13)$$

pri čemer je S zaloga vode, Q odtok, t čas in k recesijski koeficient.

Enačba vodne bilance povodja se glasi:

$$P(t) = ET(t) + Q(t) + \frac{dS(t)}{dt}. \quad (10.3.14)$$

Če zanemarimo padavine P in evapotranspiracijo ET , dobimo:

$$(10.3.15)$$

Z upoštevanjem enačbe 3.13 dobimo diferencialno enačbo:

$$0 = \frac{d Q(t)}{dt} \frac{1}{k} + Q(t), \quad (10.3.16)$$

katere rešitev je:

$$Q(t) = Q(t_0) e^{(t-t_0)k}. \quad (10.3.17)$$

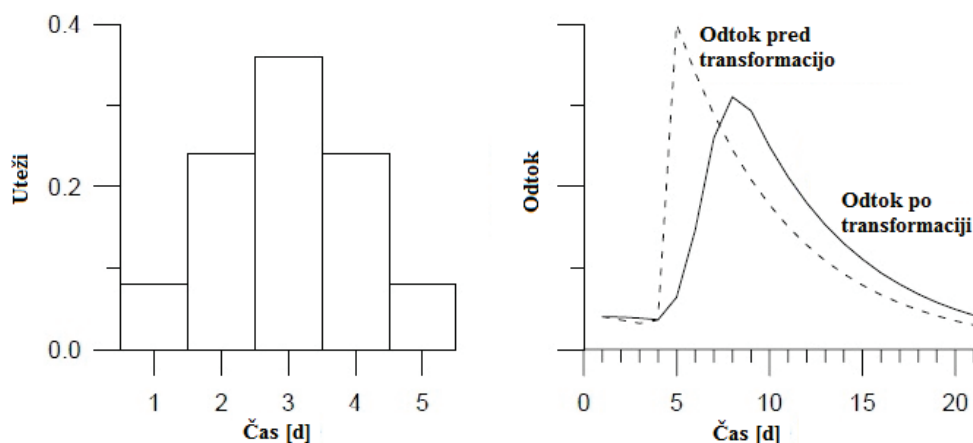
Transformacijska funkcija

Odtok je izračunan za vsako podpovodje posebej. Da na koncu dobimo hidrogram bolj pravilne oblike, je uporabljena transformacijska funkcija oziroma preprosta filter tehnika s trikotno porazdelitvijo uteži (Slika 10.17). V računu nastopa parameter $MAXBAS [\Delta t]$, ki predstavlja trajanje funkcije uteži:

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) Q(t - i + 1), \quad (10.3.18)$$

pri čemer velja:

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du. \quad (10.3.19)$$



Slika 10.17: Transformacija odtoka s filter tehniko s trikotno porazdelitvijo uteži.

10.3.3 Vhodni in izhodni podatki modela HBV-light

Za simulacijo pretokov v programu HBV-light so obvezne časovne serije padavin, temperatur zraka, potencialne evapotranspiracije in pretokov za vsa podpovodja. Časovni korak mora biti enak za vse serije podatkov, razen za evapotranspiracijo.

Padavine, ki jih vnesemo v model, izračunamo kot uteženo povprečje izmerjenih padavin s postaj na izbranem območju:

$$P = \sum P_i c_i, \quad (10.3.20)$$

pri čemer so uteži c_i določene na podlagi Thiessenovih poligonov. Vsaka utež predstavlja razmerje med površino prispevnega območja, ki jo pokriva Thiessenov poligon izbrane postaje in celotno površino prispevnega območja.

Temperature zraka so pomembne v območjih s snegom, saj nastopajo pri računu akumulacije in taljenja snega. Izračunane so na enak način kot padavine, s pomočjo Thiessenovih poligonov.

Temperatura in količina padavin se spreminjata z nadmorsko višino, kar v modelu opišemo s parametroma *PCALT* in *TCALT*, ki sta lahko konstanti ali pa se s časom spreminjata. Običajno pri povečanju nadmorske višine za 100 m temperatura zraka pade za 0.6 °C, količina padavin pa naraste za 10–20 %.

Evapotranspiracijo lahko podamo na 3 načine: z 12 povprečnimi dnevnimi vrednostmi posameznih mesecev, s 365 povprečnimi dnevnimi vrednostmi ali za vsak časovni korak

posebej. Običajno podajamo povprečne vrednosti za vsak mesec, dnevne vrednosti pa so linearno interpolirane.

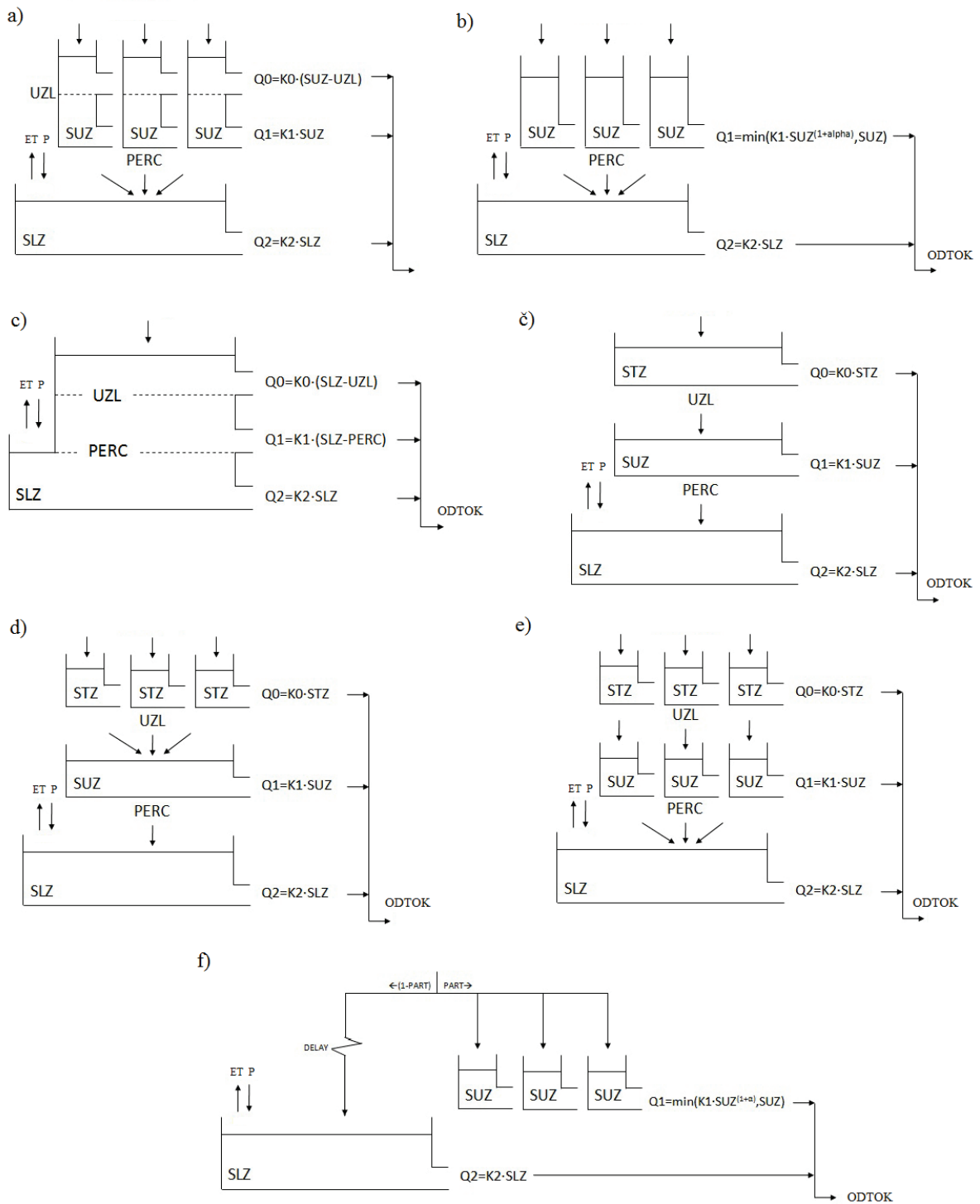
V primeru, da je povodje sestavljeno iz podpovodij, je potrebno definirati še povezave med podpovodji. Odtok z vseh podpovodij se mora steči v eno končno podpovodje.

Izhodni podatki modela so simulirani pretoki, potencialna in dejanska evapotranspiracija, višina snežne odeje, vlaga v tleh, zaloga vode v zgornjem in spodnjem rezervoarju ter pretoki skozi posamezne iztoke rezervoarjev za vsak časovni korak in vsako podpovodje. Model izračuna še nekatere statistične vrednosti ter vsoto posameznih členov vodne bilance. Na grafih v grafičnem vmesniku pa lahko opazujemo primerjavo simuliranega in izmerjenega pretoka, časovno porazdelitev padavin in simuliranega snega, temperaturo zraka, potencialno in dejansko evapotranspiracijo, vlago v zemlji, zalogo vode v zgornjem in spodnjem rezervoarju ter kumulativno vsoto odstopanj simuliranih pretokov od izmerjenih.

10.3.4 Tipi modela HBV-light

Glede na računski postopek generiranja odtoka obstaja 8 tipov modela HBV-light, ki prikazuje Slika 10.18. Standardni tip modela z dvema rezervoarjema lahko nadomestimo z enim (Slika 10.18 c) ali tremi (Slika 10.18 č), prav tako lahko za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto uporabimo svoj rezervoar (Slika 10.18 a in Slika 10.18 b). Za porečja s podzemnimi tokovi na večjih globinah je primeren tip, pri katerem del odtoka iz postopka računa vlage v tleh direktno napaja spodnji rezervoar, drug del pa se enakomerno porazdeli čez določen čas trajanja in napaja zgornji rezervoar (Slika 10.18 f).

Z različnimi tipi modela določamo, ali se računski postopki izvršijo za celotno (pod)povodje ali pa ločeno za vsako elevacijsko-vegetacijsko enoto. Splošnih navodil glede izbire modela ni, prav tako ne glede izbire števila višinskih pasov (Seibert in Vis, 2012).



Slika 10.18: Možni tipi modela HBV-light (HBV-light Help).

10.3.5 Kalibracija modela

IHMS (1999) priporoča vsaj 5 do 10 let podatkov za kalibracijo modela HBV. Kalibracija je lahko ročna ali avtomatizirana. Pri presojanju ustreznosti modela lahko upoštevamo naslednje kriterije:

- vizualno primerjavo simuliranih in izmerjenih hidrogramov,
- kumulativno vsoto odstopanj simuliranih pretokov od opazovanih,
- statistične kriterije.

Model HBV-light na podlagi izmerjenih (Q_{obs}) in simuliranih (Q_{sim}) pretokov izračuna naslednje statistične vrednosti, ki so nam v pomoč pri vrednotenju kvalitete modela (Seibert, 2005):

- koeficient učinkovitosti oziroma Nash-Sutcliffov kriterij:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (10.3.21)$$

- koeficient učinkovitosti z upoštevanjem uteži w :

$$R_{eff,weighted} = 1 - \frac{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (10.3.22)$$

- koeficient učinkovitosti glede na logaritme pretokov:

$$\log R_{eff} = 1 - \frac{\sum(\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum(\ln Q_{obs} - \ln \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (10.3.23)$$

- koeficient determinacije:

$$r^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}) (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}, \quad (10.3.24)$$

- povprečno letno odstopanje simuliranih pretokov od opazovanih:

$$meandiff = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{\text{število dni}} \quad 356. \quad (10.3.25)$$

Koeficient učinkovitosti R_{eff} primerja napoved modela s povprečno vrednostjo izmerjenih pretokov. Pri popolnem ujemanju simuliranih in izmerjenih pretokov bi R_{eff} zavzel vrednost 1, vrednost 0 pomeni, da je simulacija tako dobra (ali slaba), kot bi bila napoved s konstantno vrednostjo, negativne vrednosti R_{eff} pa so značilne za zelo slabo umerjen model. Ta kriterij je pogosto uporabljen kot glavno merilo učinkovitosti hidroloških modelov, uvedla pa sta ga Nash in Sutcliffe (1970). Če so vhodni podatki dobri, lahko v praksi dosežemo vrednosti R_{eff} med 0.8 in 0.95 (IHMS, 1999).

V model HBV-light sta vgrajeni dve orodji za avtomatično kalibracijo, Monte Carlo in GAP (angl. *Genetic Algorithm and Powell optimization*) (Seibert in Vis, 2012). Pri Monte Carlo metodi se izvede veliko število simulacij z naključno izbranimi vrednostmi parametrov znotraj izbranih mej (definiranih s strani uporabnika). Med simulacijami nato izberemo tisto z

najvišjo vrednostjo kriterija učinkovitosti modela. GAP algoritem pa je sestavljen iz dveh korakov (Seibert, 2000). Najprej je z genetskim algoritmom iz naključno izbranih začetnih vrednosti parametrov dobljen set optimiziranih parametrov. Genetski algoritmi temeljijo na posnemanju evolucije, parametri se iz začetnih n setov med seboj namreč kombinirajo v nove, boljše generacije. V drugem delu pa je optimiziran set parametrov še fino umerjen s pomočjo Powellove konvergentne metode.

Kalibracija modela HBV je bila tradicionalno izvedena ročno z uporabo tehnike poskušanja in napak (Bergström, 1995). Metodi Monte Carlo in GAP ta postopek avtomatizirata, vendar imata tudi slabosti. Predvsem Monte Carlo je zaradi naključnega izbiranja parametrov časovno zamudna metoda, še posebno pri velikem številu parametrov. Število potrebnih poskusov namreč narašča eksponentno glede na število parametrov (Solomatine et al., 1999).

Ker je HBV-light možno poganjati preko komandne vrstice, je združljiv s programom za ocenjevanje parametrov PEST, ki je eden bolj učinkovitih načinov za avtomatizirano kalibracijo.