

REKONSTRUKCIJA KATASTROFALNE SVIBANJSKE POPLAVE 2014. GODINE U SLIVU RIJEKE KOLUBARE (SRBIJA)

prof. dr Stevan Prohaska, dipl. ing. građ.
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“
Jaroslava Čemog 80, Pinosava, Beograd, Srbija
stevan.prohaska@jcerni.co.rs

Nikola Zlatanović, dipl. ing. građ.
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“
Jaroslava Čemog 80, Pinosava, Beograd, Srbija

U radu je dan detaljan prikaz novorazvijenog hidrološkog modela za potrebe rekonstrukcije formiranja, propagacije i transformacije katastrofalne poplave koja se u slivu rijeke Kolubare dogodila sredinom svibnja 2014. godine u Srbiji. Naime, spomenuta poplava je prouzrokovala značajno rušenje postojećeg obrambenog sustava, nekontrolirane prodore postojećih nasipa i plavljenje otvorenih rudnih kopova, poljoprivrednih površina, gradova i naselja, što je imalo za posljedicu gubitke ljudskih života i ogromne materijalne štete. Pored toga poplava je izazvala značajne havarije na pojedinim hidrološkim postajama Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) Srbije, potapanjem i rušenjem limnigrafa, a u zoni nekih hidroloških postaja potpuno je izmijenila strujnu sliku uslijed izlivanja vode u priobalje. Autori ovog rada preuzeli su na sebe obavezu da razviju novi hidrološki model za potrebe rekonstrukcije ove katastrofalne poplave, s ciljem da se utvrdi stvarno stanje prostiranja ove poplave duž toka rijeke Kolubare i sagleda stvarni opseg poplave iz svibnja 2014. godine, odnosno da ocijene njenu statističku značajnost. Rad je ilustriran odgovarajućim numeričkim i grafičkim pokazateljima hidrograma poplave iz svibnja 2014. godine na ključnim profilima vodomjernih postaja za ostvareno stanje i hipotetičko stanje uspješne obrane od poplava.

Ključne riječi: Kolubara 2014., poplave, hidrološko modeliranje

1. UVOD

Osnovni cilj ovog rada je razvoj i primjena novog hidrološkog modela za potrebe rekonstrukcije formiranja, propagacije i transformacije katastrofalne poplave koja se u slivu rijeke Kolubare dogodila sredinom svibnja 2014. godine i prouzrokovala ogromne materijalne štete i gubitke ljudskih života. Poseban aspekt je posvećen analizi uzroka i posljedica koje je izazvala ova katastrofalna poplava, do sada nezabilježena na teritoriju Republike Srbije. Za definiranje uzroka poplave korišteni su svi raspoloživi podatci o satnim vrijednostima oborina na GMS (glavnim meteorološkim postajama) i protocima na službenim hidrološkim postajama RHMZ Srbije, a za analizu posljedica korišteni su svi izvještaji nadležnih službi za obranu od poplava u Republici Srbiji, kao i lokalnih organa o procjeni šteta.

Ova je poplava posljedica prodora hladnog zraka preko Alpa u oblast Sredozemlja u svibnju 2014. godine, kada je došlo do formiranja prostorne ciklone koja je u slivu rijeke Kolubare prouzrokovala pojavu ekstremnih količina oborina. Posljedica toga je pojava ekstremnih otjecanja sa svih padina, što je dovelo do koincidencije valova velikih voda na lijevim i desnim pritokama Kolubare, koje su se praktički istovremeno sile u Kolubaru. Na dionicama sa zaštitnim objektima, a to su uglavnom naselja i donji dijelovi toka, došlo je do prelijevanja i proboja nasipa na više mjesta u relativno kratkom vremenskom razdoblju od 1 do 2 dana. Najteže posljedice tih proboja doživio je grad Obrenovac (slika 1). Istovremeno je došlo do izlivanja vode iz postojećih korita rijeka Kolubare, Peštana i Vraničine na području

lignitskog bazena i poplavljeni su površinski kopovi „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“. Do izlivanja je došlo uzvodno od južne granice otvorenog kopa „Tamnava-Zapadno polje“, zbog prelijevanja i rušenja zaštitnih nasipa Kolubare i njenih pritoka Vraničine i Peštana. Kao rezultat toga došlo je do promjene toka rijeke Kolubare. Kolubara je presjekla novo poplavno korito kroz postojeće korito rijeke Vraničine, od ušća do otvorenog kopa „Tamnava-Zapadno polje“. Na svom putu ka kopu presjekla je i uništila postojeći obrambeni nasip koji je štitio tamnavske kopove od velikih voda Kolubare, Vraničine i potoka Skobalj. Formiranjem poplavnog korita Kolubare uništeno je ušće Vraničine u Kolubaru, pa se ovaj vodotok direktno ulijevao u površinski kop. Do izlivanja vode u površinski kop „Tamnava-Zapadno polje“ došlo je i uslijed proloma brane „Kladnica“ (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2016.).



Slika 1: Prevrnuta kuća uslijed naleta bujice (lijevo) i grad Obrenovac iz zraka (desno) (preuzeto s interneta)

Tijekom poplave iz svibnja 2014. godine dogodile su se, također, značajne havarije na pojedinim službenim mjernim postajama Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (Babić, Mladenović i Kolarov, 2015.). Došlo je do potapanja i rušenja mjernih uređaja (limnigrafa) ili proloma nasipa neposredno uzvodno od objekata, tako da su strujne slike znatno izmijenjene pa nizvodni limnigrafi (hidrološke postaje) nisu mogli registrirati stvarno stanje protjecanja za vrijeme vršnih dijelova hidrograma. Osim toga, na nekim profilima došlo je do zaglavljivanja pera limnigrafa, što je dovelo do odsijecanja vrha poplavnog vala, a to može uzrokovati pogreške u obradama istih.

Imajući sve ovo u vidu, pojavila se potreba da se pomoću hidrološkog modela izvrši rekonstrukcija poplavnog vala iz svibnja 2014. godine na rijeci Kolubari i njenim pritokama. U skladu s tim, autori ovog rada razradili su jedan matematički model čiji je zadatak utvrditi stvarnu genezu ove poplave duž toka rijeke. Za razvoj hidrološkog modela korišten je programski paket HEC-HMS (*Hydrologic Engineering*

Center – Hydrologic Modeling System), a rezultati njegove primjene za poplavni val iz svibnja 2014. godine u slivu rijeke Kolubare prikazani su u tekstu koji slijedi.

S ciljem sagledavanja sveobuhvatnog opsega svibanjske kišne epizode u 2014. godini, prije prikaza rezultata izvršene rekonstrukcije svibanjske poplave iz 2014. godine u radu se daje kratak prikaz razvoja vremenske situacije za vrijeme poplave, kao i karakteristike jake kiše za vrijeme poplave uz ocjenu statističke značajnosti kišne epizode koja je izazvala poplavu. Poslije prikaza rezultata rekonstruiranih hidrograma velikih voda tijekom katastrofalne poplave iz svibnja 2014. godine na ključnim profilima vodomjernih postaja u slivu rijeke Kolubare daje se pregled statističkog ranga vršnih protoka (pikova) poplavnih valova iz svibnja 2014. godine na svim promatranim službenim hidrološkim postajama. Osim toga, razvijeni hidrološki model je omogućio da se sagleda veličina stanja hidrograma velike vode na izlaznom profilu Kolubare u uvjetima potpune zaštite površinskih kopova „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki-Crljeni“ od plavljenja za vrijeme promatrane svibanjske poplave, kao i eventualne reperkusije takve obrane na nizvodno područje sliva rijeke Save (Prohaska i Zlatanović, 2015.).

2. RAZVOJ VREMENSKE SITUACIJE ZA VRIJEME POJAVE KATASTROFALNE POPLAVE U SVIBNJU 2014. GODINE

Katastrofalna poplava u svibnju 2014. godine pojavila se kao posljedica prodora hladnog zraka preko Alpa u oblast Sredozemlja, kada je došlo do formiranja prostorne ciklone, razvijene po svim visinama, koja se preko Jadrana premiještala na Balkan. Ciklona se 13. svibnja premiještala s područja Jadrana ka zapadnim i centralnim dijelovima Balkana, a od 14. do 16. svibnja pojačala se (produbila) po svim visinama, a ujedno i stacionirala (bila je slabo pokretna). Centar ciklone u prizemlju kretao se od Genovskog zaljeva preko Apenina, južnog Jadrana, juga Republike Srbije, Bugarske i Rumunjske, a zatim je iscrtao putanju u obliku elipsaste „petlje“ iznad jugoistočnih dijelova Panonske nizine (područje sjeverne Srbije, istočne i jugoistočne Mađarske i sjeverozapadne Rumunjske). Tom je prilikom ciklona odstupila od najčešće putanje koju imaju genovske ciklone, a to je pravac Crnog mora, gdje se konačno gasi. Glavna oblačna i kišna zona nalazila se iznad većeg dijela Srbije, prije svega zapadne Srbije, Republike Srpske i Republike Hrvatske (područje Slavonije), bila je slabo pokretna, kao i sama ciklona, i na istom području je u razdoblju od 14. do 18. svibnja 2014. godine prouzročila na teritoriju Srbije, prema podacima RHMZ-a Srbije, ekstremnu količinu oborina, na većini mjesta preko 200 l m⁻² lokalno i više od 300 l m⁻². Sve je to uzrokovalo katastrofalne poplave, pojavu bujica, erozije i aktiviranje klizišta, prvo na malim vodotocima (potoci i rječice), a zatim na srednjim (Kolubara), što je na kraju dovelo i do porasta vodostaja na većim rijekama, ponajviše na Savi.

3. KARAKTERISTIKE JAKE KIŠE TIJEKOM SVIBANJSKE POPLAVE

Analiza karakteristika jakih kiša koje su uzrokovale poplave na teritoriju Republike Srbije u navedenom razdoblju izvršena je na temelju raspoloživih podataka o satnim sumama oborina s 28 glavnih meteoroloških postaja, kao i podataka o dnevnim sumama oborina s 450 oborinskih postaja (Prohaska et al., 2014. b) i (Prohaska et al., 2016. a). Prostorni položaj glavnih meteoroloških postaja s kojih su preuzeti podatci prikazan je na slici 2, na kojoj su prikazane izolinije (izohijete) visina oborina registriranih za vrijeme kišnih epizoda koje su uzrokovale poplavu. Na kartama izrađenim na temelju svih raspoloživih podataka, vide se područja s najvećim registriranim oborinama na teritoriju Republike Srbije.

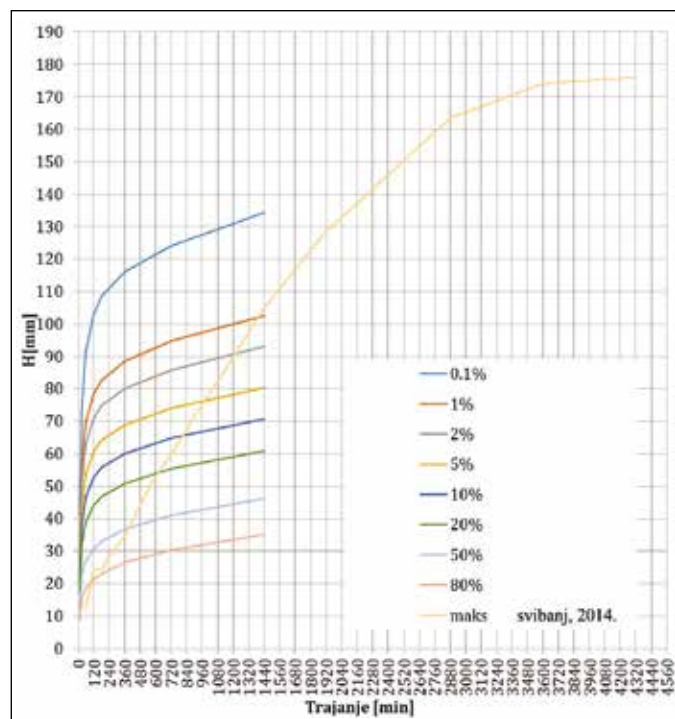
Na slici 2 je prikazana karta izohijeta ukupnih suma oborina za maksimalnu kišnu epizodu iz svibnja 2014. godine. Vidi se da su u svibnju na prostoru Republike Srbije najintenzivnije kiše zahvatile slivove Jadra i Kolubare. Najveće registrirane visine oborina u razdoblju pojave ove kiše zabilježene su na glavnim meteorološkim postajama u Loznici (188,3 mm), zatim na Opservatoriju Beograd (179,1 mm), u Valjevu (179,0 mm), Rimskim Šančevima (133,8 mm), Smederevskoj Palanci (130,8 mm) itd. Položaj izohijeta ukazuje na to da su najveće količine oborina procijenjene u centru sliva Trešnjice (pritoke Drine) oko 320 mm, zatim u zoni Krupnja i u slivu Ljiga oko 280 mm. Oborine više od 200 mm zahvatile su veći dio Šumadije i neposredni sliv rijeke Drine od Rogачice do ušća.



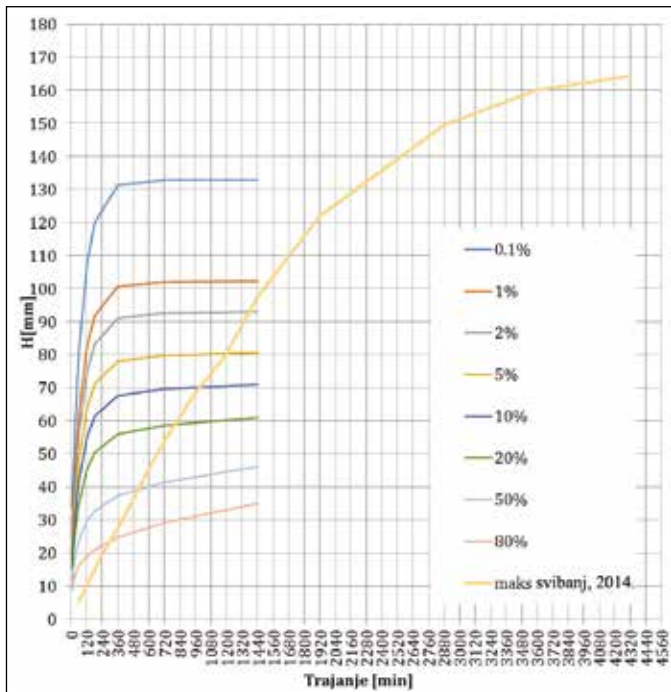
Slika 2: Ukupne oborine 325 PS, 12.–19. svibnja 2014.

4. OCJENA STATISTIČKE ZNAČAJNOSTI KIŠNE EPIZODE IZ SVIBNJA 2014. GODINE

Za sagledavanje strukture ekstremne kišne epizode iz svibnja 2014. godine, jednog od glavnih uzročnika pojave poplava u riječnim slivovima, kao i za ocjenu njene statističke značajnosti, neophodni su satni podatci izraženi u mm min^{-1} , a to su podatci mjereni na glavnim meteorološkim postajama, na temelju kojih je sagledan ostvareni maksimalni intenzitet ove kišne epizode na cijelom prostoru. Dobiveni intenziteti upoređeni su s postojećim najnovijim statističko-probabilističkim obradama (Prohaska et al., 2014. c) i (Prohaska et al., 2014.). Pri izradi ove monografije prikupljeni su svi raspoloživi povijesni podatci o registriranim maksimalnim kišnim epizodama u dugogodišnjem razdoblju s 28 pluviografskih postaja u Srbiji. Podatci su prikupljeni za razdoblje od kada pluviografska postaja radi do zaključno 2008. godine. Na temelju tih podataka formirane su vremenske serije maksimalnih intenziteta (visina) kiše za sljedeća trajanja kiše: 10, 20, 30, 60, 120, 180, 360, 720 i 1440 minuta. Odgovarajućom statističko-probabilističkom analizom formirane su zavisnosti maksimalnih visina kiše u funkciji trajanja kiše i vjerojatnosti pojave, tzv. HTP krivulje za svih 28 navedenih pluviografskih postaja (Prohaska et al., 2016. b). Na slikama 3 i 4 dani su, primjera radi, grafički prikazi HTP krivulja za dvije GMS – Valjevo, koja se nalazi približno u centru sliva rijeke Kolubare i Loznica, koja se nalazi u neposrednoj blizini promatranog sliva. Na ovim slikama su, također, nanijete i sumarne funkcije maksimalnih visina kiše za svibanjsku kišnu epizodu u 2014. godini.



Slika 3: HTP-krivulje i sumarna krivulja maksimalne visine kiše u funkciji trajanja kiše za GMS Loznica za razdoblje 12.–19. svibnja 2014.



Slika 4: HTP-krivulje i sumarna krivulja maksimalne visine kiše u funkciji trajanja kiše za GMS Valjevo za razdoblje 12.–19. svibnja 2014.

prosjeaka. Na GMS Niš 12-satni maksimalni intenziteti odgovarali su povratnom razdoblju od 100 godina. Statistički značajnije sume oborina realizirane su za kiše koje su trajale duže od 24 sata. Tako, na primjer, maksimalne 24-satne kiše realizirane u Beogradu i Loznici prelaze stogodišnje povratne periode, u Valjevu šezdesetogodišnji, u Nišu pedesetogodišnji, a u Rimskim Šančevima dvadesetogodišnji povratni period. Maksimalna visina oborina za 48 sati realizirana je u Loznici, gdje prelazi tisućgodišnju kišu, zatim slijede Beograd i Valjevo s 400-godišnjom kišom, pa Niš s kišom 80-godišnjeg povratnog perioda. Za trodnevnu kišu registriranu u Beogradu i Valjevu povratni period ocijenjen je na 650 godina. Povratni period realizirane trodnevne kiše u Loznici ocijenjen je na 450 godina, a kod Rimskih Šančeva na 110 godina. Sa stajališta usporedbe ukupnih palih kiša u promatranoj kišnoj epizodi i prosječnih višegodišnjih vrijednosti kiše u svibnju, može se reći da ukupne sume u kišnoj epizodi, također, značajno prelaze višegodišnje prosjeke. Na navedenim GMS-ovima taj se odnos kreće od 1,64 do 2,64, što znači da su oborine u kišnoj epizodi veće od višegodišnjeg prosjeka za svibanj od 64% do 164%.

Tablica 1: Statistička značajnost maksimalne kiše iz svibnja 2014. godine za različita trajanja kiše za 5 GMS postaja

svibanj	12.–19. 5.2014.			trajanje													
	P mm	P mm	Θ	1h		3h		6h		12h		24h		48h		72h	
				P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T
Loznica																	
79,2	188,3	2,38		11,1	1	24,2	<2	34,5	<2	59,8	7	105,0	125	163,4	1000	176,1	450
Beograd																	
67,8	179,1	2,64		12,5	1	21,8	1	37,3	2	66,8	20	103,9	100	158,2	400	172,3	625
Niš																	
64,7	106,2	1,64		13,1	1	30,3	3	43,3	10	67,3	100	84,0	50	96,8	80	100,1	80
Rimski Šančevi																	
57,8	133,8	2,31		7,5	1	18,4	<2	33,5	2	60,9	8	81,1	20	107,5	50	131,3	110
Valjevo																	
80,7	179,0	2,12		5,5	1	15,0	1	27,7	<2	53,8	3	97,4	60	149,4	400	164,2	650

Ocjena statističkih značajnosti osmotrene maksimalne kišne epizode u svibnju 2014. godine izvršena je za sve GMS, a u ovom radu prikazani su rezultati uporedne analize ostvarenih i probabilističkih maksimalnih visina kiša samo za 5 GMS koje se nalaze najbliže centrima kiša. U tablici 1 su za svaku GMS prikazane: prosječna višegodišnja vrijednost visine kiše u mjesecu svibnju (P), suma oborina tijekom kišne epizode od 12. do 19. svibnja 2014. (P), odnos realizirane sume oborina prema prosječnoj mjesečnoj (Θ), maksimalna suma oborina (P) i povratni period (T) maksimalne sume oborina za 7 dužina trajanja kiše: 1, 3, 6, 12, 24, 48 i 72 sata (Prohaska et al., 2015.).

Može se konstatirati da je u svibnju 2014. godine registrirana jaka kišna epizoda s ekstremnim sumama oborina u trajanju do 7 dana. Karakteristična je po tome što su maksimalni intenziteti za kiše trajanja do 5-6 sati bili statistički značajni, s izuzetkom kiše u Nišu i Smederevskoj Palanci koji su bili ispod višegodišnjeg

5. RASPOLOŽIVI PODATCI ZA POTREBE REKONSTRUKCIJE KATASTROFALNE POPLAVE U SLIVU RIJEKE KOLUBARE U SVIBNJU 2014. GODINE

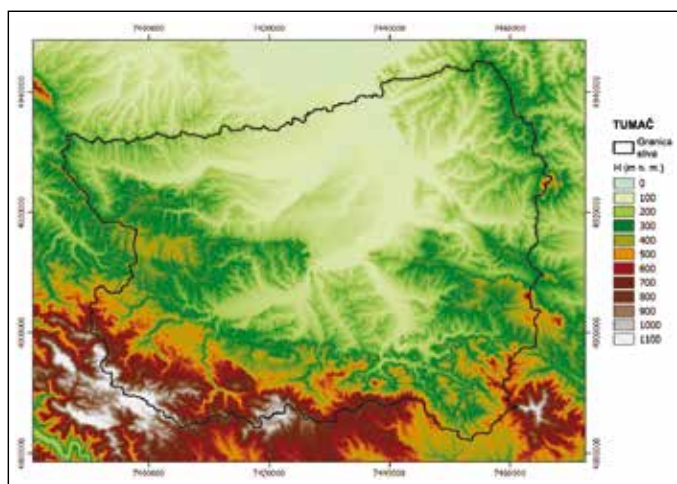
Najbitniji podatci i podloge za potrebe rekonstrukcije poplavnog vala iz svibnja 2014. godine u slivu rijeke Kolubare su: (Zlatanović i Prohaska, 2015.):

- digitalni model terena,
- hidrometeorološki podatci,
- podatci o poplavljenim objektima,
- podatci o stanju i funkcioniranju postojećih objekata za zaštitu od poplava, i
- podatci o poplavljenim naseljima i rušenjima infrastrukturnih objekata.

Korišten je SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) digitalni model terena (*DEM*) (Rodriguez et al., 2015.) kao podloga za daljnje analize. Rezolucija digitalnog

modela terena je 3 lučne sekunde u geografskoj projekciji (WGS84 datum), što iznosi okvirno 90×60 m reprojicirano u Gaus-Kriggerovu pravokutnu Merkatorovu projekciju koja se najčešće koristi u Srbiji. Ovakav raster je dalje interpolacijskim metodama doveden do rezolucije od 70×70 m da bi se osigurao kvadratni oblik ćelija s minimalnim gubitkom nivoa detaljnosti.

Pošto je izvorni SRTM DEM (bez dodatnih korekcija) vrlo ograničen za korištenje u hidrološkim analizama, primijenjen je niz koraka za predprocesiranje terena (Zlatanović i Gavrić, 2013.) da bi se osigurao „hidrološki korektan“ model terena. Nakon tretiranja depresija i ravnih površina izračunati su rasteri smjerova tečenja (*flow directions*) i površina sliva (*flow accumulations*) primjenom metode *Deterministic 8* (O’Callaghan i Mark, 1984.). Tako tretiran digitalni model (slika 5) korišten je za delinaciju slivova i podslivova, kao i za određivanje geomorfoloških parametara podslivova.



Slika 5: SRTM digitalni model terena za sliv rijeke Kolubare

Hidrometeorološki podaci koji su korišteni pri formiranju hidrološkog modela sliva rijeke Kolubare su službeni podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije. To su, prije svega, podaci o oborinama i protocima na službenim mjernim postajama registriranim u razdoblju poplave od 12. do 24. svibnja 2014. godine.

U konkretnom slučaju korišteni su podaci o oborinama i to:

- dnevne sume oborina na sljedećim kišomjernim postajama u slivu Kolubare: Bogatić, Brežde, Donje Crniljevo, Donje Leskovice, Jagodići, Kaona, Koceljeva, Koštunići, Liplje, Ljig, Lukavac, Mionica, Mratišić, Osečenica, Pambukovac, Parcani, Počuta, Radarski centar Valjevo, Rogačica, Rudovci, Šarbane, Sibnica, Sopot, Stepojevac, Struganik, Stubline, Ub, Velika Ivanča i Valjevska Kamenica;
- satne vrijednosti oborina na glavnim meteorološkim i automatsko-izvještajnim postajama u slivu Kolubare: Valjevo, Majinovići i Štavica;

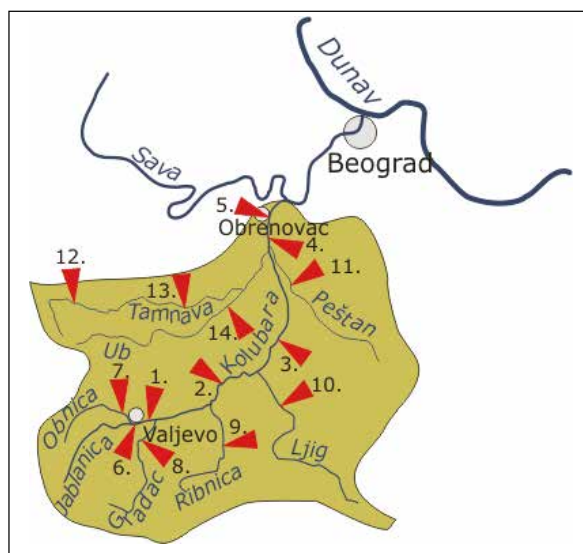
- satne vrijednosti oborina na glavnim meteorološkim postajama u neposrednoj okolini sliva Kolubare: Loznica, Beograd-Vračar, Sremska Mitrovica, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega.

Prostorni položaj korištenih oborinskih, meteoroloških i automatsko-izvještajnih postaja u slivu rijeke Kolubare prikazan je na slici 6.



Slika 6: Karta oborinskih postaja u slivu rijeke Kolubare

Korištene su satne vrijednosti protjecanja na sljedećim službenim vodomjernim postajama u slivu Kolubare: 1. Valjevo (Kolubara), 2. Slovac (Kolubara), 3. Beli Brod (Kolubara), 4. Draževac (Kolubara), 5. Obrenovac (Kolubara), 6. Sedlare (Jablanica), 7. Belo Polje (Obnica), 8. Degurić (Gradac), 9. Mionica (Ribnica), 10. Bogovađa (Ljig), 11. Zeoke (Peštan), 12. Koceljeva (Tamnava), 13. Čemanov most (Tamnava), 14. Ub (Ub). Karta sliva rijeke Kolubare, s označenim položajima hidroloških postaja, dana je na slici 7.



Slika 7: Karta hidroloških postaja (RHMZ Srbije) u slivu rijeke Kolubare

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

Raspoloživi podatci o stanju i funkcioniranju objekata za zaštitu od poplava prikupljeni su za sljedeće objekte: akumulacije „Stubo-Rovni“, „Paljuvi Viš“ i „Kladnica“.

Podatci o poplavljenim naseljima i rušenju infrastrukturnih objekata sagledani su provizorno: gradovi Obrenovac (preko ukupne zapremine izliveno 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).

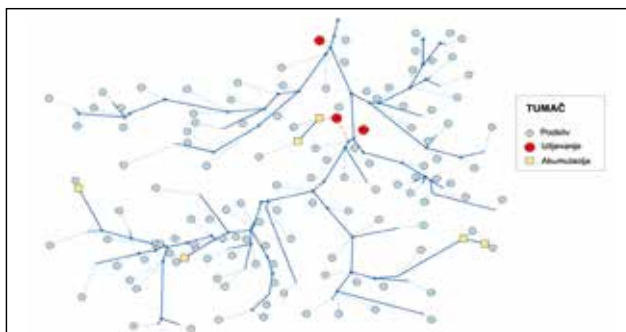
6. DEKOMPOZICIJA SLIVA RIJEKE KOLUBARE S CILJEM FORMIRANJA HIDROLOŠKOG MODELA

Za potrebe razvoja hidrološkog modela sliva rijeke Kolubare, cijeli je sliv podijeljen na podslivove pomoću digitalnog modela terena, vodeći računa o prostornoj konfiguraciji i hidrografiji sliva, zatim o položajima postojećih hidroloških postaja i lokacijama objekata koji mogu imati utjecaja na režim velikih voda, kao i položajima objekata koji su nekontrolirano plavljeni za vrijeme poplave u svibnju 2014. godine i na kraju o karakterističnim profilima vodotokova relevantnim s aspekta zaštite od poplava. Na taj se način cijeli koncept dekompozicije sliva sastoji u definiranju ključnih profila u slivu i to: ulaznih, kontrolnih i izlaznog profila.

Ulazne profile hidrološkog modela čine (Zlatanović i Prohaska, 2016.): akumulacija Stubo-Rovni na rijeci Jablanici, hidrološka postaja (HP) Belo Polje na rijeci Obnici, HP Degurić na rijeci Gradac, HP Mionica na rijeci Ribnici, HP Bogovođa na rijeci Ljig, HP Zeoke na rijeci Peštan, HP Koceljeva na rijeci Tamnavi i HP Ub na rijeci Ub.

Kontrolni profili hidrološkog modela su: HP Sedlare na rijeci Jablanici, HP Valjevo na rijeci Kolubari, HP Beli Brod na rijeci Kolubari, HP Čemanov most na rijeci Tamnavi, ušća rijeka: 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 lijevoobalni nasipi Kolubare kod Obrenovca.

Izlazni profil hidrološkog modela je hidrološka postaja Draževac. Između izračunatih profila modela (ulazni i kontrolni profili, ušća, mjesta proboja nasipa itd.), formirane su riječne dionice duž kojih je modelirana propagacija poplavnog vala. Na taj je način cijeli sliv rijeke Kolubare do profila hidrološke postaje Draževac podijeljen na 120 podslivova, 91 riječnu dionicu, 6 akumulacijskih prostora i 3 izlivanja (slika 8).



Slika 8: Shema elemenata hidrološkog modela sliva rijeke Kolubare

7. TEORIJSKE POSTAVKE HIDROLOŠKOG MODELA ZA REKONSTRUKCIJU POPLAVNOG VALA IZ SVIBNJA 2014. GODINE U SLIVU RIJEKE KOLUBARE

7.1 Modeliranje efektivnih oborina

Proračun gubitaka, odnosno efektivnih oborina, proveden je SCS (sada NRCS) metodom. Ovu metodu razvio je SCS (Soil Conservation Service, danas NRCS – National Resources Conservation Service) kao proceduru za računanje otjecanja s malih neizučeni poljoprivrednih slivova (NRCS, 2002.) (SCS, 1985.), ali je od tada postala jedna od najpopularnijih metoda za proračun površinskog otjecanja za male i srednje slivove (Mishra i Singh, 1999.).

Temelj metode je jednadžba otjecanja:

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

gdje su Q ukupno direktno otjecanje (mm), P ukupne oborine (mm), I_a početni gubitci (u mm), a S je kapacitet zemljišta, odnosno maksimalni potencijal za retenciranje i infiltraciju (mm). Pretpostavlja se da početni gubitak, definiran kao količina oborina nakon koje počinje otjecanje, ovisi o kapacitetu zemljišta S u sljedećem obliku:

$$I_a = 0,2S \quad (2)$$

Kapacitet zemljišta, odnosno maksimalni potencijal retenciranja S određuje se preko broja krivulje otjecanja CN prema sljedećem izrazu:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

gdje je S izraženo u milimetrima.

U ovoj studiji, broj CN je posebno kalibriran za svaki podsliv prema izmjerenim hidrogramima, obračunajući posebnu pažnju na hidrološku grupu tla, pokrov zemljišta, način obrade tla i hidrološke uvjete u slivu.

7.2 Modeliranje direktnog otjecanja

Za simuliranje procesa direktnog otjecanja u slivu, odnosno formiranje hidrograma od efektivnih oborina, korišten je Klarkov jedinični hidrogram (Clark, 1945.). Klarkov model računa, jedinični hidrogram sliva, tako što eksplicitno predstavlja dva ključna procesa pri transformaciji efektivnih oborina u otjecanje: translaciju efektivnih oborina od izvora kroz riječnu mrežu do izlaznog profila i retenciranje te zapremine na ukupnoj površini sliva. Klarkov jedinični hidrogram definiran je s dva parametra: vremenom koncentracije T_c i koeficijentom linearnog rezervoara R .

Kod metode Klarkovog jedičnog hidrograma, vrijeme koncentracije definirano je vremenom od završetka efektivnih oborina do točke infleksije opadajuće grane hidrograma. Točka infleksije na hidrogramu predstavlja trenutak završetka površinskog dotoka u riječnu mrežu i nakon toga se smatra da je protjecanje rezultat transformirane zapremine vode koja se zadržala u slivu.

Transformacija otjecanja može se predstaviti jednostavnim linearnim rezervoarom kod kojeg je odnos zapremine i otjecanja definiran kao:

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

gdje je S ukupna zapremina za retenciranje vode u slivu, R je koeficijent linearnog rezervoara za sliv, a O je otjecanje sa sliva.

Parametri Klarkovog jediničnog hidrograma kalibrirani su prema izmjerenim hidrogramima na kontrolnim profilima. Početne vrijednosti vremena koncentracija procijenjene su na temelju dužine i uravnatog pada najdužih tokova, koji su dobiveni pomoću digitalnog modela terena, primjenom modificirane Kirpihove formule (Zelenhasić, 1970.). Početne vrijednosti koeficijenta linearnog rezervoara R procijenjene su na temelju linearne ovisnosti o vremenu koncentracije (Russel et al., 1979.).

7.3 Model propagacije vala

Model propagacije vala duž toka koristi jednadžbu kinematskog vala koja se rješava primjenom 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 temelji se na rješavanju jednadžbe kontinuiteta

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

i difuznog oblika dinamičke jednadžbe

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

Primjenom linearne aproksimacije dobiva se:

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

gdje je c brzina prostiranja vala, a μ viskoznost (Miler i Cunge, 1975.). Kako se c i μ mijenjaju u vremenu, računaju se za svaki vremenski korak i prostornu diskretizaciju Δt i Δx (Ponce, 1986.).

Korišten je algoritam za Muskingum-Cunge model koji je sastavni dio softvera HEC-HMS, gdje se za svaku

riječnu dionicu kao ulazni parametri definiraju geometrija korita, efektivna hrapavost (u vidu Maningovog koeficijenta), pad linije energije i dužina dionice. Dužina riječnih dionica procijenjena je korištenjem riječne mreže dobivene na temelju digitalnog modela terena, efektivna hrapavost korita i inundacijskog područja usvajana je na temelju terenskih promatranja i avionskih snimaka, a pad linije energije je aproksimiran uzdužnim padom riječnog korita, koji je također računat na temelju digitalnog modela terena.

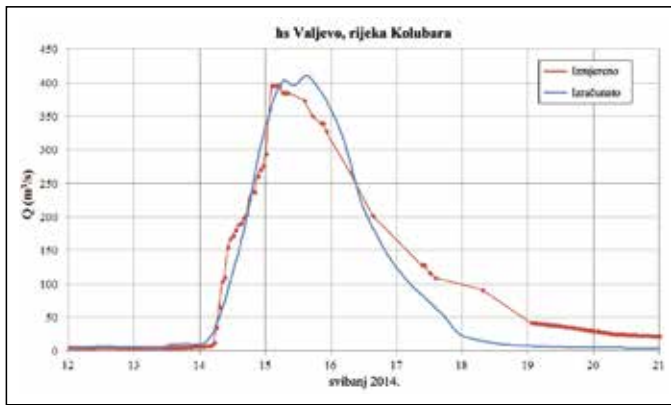
7.4 Primijenjena procedura prostorne interpolacije dnevnih oborina u satne

Za vrijeme poplave u svibnju 2014. godine u slivu rijeke Kolubare postojala su mjerenja satnih vrijednosti oborina samo na GMS Valjevo i na dvije automatske oborinske postaje – Majinovići i Štavica. Kako su ovi podatci nedovoljni za pouzdanije sagledavanje prostornog rasporeda satnih oborina, na cijelom slivu rijeke Kolubare za vrijeme predmetne poplave razrađena je procedura prostorne interpolacije satnih oborina korištenjem podataka s navedene GMS Valjevo i spomenute dvije automatske oborinske postaje, kao i raspoloživih satnih oborina na širem obodu sliva i to GMS Loznica, Sremska Mitrovica, Beograd, Smederevska Palanka, Kragujevac i Požega. Osim toga, korišteni su svi raspoloživi podatci o dnevnim sumama oborina na navedenim oborinskim postajama u slivu Kolubare.

Suština primijenjenog postupka sastoji se u proračunu postotnog učešća satnih suma oborina u ukupnoj 24-satnoj sumi oborina na navedenoj pluviografskoj postaji (GMS ili automatskoj) i da se zatim taj postotni raspored pomoću Thiessenovih poligona „prenese“ na sve ostale oborinske postaje u slivu rijeke Kolubare množenjem dnevnih suma oborina na promatranom kišomjeru s pripadajućim postotnim učešćima na odgovarajućim pluviografskim postajama.

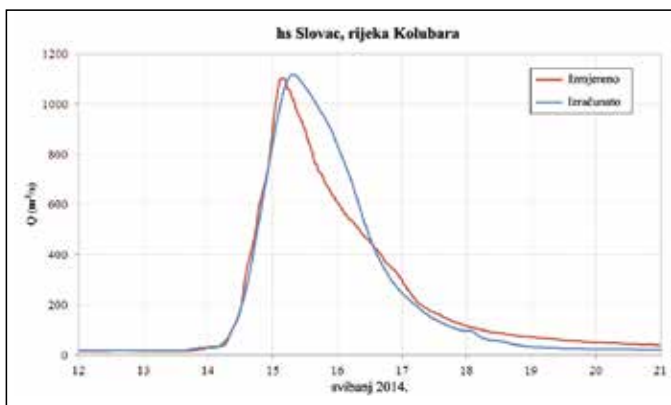
8. PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA REKONSTRUKCIJE POPLAVNOG VALA IZ SVIBNJA 2014. GODINE

Rezultati proračuna prikazani su grafički u obliku usporednog dijagrama izmjerenog hidrograma (službeni podatci RHMZ Srbije) i računskog hidrograma po hidrološkom modelu. Ovi rezultati su prikazani na tri kontrolna profila vodomjernih postaja na rijeci Kolubari: Valjevo, Slovac i Beli Brod, kao i na izlaznom profilu iz modela na vodomjernoj postaji Draževac na rijeci Kolubari. Na slici 9 prikazana je usporedba izmjerenog i izračunatog hidrograma rijeke Kolubare u profilu HP Valjevo. Evidentno je da je u fazi porasta hidrograma postignuta značajna suglasnost, dok su u fazi opadanja registrirana određena odstupanja, što je posljedica uzvodnog prodora obaloutvrde i plavljenja uže gradske jezgre Valjeva.



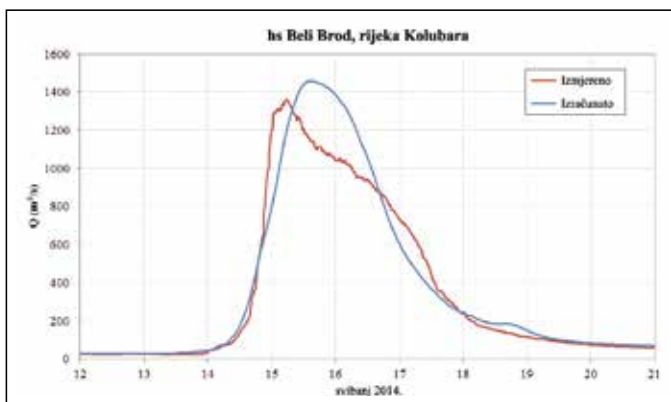
Slika 9: Izračunati i izmjereni hidrogrami za hidrološku postaju Valjevo (Kolubara)

Na slici 10 je prikazana usporedba izmjerenog i izračunatog hidrograma rijeke Kolubare u profilu HP Slovac. Faza porasta hidrograma je vrlo dobro rekonstruirana hidrološkim modelom, dok u vršnom i opadajućem dijelu izmjerenog hidrograma „nedostaje” voda koja je nekontrolirano otjecala vrlo širokim inundacijskim prostorom.



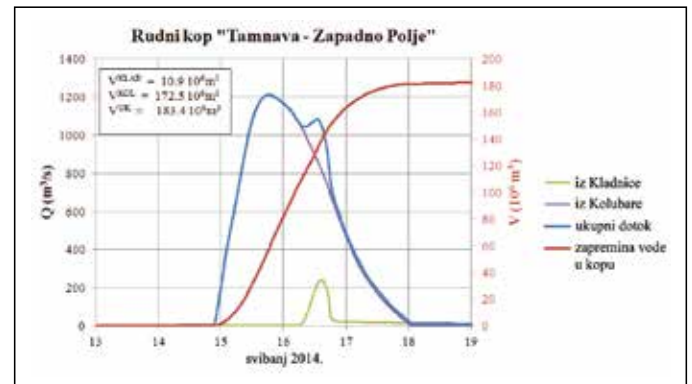
Slika 10: Izračunati i izmjereni hidrogrami za hidrološku postaju Slovac (Kolubara)

Vrlo slični rezultati su postignuti i za profil HP Beli Brod na rijeci Kolubari (slika 11). U ovom profilu, osim vode koja je prošla ispod mosta, što je službeno registrirano u RHMZ-u, značajan dio vode je protekao kroz dva proboja nasipa na desnoj obali Kolubare i kroz inundacijski pojas na lijevoj obali, gdje se formirao tok paralelno s rijekom Kolubarom.



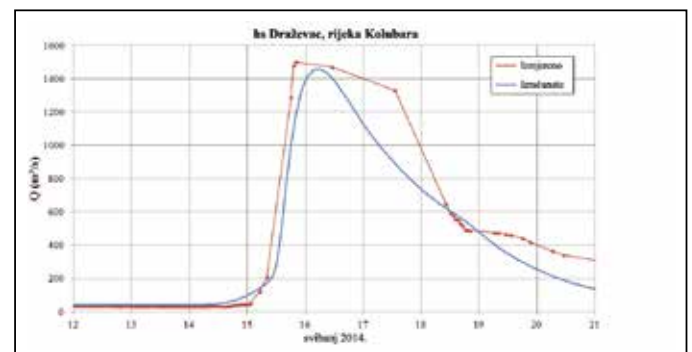
Slika 11: Izračunati i izmjereni hidrogrami za hidrološku postaju Beli Brod (Kolubara)

Val na rijeci Kladnici je, nakon proboja brane na retenciji Kladnica, u potpunosti akumuliran u Zapadnom polju (hidrogram označen zelenom bojom na slici 12). Poplavni val koji je došao iz pravca Kolubare je probio zaštitni nasip i ulio se kroz korito rijeke Vraničine u kop „Tamnava-Istočno polje”, a potom u Zapadno polje (hidrogram označen ljubičastom bojom na slici 12). Prema proračunima, maksimalni dotok u kopove se zbio 15. svibnja poslije podne i bio je veći od $1200 m^3 s^{-1}$. Također, može se vidjeti da je od ukupnih 183,4 mil. m^3 akumulirane vode, 10,9 mil. m^3 doteklo iz Kladnice, dok je 172,5 mil. m^3 vode doteklo iz Kolubare.



Slika 12: Izračunati hidrogrami i dinamika punjenja rudnog kopa "Tamnava-Zapadno polje"

Najveća „neslaganja” zabilježena su za profil HP Draževac na Kolubari (slika 13). Jedan od razloga je što je tijekom poplave cijeli nizvodni tok rijeke Kolubare bio pod usporom velikih voda rijeke Save. Prvo, izmjereni podaci RHMZ-a Srbije o protocima rijeke Kolubare u tom profilu obrađeni su na klasičan način korištenjem ekstrapolirane krivulje otjecanja, koja nije formirana za uvjete pojave uspora. Drugo, limnigrafski aparat je bio pod vodom i nije kontinuirano registrirao sve promjene vodostaja, što je vidljivo iz grubo predstavljenih podataka na slici 13. Evidentno je da izračunati hidrogram pokazuje da je znatno manja količina vode protekla kroz ovaj profil tijekom 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 13: Izračunati i izmjereni hidrogrami za hidrološku postaju Draževac (Kolubara)

Rezultati proračuna prikazani grafički u obliku usporednog dijagrama izmjerenog (službeni podatci

RHMZ-a Srbije) i izračunatog hidrograma po hidrološkom modelu na tri kontrolna profila vodomjernih postaja na rijeci Kolubari: Valjevo, Slovac i Beli Brod, kao i na izlaznom profilu iz modela na vodomjernoj postaji Draževac na rijeci Kolubari, pokazuju da postoje značajne razlike u vrijednostima protoka. Generalno se može zaključiti da su se postojeće značajne razlike između izmjerenih i izračunatih vrijednosti protoka mogle očekivati iz dva osnovna razloga:

1. Protoci izmjerenih hidrograma obuhvaćaju samo onu količinu vode koja je prošla kroz službeni profil vodomjerne postaje. Međutim, na svim ovim profilima vodomjernih postaja voda je protjecala na znatno širem inundacijskom prostoru ili je porušila uzvodne nasipe pa je tekla nekontrolirano izvan branjenog područja.

2. Na svim ovim vodomjernih postajama voda je dostigla ili potopila limnografske uređaje, dok je u profilu HP Valjevo došlo do potpunog rušenja limnografske postaje. Sretna okolnost je da se to dogodilo nakon pojave vrha poplavnog vala i da je opadajuća grana rekonstruirana na temelju naknadno uspostavljenih izvanrednih mjerenja.

U takvim okolnostima evidentno je da je za vrijeme poplave u svibnju 2014. godine na promatranom sektoru rijeke Kolubare protekla znatno veća količina vode nego što su hidrološke postaje RHMZ-a registrirale.

Vežano s time, a s ciljem kvantitativne ocjene rezultata primijenjenog hidrološkog modela za rekonstrukciju katastrofalne poplave iz svibnja 2014. godine u slivu rijeke Kolubare, u tablici 2 su dani parametri izračunatih hidrograma promatranog poplavnog vala. Zbog sveobuhvatnosti sagledavanja kvaliteta izračunatih vrijednosti na cijelom slivu rijeke Kolubare u tablici su dani podatci za sve ulazne i kontrolne profile te izlazni profil hidrološkog modela. Prikazani su osnovni parametri hidrograma velikih voda kao što su: maksimalna kordinata hidrograma Q_{max} ($m^3 s^{-1}$), ukupne oborine P (mm i $10^6 m^3$), zapremine poplavnog vala V (mm i $10^6 m^3$) i koeficijent otjecanja ϕ .

Tablica 2: Karakteristike slivova, oborina i modeliranih hidrograma

Profil	A (km ²)	P (mm)	P (10 ⁶ m ³)	MODELIRANO			
				QMAX (m ³ s ⁻¹)	V (mm)	V (10 ⁶ m ³)	ϕ
Belo Polje	182	294,6	54,5	292	252,1	46,6	0,86
Sedlare	140	249,4	34,9	111	183,8	25,7	0,74
Valjevo	340	271,2	92,2	411	220,5	75,0	0,81
Degurić	159	215,9	34,3	167	146,4	23,3	0,68
Mionica	108	257,4	27,8	179	217,0	23,4	0,84
Slovac	995	241,1	239,9	1.036	193,8	192,9	0,80
Bogovođa	679	196,7	133,5	429	128,4	87,2	0,65
Beli Brod	1.896	224,1	424,8	1.305	164,5	311,9	0,73
Zeokoe	125	275,9	34,5	158	219,4	27,4	0,80
Koceljeva	208	195,6	40,7	180	153,2	31,9	0,78
Čermanov most	386	199,2	76,9	177	125,0	48,2	0,63
Ub	214	228,8	49,0	183	135,4	29,0	0,59
Draževac	3.588	239,7	860,2	1.456	105,9	379,9	0,44

Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da su u slivu rijeke Kolubare u kraćem vremenskom razdoblju (neposredno prije i za vrijeme pojave katastrofalne poplave) pale znatne količine oborina, relativno ravnomjerno raspoređene po slivu. Po izdvojenim podslivovima najmanje oborina je palo u gornjem dijelu sliva Tamnave do HP Koceljeva (195,6 mm), a najviše u susjednom podslivu rijeke Obnice do HP Belo Polje (294,6 mm). Ove oborine uzrokovale su pojavu poplavnih valova na svim promatranim ulaznim kontrolnim i izlaznom profilu.

S ciljem sagledavanja točnosti izračunatih hidrograma poplavnog vala (primjenom razrađenog hidrološkog modela HEC-HMS) iz svibnja 2014. godine u dijelu sliva rijeke Kolubare koji obuhvaća pojas direktnog utjecaja plavljenja površinskih kopova „Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“ na veličinu i oblik poplavnog vala u tablici 3 je dana bilanca voda u navedenom sektoru. Ulazi u promatrani sektor su hidrogrami poplavnih valova u profilima vodomjernih postaja Beli Brod na rijeci Kolubari, Zeoke na rijeci Peštan, Čermanov most na rijeci Tamnavi i Ub na rijeci Ub, zatim izračunati hidrogrami (pomoću hidrološkog modela) s hidrološki neizučeni pritoka koje se ulijevaju u Kolubaru u zoni površinskih kopova, a to su: Lukavica, Kladnica, Vraničina, Beljanica i Turija, kao i hidrogram s neposrednog sliva. Izlaz iz promatranog sektora je hidrogram poplavnog vala u profilu vodomjerne postaje Draževac na rijeci Kolubari. Podatci o količinama voda koje su poplavile navedene površinske kopove preuzeti su iz službene dokumentacije (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 2015.). Osnovni elementi za kontrolu bilance voda su zapremine poplavnog vala, izračunatog pomoću hidrološkog modela, kao i sume oborina koje su izazvale poplavni val, a prikazani su u tablici 3.

Tablica 3: Bilanca voda na promatranom sektoru donjeg toka rijeke Kolubare za vrijeme pojave poplavnog vala u svibnju 2014. godine

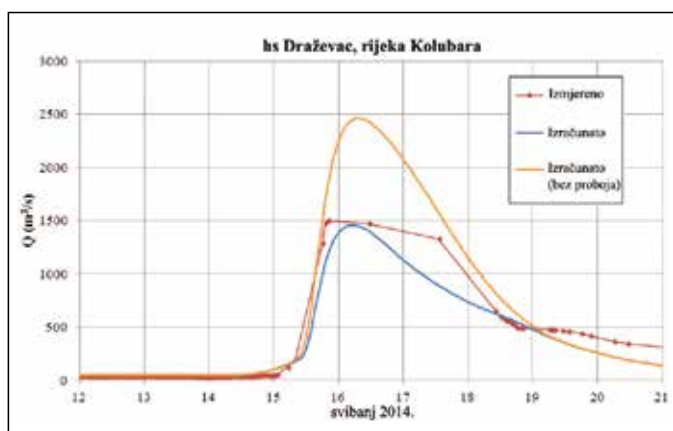
Rijeka	Profil	A (km ²)	Hidrološki model – „Jaroslav Černi“		
			V (10 ⁶ m ³)	V (mm)	P (mm)
Ulazi	B. Brod	1.896	311,9	164,5	224,1
	Zeoke	125	27,4	219,4	275,9
	Čermanov most	386	48,2	125,0	199,2
	Ub	214	29,0	135,4	228,8
	Σ ulazi	2.621	416,5	158,9	223,3
Neizučeni slivovi	Lukavica	826,4	170,9	206,8	-
	Kladnica				-
	Vraničina				-
	Beljanica				-
	Turija				-
Neposredni sliv	Σ neizučeni slivovi	3.447,4	587,4	170,4	-
	Izlaz	Draževac	3.588,0	379,9	105,9
Površinski kopovi	Razlika	140,6	-207,5	-	-
	Zapadno polje	-	189,6	-	-
	Veliki Crljeni	-	15,8	-	-
	Σ kopovi	-	205,4	-	-
Greška bilanciranja	Apsolutna	-	-2,1	-	-
	Postotna	-	0,6	-	-

U tablici 3 je vidljivo, sa stajališta zapremine izračunatih hidrograma poplavnih valova dobivenih pomoću hidrološkog modela HEC-HMS, disbalans vodnih masa je minimalan, reda veličine $-2,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, što predstavlja grešku manju od 1%. Navedena konstatacija samo potvrđuje hipotezu iznijetu u točki 1 ovog poglavlja, a to je da otjecanje izmjerenih hidrograma RHMZ-a Srbije obuhvaća samo onu količinu vode koja je prošla kroz službeni profil vodomjerne postaje, zanemarujući činjenicu da je skoro na svim profilima vodomjernih postaja voda protjecala na znatno širem inundacijskom pojasu ili je porušila uzvodne nasipe pa je tekla nekontrolirano izvan branjenog područja.

9. ANALIZA HIPOTETIČKIH STANJA ZAŠTITE OD POPLAVE U SVIBNJU 2014. GODINE U SLIVU RIJEKE KOLUBARE

Razrađeni hidrološki model primijenjen je i za uvjete hipotetičkog stanja zaštite od poplava u donjem toku sliva rijeke Kolubare. Pretpostavljeno je da je sustav zaštite od plavljenja površinskih kopova „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“ bio uspješan, tj. da nije dozvolio direktno ulijevanje voda iz vodotoka Kolubare, odnosno iz sliva Peštana. Pretpostavljeno je, također, da se plavljenje iz sliva rijeke Kladnice nije moglo spriječiti. U tim uvjetima pretpostavljeno je da vrijede isti uvjeti u svibnju 2014. godine, a da nije došlo do potapanja površinskih kopova „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“.

Rezultati proračuna prikazani su samo za izlazni profil iz hidrološkog modela, tj. za profil HP Draževac na rijeci Kolubari. Rezultati proračuna dani su i grafički na slici 14 zajedno s rezultatima prethodnih proračuna (rekonstruiranog vala) i izmjerenim podacima RHMZ-a.



Slika 14: Izračunati i izmjereni hidrogrami za hidrološku postaju Draževac (Kolubara), zajedno s hipotetičkim hidrogramom bez proboja kolubarskih nasipa u otvorene kopove

Da za vrijeme poplave u svibnju 2014. godine nije došlo do potapanja površinskih kopova „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“, primjenom hidrološkog modela se pokazuje da bi vrh poplavnog vala tada iznosio $2.460 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a zapremina poplavnog vala bi iznosila 585 mil. m^3 .

10. PRIKAZ STATISTIČKE ZNAČAJNOSTI REKONSTRUIRANOG POPLAVNOG VALA IZ SVIBNJA 2014. GODINE U SLIVU RIJEKE KOLUBARE.

Na temelju definirane mješovite kumulativne funkcije raspodjele maksimalnih godišnjih protoka i zapremina poplavnih valova na promatranim hidrološkim postajama, određen je statistički rang katastrofalne poplave iz svibnja 2014. godine u slivu rijeke Kolubare. Napominje se da je statistički rang određen uz uvjet da nije bilo izlivanja u kopove. Ocjena statističkog ranga poplave iz svibnja 2014. godine izvršena je na bazi izračunatih vrijednosti vrha poplavnog vala (tablica 4), kao i zapremine poplavnog vala dobivene pomoću hidrološkog modela HEC-HMS.

Tablica 4: Ocijenjeni povratni periodi izračunatih vrijednosti maksimalnih protoka i zapremina poplavnog vala iz svibnja 2014. godine dobiveni modelom HEC-HMS

Rijeka	Hidrološka postaja	Protoci i zapremine poplavnog vala iz svibnja 2014. godine			
		Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Povratni period	W ($\text{m}^3 \cdot 10^9$)	Povratni period
Kolubara	Valjevo	411	120	75,0	350
Kolubara	Slovac	1036	480	192,9	450
Kolubara	Beli Brod	1305	520	311,9	360
Kolubara	Draževac	2460	650	587,4	360
Jablanica	Sedlare	111	20	25,7	100
Obnica	Belo polje	292	210	46,6	430
Gradac	Degurić	167	70	23,3	100
Ribnica	Mionica	179	20	23,4	50
Ljig	Bogovađa	429	280	87,2	330
Peštan	Zeoke	158	110	27,4	220
Tamnava	Koceljeva	180	160	31,9	340
Tamnava	Ćemanov most	177	420	48,2	200
Ub	Ub	183	500	29,0	380

Na glavnom toku rijeke Kolubare, za hidrološke postaje Valjevo, Slovac, Beli Brod i Draževac, povratni period protoka raste povećanjem slivne površine i kreće se u rasponu od 120 do 650 godina. Duž glavnog toka rijeke Kolubare dolazi do koincidencije poplavnih valova sa sljedećim slivovima: Obnica (HP Belo Polje), Ljig (HP Bogovađa), Peštan (HP Zeoke), Tamnava (HP Ćemanov Most). Prema statističkom rangu, najekstremnija vrijednost protoka na pritokama javlja se na HP Ub, na istoimenoj rijeci koja se nalazi na sjeverozapadnom dijelu sliva, s povratnim periodom od 500 godina. Izuzetak od ostalih dijelova sliva rijeke Kolubare predstavlja jugozapadni dio sliva, gdje su na rijekama Jasenica (HP Sedlari), Gradac (HP Degurić) i Ribnica (HP Mionica) ocijenjeni povratni periodi protoka od 20 do 70 godina, a kao posljedica pojave manjih registriranih oborina.

Za razliku od protoka, ocijenjeni povratni period zapremine poplavnog vala tijekom katastrofalnih poplava 2014. godine je relativno ujednačen po slivu. Tako je na glavnom toku rijeke Kolubare povratni period zapremine poplavnog vala u rasponu od 350 do

450 godina. Veliki povratni period je karakterističan za najuzvodniji dio sliva na rijeci Obnici (HP Belo Polje), gdje iznosi 430 godina. Na nizvodnim dijelovima sliva povratni periodi zapremine poplavnih valova iz svibnja 2014. godine kreću se u rasponu od 220 do 380 godina, dok su zapremine vala na jugozapadnom dijelu sliva s povratnim periodom manjim od 100 godina (HP Sedlare, HP Degurić, HP Mionica). Zapaža se da je statistički rang zapremine na jugozapadnom dijelu sliva nešto veći nego u slučaju protoka, što se pripisuje dužem trajanju poplavnog vala.

11. ZAKLJUČAK

U travnju i svibnju 2014. godine teritorij Republike Srbije zahvatilo je nekoliko prodora hladnog zraka s Atlantika, koji su izazvali pojavu serije ciklona s dugotrajnim oborinama. Kako je broj kišnih dana u ovom razdoblju na većini meteoroloških postaja u Srbiji premašio broj dana bez kiše, može se zaključiti da je ovo navedeno dvomjesečno razdoblje cijelo bilo kišno. U oba mjeseca zabilježena je po jedna značajna kišna epizoda.

Ocjena statističke značajnosti svibanjske kišne epizode izvršena je samo na temelju podataka sa GMS-a. Unutar kišnog razdoblja izvršena je procjena povratnog perioda maksimalnih ostvarenih intenziteta za različita trajanja kiše, kao i za ukupnu sumu kiše u epizodi. Izvršen je, također, pokušaj da se ostvarene ukupne sume kiše usporede s prosječnim višegodišnjim vrijednostima mjesečne sume oborina. S tim u vezi, statistički značajne sume oborina realizirane su za trajanje kiše duže od 24 sata. Tako, na primjer, u širem centru, svibanjske kiše, maksimalne 24-satne kiše realizirane u Beogradu i Loznici prelaze stogodišnje povratne periode, a u Valjevu 70-godišnji. Maksimalne količine oborina za 48 sata realizirane su u Loznici, gdje izmjerena vrijednost premašuje tisućgodišnju kišu, zatim slijede Beograd i Valjevo s 400-godišnjom kišom, pa Niš s kišom 80-godišnjeg povratnog perioda. Za maksimalnu trodnevnu kišu registriranu u Beogradu i Valjevu povratni period je procijenjen na 700 godina, dok je u Loznici ostvarena maksimalna trodnevna kiša 400-godišnjeg povratnog perioda.

Općenito, za maksimalnu kišnu epizodu u svibnju 2014. godine može se zaključiti da je okarakterizirana pojavom ekstremnih oborina koje su dugo trajale i zahvatile relativno veliku površinu. Osim Srbije gdje su poplavljena područja Jadra, Kolubare i Mlave, poplavljen je i dio Bosne i Hercegovine, a prije svega slivovi rijeka Bosne, Drine i područje Semberije, kao i područje donjeg toka rijeke Save u Republici Hrvatskoj. Ocjenu statističke značajnosti ekstremnih oborina, na cijelom zahvaćenom području tri navedene susjedne zemlje, teško je u ovom trenutku dati bez odgovarajućih podataka.

U uvjetima nezapamćenih velikih voda u mjesecu svibnju 2014. godine u slivu rijeke Kolubare dogodile su

se havarije na pojedinim hidrološkim postajama RHMZ-a Srbije. Neki limnografi su potopljeni ili srušeni, kod drugih je oprema otkazala, a u zonama nekih hidroloških postaja je potpuno izmijenjena strujna slika uslijed izlivanja vode u priobalje. Iz navedenih razloga, na brojnim profilima hidroloških postaja nije bilo moguće dobiti stvarne protoke u vršnim dijelovima hidrograma. Da bi se što realnije procijenili vršni dijelovi hidrograma poplavnih valova koji su se u svibnju 2014. godine javili u slivu rijeke Kolubare i njenim pritokama, izvršena je rekonstrukcija na svim hidrološkim postajama pomoću razvijenog hidrološkog modela, korištenjem programskog paketa HEC-HMS (Vidmar et al., u pripremi).

Izvršena rekonstrukcija formiranja i prostiranja poplavnog vala u svibnju 2014. godine u slivu rijeke Kolubare daje zadovoljavajuće bilančne rezultate, imajući u vidu sve probleme evakuacije i zaštite od poplava koje su se dogodile u vidu preljeva i prodora obrambenih nasipa, retencija Kladnica i prodora vode u površinske kopove „Tamnava-Zapadno polje“ i „Veliki Crljeni“. Zbog toga su maksimalni protoci na većini profila vodomjernih postaja u slivu rijeke Kolubare za 2014. godinu izračunati pomoću primijenjenog hidrološkog modela prihvatljiviji u odnosu na službene maksimalne protoke objavljene u godišnjacima RHMZ-a Srbije. Rezultati proračuna formiranja i prostiranja poplavnog vala iz svibnja 2014. godine za uvjete da ne dođe po potapanja navedenih površinskih kopova pokazali su da bi vršni protoci i zapremine poplavnog vala bili značajno izraženiji. Najveće promjene bile bi zabilježene u donjem dijelu sliva rijeke Kolubare, kada bi te promjene bile veće za red veličine više od 120% u odnosu na ostvareno stanje tijekom mjeseca svibnja 2014. godine.

Procijenjena statistička značajnost vršnih protoka ukazuje da njihovi povratni periodi rastu povećanjem slivne površine u rasponu od 120 do 650 godina, što samo potvrđuje da je duž toka rijeke Kolubare došlo do izražene koincidencije poplavnih valova glavne rijeke i pritoka. Za razliku od vršnih protoka, ocijenjeni povratni periodi zapremine poplavnih valova tijekom katastrofalne poplave u svibnju 2014. godine su relativno ujednačeni u slivu. Duž glavnog toka Kolubare povratni periodi zapremine poplavnog vala kreću se u rasponu od 350 do 450 godina. Na najuzvodnijem dijelu sliva povratni period zapremine poplavnog vala je reda veličine 430 godina, na nizvodnim dijelovima sliva povratni periodi se kreću u rasponu od 220 do 380 godina, a na pritokama jugozapadnog dijela sliva povratni periodi su manji od 100 godina.

Imajući u vidu činjenicu da su poplavama u svibnju zahvaćene znatno veće površine nego je to sliv rijeke Kolubare u Srbiji, i da su se u isto vrijeme na širem dijelu sliva rijeke Save, prema objavljenim dostupnim podacima, događali statistički značajniji poplavni događaji (Vidmar et al., u pripremi) (gdje je navedeno da na oborinskoj postaji Tuzla povratni period višednevne maksimalne kiše u trajanju od 2 do 6 dana iznosi 10.000 godina), autori

ovog rada smatraju da je moralna obaveza hidrologa u svim susjednim zemljama zahvaćenim poplavom (Srbija, Hrvatska te Bosna i Hercegovina) da zajedničkim snagama ovu poplavu sveobuhvatno razmotre i razjasne njene uzroke, sagledaju njenu statističku značajnost i posljedice, da nas ubuduće poplava takvih razmjera ne bi iznenadila. Autori ovog rada predlažu da u realizaciji ovog zadatka ravnopravno sudjeluju eksperti-hidrolozi iz svih susjednih zemalja, a da je na nadležnim institucijama da pronađu i osiguraju uvjete da se ovaj vrlo akutni zadatak što prije realizira, s obzirom na evidentan rizik

da se ovakva pojava može u budućnosti ponoviti (sa i bez najavljenih klimatskih promjena).

ZAHVALA

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

LITERATURA

- Babić Mladenović, M.; Kolarov, V. (2015): May 2014. Floods in Serbia. *Water Research and Management*, 5(1), 3-8, Serbian Water Pollution Control Society, Belgrade, Serbia.
- Clark, C. O. (1945.): *Storage and the unit hydrograph*. Transactions, ASCE, 110, 1419-1446.
- Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2015.): Konsultantske usluge ispumpavanja zamuljene vode i mulja PK „Tamnava-Zapadno polje“. *Završni izveštaj*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija.
- Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2016.). Studija unapređenja zaštite od voda u slivu reke Kolubare. *Preliminarni izveštaj*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija.
- Miller, W. A.; i Cunge, J. A. (1975.): *Simplified equations of unsteady flow*. U: *Unsteady flow in open channels* (urednici: W. A. Miller, V. Yevjewich), Water Resources Publishing, Fort Collins.
- Mishra, S. K. i Singh, V. P. (1999.): Another Look at SCS-CN Method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3, 257-265.
- NRCS (2002.): *National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology*. USDA, Washington, D. C.
- O'Callaghan, J. F. i Mark, D. M. (1984.): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323-344.
- Ponce, V. M. (1986.): Diffusion wave modelling of catchment dynamics. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 112(8), 716-727.
- Prohaska, S.; Bartoš Divac, V.; et al. (2014. a): *Intenziteti jakih kiša u Srbiji*. Institut „Jaroslav Černi“, Beograd, Srbija, 481.
- Prohaska, S.; Đukić, D.; Bartoš Divac, V.; Todorović, N.; Božović, N. (2014. b): Karakteristike jakih kiša koje su prouzrokovala čestu pojavu poplava na teritoriji Srbije u periodu april–septembar 2014. godine. *Vodoprivreda*, 46 (267-272), 15-26.
- Prohaska, S.; Đukić, D.; Bartoš Divac, V.; Todorović, N.; Božović, N.; Anđelković, O. (2014. c): Statistička značajnost mesečnih i maksimalnih dvomesečnih, tromesečnih i šestomesečnih suma padavina iz perioda april–septembar 2014. godine. *Vodoprivreda*, 46 (267-272), 27-37.
- Prohaska, S.; Đukić, D.; Bartoš Divac, V.; Todorović, N. (2015.): Ocena povratnog perioda jake kiše koja je prouzrokovala pojavu katastrofalne poplave u maju 2014. godine na teritoriji Republike Srbije. *XI. Međunarodni naučni skup „Savremena teorija i praksa u graditeljstvu“*, 101-112, Banja Luka, Bosna i Hercegovina.
- Prohaska, S. i Zlatanović, N. (2015.): Hidrološka rekonstrukcija majske poplave 2014. godine u slivu reke Kolubare – uzroci i posledice. *Izgradnja*, 11-12.
- Prohaska, S.; Bartoš Divac, V.; Đukić, D.; Todorović, N.; Kolarov, V.; Babić Mladenović, M. (2016. a): Poplava u maju 2014. godine u slivu reke Kolubare – uzroci i posledice. *45. Konferencija o aktuelnim temama korišćenja i zaštite voda „VODA 2016“*, Zlatibor, 55-64.
- Prohaska, S.; Bartoš Divac, V.; Stojković (2016. b): Određivanje statističke značajnosti intenziteta jakih kiša u Valjevu nakon pojave izuzetnih majske padavina 2014. godine. *Voda i sanitarna tehnika*, Udruženja za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo. Beograd, 11-16.
- Rodriguez, E.; et al. (2005.): An assessment of the SRTM topographic products. *Technical Report JPL D-31639*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Russell, S.; Kenning, B. i Sunnell, G. (1979.): Estimating Design Flows for Urban Drainage. *Journal Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 105(1), 43-52.
- SCS (1985.): *National engineering handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapter 10*. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture (USDA), Washington, D. C.
- Vidmar, A.; et al. (u pripremi): The Bosna River floods in May 2014. *Journal on Flood Risk*, 1-25.
- Zelenhasić, E. (1970.): Theoretical probability distributions for flood peaks. *Hydrol. Paper*, 42, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- 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), 195-201.

Zlatanović, N.; Prohaska, S. (2015.): Preliminarna hidrološka rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare. *Vodoprivreda*, 47(276-278), 4-6.

Zlatanović, N.; Prohaska, S. (2016.): Hidrološko-hidraulička rekonstrukcija majske poplave iz 2014. godine u slivu reke Kolubare. 45. *Konferencija o aktuelnim temama korišćenja i zaštite voda „VODA 2016“*, Zlatibor, 65-74.

Reconstruction of the catastrophic May 2014 flood in the Kolubara river basin (Serbia)

Abstract. The paper provides a detailed overview of the newly developed hydrological model for the purposes of the reconstruction of the formation, propagation and transformation of the catastrophic flood which occurred in mid-May 2014 in the Kolubara river basin in Serbia. This flood caused a significant destruction of the existing flood protection system, uncontrolled breaches of the existing embankments and flooding of the open mining pits, agricultural surfaces, towns and settlements, resulting in the loss of human life and huge material damage. In addition, the flood caused a significant damage to some hydrological stations of the Republic Hydrometeorological Service of Serbia, sinking and toppling limnigraphs, and in the areas of some hydrological stations completely changing the flow pattern due to floodwater pouring out into the hinterland. The authors of the paper undertook the obligation to develop a new hydrological model for the purposes of the reconstruction of this catastrophic flood, with the aim to determine the actual state of flood propagation along the Kolubara and to investigate the actual scope of flooding in May 2014, i.e. to evaluate its statistical significance. The paper is illustrated by relevant numerical and graphical indicators of the May 2014 flood hydrograph on the hydrological stations' key profiles for the actual state and hypothetical state for successful flood protection.

Key words: Kolubara 2014, floods, hydrological modelling

Rekonstruktion des katastrophalen Hochwassers im Einzugsgebiet der Kolubara (Serbien) im Mai 2014

Zusammenfassung. Im Artikel wird ein neuentwickeltes hydrologisches Modell zur Rekonstruktion der Entstehung, Ausbreitung und Transformation des katastrophalen Hochwassers dargestellt, das in Serbien im Einzugsgebiet des Flusses Kolubara Mitte Mai 2014 auftrat. Dieses Hochwasser verursachte wesentliche Zerstörung des Hochwasserschutzsystems, unkontrolliertes Brechen von Dämmen sowie Überflutung der offenen Gruben, landwirtschaftlichen Flächen, Städte und Orte, was auch zum Verlust an Menschenleben und große materielle Schäden führte. Überdies verursachte das Hochwasser schwere Schäden an einzelnen hydrologischen Stationen des Hydrometeorologischen Instituts Serbiens (RHMZ), nämlich Limnigraphen wurden überschwemmt und stürzten ein. In den Zonen einiger hydrologischer Stationen wurde auch das Strömungsbild wegen der Überschwemmung der Küstengebiete geändert. Die Autoren entwickelten ein neues hydrologisches Modell zur Rekonstruktion dieses katastrophalen Hochwassers mit dem Ziel, den tatsächlichen Umfang des Hochwassers entlang des Flussverlaufs zu bestimmen sowie die statistische Signifikanz des Hochwassers zu beurteilen. In den Artikel wurden auch entsprechende numerische und grafische Indikatoren des Hydrogramms des Hochwassers an den wichtigsten Profilen der Wassermessstationen für den tatsächlichen Zustand und für den hypothetischen Zustand des erfolgreichen Hochwasserschutzes einbezogen.

Schlüsselwörter: Kolubara 2014, Hochwasser, hydrologische Modellierung