

## PRELIMINARNA HIDROLOŠKA REKONSTRUKCIJA POPLAVNOG TALASA IZ MAJA 2014. GODINE U SLIVU REKE KOLUBARE

Nikola ZLATANOVIĆ, Prof dr Stevan PROHASKA  
Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd  
email: nikola.zlatanovic@jcerni.co.rs, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

### REZIME

Katastrofalna poplava koja se u slivu reke Kolubare desila sredinom maja 2014. godine prouzrokovala je značajno rušenje postojećeg odbrambenog sistema, nekontrolisane prodore postojećih nasipa i plavljenje otvorenih rudnih kopova, poljoprivrednih površina, gradova i naselja, a što je imalo za posledicu gubitke ljudskih života i ogromne materijalne štete. Imajući u vidu tu činjenicu, autori ovog rada preuzeli su na sebe obavezu da izvrše hidrološku rekonstrukciju ove poplave sa ciljem da se utvrdi stvarno stanje prostiranja ove poplave duž toka reke Kolubare i sagleda stvarnu razmeru poplave iz maja 2014. godine. Rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine duž glavnog toka reke Kolubare i njenih glavnih pritoka izvršena je pomoću razvoja hidrološkog modela primenom programskog paketa HEC-HMS. Suština primene modela je da se ceo sliv reke Kolubare izdela na podslivove, gde postojeće hidrološke stanice predstavljaju kontrolne profile, dok je izlazni profil iz modela položaj hidrološke stanice Draževac na reci Kolubari. Rad je ilustriran odgovarajućim numeričkim i grafičkim pokazateljima hidrograma poplave iz maja 2014. godine na ključnim profilima vodomernih stanica za ostvareno stanje kao i za hipotetičko stanje uspešne odbrane od poplava.

**Ključne reči:** rekonstrukcija poplave, hidrološko modeliranje, HEC-HMS

### 1. UVODNE NAPOMENE

Sredinom maja 2014. godine, ceo sliv reke Kolubare je bio zahvaćen obilnim kišama. Ekstremni oticaji sa padina doveli su do koincidencije talasa velikih voda na levim i desnim pritokama Kolubare, koje su se praktično istovremeno slile u reku Kolubaru. Na

deonicama sa zaštitnim objektima, a to su uglavnom naselja i donji delovi toka, došlo je do prelivanja i proboja nasipa na više mesta u relativno kratkom vremenskom periodu od 1-2 dana [1]. Najteže posledice tih proboja doživeo je grad Obrenovac. Istovremeno je došlo do izlivanja vode iz postojećih korita reka Kolubare, Peštana i Vraničine na području lignitskog basena i poplavljani su površinski kopovi "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni". Do izlivanja je došlo uzvodno od južne granice otvorenog kopa "Tamnava-Istočno polje", kao posledica prelivanja i rušenja zaštitnih nasipa Kolubare i pritoka Vraničine i Peštana. Kao rezultat došlo je do promene toka reke Kolubare, kada je Kolubara presekla novo poplavno korito kroz postojeće korito reke Vraničine, od ušća do otvorenog kopa "Tamnava-Istočno polje". Na svom putu ka kopu, reka je presekla i uništila postojeći odbrambeni nasip koji je štitiio tamnavske kopove od velikih voda Kolubare, Vraničine i potoka Skobalj. Formiranjem poplavnog korita Kolubare uništeno je ušće Vraničine u Kolubaru te se ovaj vodotok direktno ulivao u površinski kop. Do izlivanja vode u površinski kop "Tamnava-Zapadno polje" je došlo i usled proloma retenzione brane "Kladnica".

Tokom poplave iz maja 2014. godine dogodile su se, takođe, značajne havarije na pojedinim zvaničnim mernim stanicama Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. Sa jedne strane došlo je do potapanja i rušenja mernih uređaja (limnigrafa) ili proloma nasipa neposredno uzvodno od objekata tako da su strujne slike znatno izmenjene, pa nizvodni limnigraf (hidrološke stanice) nisu mogle registrovati stvarno stanje proticaja za vreme vršnih delova hidrograma. Sa druge strane, na nekim profilima došlo je do zaglavlivanja pera limnigrafa što je imalo za posledicu "odsecanje" vrha poplavnog talasa, što može imati nepovoljne posledice pri kasnijim obrada istih.

Imajući sve ovo u vidu, pojavila se potreba da se, pomoću hidrološkog modela, izvrši rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine na reci Kolubari i njenim pritokama. U vezi sa ovim, autori ovoga rada su razradili jedan matematički model čiji je zadatak da utvrdi stvarnu genezu ove poplave duž toka reke. Za razvoj hidrološkog modela korišćen je programski paket HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), a preliminarni rezultati njegove primene za poplavni talas iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare prikazani su tekstu koji sledi.

## 2. RASPOLOŽIVI PODACI ZA ANALIZU KATASTROFALNE POPLAVE U SLIVU REKE KOLUBARE U MAJU 2014. GODINE

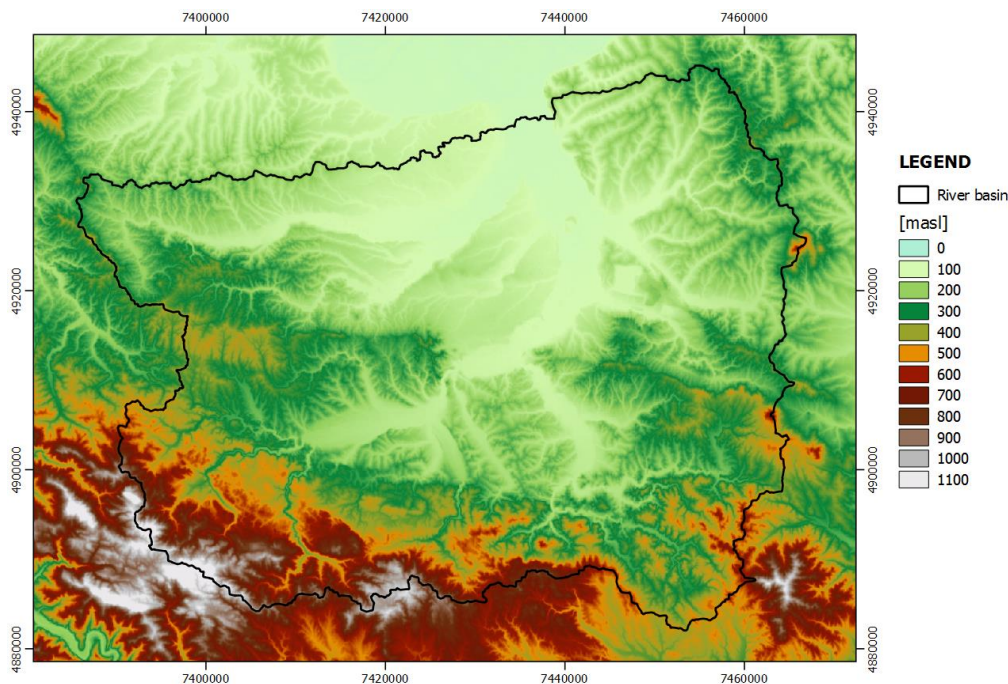
U osnovi najbitniji podaci i podloge za potrebe rekonstrukcije poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare su:

- digitalni model terena,
- hidrometeorološki podaci,
- podaci o poplavljenim objektima,
- podaci o stanju i funkcionisanju postojećih objekata za zaštitu od poplava, i

- podaci o poplavljenim naseljima i rušenjima infrastrukturnih objekata.

Korišćen je SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) digitalni model terena (DEM) [9] kao podloga za dalje analize. Rezolucija digitalnog modela terena je 3 lučne sekunde u geografskoj projekciji (WGS84 datum), što iznosi okvirno 90x60 m reprojektovano u Gaus Krigerovu pravougaonu Merkatorovu projekciju koja se najčešće koristi u Srbiji. Ovakav raster je dalje interpolacionim metodama doveden do rezolucije od 70x70 m da bi se obezbedio kvadratni oblik ćelija sa minimalnim gubitkom nivoa detaljnosti.

Kako je izvorni SRTM DEM (bez dodatnih korekcija) veoma ograničen za korišćenje u hidrološkim analizama, niz koraka za predprocesiranje terena je primenjen [13] da bi se obezbedio "hidrološki korektan" model terena. Nakon tretiranja depresija i ravnih površina, sračunati su rasteri pravaca tečenja (flow directions) i površina sliva (flow accumulations) primenom metode "Deterministic 8" [7]. Ovakvo tretiran digitalni model (slika 1) je korišćen za delineaciju slivova i podslivova, kao i za određivanje geomorfoloških parametara podslivova.



Slika 1. SRTM digitalni model terena za sliv reke Kolubare

Hidrometeorološki podaci koji su korišćeni pri formiranju hidrološkog modela sliva reke Kolubare su zvanični podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. To su pre svega podaci o padavinama i proticajima na zvaničnim mernim stanicama registrovanim u periodu poplave od 12. do 24. maja 2014. godine.

U konkretnom slučaju korišćeni su podaci o padavinama i to:

- Dnevne sume padavina na sledećim kišomernim stanicama u slivu reke Kolubare: Bogatić, Brežće, Donje Crniljevo, Donje Leskovice, Jagodići, Kaona, Koceljeva, Koštunići, Liplje, Ljig, Lukavac, Mionica, Mratišić, Osečenica, Pambukovica, Parcani, Počuta, Radarski centar Valjevo, Rogačica, Rudovci, Šarbane, Sibnica, Sopot, Stepojevac, Struganik, Stubline, Ub, Velika Ivanča i Valjevska Kamenica.
- Časovne vrednosti padavina na glavnim meteorološkim i automatsko-izveštajnim stanicama u slivu reke Kolubare: Valjevo, Majinovići i Štavica.
- Časovne vrednosti padavina na glavnim meteorološkim stanicama u neposrednoj okolini sliva reke Kolubare: Loznica, Beograd-Vračar, Sremska Mitrovica, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega.
- Časovne vrednosti proticaja na zvaničnim vodomernim stanicama u slivu reke Kolubare: Belo Polje (Obnica), Sedlare (Jablanica), Valjevo (Kolubara), Degurić (Gradac), Mionica (Ribnica), Slovac (Kolubara), Bogovađa (Ljig), Beli Brod (Kolubara), Zeoke (Peštan), Koceljeva (Tamnava), Čemanov most (Tamnava), Ub (Ub), Draževac (Kolubara).

Raspoloživi podaci o plavljenim objektima prikupljeni su za sledeće objekte: otvorene rudne kopove "Tamnava - Zapadno polje", "Tamnava - Istočno polje" i "Veliki Crljeni".

Raspoloživi podaci o stanju i funkcionisanju objekata za zaštitu od poplava prikupljeni su za sledeće objekte: akumulacije "Stubo-Rovni", "Paljuvi Viš" i "Kladnica".

Podaci o poplavljenim naseljima i rušenju infrastrukturnih objekata sagledani su provizorno: gradovi Obrenovac (preko ukupne zavremine izliven

vode) i Valjevo (preko veličine prostora zahvaćenog poplavom), naselja Koceljeva, Ub, Vreoci, Bogovođa i dr. (preko veličine prostora zahvaćenog poplavom), rušenja nasipa i pruga (preko lokacija i dužina porušenih objekata).

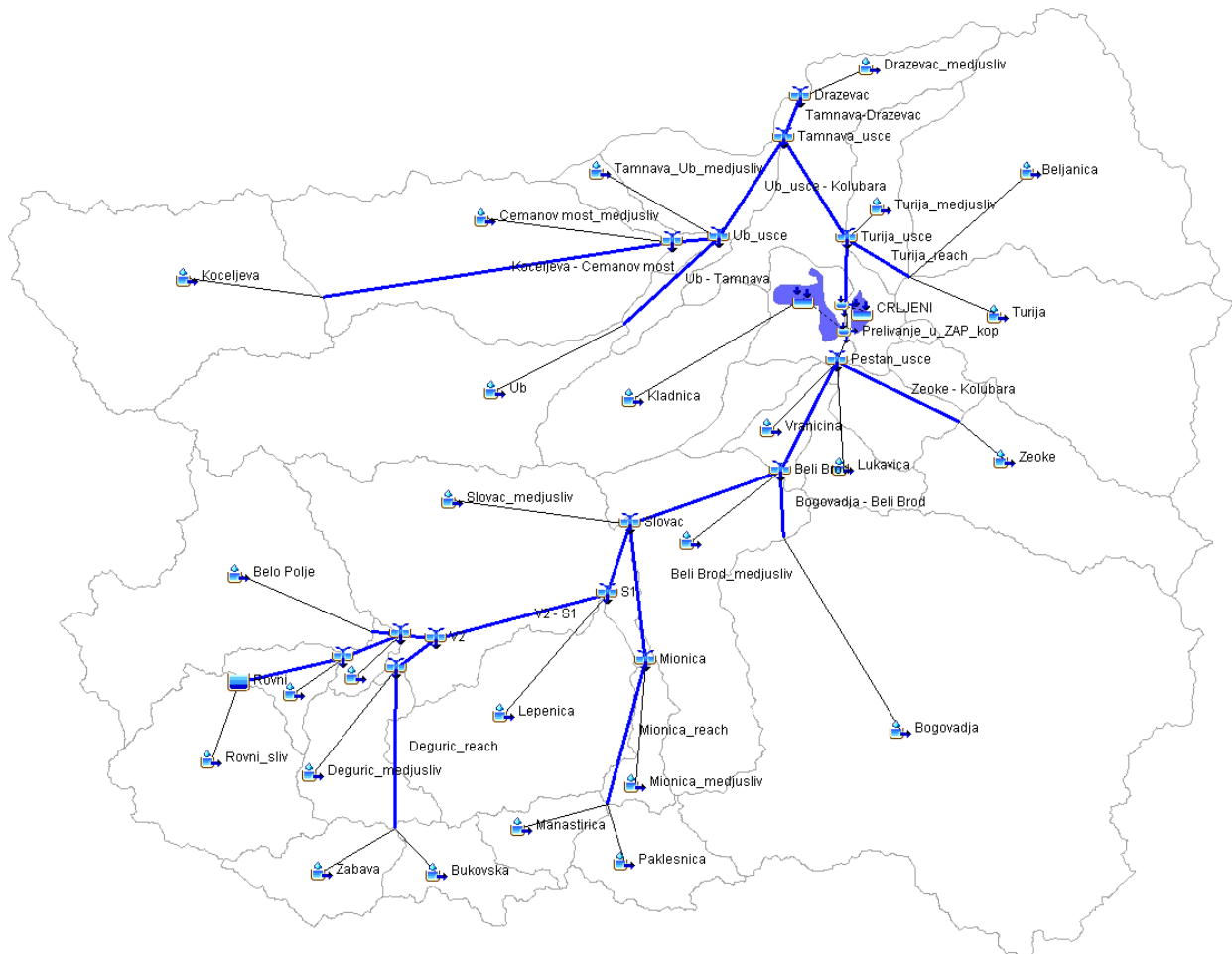
### 3. DEKOMPOZICIJA SLIVA REKE KOLUBARE U CILJU FORMIRANJA HIDROLOŠKOG MODELA

Za potrebe razvoja hidrološkog modela sliva reke Kolubare ceo sliv je izdvojen na podslivove korišćenjem digitalnog modela terena, vodeći računa o prostornoj konfiguraciji i hidrografiji sliva, zatim o položajima postojećih hidroloških stanica i lokacijama objekata koji mogu imati uticaja na režim velikih voda, kao i položajima objekata koji su nekontrolisano plavljeni za vreme poplave iz maja 2014. godine, i na kraju o karakterističnim profilima vodotokova relevantnim sa aspekta zaštite od poplava. Na taj način ceo koncept dekompozicije sliva sastoji se u definisanju ključnih profila u slivu i to: ulaznih, kontrolnih i izlaznog profila.

Ulazne profile hidrološkog modela čine: Akumulacija "Stubo-Rovni" na reci Jablanici, hidrološka stanica (hs) "Belo Polje" na reci Obnici, hs "Degurić" na reci Gradac, hs "Mionica" na reci Ribnici, hs "Bogovađa" na reci Ljig, hs "Zeoke" na reci Peštan, hs "Koceljeva" na reci Tamnavi i hs "Ub" na reci Ub.

Kontrolni profili hidrološkog modela su: hs "Sedlare" na reci Jablanici, hs "Valjevo" na reci Kolubari, hs "Beli Brod" na reci Kolubari, hs "Čemanov most" na reci Tamnavi, ušće reka Lepenice, Toplice, Vraničine, Lukavice, Turije i Beljanice u Kolubaru, lokacije proboja nasipa otvorenih rudnih kopova "Tamnava - Zapadno polje", "Tamnava - Istočno polje" i "Veliki Crljeni" i levoobalni nasipi Kolubare kod Obrenovca.

Izlazni profil hidrološkog modela je hidrološka stanica "Draževac". Između računskih profila modela (ulazni i kontrolni profili, ušća, mesta proboja nasipa itd), formirane su rečne deonice duž kojih je modelirana propagacija poplavnog talasa. Na ovaj način ceo sliv reke Kolubare, do profila hidrološke stanice "Draževac" je podeljen na 26 podslivova, 24 rečnih deonica, 3 akumulaciona prostora i 2 ponora (slika 2).



Slika 2. Šema elemenata hidrološkog modela sliva reke Kolubare

#### 4. TEORIJSKE POSTAVKE HIDROLOŠKOG MODELA ZA REKONSTRUKCIJU POPLAVNOG TALASA IZ MAJA 2014. GODINE U SLIVU REKE KOLUBARE

##### 4.1 Modeliranje efektivnih padavina

Proračun gubitaka, odnosno efektivnih padavina, vršen je SCS (sada NRCS) metodom. Ovu metodu je razvio SCS (Soil Conservation Service, danas NRCS - National Resources Conservation Service) kao proceduru za računanje oticaja u malim neizučnim poljoprivrednim slivovima [6] [11], ali je od tada postala jedna od najpopularnijih metoda za proračun površinskog oticaja za male i srednje slivove [5].

Osnova metode je jednačina oticaja:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

gde su:  $Q$  - ukupan direktan oticaj,  $P$  - ukupne padavine,  $I_a$  - početni gubici,  $S$  - kapacitet zemljišta odnosno maksimalni potencijal za retenziranje i infiltraciju. Početni gubitak, definisan kao količina padavina nakon koje počinje oticanje, se pretpostavlja da zavisi od kapaciteta zemljišta  $S$  u sledećem obliku:

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Kapacitet zemljišta odnosno maksimalni potencijal retenziranja  $S$  se određuje preko broja krive oticaja  $CN$  prema sledećem izrazu:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

gde je  $S$  u milimetrima.

U ovoj studiji, broj CN je posebno kalibrisan za svaki podsliv prema osmotrenim hidrogramima, obraćajući posebnu pažnju na hidrološku grupu zemljišta, zemljišni pokrivač, način obrade zemljišta i hidrološke uslove u slivu.

#### 4.2 Modeliranje direktnog oticaja

Za simuliranje procesa direktnog oticaja u slivu, odnosno formiranje hidrograma od efektivnih padavina, korišćen je Klarkov jedinični hidrogram [2]. Klarkov model računa jedinični hidrogram sliva tako što eksplicitno predstavlja dva ključna procesa pri transformaciji efektivnih padavina u oticaj: translaciju efektivnih padavina od izvora, kroz rečnu mrežu, do izlaznog profila, i retenziranje te zapremine na ukupnoj površini sliva. Klarkov jedinični hidrogram se definiše sa dva parametra: vremenom koncentracije  $T_c$  i koeficijentom linearnog rezervoara  $R$ .

Kod metode Klarkovog jediničnog hidrograma, vreme koncentracije je definisano vremenom od završetka efektivnih padavina do prevojne tačke opadajuće grane hidrograma. Prevojna tačka na hidrogramu predstavlja trenutak završetka površinskog doticaja u rečnu mrežu i nakon toga se smatra da je proticaj rezultat transformisane zapremine vode koja se zadržala u slivu.

Transformacija oticaja se može predstaviti prostim linearnim rezervoarom kod kojeg je odnos zapremine i oticaja definisan kao:

$$S = RO \quad (4)$$

gde su:  $S$  - ukupna zapremina za retenziranje vode u slivu,  $R$  - koeficijent linearnog rezervoara za sliv, i  $O$  - oticaj sa sliva.

Parametri Klarkovog jediničnog hidrograma su kalibrisani prema osmotrenim hidrogramima na kontrolnim profilima. Početne vrednosti vremena koncentracije su procenjene na osnovu dužine i uravnatog pada najdužih tokova, koji su dobijeni pomoću digitalnog modela terena, primenom modifikovane Kirpihove formule [12]. Početne vrednosti koeficijenta linearnog rezervoara  $R$  su procenjene na osnovu linearne zavisnosti od vremena koncentracije [10].

#### 4.3 Model propagacije talasa

Model propagacije talasa duž toka koristi jednačinu kinematskog talasa, koja se rešava primenom

Muskingum-Cunge metode, uzimajući u obzir geometriju toka (dužinu i pad toka, oblik i dimenzije poprečnog profila) kao i otpore u koritu i/ili inundaciji. Muskingum-Cunge model se bazira na rešavanju jednačine kontinuiteta

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (5)$$

i difuznog oblika dinamičke jednačine

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6)$$

Primenom linearne aproksimacije dobija se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \quad (7)$$

gde su:  $c$  - brzina prostiranja talasa, a  $\mu$  - viskoznost [4]. Kako se i  $c$  i  $\mu$  menjaju kroz vreme, računaju se za svaki vremenski korak i prostornu diskretizaciju,  $\Delta t$  i  $\Delta x$  [8].

Korišćen je algoritam za Muskingum-Cunge model koji je sastavni deo softera HEC-HMS, gde se za svaku rečnu deonicu kao ulazni parametri zadaju geometrija korita, hrapavost (u vidu Manningovog koeficijenta), pad linije energije i dužina deonice. Dužina rečnih deonica je procenjena korišćenjem rečne mreže dobijene na osnovu digitalnog modela terena, hrapavost korita i inundacionog područja usvajana je na osnovu terenskih osmatranja i aerofoto snimaka, a pad linije energije je aproksimiran podužnim padom rečnog korita, koji je takođe računat na osnovu digitalnog modela terena.

#### 4.4 Primenjena procedura prostorne interpolacije dnevnih padavina u časovne

Za vreme poplave u maju 2014. godine u slivu reke Kolubare postojala su osmatranja časovnih vrednosti padavina samo na GMS Valjevo i na dve automatske padavinske stanice Majinovići i Štavica. Kako su ovi podaci nedovoljni za pouzdanije sagledavanje prostornog rasporeda časovnih padavina na celom slivu reke Kolubare za vreme predmetne poplave razrađena je procedura prostorne interpolacije časovnih padavina korišćenjem podataka sa navedene GMS Valjevo i spomenute dve automatske padavinske stanice, kao i raspoloživih časovnih padavina na širem obodu sliva i to GMS: Loznica, Sremska Mitrovica, Beograd, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega. Pored toga korišćeni su svi raspoloživi podaci o dnevnim sumama padavina na navedenim padavinskim stanicama u slivu reke Kolubare.

Suština primenjenog postupka sastoji se u proračunu procentualnog učešća časovnih suma padavina u ukupnoj 24-časovnoj sumi padavina na navedenoj pluviografskoj stanici (GMS ili automatskoj) i da se zatim taj procentualni raspored, pomoću Tisenovih poligona, "prenese" na sve ostale padavinske stanice u slivu reke Kolubare - množenjem dnevnih suma padavina na razmatranom kišomeru sa pripadajućim procentualnim učešćima na odgovarajućim pluviografskim stanicama.

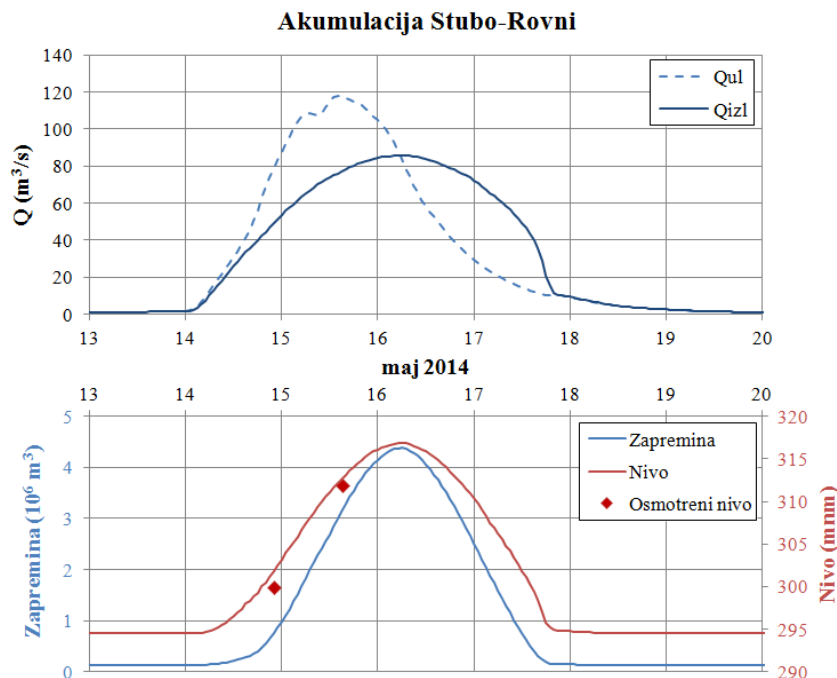
## 5. PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA REKONSTRUKCIJE POPLAVNOG TALASA IZ MAJA 2014. GODINE

Rezultati proračuna prikazani su grafički u vidu uporednog dijagrama osmotrenog hidrograma (zvanični podaci RHMZ Srbije) i računskog hidrograma po hidrološkom modelu. Ovi rezultati su prikazani na tri kontrolna profila vodomernih stanica na reci Kolubari: Valjevo, Slovac i Beli Brod, kao i na izlaznom profilu iz modela na vodomernoj stanici Draževac na reci Kolubari. Generalno se može uočiti da postoje značajne razlike između osmotrenih i sračunatih vrednosti protoka, što se moglo očekivati iz dva osnovna razloga:

1. Proticaji osmotrenih hidrograma obuhvataju samo onu količinu vode koja je prošla kroz zvanični profil vodomerne stanice. Međutim, na svim ovim profilima vodomernih stanica voda je proticala na znatno širem inundacionom prostoru, ili je porušila uzvodne nasipe, pa je tekla nekontrolisano van branjenog područja.
2. Na svim ovim vodomernim stanicama voda je dostigla ili potopila limnografske aparate, dok je u profilu hs Valjevo došlo do potpunog rušenja limnografske stanice. Srećna okolnost je da se to desilo nakon pojave špica poplavnog talasa i da je opadajuća grana rekonstruisana na osnovu naknadno uspostavljenih vanrednih osmatranja.

U takvim okolnostima evidentno je da je za vreme poplave iz maja 2014. godine na razmatranom sektoru reke Kolubare protekla znatno veća količina vode nego što su hidrološke stanice RHMZ registrovale.

Na slici 3 prikazan je rezultat proračuna transformacije poplavnog talasa kroz akumulaciju Stubo-Rovni. Ulazni hidrogram je sračunat na osnovu hidrološkog modela padavine-oticaaj, dok je za proračun transformacije korišćena kriva zapremine akumulacionog prostora kao i hidrauličke karakteristike evakuacionog organa (maja



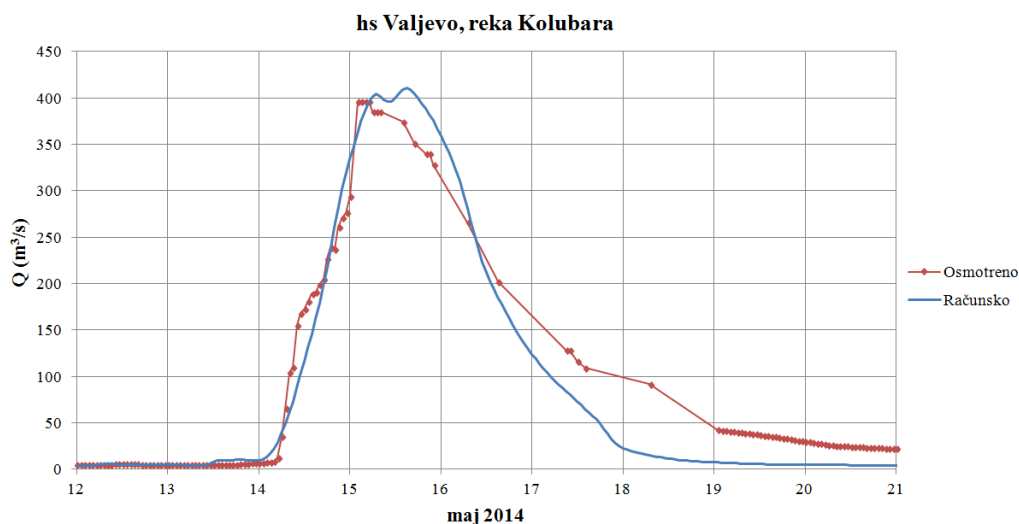
Slika 3. Računski ulazni i izlazni hidrogrami na akumulaciji Stubo-Rovni, kao i rezultat proračuna promene nivoa i zapremine u akumulaciji

2014. u funkciji je bio samo optočni tunel). Iako nikakva merenja proticaja ili nivoa nisu vršena na brani za vreme poplave, očevici su zabeležili približan nivo u akumulaciju u dva navrata (takođe prikazano na slici 3), a sa slike se može videti da su osmotreni nivoi potpuno u saglasnosti sa sračunatim nivogramom u akumulaciji. Prema proračunu, akumulacija Stubo-Rovni je akumulirala maksimalno 4.5 miliona kubika vode, i time je smanjen vršni proticaj sa 118 m<sup>3</sup>/s na 86 m<sup>3</sup>/s, dok je vreme pojave vršnog proticaja odloženo za 16 časova.

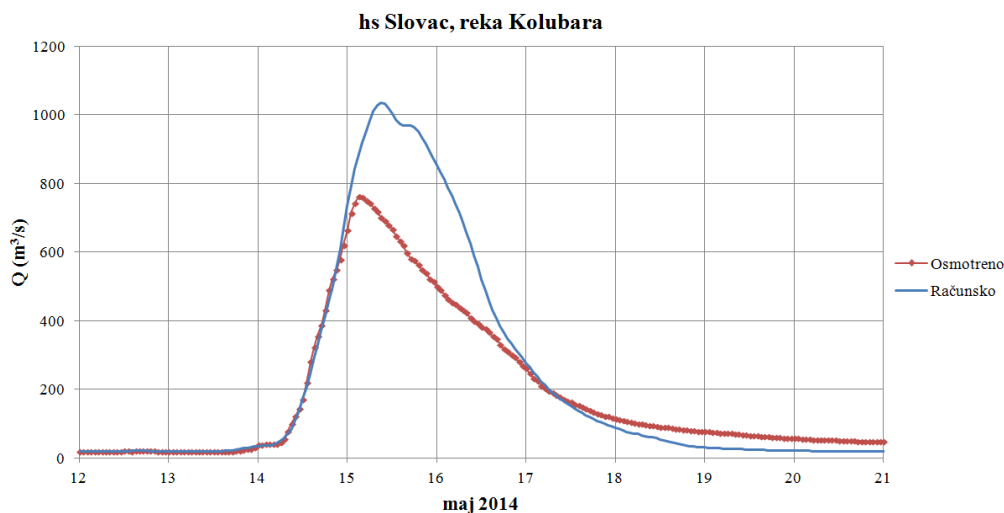
Na slici 4 prikazani su uporedni grafici osmotrenog i računskog hidrograma reke Kolubare u profilu hs

Valjevo. Evidentno je da je u fazi porasta hidrograma postignuta značajna saglasnost, dok su u fazi opadanja registrovana određena odstupanja, što je posledica uzvodnog prodora obaloutvrde i plavljenja u užem gradskom jezgru Valjeva.

Na slici 5 prikazani su uporedni grafici osmotrenog i računskog hidrograma reke Kolubare u profilu hs Slovac. Faza porasta hidrograma je veoma dobro rekonstruisana hidrološkim modelom, dok u vršnom delu hidrograma "nedostaje" ona voda koje je nekontrolisano oticala veoma širokim inundacionim prostorom.



Slika 4. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Valjevo (Kolubara)

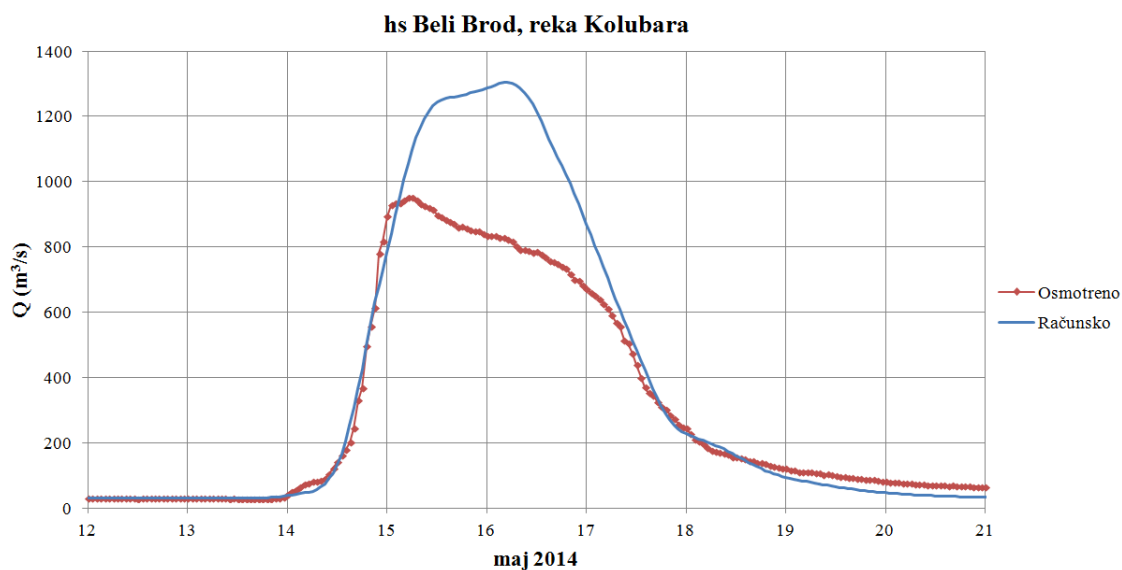


Slika 5. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Slovac (Kolubara)

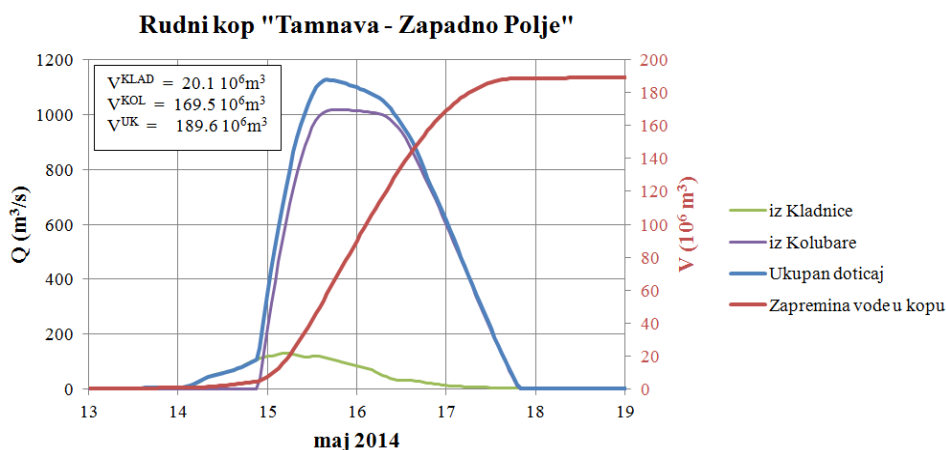
Veoma slični rezultati su postignuti i za profil hs Beli Brod na reci Kolubari (slika 6). U ovom profilu, pored vode koja je prošla ispod mosta, što je zvanično registrovano u RHMZ, značajan deo vode je protekao kroz dva proboja nasipa na desnoj obali Kolubare i kroz inundacioni prostor na levoj obali, gde se formirao tok paralelno sa rekam Kolubarom.

Izvršena je procena dinamike punjenja rudnog kopa "Tamnava - Zapadno polje". Poplavni talas koji je došao iz pravca Kolubare je probio zaštitni nasip i kroz korito reke Vraničine se ulio u kop "Tamnava - Istočno polje", a potom u Zapadno polje (označen ljubičastom bojom na slici 7). Prema proračunima, maksimalni doticaj u kopove se desio 15. maja popodne i iznosio je preko 1100 m<sup>3</sup>/s. Takođe se može videti da je od ukupnih 189,5 miliona kubika akumulirane vode, 20,1 miliona doteklo iz Kladnice, dok je 169,5 miliona kubika vode doteklo iz Kolubare.

u potpunosti akumuliran u Zapadnom polju (označen zelenom bojom na slici 7). Poplavni talas koji je došao iz pravca Kolubare je probio zaštitni nasip i kroz korito reke Vraničine se ulio u kop "Tamnava - Istočno polje", a potom u Zapadno polje (označen ljubičastom bojom na slici 7). Prema proračunima, maksimalni doticaj u kopove se desio 15. maja popodne i iznosio je preko 1100 m<sup>3</sup>/s. Takođe se može videti da je od ukupnih 189,5 miliona kubika akumulirane vode, 20,1 miliona doteklo iz Kladnice, dok je 169,5 miliona kubika vode doteklo iz Kolubare.



Slika 6. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Beli Brod (Kolubara)

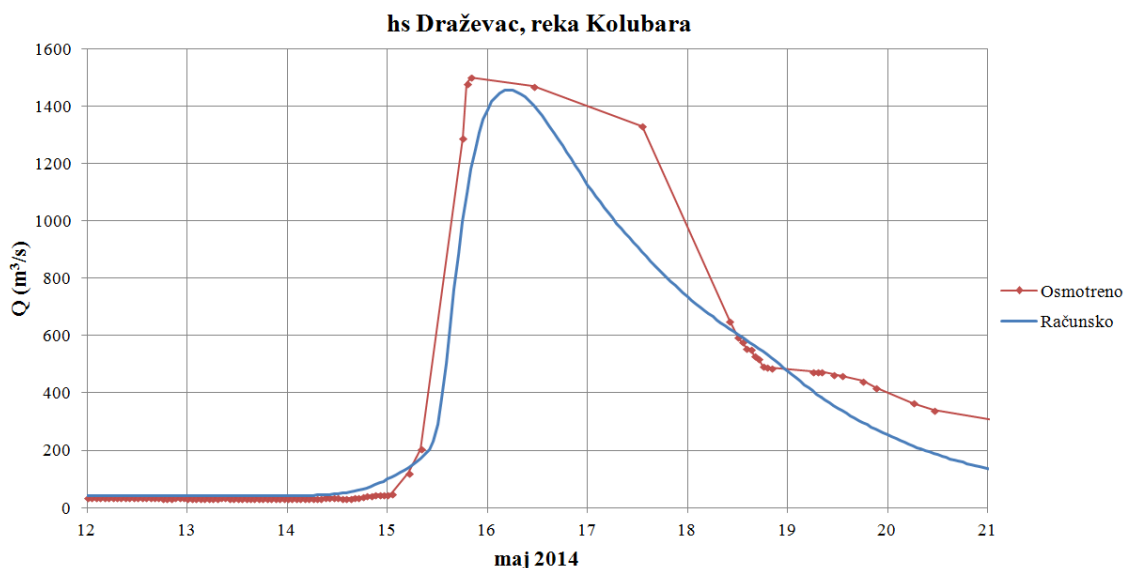


Slika 7. Računski hidrogrami i dinamika punjenja rudnog kopa "Tamnava - Zapadno polje"



Najveća "neslaganja" zabeležena su za profil hs Draževac na Kolubari (slika 8). Jedan od razloga je što je u toku poplave ceo nizvodni tok reke Kolubare bio pod usporom velikih voda na reci Savi. Kao prvo, osmotreni podaci RHMZ Srbije o proticajima reke Kolubare u tom profilu obrađeni su na klasičan način korišćenjem ekstrapolovane krive proticaja, koja nije formirana za uslove pojave uspora. Kao drugo,

limnigrafski aparat je bio pod vodom i nije registrovao kontinualno sve promene vodostaja, što se može videti "tačkasto" predstavljenim podacima na slici. Evidentno je da računski hidrogram pokazuje da je znatno manja količina vode protekla kroz ovaj profil u toku poplave, što je razumljivo, jer je hidrološki model "isključio" sve količine voda koje su prodrle u postojeće površinske kopove "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni".



Slika 8. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Draževac (Kolubara)

U cilju kvantitativne ocene rezultata primenjenog hidrološkog modela za rekonstrukciju katastrofalne poplave iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare u donjoj tabeli su dati uporedni rezultati parametara hidrograma računskih i "osmotrenih" (zvanično registrovanih u RHMZ Srbije) hidrograma razmatranog poplavnog talasa. Zbog sveobuhvatnosti sagledavanja kvaliteta osmotrenih i sračunatih vrednosti na celom slivu reke Kolubare u tabeli 1 su dati podaci za sve ulazne, kontrolne i izlazni profil hidrološkog modela. Prikazani su osnovni parametri hidrograma velikih voda, kao što su: maksimalna ordinata hidrograma -  $Q_{max}$  ( $m^3/s$ ), ukupne padavine -  $P$  (u mm i  $10^6 m^3$ ), zapremina poplavnog talasa -  $V$  (u mm i  $10^6 m^3$ ) i koeficijenta oticaja  $n$ .

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da su na slivu reke Kolubare u kraćem vremenskom periodu (neposredno pre i za vreme pojave katastrofalne poplave) pale znatne količine padavina, relativno ravnomerno raspoređene po slivu. Po izdelfenim

podslivovima najmanje padavina je palo u gornjem delu sliva Tamnave do hs Koceljeva (195,6 mm) a najviše u susjednom podslivu reke Obnice do hs Belo Polje (294,6 mm). Ove padavine prouzrokovale su pojavu poplavnih talasa na svim razmatranim ulaznim kontrolnim i izlaznom profilu. Uporednom analizom navedenih parametara poplavnog talasa, osmotrenih i računatih, može se konstatovati da se oni u osnovi znatno razlikuju.

Generalno, ako se posmatra bezdimenzionalni parametar – koeficijent oticaja  $n$ , može se reći da je on znatno ujednačeniji po slivu za računске vrednosti hidrograma dobijenih primenjenim hidrološkim modelom i kreće se u granicama od 0,44 (profil Draževac) do 0,86 (profil Belo Polje), s tim što se sve ostale vrednosti parametra  $n$  kreću u granicama od 0,59 do 0,84. Ista analiza koeficijenta  $n$  na osnovu osmotrenih hidrograma ukazuje da isti u slivu reke Kolubare varira od 0,44 (profil Bogovođa) do 1,02 (profil Belo Polje) i 1,45 (profil Mionica), što se nije

Tabela 1. Karakteristične veličine slivova, modeliranih i osmotrenih hidrograma

Profil	MODELIRANO							OSMOTRENO			
	A (km <sup>2</sup> )	P (mm)	P (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V (mm)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	n	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V (mm)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	n
Belo Polje	185	294.6	54.5	292	252.1	46.6	0.86	247	300.0	55.5	1.019
Sedlare	140	249.4	34.9	111	183.8	25.7	0.74	138	174.3	24.4	0.699
Valjevo	340	271.2	92.2	411	220.5	75.0	0.81	396	246.4	83.8	0.909
Degurić	159	215.9	34.3	167	146.4	23.3	0.68	164	165.0	26.2	0.764
Mionica	108	257.4	27.8	179	217.0	23.4	0.84	188	372.3	40.2	1.446
Slovac	995	241.1	239.9	1036	193.8	192.9	0.80	761	165.0	164.2	0.684
Bogovađa	679	196.7	133.5	429	128.4	87.2	0.65	195	87.1	59.1	0.443
Beli Brod	1896	224.1	424.8	1305	164.5	311.9	0.73	951	135.7	257.2	0.606
Zeoke	125	275.9	34.5	158	219.4	27.4	0.80	116	160.7	20.1	0.583
Koceljeva	208	195.6	40.7	180	153.2	31.9	0.78	178	136.4	28.4	0.697
Ćemanov most	386	199.2	76.9	177	125.0	48.2	0.63	147	101.8	39.3	0.511
Ub	214	228.8	49.0	183	135.4	29.0	0.59	146	123.0	26.3	0.537
Draževac	3588	239.7	860.2	1456	105.9	379.9	0.44	1500	130.5	468.4	0.545

moglo dogoditi, jer u mesecu maju 2014. godine nije bilo snega u slivu. Sve ostale vrednosti koeficijenta  $n$  za osmotrene talase se kreću u rasponu od 0,51 do 0,91. Veoma niska vrednost koeficijenta  $n$  za računski poplavni talas Kolubare u profilu hs Draževac se objašnjava činjenicom da je u hidrološkom modelu "isključeno" preko 200 miliona kubika vode koja je poplavila površinske kopove "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni".

U cilju sagledavanja tačnosti "osmotrenih" (RHMZ) i sračunatih (hidrološki model) hidrograma poplavnog talasa iz maja 2014. godine u delu sliva reke Kolubare koji obuhvata pojas direktnog uticaja plavljenja površinskih kopova "Zapadno polje" i "Veliki Crljeni" na veličinu i oblik poplavnog talasa, u tabeli br. 2 dat je bilans voda na navedenom sektoru. Ulazi na razmatranom sektoru su hidrogrami poplavnih talasa u profilima vodomernih stanica Beli Brod na reci Kolubari, Zeoke na reci Peštan, Ćemanov most na reci Tamnava i Ub na reci Ub, zatim sračunati hidrogrami (pomoću hidrološkog modela) sa hidrološki neizučeni pritoka koje se ulivaju u Kolubaru u zoni površinskih kopova, a to su: Lukavica, Kladnica, Vraničina, Beljanica i Turija, kao i hidrogram sa neposrednog sliva. Izlaz iz razmatranog sektora je hidrogram

poplavnog talasa u profilu vodomerne stanice Draževac na reci Kolubari. Podaci o količinama voda koje su poplavile navedene površinske kopove preuzeti su iz zvanične dokumentacije [3]. Osnovni elementi za kontrolu bilansa voda su zapremine poplavnog talasa, računatog pomoću hidrološkog modela i "osmotrene" prema podacima RHMZ Srbije, kao i sume padavina koje su izazvale poplavni talas.

Kao što se iz tabele 2 vidi, sa gledišta zapremine poplavnih talasa u osmotrenim hidrogramima RHMZ Srbije postoji značajan disbalans voda, u iznosu od + 160,0 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> na sektoru od hs Beli Brod, hs Zeoke, hs Ub i hs Ćemanov most do hs Draževac. Kod računskih hidrograma dobijenih pomoću hidrološkog modela taj deblans je minimalan, reda veličine - 2.1 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, što predstavlja grešku manju od 1%. Navedene konstatacije samo potvrđuju hipotezu, iznete u tački 1 ovoga poglavlja, a to je da proticaji osmotrenih hidrograma RHMZ Srbije obuhvataju samo onu količinu vode koja je prošla kroz zvanični profil vodomerne stanice, zanemarujući činjenicu da je skoro na svim profilima vodomernih stanica voda proticala na znatno širem inundacionom prostoru, ili je porušila uzvodne nasipe, pa je tekla nekontrolisano van branjenog područja.

Tabela 2. Bilans voda na razmatranom sektoru donjeg toka reke Kolubare za vreme pojave poplavnog talasa iz maja 2014. godine

Reka	Profil	F(km <sup>2</sup> )	Hidrološki model – Jaroslav Černi			RHMZ Srbije	
			V(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V(mm)	P(mm)	V(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	V(mm)
Ulazi	Beli Brod	1896	311.9	164.5	224.1	257.2	135.7
	Zeoke	125	27.4	219.4	275.9	20.1	160.7
	Ćemanov most	386	48.2	125.0	199.2	39.3	101.8
	Ub	214	29.0	135.4	228.8	26.3	123.0
	$\sum ulaza$	2621	416.5	158.9	223.3	342.9	130.8
Neizučeni slivovi	Lukavica	826.4	170.9	206.8		170.9	206.8
	Kladnica						
	Vraničina						
	Beljanica						
	Turija						
	Nep. sliv						
		3447.4	587.4	170.4		513.8	149.0
Izlaz	Draževac	3588	379.9	105.9	239.7	468.4	130.5
Razlika		140.6	-207.5			-45.4	
Površinski kopovi	Zapadno polje		189.6			189.6	
	Veliki Crljeni		15.8			15.8	
	$\sum Kopovi$		205.4			205.4	
Greška bilansiranja	Apsolutna		- 2.1			-160.0	
	Procentualna		0.6			34.2 (42.1)	

## 6. ANALIZA HIPOTETIČKIH STANJA ZAŠTITE OD POPLAVE IZ MAJA 2014. GODINE U SLIVU REKE KOLUBARE.

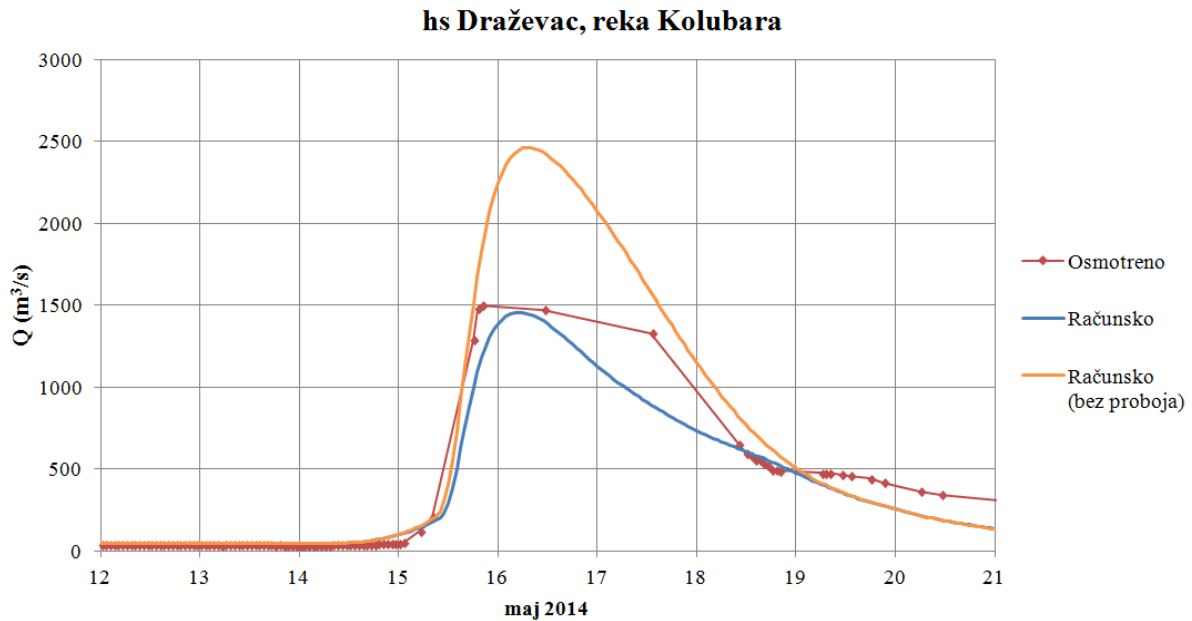
Razrađeni hidrološki model primenjen je i za uslove hipotetičkog stanja zaštite od poplava u donjem toku sliva reke Kolubare. Pretpostavljeno je da je sistem zaštite od plavljenja površinskih kopova "Tamnava-Zapadno polje" i "Veliki Crljeni" bio uspešan, tj. da nije dozvolio direktno ulivanje voda iz vodotoka Kolubare, odnosno iz sliva Peštana. Pretpostavljeno je, takođe, da se plavljenje iz sliva reke Kladnice nije moglo sprečiti. U tim uslovima pretpostavljena su dva hipotetička stanja hidrometeoroloških uslova koji su izazvali poplavu:

– isti uslovi iz maja 2014. godine, i

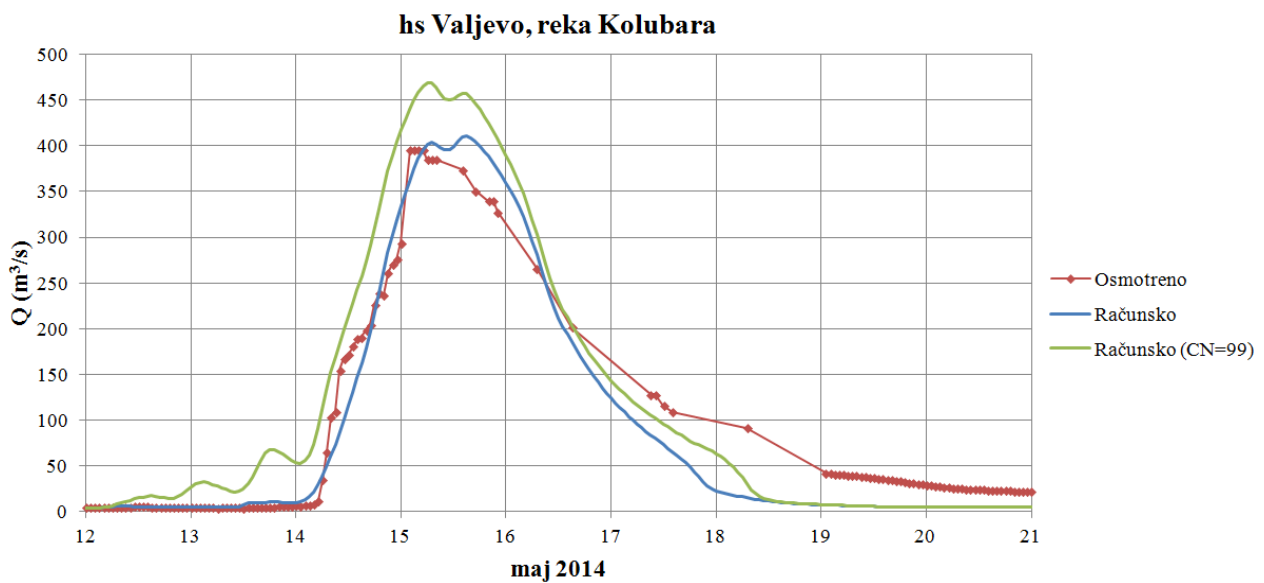
– da je sliv bio potpuno natopljen i da je sva voda sa sliva otekla površinski u reku Savu.

Za prvi slučaj rezultati proračuna prikazani su samo za izlazni profil iz hidrološkog modela, tj za profil hs Draževac na reci Kolubari. Rezultati proračuna prikazani su grafički na slici 9 zajedno za rezultatima prethodnih proračuna (rekonstruisanog talasa) i osmotrenim podacima RHMZ.

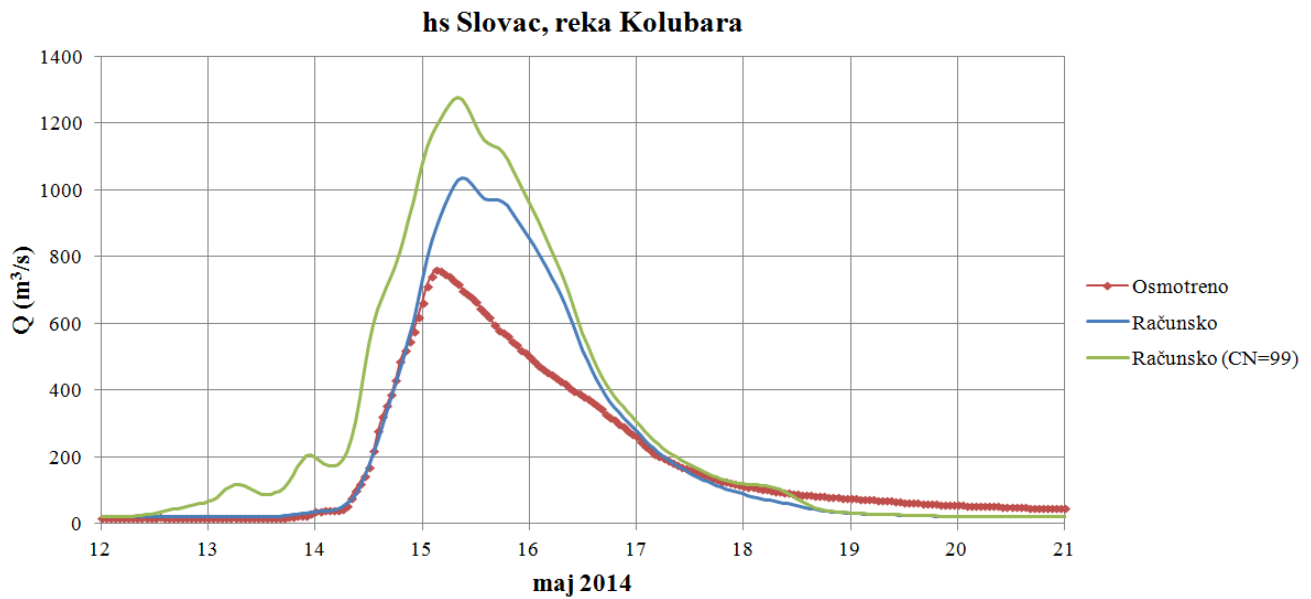
Za drugi pretpostavljeni hipotetički slučaj, rezultati su prikazani na svim profilima vodomernih stanica duž toka reke Kolubare i to: za hs Valjevo (slika 10), za hs Slovac (slika 11), za hs Beli Brod (slika 12) i za hs Draževac (slika 13).



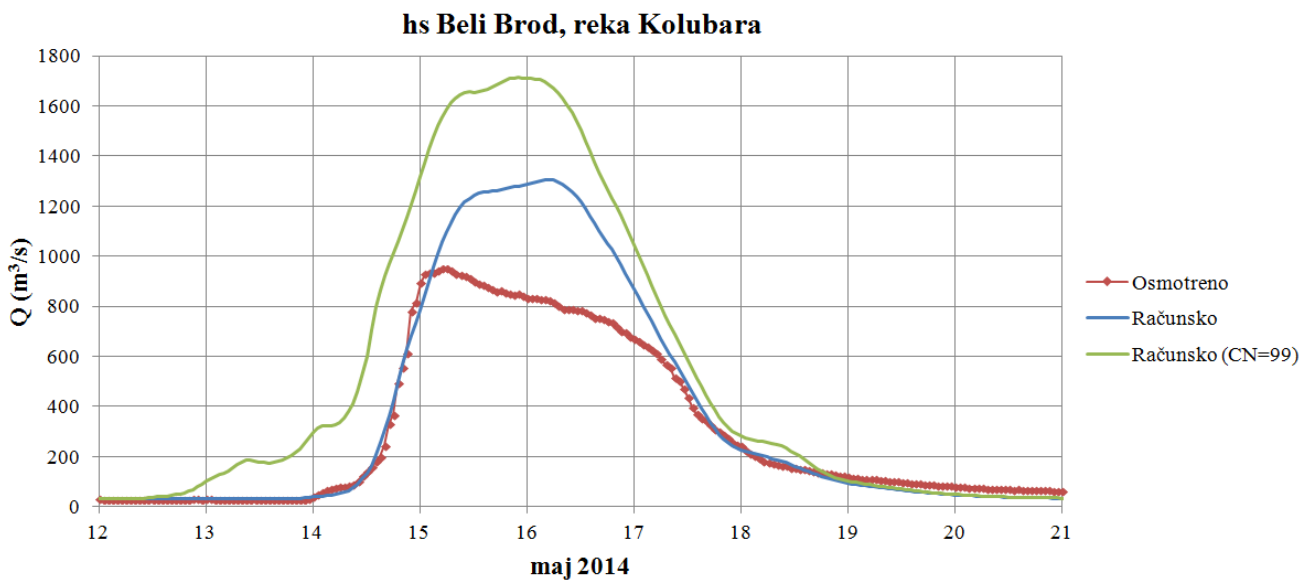
Slika 9. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Draževac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom bez proboja kolubarskih nasipa u otvorene kopove



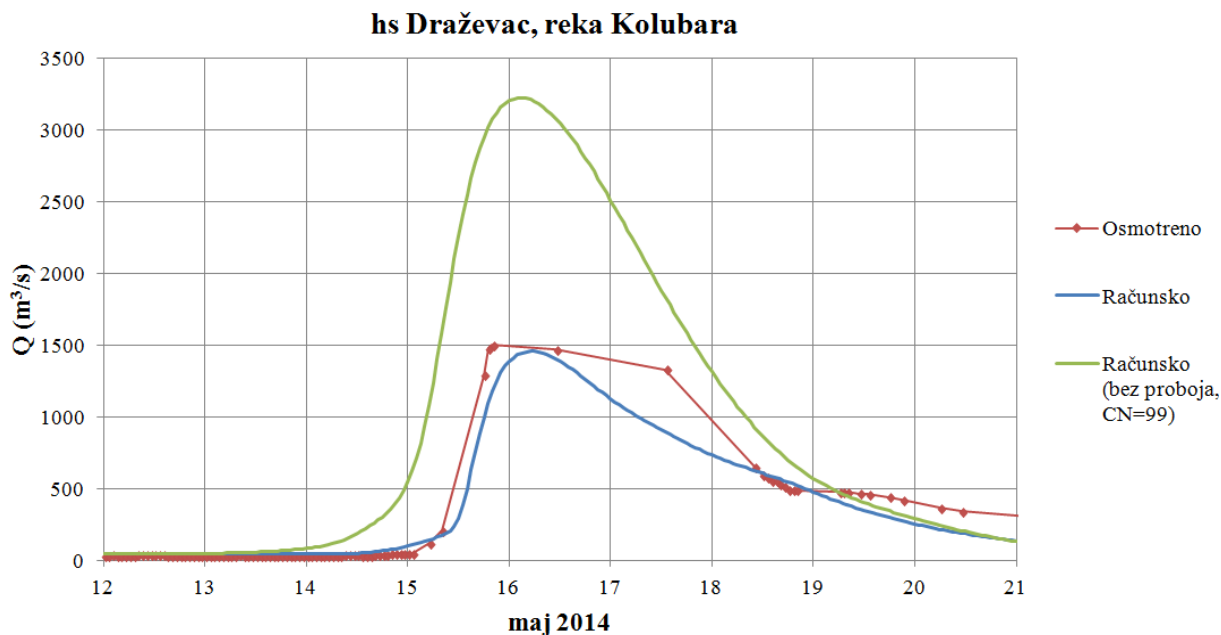
Slika 10. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Valjevo (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja n=1)



Slika 11. Računski i osmotreni hidrogrami za hidrološku stanicu Slovac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja  $n=1$ )



Slika 12. Računski i osmotreni hidrogrami za hs Beli Brod (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja  $n=1$ )



Slika 13. Računski i osmotreni hidrografi za hs Draževac (Kolubara), zajedno sa hipotetičkim hidrogramom potpune natopljenosti zemljišta (koeficijent oticaja  $n=1$ ) bez proboja kolubarskih nasipa u kopove "Tamnava - Zapadno polje" i "Veliki Crljeni"

## 7. ZAKLJUČAK

Izvršena rekonstrukcija formiranja i prostiranja poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare daje zadovoljavajuće bilansne rezultate, imajući u vidu sve probleme evakuacije i zaštite od poplava koji su se desili u vidu preliva i prodora odbrambenih nasipa, retenzija "Kladnica" i prodora vode u površinske kopove akumulacije "Tamnava - Zapadno polje" i "Veliki Crljeni". Zbog toga su maksimalni proticaji na većini profila vodomernih stanica u slivu reke Kolubare za 2014. godinu, sračunati pomoću primenjenog hidrološkog modela, prihvatljiviji u odnosu na zvanične maksimalne proticaje službeno objavljene u Godišnjacima RHMZ Srbije.

## ZAHVALNOST

Predstavljeni rezultati i analize su predmet istraživanja naučnog projekta „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ (TR-37005) za period 2011–2015. godine Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije. Autori se zahvaljuju ministarstvu na pruženoj finansijskoj pomoći i podršci.

## LITERATURA

- [1] Babić Mladenović M., Kolarov V. (2015), May 2014 Floods in Serbia, Water Research and Management, Vol. 5, No.1, pp. 3-8, Serbian Water Pollution Control Society, Belgrade, Serbia
- [2] Clark, C.O. (1945), Storage and the unit hydrograph Transactions, ASCE, 110, 1419-1446.
- [3] Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi (2015), Konsultantske usluge ispumpavanja zamuljene vode i mulja PK "Tamnava Zapadno Polje" - Završni izveštaj
- [4] Miller, W.A., and Cunge, J.A. (1975), Simplified equations of unsteady flow.
- [5] Mishra S.K., Singh V.P. (1999), Another Look at SCS-CN Method. Journal of Hydrologic Engineering, 3, p257-265
- [6] NRCS (2002), National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. USDA, Washington, D.C.
- [7] O'Callaghan, J.F., and Mark, D.M. (1984), The extraction of drainage networks from digital

- elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28, 3, p323-344
- [8] Ponce, V.M. (1986), Diffusion wave modelling of catchment dynamics. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 112(8), 716-727
- [9] Rodriguez E. et al (2005), An assessment of the SRTM topographic products (Technical Report JPL D-31639). Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California
- [10] Russell S., B. Kenning and G. Sunnell (1979), Estimating Design Flows for Urban Drainage, *Journal Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 105(1), pp 43-52
- [11] Soil Conservation Service (1985), National engineering handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapter 10. US Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C.
- [12] Zelenhasić, E. (1970), Theoretical probability distributions for flood peaks. *Hydrol. Paper 42*, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- [13] Zlatanović N., Gavrić S. (2013), Comparison of an automated and manual method for calculating storm runoff response in ungauged catchments in Serbia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61 (3). pp. 195-201. ISSN 0042-790X

## PRELIMINARY HYDROLOGICAL RECONSTRUCTION OF THE 2014 KOLUBARA FLOOD WAVE

Nikola ZLATANOVIĆ

Prof dr Stevan PROHASKA

Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources  
email: nikola.zlatanovic@jcerni.co.rs, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

### Summary

The disastrous flood that affected the Kolubara River basin in May 2014 caused significant damage of existing embankments, flooding of open mine pits, agricultural land, towns and villages, which resulted in the loss of human lives and material damage. The authors of this paper have developed a hydrological model whose task was to simulate the flood and determine the spatial and temporal distribution of the flood throughout the basin. The software package HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) was used to develop the hydrological model. The Kolubara River basin was divided into

multiple sub-basins, with one official hydrological station at the basin outlet. The existing hydrological stations along these streams represent control profiles, while the output profile from the model is defined by the position of the hydrological station Draževac on the Kolubara River. Provided in the paper are appropriate numerical and graphical indicators of characteristic hydrographs in the Kolubara River basin during the flood of May 2014.

**Keywords:** flood reconstruction, hydrological modelling, HEC-HMS

Redigovano 19.11.2015.