

UDK/UDC: 551.578.1:556.166(497.6)

Prejeto/Received: 07.03.2016

Pregledni znanstveni članek – Review scientific paper

Sprejeto/Accepted: 23.06.2016

**RAZVOJ HIDROLOŠKEGA MODELA POREČJA REKE BOSNE ZA SIMULACIJO  
POPLAVNEGA DOGODKA MAJA 2014 V BOSNI IN HERCEGOVINI  
DEVELOPMENT OF A HYDROLOGICAL MODEL FOR THE BOSNA RIVER BASIN TO  
SIMULATE THE FLOOD EVENT IN MAY 2014 IN BOSNIA AND HERZEGOVINA**

**Mira Kobold<sup>1,2\*</sup>, Andrej Vidmar<sup>2</sup>, Lidija Globevnik<sup>2</sup>, Mitja Brilly<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Agencija Republike Slovenije za okolje, Ministrstvo za okolje in prostor, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

**Izvleček**

Sredi maja 2014 so kot posledica velike količine padavin, ki je v le treh dneh preseгла trimesečno povprečje, del Bosne in Hercegovine, Srbije ter Hrvaške zajele ene največjih poplav vzdolž reke Save in njenih pritokov. Poplave so povzročile izgubo življenj ljudi in živali, degradacijo okolja in več milijard evrov škode. Poplava je bila ocenjena kot stoleten, ponekod tudi tisočleten pojav. Dogodek je sprožil veliko mednarodno akcijo pomoči prizadetim v poplavah. Slovenija, ki se je množično odzvala, je med drugim pomagala z analizo poplavnega dogodka za porečje reke Bosne. Za rekonstrukcijo poplavnega dogodka je bil z orodjem HBV-light razvit hidrološki model porečja reke Bosne. Rezultati simulacije kažejo, da so pretoki reke Bosne v Maglaju preseгли 500-letno povratno dobo, ponekod pa celo 1000-letno. Hidrološki model porečja Bosne zadovoljivo in uspešno simulira poplavni dogodek maja 2014 in daje osnovo za nadaljnji razvoj, v obstoječi obliki pa je že uporaben za izdelavo napovedi poplavnih pretokov reke Bosne v prihodnje. Z izdelavo hidrološkega modela se je vzpostavil prenos znanja in izkušenj med Slovenijo in BiH s področja napovedovanja poplav.

**Ključne besede:** poplava maj 2014, reka Bosna, hidrološki model, padavine, napovedovanje poplav, povratna doba, HBV-light.

**Abstract**

In mid-May 2014, as a result of high precipitation which in only three days exceeded a three-month average, parts of Bosnia and Herzegovina, Serbia and Croatia experienced one of the largest floods along the Sava River and its tributaries. The floods caused loss of human lives and animals, environmental degradation and billions of euros of damage. The flood was estimated to be a phenomenon with a hundred, in some places a thousand-year return period. The event spawned a major international campaign to help those affected by the floods. Slovenia responded extensively, including by making an analysis of the flood event of the Bosna river basin. The HBV-light hydrological tool was used for the development of hydrological model for the Bosna river basin. The simulation results show that the peak discharge of the Bosna River in Maglaj exceeded the return period of 500 years, in other parts even 1000 years. The hydrological model of the Bosna

---

\* Stik / Correspondence: [mira.kobold@gov.si](mailto:mira.kobold@gov.si)

© Kobold M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Kobold M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

river basin sufficiently and successfully simulates the flood event of May 2014 and provides the basis for further development. The model is already being used for forecasting flood discharges of the Bosna River. Hydrological model for the Bosna river basin establishes an important transfer of Slovenian knowledge and experience in the field of flood forecasting in BiH.

**Keywords:** flood May 2014, Bosna River, hydrological model, precipitation, flood forecasting, return period, HBV-light.

## 1. Uvod

Velik del Bosne in Hercegovine, Srbije ter Hrvaške so maja 2014 zajele ene največjih poplav vzdolž reke Save in njenih pritokov (slika 1), ki jim pripisujejo več kot stoletno, ponekod tudi tisočletno povratno dobo (Kobold et al., 2015; ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Poplave so se zgodile sredi maja kot posledica velike količine padavin, ki je le v treh dneh preseгла trimesečno povprečje. Najvišje izmerjene padavine v obdobju meritev so povzročile ekstremen dvig gladine v rekah, marsikje pa so bili preseženi do takrat izmerjeni rekordi. Šlo je za kombinacijo nižinskih in hudourniških poplav. V nižinskem delu so poplavljalje reka Sava in njeni nižinski pritoki Una, Vrbas, Bosna (slika 1), Drina ter Kolubara. Na poplavljenih območjih se je voda zadrževala več dni. V hribovitih predelih so hitro narastli hudourniški pritoki, ki so s seboj prinašali veliko zemeljskega materiala in rečnih sedimentov ter marsikje povzročali zasutje objektov in uničenje infrastrukture (slika 2). Prizadeta so bila območja na Hrvaškem, v Bosni in Hercegovini ter Srbiji, kjer so bile poplave najobsežnejše (slika 3). Poplave so se začele na rekah z manjšimi prispevnimi območji. Poplavilo je veliko naselij ob reki Kolubari (ICPDR in ISRBC, 2015). Najhuje je bilo v mestu Obrenovac, kjer je gladina vode dosegla višino več metrov. Zelo veliko škode zaradi poplav in zemeljskih plazov je doživelo porečje reke Drine. Velike poplave in plazove ter zelo veliko škodo so povzročili desni pritoki reke Save, med njimi Bosna, Vrbas ter Una. Poplave so bile uničujoče predvsem v mestih in vaseh ob reki Bosni, in sicer v Zavidovičih, Maglaju, Doboju, Modriči ter Bosanskem Šamcu. Sava je povzročila največ škode v Brčkem, Orašju in Obrenovcu, reka Drina v Bijelini in Zvorniku ter reka Vrbanja v Čelincu in Kotorju Varošu.

Srbija ter Bosna in Hercegovina sta zaprosili za mednarodno pomoč. Na pomoč ob poplavah se je odzvala tudi Slovenija. Slovenska vlada je sprejela odločitev, da pomaga prizadetim območjem Bosne in Hercegovine tudi z analizo poplavnega dogodka na reki Bosni ter predlaga nekatere ukrepe za blaženje vpliva poplav v prihodnje. V projektu sta iz Slovenije poleg Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) sodelovala Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG) ter Inštitut za vode Republike Slovenije (IzVRS) (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Za potrebe rekonstrukcije poplavnega dogodka maja 2014 je bil z orodjem HBV-light razvit hidrološki model porečja reke Bosne.

## 2. Vremensko dogajanje maja 2014 na Balkanu

Poplave na Balkanu maja 2014 so bile posledica izjemnih padavin, nastalih zaradi obsežnega območja nizkega zračnega tlaka, ki se je pomikalo z južnega dela Jadranskega morja čez Bosno in Hercegovino ter Srbijo na Madžarsko. Območje poplav je bilo že pred poplavnim dogodkom zasičeno z vodo, saj je v Srbiji ter Bosni in Hercegovini že aprila padlo veliko dežja (slika 4). Na več meteoroloških postajah, na primer v Banjaluki, Doboju in Prijedoru, je bila aprila izmerjena celo maksimalna mesečna količina padavin za april po letu 1961, in sicer v Banjaluki 214 mm, Doboju 177,4 mm ter Prijedoru 163,8 mm (RHMZ RS, 2014). Aprila je čez to območje prešlo kar sedem ciklonov, že 2. maja pa se je oblikoval nov višinski ciklon v Genovskem zalivu, kar je predvsem na severu Bosne in Hercegovine 3. ter 4. maja povzročilo obilne padavine (RHMZ RS, 2014). Sledilo je enotedensko obdobje skoraj brez padavin. V ponedeljek, 12. maja 2014, je prizadeto območje prešla hladna fronta, ki je s seboj prinesla

hladnejši zrak, predvsem v višje plasti ozračja. Do srede zjutraj se je nad območjem oblikovalo plitvo območje nizkega zračnega tlaka, ki se je začelo poglobljati (DHMZ, 2014). Z zahoda je začel na to območje z višinskimi tokovi dotekati vlažen in nestabilen zrak. Z dotekanjem mrzlega zraka čez Alpe se je v sredo, 14. maja, oblikoval obsežen ciklon s središčem nad BiH. Ciklon je dosegel svoj vrhunec 15. in 16. maja, ko se je center pomaknil proti severovzhodu, oslabil pa je šele v soboto, 17. maja. Na osrednjem Balkanu se je ta ciklon zadrževal kar tri dni. Hkrati je nad Zahodno in delom Srednje Evrope vztrajalo območje visokega zračnega tlaka, ki je preprečilo, da bi se ciklon pomaknil proti zahodu. Posledica so bile dolgotrajne padavine, ki so zajele zahodno in osrednjo Srbijo, severno ter vzhodno Bosno in Hercegovino ter severovzhodno Hrvaško. Ciklon je

dobival vlago iz Sredozemlja in Črnega morja, hladnejši zrak pa je v višjih predelih povzročal sneg. Procesi v globokem ciklonu so bili zelo intenzivni, ker je bila os ciklona navpično. Poleg tega je ciklon bolj ali manj miroval, 15. maja pa se je celo premaknil proti zahodu. Poleg ekstremne količine padavin so stanje poslabšali nenavadno nizke temperature za ta letni čas in zelo močan veter (Renko, 2014). Opisane vremenske razmere so povzročile obilne in dolgotrajne padavine ter posledično obsežne poplave na osrednjem Balkanu. Obilne padavine za to območje so napovedali tudi meteorološki modeli, ki so za severno in osrednjo Bosno in Hercegovino ter zahodno Srbijo predvideli med 150 in 250 litrov dežja na m<sup>2</sup> v 72 urah (slika 5), kar se je tudi uresničilo.



**Slika 1:** Poplavljeno območje pri Šamcu na sotočju rek Save in Bosne ter dolvodno 19. maja 2014 (vir: URSZR, 2014).

**Figure 1:** Flooded area in Šamac at the confluence of rivers Sava and Bosna and downstream on 19 May 2014 (source: URSZR, 2014).





*Slika 2: Posledice drobirskega toka v Željeznom polju 11. junija 2014 (levo, foto: L. Globevnik) in posledice poplav v Šamcu (desno, foto: M. Kobold).*

*Figure 2: The consequences of debris flow in Željezno polje on June 11, 2014 (left, photo: L. Globevnik) and flood consequences in Šamac (right, photo: M. Kobold).*



(1) Source: European Commission - COPERNICUS, Emergency Management Service and EsriDRP - LandsAT  
 This product is processed and compiled by the Secretariat of ISRBC, based on the information provided by the Parties to the FASRB (SI, HR, BA, RS) and ME.  
 The boundaries and names shown and designations used on this map do not imply official endorsement or acceptance by ISRBC and ICPDR.

*Slika 3: Poplavna območja vzdolž Save in pritokov maja 2014 (vir: ICPDR in ISRBC, 2015).*

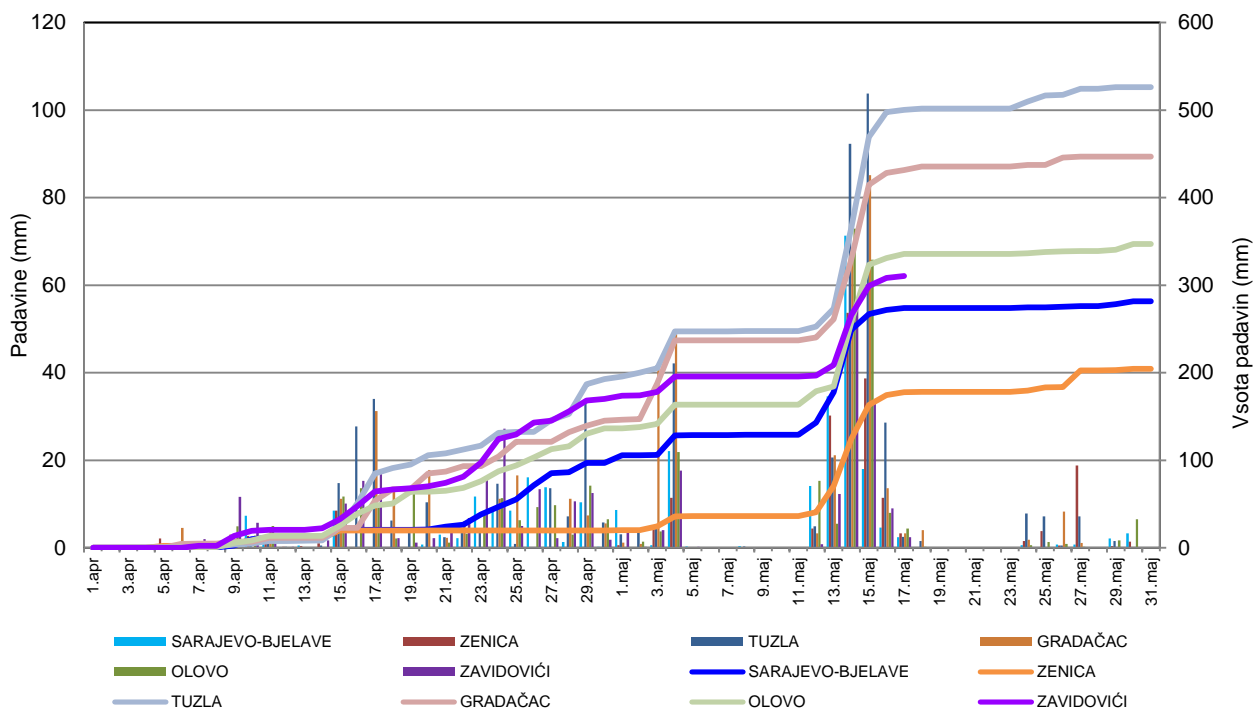
*Figure 3: Flooded areas along the Sava River and its tributaries in May 2014 (source: ICPDR and ISRBC, 2015).*

Po zbranih podatkih (OGIMET, 2014; ICPDR in ISRBC, 2015) so največjo količino padavin med 13. majem 2014 ob 6. uri po UTC in 17. majem 2014 ob 6. uri po UTC izmerili na meteorološki postaji Tuzla, in sicer 249 mm. Več kot 100 mm padavin v štirih dneh so izmerili še na meteoroloških postajah Loznica 219 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 so izmerili na meteoroloških postajah Loznica 110 mm, Valjevo in Beograd 108 mm, Smederevska Palanka in Tuzla 95 mm, vse 15. maja 2014 ob 6. uri po UTC.

Za primerjavo, največja izmerjena dnevna količina padavin v obdobju 1961–2010 je bila po podatkih RHMZ Srbije (2015) na postaji Loznica 92,3 mm, Valjevo 94,7 mm, Beograd 94 mm in Smederevska Palanka 129,3 mm. Absolutno največja izmerjena

dnevna količina padavin v Srbiji je bila 211,1 mm, izmerjena 10. oktobra 1955 v Negotinu, največja mesečna količina padavin pa 308,9 mm junija 1954 v Sremski Mitrovici (RHMZ Srbije, 2015).

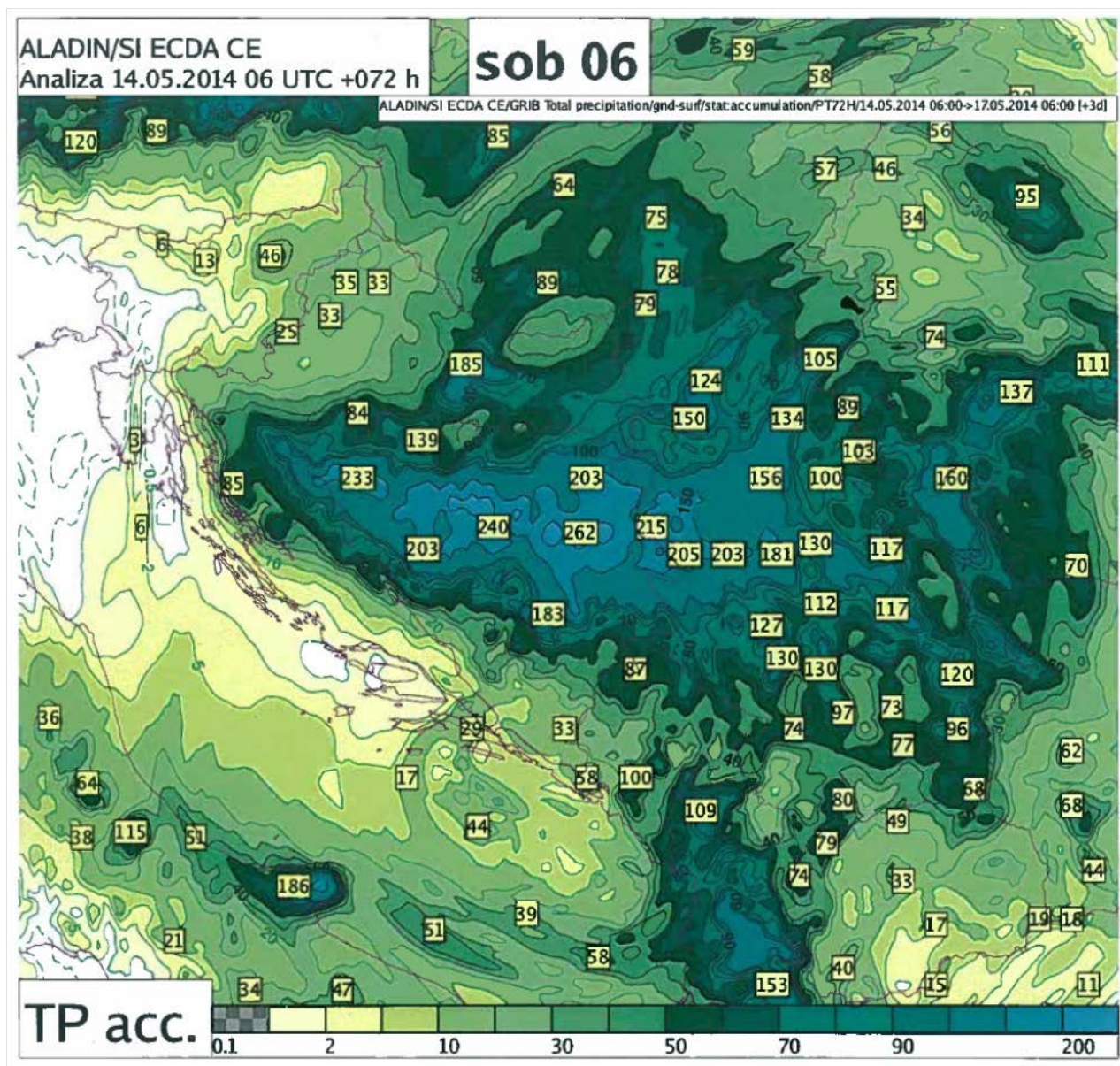
V Tuzli je večina večdnevni padavin dosegla povratno dobo več kot 500 let (Anzeljc in Đurović, 2014). V Olovem so dvo- in tridnevne padavine imele več kot 500-letno povratno dobo, eno-, štiri- in tridesetdnevne padavine pa 100-letno povratno dobo. Padavine vseh drugih trajanj so imele povratno dobo višjo od 20 let. V Doboju je imela večina večdnevni padavin povratno dobo od 20 do 50 let, tridnevne pa več kot 100 let. Podobno kot v Doboju so tudi v Sarajevu in Zenici večdnevne padavine imele večinoma več kot 20-letno povratno dobo, tri- do sedemdnevne pa celo več kot 100-letno povratno dobo. Glede na padavine, ki so zajele več kot polovico porečja reke Bosne, je bila verjetnost dogodka od 100 do 200 let, lokalno pa tudi več kot 500 let.



**Slika 4:** Dnevne in kumulativne padavine aprila in maja 2014 na padavinskih postajah v BiH (vir podatkov: FHMZ BiH in RHMZ RS).

**Figure 4:** Daily and cumulative precipitation in April and May 2014 at rainfall stations in BiH (data source: FHMZ BiH and RHMZ RS).





*Slika 5: Skupna napovedana količina padavin za obdobje od 14.5.2014 ob 06 UTC do 17.5.2014 ob 06 UTC (vir: ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014).*

*Figure 5: Total forecasted precipitation for the period 14.05.2014 06 UTC - 05.17.2014 06 UTC (source: ARSO, ULFGG and IzVRS, 2014).*

### 3. Hidrološke razmere maja 2014 na porečju reke Bosne

Po izredno mokrem aprilu je bila zemlja nasičena z vodo in obilne padavine maja so povečale površinski odtok ter povzročale erozijo in zemeljske plazove. Ti so bili najhujši v Željeznem polju (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Največje vodostaje na poplavnih območjih so presegle reke Bosna, Jala, Sana in Vrbas v Bosni in Hercegovini, reka Sava na Hrvaškem ter reke Sava, Drina, Jadar,

Kolubara in Tamnava v Srbiji (Kobold et al., 2015).

Posledice poplavnega dogodka in erozijskih pojavov vzdolž reke Bosne so bile primerljive s posledicami izrednih dogodkov poplav, plazov in drobirskih tokov, kot jih poznamo v Sloveniji iz let 1990, 2000, 2007 in 2010 (Kobold, 2011). Dogodki v Sloveniji so bili sicer intenzivni, toda kratkotrajni, z izjemo leta 2000 (Mikoš et al., 2002). Pojav zemeljskih plazov in drobirskega toka

v Željeznem polju je podoben pojavu zemeljskega plazu v Logu pod Mangartom leta 2000 in drobirskega toka v Železnikih leta 2007. Dogodek v Bosni in Hercegovini maja 2014 je bil vsekakor intenzivnejši, predvsem pa dolgotrajnejši.

Vodotoki v povirju reke Bosne so bili zelo visoki, vendar voda tam ni prestopila brežin (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Visoke vode so ponekod sicer poškodovale obrežne utrditve, do strnjenih poplav pa pred Zavidovići ni prišlo. Tam v reko Bosno priteče Krivaja, ki je zelo povečala pretok reke Bosne in poplavlila naseljeno območje sotočja rek Bosne in Krivaje. Krivaja je poplavljala že v mestu Olovo, razdejanje je bilo opazno tudi vzdolž reke Krivaje.

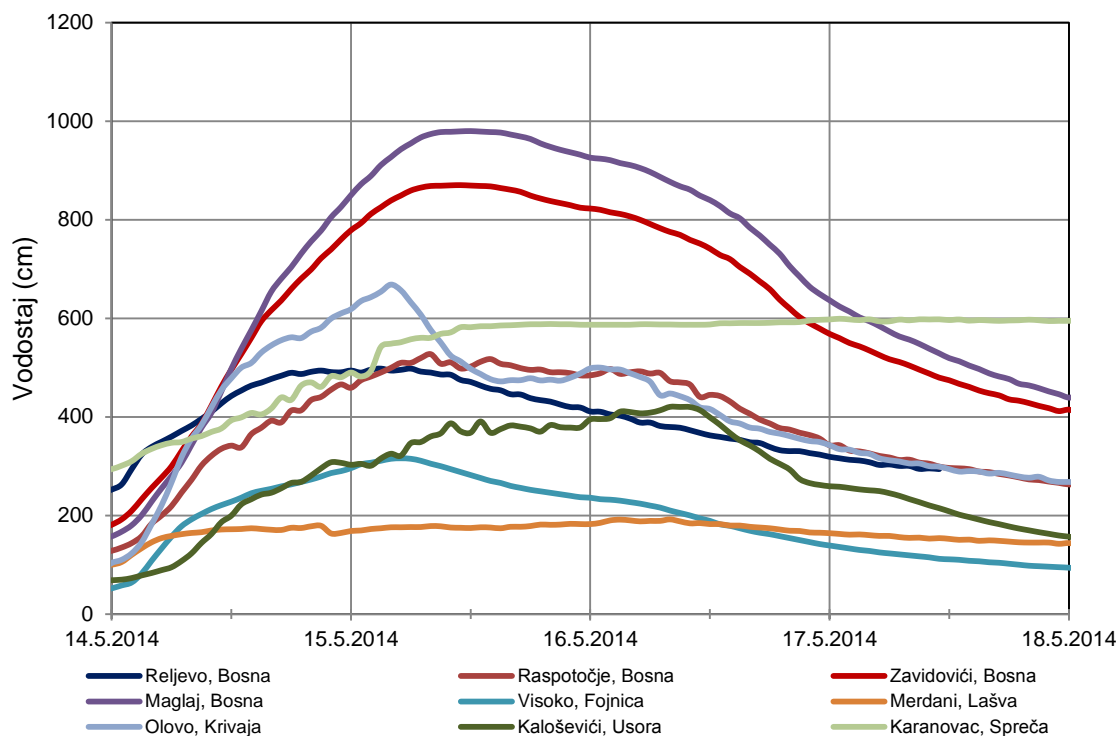
Reka Bosna je nato poplavljala do izliva v reko Savo. Zelo so bila poplavljena mesta Maglaj, Doboju, Modriča in Šamac. Poplavljali so tudi pritoki. Na reki Spreči, ki se v reko Bosno izliva v Doboju, je zgrajena večja pregrada z vodnim zadrževalnikom Modrac. Prelivanje visoke vode čez pregrado je poškodovalo podslapje pregrade, iz zadrževalnika pa se je med dogodkom izpuščalo več vode, kot je je vanjo priteklo (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Pretoki Spreče so bili večji, kot bi bili pri naravnem odtekanju vode. Voda je poplavljala vso ravnico ob Spreči do Doboja.

Zelo prizadeto je bilo mesto Bosanski Šamac pri vtoku reke Bosne v reko Savo. 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 vodah zajezi vodo v reki Bosni. Pri dogodku maja 2014 se je zgodilo, da sta imeli reki Sava in Bosna hkrati zelo 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 čez

naselje proti reki Savi. Zaradi visokih gladin v reki Savi se je voda v mestu zadržala še dober teden.

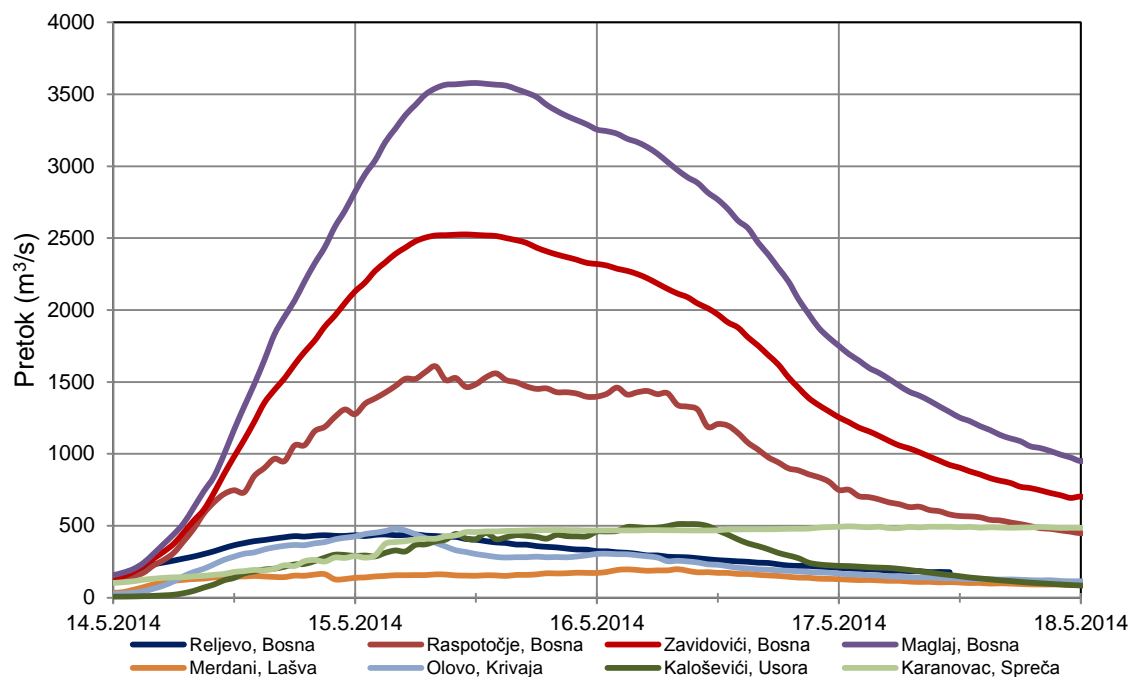
Poplava se je začela v zgornjem delu porečja 13. maja 2014. V zgornjem delu porečja vodostaji niso presegli vrednosti, doseženih pri izmerjenih zgodovinskih dogodkih (Kobold et al., 2015). Maksimalne vrednosti so bile presežene dolvodno od Zenice. V Zenici je bil maksimum presežen za 70 cm, v Doboju pa 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 preseneča trajanje poplavnih valov (slika 6). Potek pretokov, ki so jih za nekatere vodomerne postaje ovrednotili na RHMZ RS in FHMZ BiH od 14. do 18. maja 2014, predstavlja slika 7.

Iz grafičnih prikazov gladin in pretokov (sliki 6 in 7) so razvidni čas dvigovanja gladine poplavnega vala, verjetni vplivi zadrževanja vode na poplavnih ravninah, kar odražajo vodomerne postaje, pri katerih je vrh hidrograma raven oziroma je konica vala trajala več ur, ter hkratnost nastopa konice poplavnih valov na sotočjih. Zamiki pri pojavu konic so v zgornjem toku reke od dve do tri ure. V spodnjem toku je bilo potovanje poplavnega vala podobno kot v zgornjem toku, le da se je pojav največjega pretoka krepko upočasnil zaradi razlivanja vode na poplavna območja. Voda se je v Maglaju začela dvigovati celo prej kot v gorvodnih Zavidovićih. Maksimum je bil v Maglaju dosežen že v uri po doseženem maksimumu v Zavidovićih, v Doboju pa po šestih urah pri skoraj enaki razdalji. Reka Krivaja v Olovu je dosegla vrh dve uri pred reko Bosno v Zavidovićih in tako povzročila dvig vala v Maglaju, še preden je tja pripotovala najvišja konica vala reke Bosne iz Zavidovićev. V Maglaju je tako konica vala združene Bosne in Krivaje trajala kar šest ur.



**Slika 6:** Gladine poplavnih valov na vodomernih postajah na porečju Bosne pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH).

**Figure 6:** The water levels of the flood wave at the gauging stations on the Bosna catchment in May 2014 flood (data source: RHMZ RS and BiH FHMZ).



**Slika 7:** Pretoki na vodomernih postajah na porečju Bosne med poplavo maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH).

**Figure 7:** Discharges at the gauging stations on the Bosna catchment in May 2014 flood (data source: RHMZ RS and BiH FHMZ).



## 4. Hidrološki model porečja reke Bosne

### 4.1 Opis porečja reke Bosne

Porečje Bosne (slika 8) po podatkih 'Hidrološke studije površinskih voda Bosne i Hercegovine, Slijiv rijeke Bosne' (ZV in FHMZ, 2012) obsega 10420 km<sup>2</sup> glede na orografsko razvodnico. Reka teče od juga proti severu. Povirje je v Dinaridih z vršaci, ki presegajo 2000 metrov, osrednji del porečja zajema hribovito območje osrednje Bosne, spodnji del toka pa poteka po ravninskem območju poplavnega sveta reke Save. Porečje je tudi po geološki sestavi izredno pestro z značilnimi območji krasa.

Povirje reke Bosne opredeljuje Vrelo Bosne (4 km<sup>2</sup>) in trije vodotoki: Željeznica (480 km<sup>2</sup>), Zujevina (200 km<sup>2</sup>) in Miljacka (410 km<sup>2</sup>). Dolvodno se z leve priključita Fojnica (760 km<sup>2</sup>) in Lašva (960 km<sup>2</sup>), v Zavidovičih z desne potok Krivaja (1500 km<sup>2</sup>). V Doboju v reko Bosno z leve strani priteka Usora (850 km<sup>2</sup>), z desne pa reka Spreča (1950 km<sup>2</sup>). Na odseku Bosne med vtokom Miljacke in Krivaje v Bosno z desne vteka večje število manjših pritokov prispevne površine do 200 km<sup>2</sup>, ki skupaj tvorijo prispevno površino velikosti ca. 1700 km<sup>2</sup>. Skupna površina porečja desnega brega Bosne je 6900 km<sup>2</sup> (ca. 65% celotnega porečja).

### 4.2 Uporabljeni podatki in metode dela

Pretočne hidrograme maja 2014 na porečju reke Bosne smo simulirali s pomočjo hidrološkega modela HBV-light. S simulacijo smo analizirali odtočne koeficiente dogodka in določili najbolj verjetne pretoke reke Bosne in pritokov. 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).

### 4.2.1 Programski paket »HBV-light«

Model HBV je konceptualni hidrološki model, ki omogoča simulacijo odtoka na podlagi časovnih nizov 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).

Model HBV temelji na enačbi vodne bilance:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + lakes), \quad (1)$$

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).

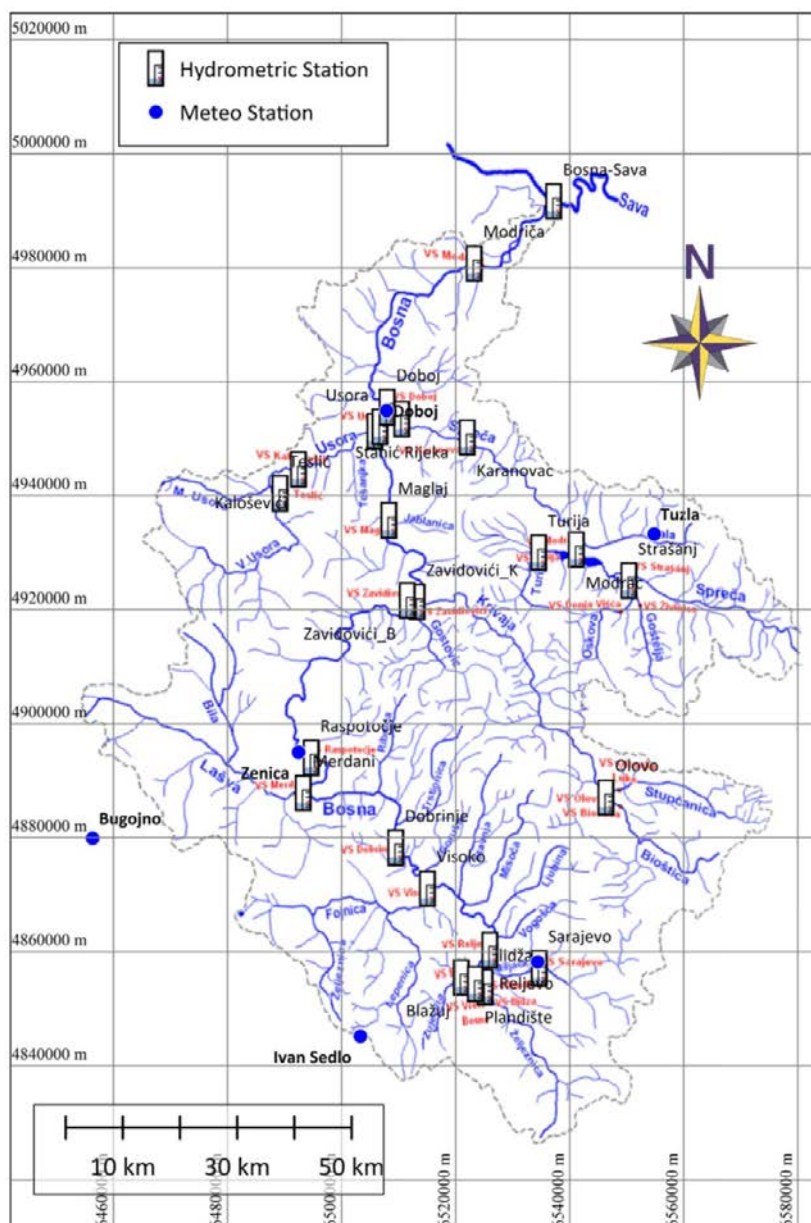
Model HBV-96 je že bil implementiran v slovenskem prostoru. V okviru razvoja evropskega poplavnega prognostičnega sistema je bilo umerjeno porečje Savinje (Kobold et al., 2003), na porečju Savinje je bila izdelana tudi analiza občutljivosti modela HBV na vhodne padavinske podatke (Kobold in Sušelj, 2005). 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).

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 razmere in vrednosti parametrov (Seibert in Beven, 2009). V večini primerov zadošča, če je »ogrevalno obdobje« dolgo eno leto (Seibert in Vis, 2012).

Model HBV je sestavljen iz štirih glavnih računskih postopkov (IHMS, 1999; slika 9):

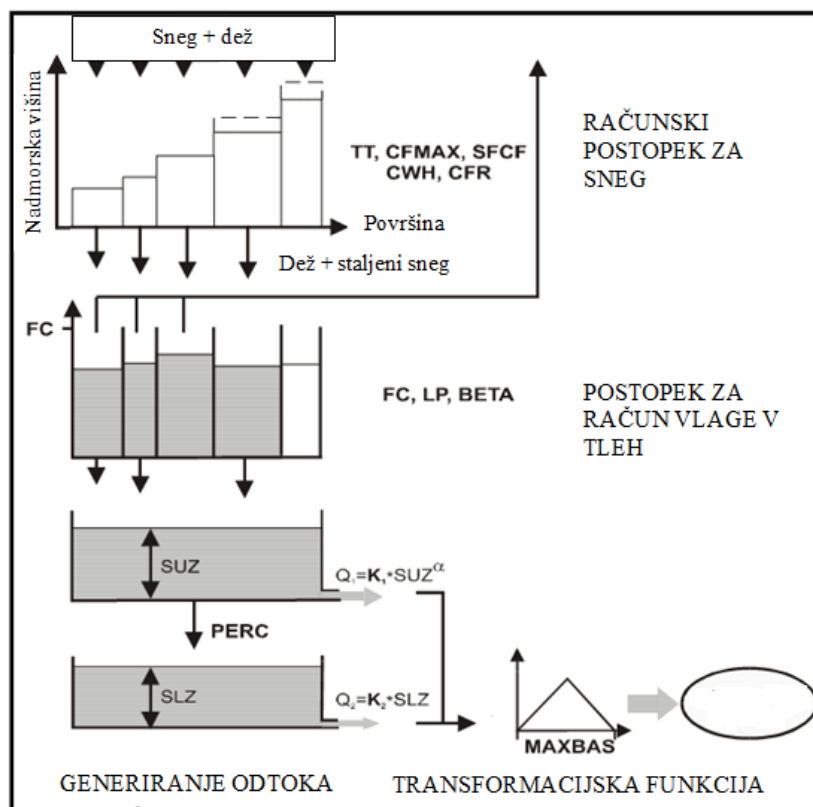
- računa akumulacije in taljenja snega,
- računa vlage v tleh,
- generiranja odtoka in

transformacijske funkcije.



**Slika 8:** Porečje reke Bosne v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu z lokacijami vodomernih in padavinskih postaj (vir hidrografske podlage z razvodnico in vodomernimi postajami: ZV in FHMZ, 2012).

**Figure 8:** The Bosna catchment in the Gauss-Krüger coordinate system with locations of hydrometric and precipitation stations (source of hydrographic basis of the watershed and gauging stations: ZV in FHMZ, 2012).



*Slika 9: Shematični prikaz računskih postopkov modela (povzeto po HBV-light Help).*

*Figure 9: Schematic diagram of the calculation procedures of the model (adapted from HBV-light Help).*

#### 4.2.2 Vhodni in izhodni podatki modela HBV-light

Vhodni podatki v model so časovni nizi 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 nize merjenih pretokov na iztoku iz podporečij.

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

$$P = \sum P_i c_i \quad (2)$$

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 tri 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 in to smo uporabili v modelu.

Izhodni podatki modela so simulirani pretoki, potencialna in dejanska evapotranspiracija, višina snežne odeje, vlaga v tleh, zaloga vode v zgronjem



in spodnjem rezervoarju ter pretoki skozi posamezne iztoke rezervoarjev za vsak časovni korak in vsako podporečje. 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 časovnih.

#### 4.2.3 Umerjanje modela

IHMS (1999) priporoča vsaj pet do deset let podatkov dnevni vrednosti za umerjanje modela HBV. Umerjanje je lahko ročno ali samodejno. 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 kakovosti modela (Seibert, 2005):

- koeficient učinkovitosti oziroma Nash-Sutcliffov kriterij:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (3)$$

- koeficient učinkovitosti z upoštevanjem uteži  $w$ :

$$R_{eff,weighted} = 1 - \frac{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum w Q_{obs} (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (4)$$

- koeficient učinkovitosti glede na logaritme pretokov:

$$\log R_{eff} = 1 - \frac{\sum(\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum(\ln Q_{obs} - \ln \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (5)$$

- koeficient determinacije:

$$r^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim}))^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}, \quad (6)$$

- povprečno letno odstopanje simuliranih pretokov od opazovanih:

$$meandiff = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{\text{število dni}} \cdot 356. \quad (7)$$

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 samodejno umerjanje, 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.

Umerjanje modela HBV je bilo tradicionalno izvedeno 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).

### 4.3 Izdelava modela porečja reke Bosne

Da bi zagotovili dovolj točen model tako obsežnega in heterogenega območja, smo porečje razdelili na podporečja, ki so tako velika, da pokrivajo območje le enega velikega pritoka. Porečje je bilo razdeljeno na 25 podporečij s površinami od 30 do 1000 km<sup>2</sup> (slika 10, preglednica 1). 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 (Balta et al., 2010). Zato je bilo prispevno območje Vrele Bosne določeno glede na geologijo in specifične pretoke na Vrelu Bosne (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Skupna površina porečja reke Bosne z upoštevanjem kraškega zaledja in uporabljenega GIS modela (10836 km<sup>2</sup>) se zato razlikuje od orografsko določenega prispevnega območja 10420 km<sup>2</sup> (ZV in FHMZ, 2012).

Vsa podporečja so bila razdeljena v cone glede na nadmorsko višino (tri 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 1). Podporečje v ravninskem delu (severni del porečja), kjer nadmorske višine večinoma ne presežejo 700 m, smo razdelili na dve coni nadmorskih višin (slika 11). Vsaka cona nadmorske višine pa je bila nato razdeljena še v dve skupini glede na rabo tal (slika 12) v tako imenovane vegetacijske cone: gozd in polje (ne-gozd).

Delitev na cone nadmorske višine in vegetacije je še posebej pomembna zaradi upoštevanja snega. Ta postopek shematično opiše slika 13.

Upoštevanje snega temelji na preprosti povezavi stopinja-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

( $TT$ ) 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 spodnjih formul:

$$\text{Taljenje snega} = CFMAX \cdot (T - TT), \quad (8)$$

$$\text{Zamrzovanje staljene vode} = CFR \cdot CFMAX \cdot (TT - T), \quad (9)$$

kjer je  $CFMAX$  faktor taljenja,  $CFR$  faktor zamrzovanja in  $TT$  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.

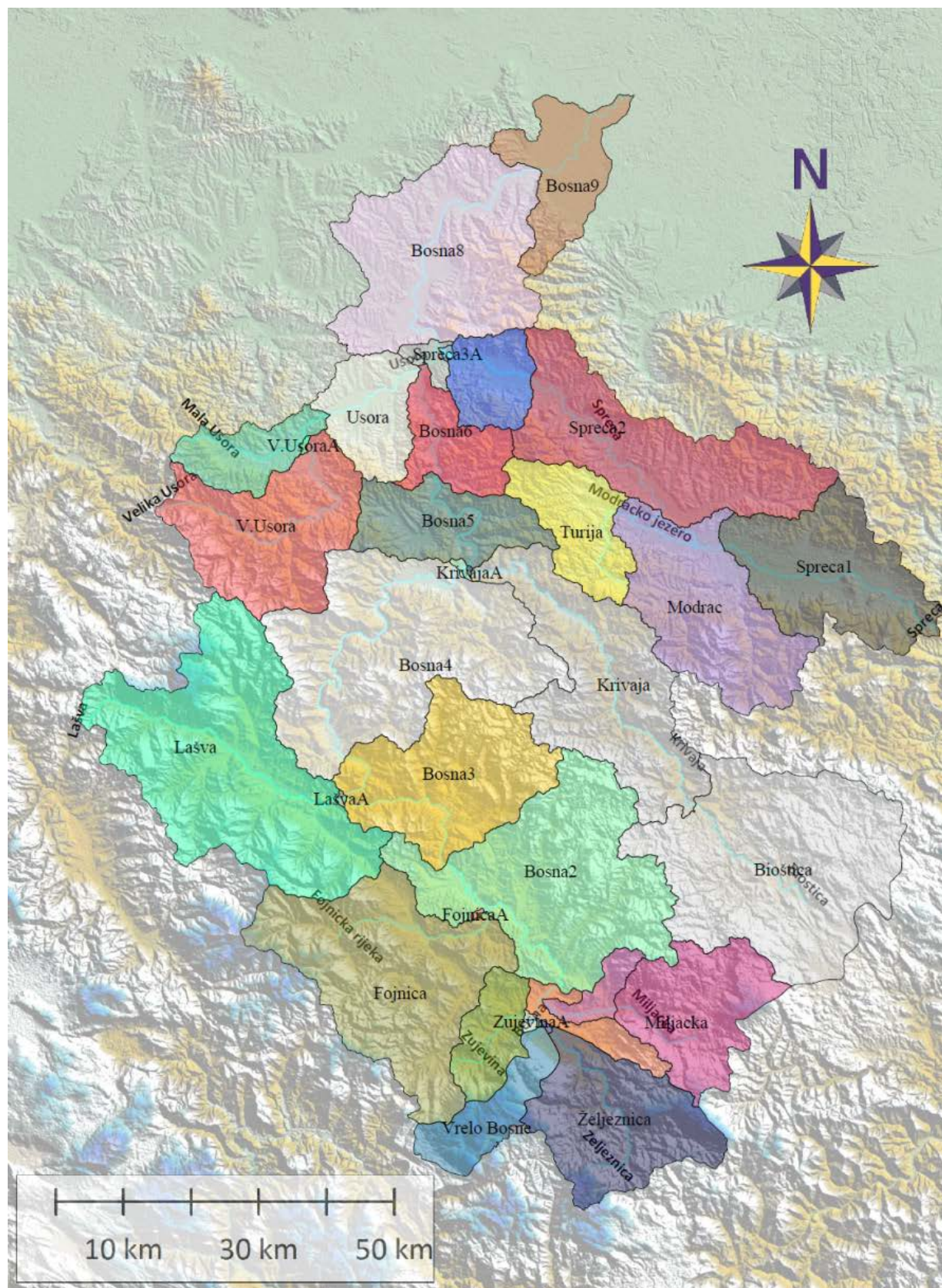
### 4.4 Umerjanje in preverjanje modela

Vhodni podatki, ki so potrebni za umirjanje modela, so padavine, temperatura zraka, potencialna evapotranspiracija in pretok. Za končno verzijo modela je bilo izbranih šest postaj, za katere so bili na voljo vsi podatki o padavinah: Sarajevo-Bjelave, Zenica, Tuzla, Bugojno, Ivan Sedlo in Doboj (slika 14). Vplivna območja posameznih postaj smo določili s Thiessenovimi poligoni. Za iste postaje smo upoštevali tudi podatke o temperaturah in evapotranspiraciji.

Podatki o temperaturi in padavinah so bili pripravljani z dnevним časovnim korakom. Za evapotranspiracijo so bile podane povprečne mesečne vrednosti (mm/dan), ki jih model z linearno interpolacijo transformira v dnevni časovni korak in nato modificira z upoštevanjem ETF faktorja z uporabo formule:

$$\text{Potencialna evapotranspiracija} = E_{pot} \cdot (1 + ETF \cdot (T - T_{norm})), \quad (10)$$

kjer je  $E_{pot}$  standardna vrednost potencialne evapotranspiracije,  $T$  dejanska temperatura in  $T_{norm}$  normalna temperatura posameznega dne v letu. Za  $ETF$  faktor je priporočena vrednost 0,1 (IHMS, 1999).



*Slika 10: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji, zajetimi v modelu.*

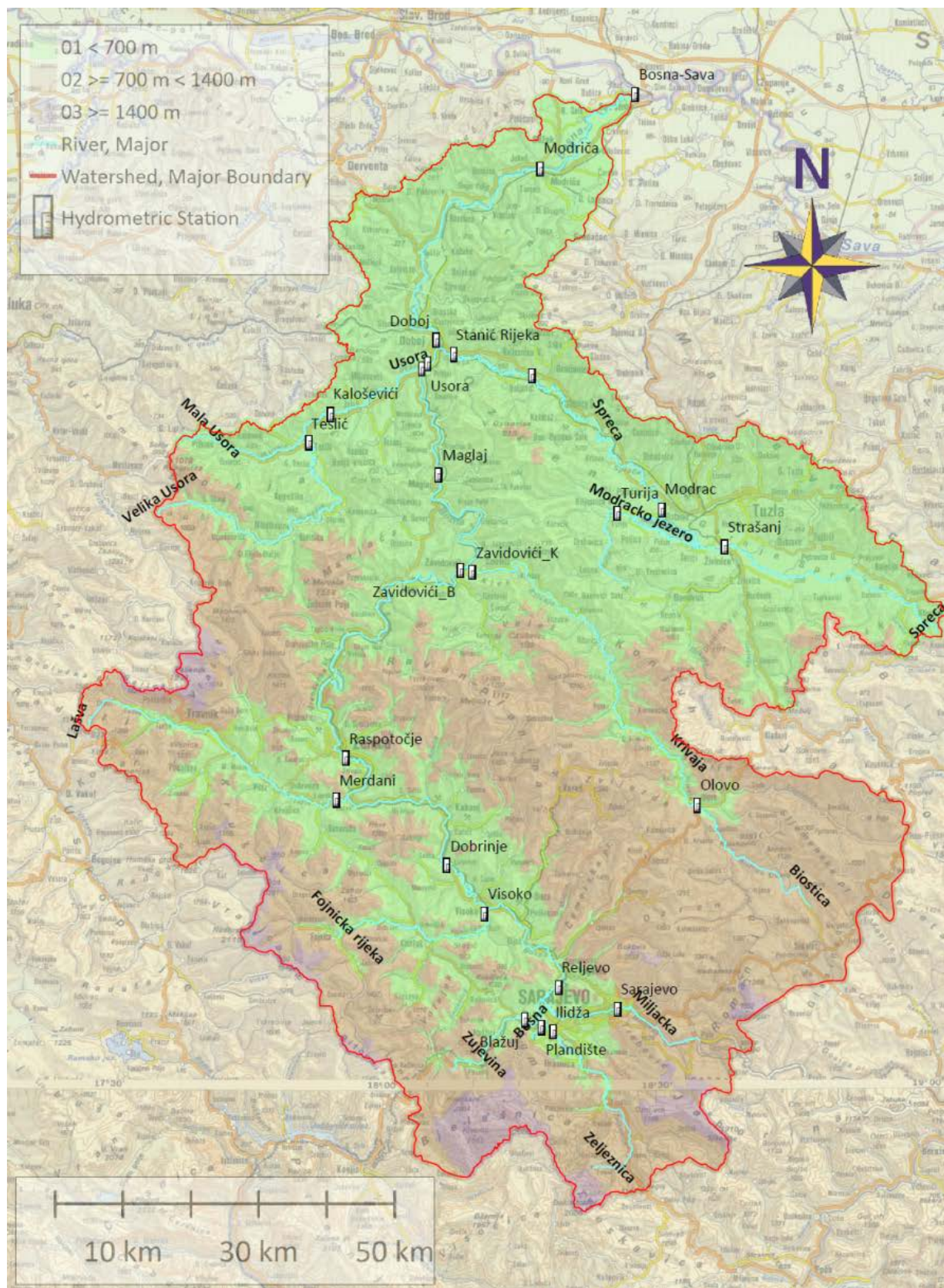
**Figure 10:** *The model of the Bosna river basin with the subcatchments included in the model.*



**Preglednica 1:** *Površina podporečij in deleži po pasovih nadmorske višine.*

**Table 1:** *The areas of the subcatchments and their proportions in the altitude zones.*

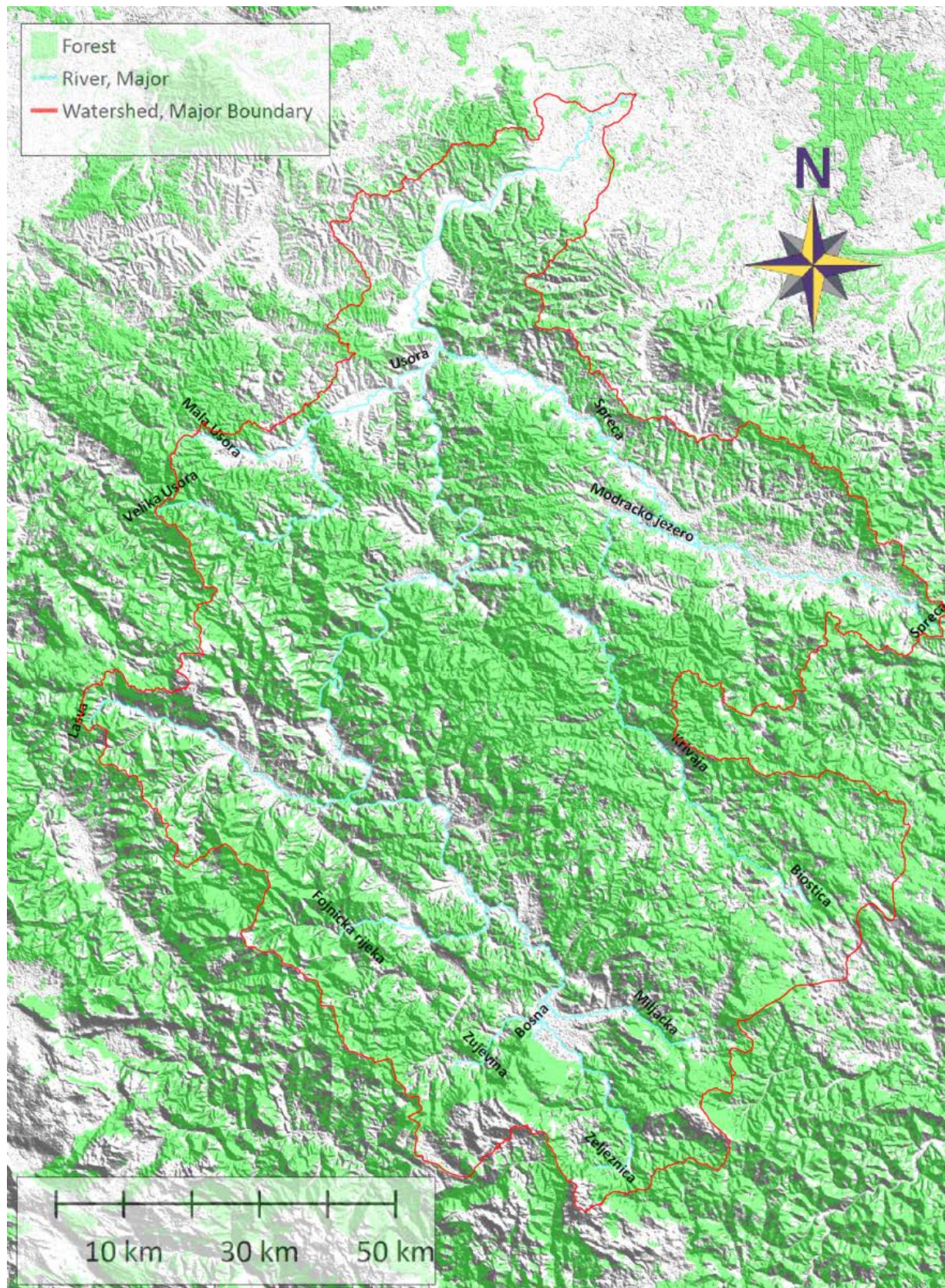
Št. podporečja	Ime podporečja	Površina podporečja	01 < 700 m	02 ≥ 700 m < 1400 m	03 ≥ 1400 m	01 < 700 m	02 ≥ 700 m < 1400 m	03 ≥ 1400 m
		[km <sup>2</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]	[km <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
1	Željeznica	433.43	43.43	312.49	77.51	0.10	0.72	0.18
2	Zujevina	155.19	71.75	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 11: Višinske cone porečja reke Bosne.

Figure 11: Altitude zones of the Bosna river basin.

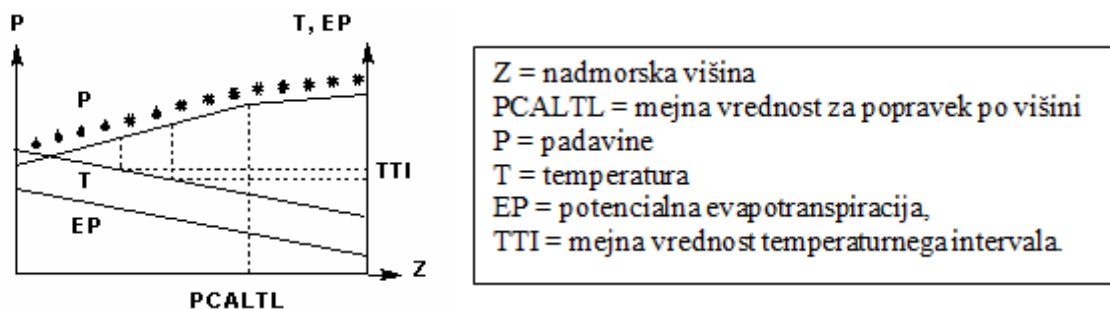




*Slika 12: Vegetacijske cone na območju porečja reke Bosne.*

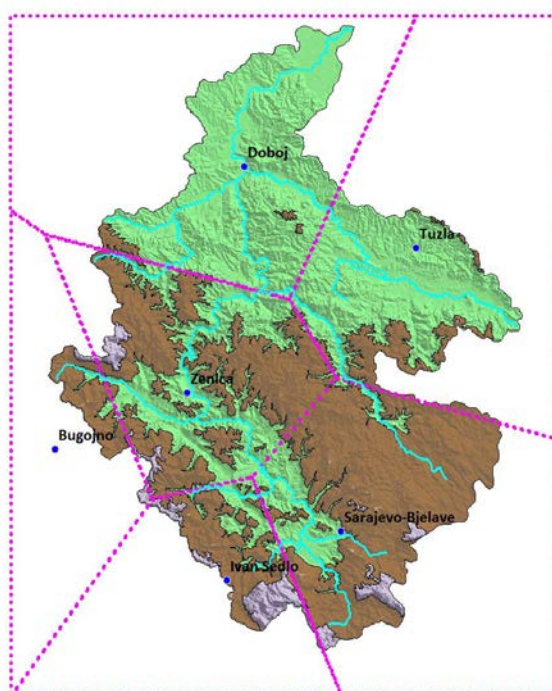
*Figure 12: Vegetation zones on the Bosna river basin.*





Slika 13: Upoštevanje snega v modelu (povzeto po IHMS, 1999).

Figure 13: Consideration of snow in the model (adapted from IHMS, 1999).



Slika 14: Porečje reke Bosne s prikazanimi padavinskimi postajami in s Thiessenovimi poligoni.

Figure 14: The Bosna river basin with precipitation stations and Thiessen polygon.

Podatki z dnevnimi vrednostmi pretokov so bili na voljo za obdobje 1960–1990 (ZV in FHMZ, 2012). Ker se za umerjanje hidrološkega modela priporoča vsaj pet let podatkov neprekinjenega obdobja, ki zajemajo tako nizke kot visoke pretoke, smo obdobja za umerjanje in preverjanje modela izbrali na osnovi pojava velikih pretokov in razpoložljivih podatkov na vseh postajah. V obdobju 1960–1990 so bili največji pretoki reke Bosne v letih 1968 in 1988, zato smo za umerjanja modela izbrali obdobje 1. 1. 1964 – 31. 12. 1968, za preverjanje modela pa kasnejše obdobje od 1. 1.

1984 – 31. 12. 1988. S tem smo zajeli za model značilne dogodke visokovodnih konic.

Za umerjanje smo uporabili orodje, ki ga nudi program HBV-light, genetski algoritem GAP. Rezultati so prikazani v preglednici 2. Rezultati umerjanja so podobni za obe obdobji, obdobje umerjanja (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.

**Preglednica 2:** Rezultati umerjanja modela z orodjem HBV (genetski algoritem GAP) 1.1.1964–31.12.1968 in validacija 1.1.1984–31.12.1988.

**Table 2:** The results of model calibration with the HBV tool (genetic algorithm GAP) 1.1.1964–31.12.1968 and validation 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
Plandište	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 kvocijent varianc simuliranih vrednosti in opazovanih vrednosti odvisne spremenljivke. [ $K_d^2$  = kvocijent 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 [ $K_u = 1 - (\text{vsota kvadratov razlik simuliranih in merjenih vrednosti}) / \text{vsota razlike merjenih vrednosti s srednjo vrednostjo}$ ];  $K_u = 1$ : popolna učinkovitost;  $K_u = 0$ : simulacija je dobra (slaba) kot napoved s konstantno vrednostjo;  $K_u < 0$ : zelo slaba napoved; *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;

## 5. Rezultati simulacije poplavnega dogodka maja 2014

Poplavni dogodek maja 2014 smo simulirali z dnevnim časovnim korakom za obdobje april–maj 2014. Rezultati simulacije so hidrogrami pretokov na izbranih profilih vzdolž reke Bosne in na Krivaji, Usori, Spreči ter Lašvi. Simulirani hidrogrami za profile na reki Bosni so prikazani na sliki 15, najvišji pretoki v času konice poplavnega vala 15. maja 2014 pa so: v Zavidovičih 2479 m<sup>3</sup>/s, v Maglaju 3500 m<sup>3</sup>/s, Doboju 4830 m<sup>3</sup>/s in Modriči 4874 m<sup>3</sup>/s. Na izlivu v reko Savo daje model za reko Bosno pretok konice vala okoli 4900 m<sup>3</sup>/s. Te vrednosti se dobro ujemajo s pretoki, prikazanimi na sliki 4, kjer je po podatkih FHMZ BiH najvišji pretok v Zavidovičih znašal 2526 m<sup>3</sup>/s, v Maglaju pa 3579 m<sup>3</sup>/s. Podrobneje je ujemanje simuliranih pretokov in pretokov, določenih iz merjenih vodostajev in pretočnih krivulj FHMZ BiH, za ti dve vodomerni postaji prikazano na slikah 16 in 17. Rezultati kažejo na dobro ujemanje simuliranih in merjenih pretokov.

Krivuljo odnosa med konicami simuliranih hidrogramov glede na velikost prispevne površine vzdolž reke Bosne in njenih pritokov prikazuje slika 18. 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 velikost prispevne površine manjše

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

**Table 3:** The probability of occurrence of maximum discharges at gauging stations on the Bosna River (source: Hydrological study of BiH, RHMZ RS and FHMZ BiH).

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

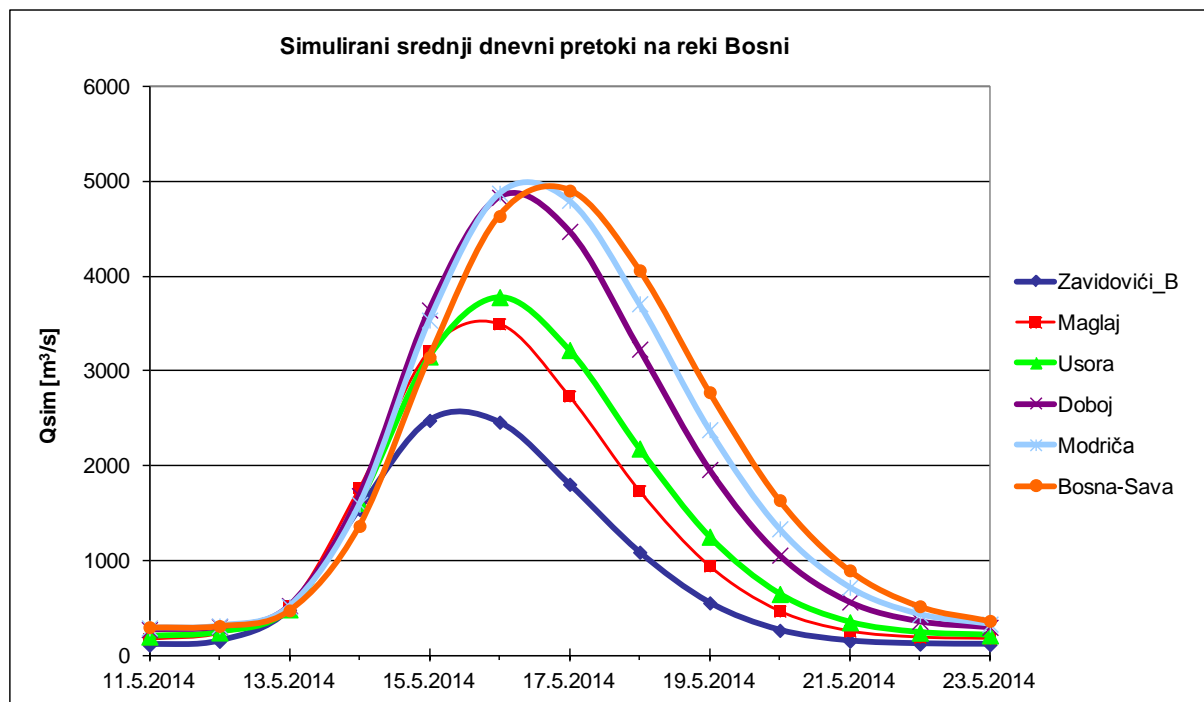
\*določeno iz odnosa verjetnih visokih voda do 100-letne povratne dobe s pomočjo logaritemske skale

odtoke od reke Bosne, kar se odraža na zmanjšanem naklonu krivulje po vtoku Usore v reko Bosno. Povečanje naklona krivulje pa opazimo na reki Bosni po vtoku Krivaje v Zavidovičih in po vtoku reke Spreče v Doboju. Razlog so višji odtoki glede na prispevno površino na Spreči in Krivaji.

Parametri modela so umerjeni na zabeležene pretoke, 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 7).

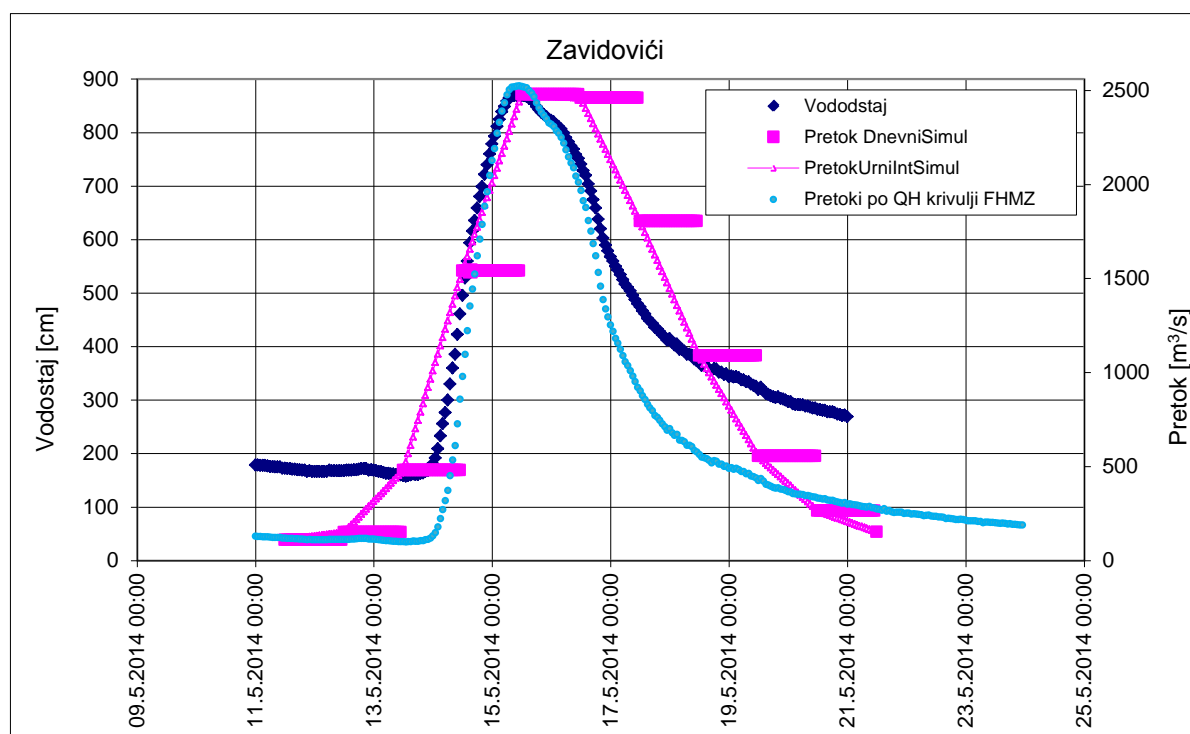
Preglednica 3 podaja podatke o verjetnih visokih vodah na postajah reke Bosne in vrednosti, dosežene maja 2014. Verjetne visoke vode povratne dobe od 10 do 100 let so določene v hidroloških študijah RHMZ RS in FHMZ BiH. Visoke vode 500 in 1000 letne povratne dobe smo določili s pomočjo grafičnega prikaza določenih visokih voda na logaritemski skali, pri čemer smo predpostavili zvezen potek krivulje verjetnostne porazdelitve vzorca. Glede na podatke, ki jih prikazuje preglednica 3, so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli povratno dobo 500 let, drugod pa več kot 1000 let.





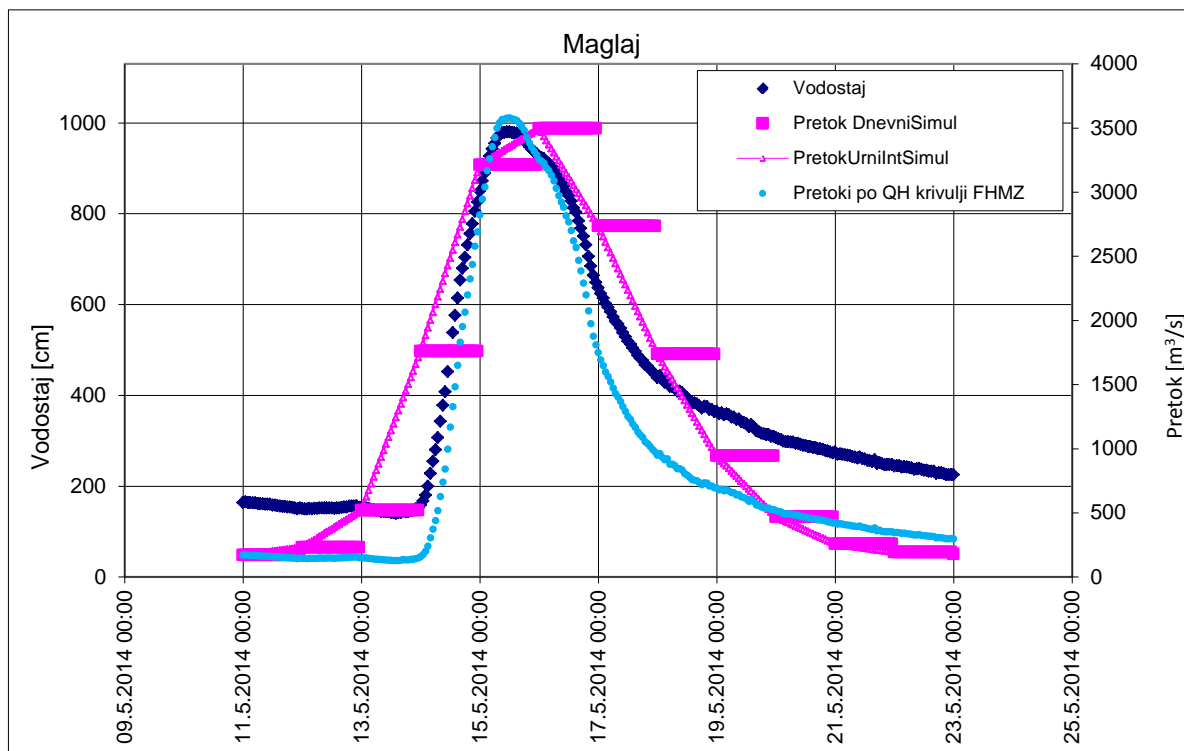
Slika 15: Simulirani hidrogrami povprečnih dnevni pretokov na reki Bosni v maju 2014.

Figure 15: Simulated hydrographs of mean daily discharges in May 2014 on the Bosna River.



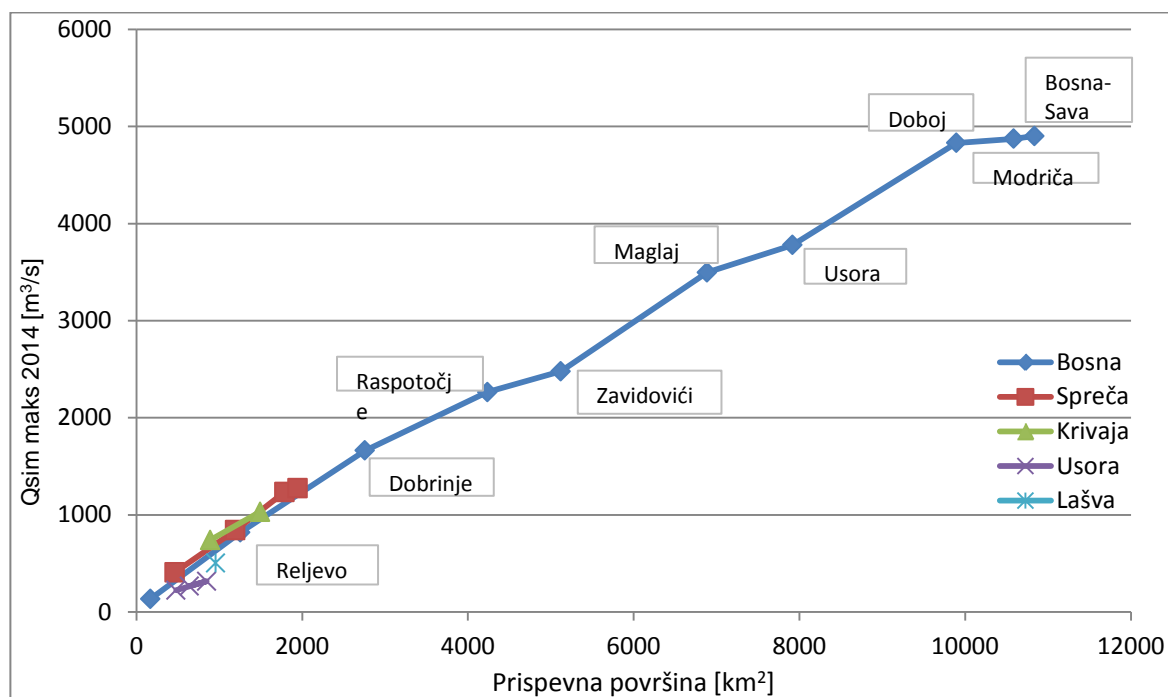
Slika 16: Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Zavidovići na reki Bosni.

Figure 16: The comparison of simulated hydrograph with measured water levels and flow rates from the QH curve at Zavidovići on the Bosna River.



**Slika 17:** Primerjava simuliranega hidrograma pretokov z merjenimi vodostaji in pretoki iz veljavne QH krivulje na VP Maglaj na reki Bosni.

**Figure 17:** The comparison of simulated hydrograph with measured water levels and flow rates from the QH curve at Maglaj on the Bosna River.



**Slika 18:** Krivulja odnosa med konicami simuliranih hidrogramov glede na velikosti prispevnih površin.

**Figure 18:** The curve of the relationship between the peak of simulated hydrographs and size of the catchment areas.

Odočni koeficienti za reko Bosno (odtok med 14. in 17. majem 2014 glede na padavine od 12. do 17. maja 2014) (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014) so se gibali med 0,76 na reki Bosni pri Modriči in 0,91 na reki Bosni pod vtokom Usore. Odočni koeficient za Bosno v Doboju je bil 0,82. Koeficienti odtoka so visoki, saj so bila tla zaradi predhodnih padavin aprila in v začetku maja nasičena z vodo, zato je večina padavin površinsko odtekla in prispevala k višjim poplavnim konicam.

## 6. Zaključki

Za simulacijo pretokov reke Bosne in njenih pritokov v maju 2014 smo zbrali in uredili vse razpoložljive zgodovinske podatke o pretokih, padavinah in temperaturah zraka na porečju reke Bosne (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Opravljene analize, zbir podatkov od leta 1961 do maja 2014, priprava baze podatkov o pretokih, padavinah in temperaturah v porečju reke Bosne ter hidrološki model so dali vpogled v kompleksen in pester proces poplav na porečju reke Bosne.

Vsaka katastrofalna poplava je enkratni pojav s posebnimi značilnostmi in razvojem. Poplave v spodnjem delu porečja Save maja 2014 so bile posledica večdnevniških neprekinjenih padavin, ki so povzročile zelo visoke pretoke in koeficient odtoka blizu vrednosti 1. S celovito analizo poplavnega dogodka na reki Bosni se večja poznavanje izrednega hidrološkega dogodka maja 2014 na največjem porečju v BiH, s postavitvijo hidrološkega modela pa se je vzpostavil prenos znanja in izkušenj med Slovenijo ter BiH na področju hidrološkega modeliranja in napovedovanja poplav. Model porečja reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira vodno bilanco vodotoka ter daje podlago za nadaljnji razvoj, v obstoječi obliki pa je že uporaben za pripravo napovedi pretokov pri poplavah reke Bosne v spodnjem toku. Ugotovljeno je bilo, da je v porečju Bosne prisoten velik lokalni orografski vpliv na padavine, zato je bila za izboljšanje delovanja modela predlagana postavitev dodatnih padavinskih postaj na ustreznih lokacijah, ki bodo reprezentativne za posamezna podporečja.

## Viri

Aghakouchak, A., Habib, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education* **26**(4), 963–973.

Anzeljc, D., Đurović, B. (2014). Analiza večdnevniških padavin, ki so maja 2014 povzročile poplave na porečju Bosne. Poročilo IzVRS.

ARSO, ULFGG in IzVRS (2014). Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne. Poročilo. [http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Koncno%20porocilo\\_Analiza%20poplave%20maja%202014%20za%20porecje%20reke%20Bosne.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Koncno%20porocilo_Analiza%20poplave%20maja%202014%20za%20porecje%20reke%20Bosne.pdf)

Balta, V., Žigić, I., Pašić-Škripić, D. (2010). Hidrogeološka istraživanja u cilju zaštite voda šireg područja Hadžića kod definiranja trase koridora Vc. 1. Konferencija "Održavanje 2010", Zenica, B&H.

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. Državni hidrometeorološki zavod. [http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava\\_sava\\_2014.pdf](http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf) (20.5.2014)

ICPDR in ISRBC (2015). Floods in May 2014 in the Sava River Basin. Brief overview of key events and lessons learned.

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

Kobold, M. (2011). Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. *Ujma* **25**, 48–56.

Kobold, M., Globovnik, L., Brilly, M., Vidmar, A., Anzeljc, D. (2015). Hidrološka analiza katastrofalne poplave maja 2014 v Bosni in Hercegovini. *Ujma* **29**, 252–263.

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.
- 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.
- 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.
- Kopusović, T. (2014). Poplave, akumulacije, hidroenergija i okoliš, sa izazovima klimatskih promjena, predstavitev, Doboj, Javna tribuna (15.7.2014)
- 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.
- 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* **16**, 326–334.
- Nash, J. E., Sutcliffe J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I -A discussion of principles, *Journal of Hydrology* **10**(3), 282–290.
- OGIMET (2014). Professional information about meteorological conditions in the world. <http://www.ogimet.com/resynops.phtml.en> (6. 5. 2014)
- 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. Hrvatska vodoprivreda 207, 12–13.
- RHMZ RS (2014). Meteorološki i hidrološki aspekti poplava u Republici Srpskoj, maj 2014 (Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014). Republički hidrometeorološki zavod RS. <http://rhmrz.com/assets/images/meteorologija/> (19. 12. 2014).
- RHMZ Srbije (2015). Analiza hidrološke situacije na glavnim slivovima na teritoriji Republike Srbije u periodu januar - jun 2014. godine. [http://www.hidmet.gov.rs/latin/hidrologija/naslovna\\_analize.php](http://www.hidmet.gov.rs/latin/hidrologija/naslovna_analize.php) (14.5.2015)
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm, *Hydrology and Earth System Sciences* **4**(2), 215–224.
- Seibert, J. (2005). HBV light version 2, User's manual. Stockholm, Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology: 16 str.
- 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.
- 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.
- Solomatine, D.P., Dibike, Y.B., Kukuric, N. (1999). Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. *Hydrological Sciences Journal* **44**(6), 879–894.
- ZV in FHMZ (2012). Hidrološka studija površinskih voda Bosne i Hercegovine, Sliv rijeke Bosne. Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, Federalni Hidrometeorološki Zavod.