

UDK: 627.81
Originalni naučni rad

ANALIZA EFEKATA PLANIRANIH AKUMULACIJA ZA UBLAŽENJE VELIKIH VODA NA SLIVU TOPČIDERSKE REKE

Jasna PLAVŠIĆ

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Danijela JELUŠIĆ, Dragomir JEVTIĆ

Ehting d.o.o., Beograd

REZIME

U radu je prikazana analiza efekata planiranih akumulacija na slivu Topčiderske reke za ublažavanje velikih voda. Za potrebe ove analize razvijen je model padavine-oticaaj za simulaciju hidrograma velikih voda na profilima postojećih i planiranih akumulacija, kao i na drugim ključnim profilima Topčiderske reke i njenih pritoka. Model je kalibrisan i verifikovan koristeći osmotrene kišne epizode i hidrograme oticaja na hidrološkoj stanici Rakovica, a primenjen je sa računskim kišama kao ulazom za simulacije hidrograma velikih voda u sadašnjim i budućim uslovima na ključnim profilima u slivu. Rezultati su pokazali da su efekti tri najnižvodnije planirane akumulacije praktično zanemarljivi, dok su efekti najuzvodnijih akumulacija nešto veći jer na najnižvodnijim deonicama Topčiderske reke omogućavaju smanjenje maksimalnih protoka velikih voda od 10% do 20% (u zavisnosti od profila i povratnog perioda). Rezultati jasno ukazuju da je neophodno primeniti i druge mere kontrole kišnog oticaja na ovom slivu, a naročito na njegovom najnižvodnijem i najurbanizovanijem delu, kao i mere za sprečavanje nekontrolisane urbanizacije na ovom slivu koja bi u budućnosti još pogoršala uslove za formiranje velikih voda.

Ključne reči: velike vode, model padavine-oticaaj, osmotrene epizode, računске kiše, računski protoci, Topčiderska reka, retenzije, male akumulacije.

1. UVOD

Sa razvojem društva i stalnom urbanizacijom, prirodno okruženje se pretvara u stambene, komercijalne i industrijske zone. Ove promene imaju značajan uticaj na životnu sredinu i posledice po lokalne ekosisteme. Na žalost, mnogi od tih uticaja su negativni. Neplanska i

nekontrolisana urbanizacija donosi neke od najnepovoljnijih posledica za stanovnike takvih naselja, okolnu infrastrukturu i životnu sredinu [1].

Uticaj urbanizacije na hidrološki ciklus se izučava već dovoljno dugo, pa su posledice dobro poznate. Promenom namene površina se menjaju putevi vode u hidrološkom ciklusu, a to donosi promene i u količinama, kvalitetu i dinamici voda u urbanim zonama. Sa uklanjanjem vegetacije, ravnanjem terena tako da nema prirodnih depresija i povećanjem nepropusnih površina koje sprečavaju upijanje vode, smanjuju se količine voda koje se mogu zadržati na slivu, pa oticaaj postaje veći i brži. Pri tome, najveće probleme stvara urbanizacija najuzvodnijih delova malih slivova, gde se novim objektima praktično eliminišu prirodni tokovi vode. Time se gubi značajna sposobnost sliva da zadrži vodu i stvaraju se značajni ekološki problemi. Sa povećanim i bržim oticajem povećava se spiranje i transport nanosa i zagađujućih materija (kao što su ulja, masti, teški metali, đubrivo itd.) sa površine terena, koji dospevaju u vodotoke ili direktno ili preko kanalizacionih sistema, što pokazuje da su i vodene zajednice veoma ugrožene u celom procesu. Dakle, pored značajnog uticaja na hidrološke funkcije slivova, urbanizacija ima i veliki uticaj na funkcije ekosistema [2].

U uslovima brze i nekontrolisane urbanizacije tradicionalne metode za odvođenje kišnih voda postaju neefikasne, jer su te metode zasnovane na principu da se kišni oticaaj što pre ukloni i odvede (npr. skupljanje oticaja sa krovova u oluke ili na ulicama pomoću ivičnjaka, transport u rigolama i kroz kanalizacioni sistem i konačno ispuštanje u obližnje vodotoke). Kako se ovi sistemi projektuju na ekstremne protoke da bi se rizik od plavljenja smanjio, takvim rešenjima se problem samo prenosi na druge delove sliva gde kontrola oticaja onda postaje još teža.

Efikasna rešenja zahtevaju mnogo više od klasičnih strukturnih (investicionih) mera i moraju biti usmerena na integralno sagledavanje svih procesa na slivu. Savremene tendencije, kao što su „pametan razvoj“ (*smart growth*) i „razvoj bez velikih posledica“ (*low impact development*) zasnivaju se na holističkom i održivom pristupu. Jedan od osnovnih principa takvih pristupa je tzv. „kontrola na mestu nastanka“. Pored klasičnih mera kontrole kišnog oticaja kao što su retenzioni prostori, u današnje vreme se primenjuju i mnoge mere zasnovane na prirodnim principima za preraspodelu količina i regulisanje kvaliteta kišnog oticaja. Mnoge takve mere su one kojima se podstiče infiltracija, kao što su mokra polja, infiltracioni rovovi, travnate bankine pored saobraćajnica, porozni asfalti ili druge porozne površine, kišne bašte i baštice sa vegetacijom u trotoarima, zeleni krovovi, zeleni zidovi itd. Jedan primer integralnog pristupa rešavanju uređenja slivova prikazan je u radu [3].

Ipak, izgradnja retenzionih prostora je još uvek jedna od primarnih opcija za kontrolu količina i kvaliteta vode u uslovima urbanizacije. Troškovi izgradnje retenzionih prostora su generalno mali, a relativno visoki troškovi održavanja se čine prihvatljivim u odnosu na korist [1]. Mali retenzioni prostori, pod uslovom da su dobro projektovani i da se održavaju, mogu čak doprineti povećanju vrednosti zemljišta.

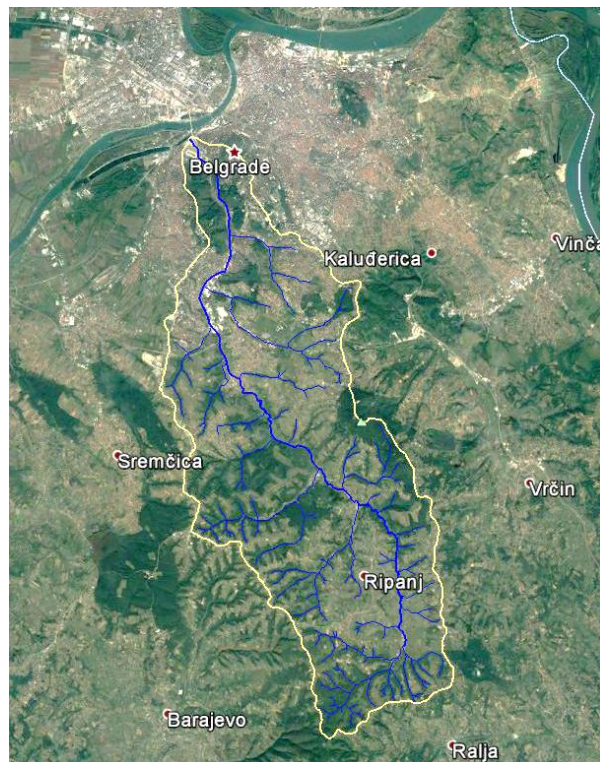
Sliv Topčiderske reke u Beogradu je pravi primer uticaja brze i nekontrolisane urbanizacije na hidrološki ciklus. Svi prethodno nabrojani problemi u vezi sa količinama i kvalitetom vode mogu se videti na ovom slivu. Problem učestalog plavljenja doline Topčiderske reke i njenih pritoka je odavno uočen, pa su krajem 80-tih godina 20. veka na dve pritoke Topčiderske reke izgrađene dve akumulacije za zaštitu nizvodnog područja od plavljenja, dok je u kasnijem periodu razmatrana izgradnja i drugih objekata sličnog tipa na slivu. U ovom radu se prikazuju rezultati skorašnje hidrološke studije sliva Topčiderske reke [3] u kojoj je razmatrano deset planiranih retenzionih prostora i njihovi efekti na ublažavanje maksimalnih protoka u dolini Topčiderske reke i njenih pritoka. U okviru studije je razvijen hidrološki model sliva Topčiderske reke do profila HS Rakovica za potrebe ocene promene režima velikih voda u budućim izmenjenim uslovima. Zatim je sprovedena analiza režima velikih voda različitih verovatnoća pojave za postojeće stanje na ključnim profilima duž glavnog toka i svih pritoka i pregradnim mestima akumulacija i retenzija i na kraju je analiziran uticaj akumulacija i retenzija na režim velikih voda na ključnim profilima pomoću

razvijenog hidrološkog modela sa unetim planiranim objektima.

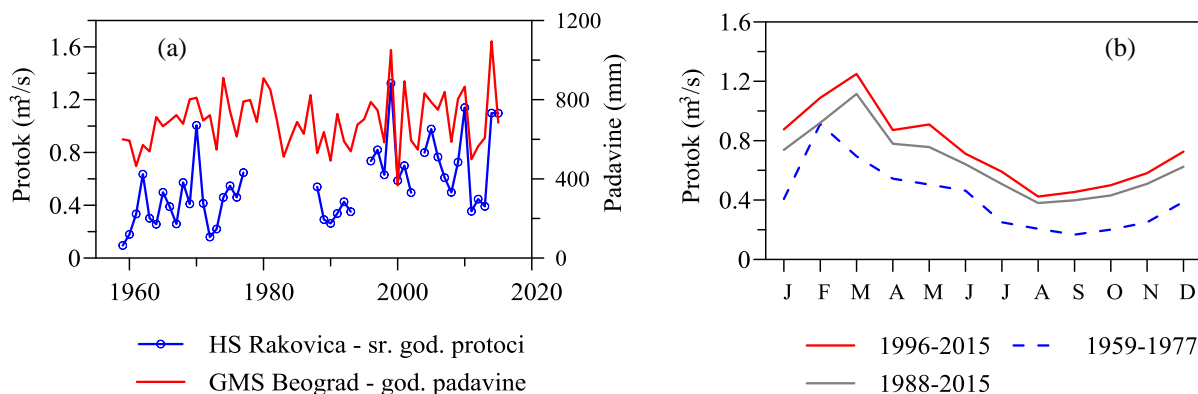
2. PODACI I METODOLOGIJA

2.1 Sliv Topčiderske reke

Sliv Topčiderske reke, desne pritoke reke Save, obuhvata površinu od 148 km² (slika 1). Glavni tok Topčiderske reke orijentisan je od jugoistoka ka severozapadu, ima dužinu od oko 28 km i prosečan podužni nagib od 0.5%. Sliv je bujičnog karaktera sa velikim brojem malih bujičnih pritoka [5]. Glavne pritoke Topčiderske reke od nizvodnog ka uzvodnom kraju su: Kaljavi potok, Rakovički potok, Kijeovski potok, Sikijevac, Pariguz, Bela reka, Prečica, Palanka, Kovionski potok i potok Šutilovac. Najviša tačka na slivu je vrh Avale od 506 m.n.m, a najniža ušće u Savu na 87.5 m.n.m. Prosečna nadmorska visina sliva iznosi oko 220 m.n.m., a prosečan nagib sliva 11% [6]. Osnovna karakteristika sliva je visok stepen urbanizacije na njegovom nizvodnom delu, kao i zaposednutost dolina potoka neplanskom gradnjom.



Slika 1. Položaj sliva Topčiderske reke.



Slika 2. (a) Poređenje srednjih godišnjih protoka na HS Rakovica i godišnjih padavina na GMS Beograd, (b) srednji mesečni protoci na HS Rakovica u karakterističnim periodima.

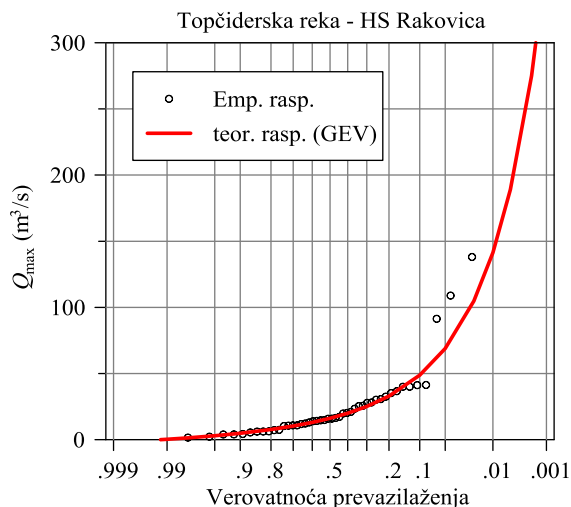
Republički hidrometeorološki zavod osmatra protoke Topčiderske reke na hidrološkoj stanici (HS) Rakovica, do koje površina sliva iznosi 138 km². Podaci osmatranja protoka postoje od 1959. godine uz prekide u periodima 1978-1987, 1994-1995 i 2003. godine. Slika 2a, na kojoj su prikazani srednji godišnji protoci izmereni na ovoj stanici, pokazuje da je u poslednjih 20 godina došlo do povećanja protoka u odnosu na ranije periode. U periodu 1959-1977 prosečni protok je iznosio 0.42 m³/s, u periodu 1988-2015 iznosi 0.66 m³/s, a u poslednjih 20 godina, tj. 1996-2015, iznosi 0.75 m³/s. Ovakva disproporcija nije prisutna u godišnjim padavinama (slika 2a), pa se ne može pripisati promenama u hidrološkom ciklusu već se pre može objasniti urbanizacijom sliva i sve većim ispuštanjem otpadnih voda iz kanizacionog sistema u Topčidersku reku. U prilog ovom zaključku govori i slika 2b na kojoj su prikazani srednji mesečni protoci na HS Rakovica u karakterističnim periodima (do 1977. godine, posle 1988. godine i u poslednjih 20 godina) i na kojoj se vidi sistematsko povećanje prosečnih protoka u svim mesecima.

Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ koristio je sliv Topčiderske reke kao eksperimentalni sliv i počevši od 1977. godine sprovodio merenja na osmatračkoj mreži koja se sastojala od tri pluviografa, dve padavinske stanice i sedam limnigrafa [7], ali je autorima nepoznato do kada je ova eksperimentalna osmatračka mreža radila. Podaci o talasima velikih voda osmotrenih na ovoj eksperimentalnoj mreži nisu bili na raspolaganju za ovu studiju.

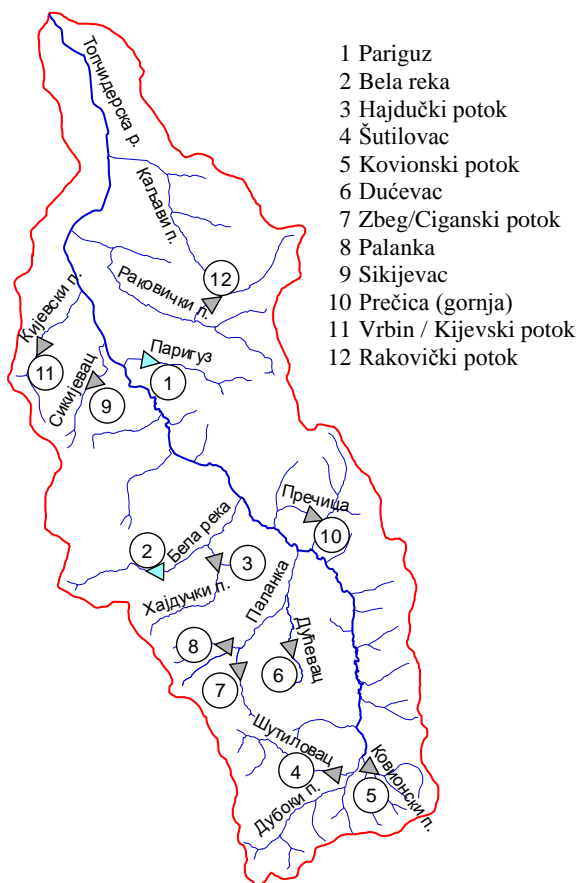
Najveća velika voda na slivu Topčiderske reke zabeležena je u maju 2014. godine, kada su veći deo Srbije zadesile katastrofalne poplave, pa ni Topčiderska reka nije bila izuzetak. Tokom tri dana, od 14. do 16. maja

2014, na pluviografu na GMS Beograd-Observatorija zabeleženo je 192 mm kiše, dok je maksimalni protok na HS Rakovica bio 138 m³/s. Druga najveća velika voda desila se 28-30. avgusta 1985. godine, ali za taj period RHMZ ne raspolaže registrovanim podacima na HS Rakovica. Ovaj događaj je detaljno analiziran u radu Prohaske i sar. [7], gde je opisano da se sliv Topčiderske reke tokom tri dana našao u centru olujnog sistema sa ukupnim padavinama od oko 200 mm. Tokom ovog događaja, najdrastičnije je bilo u slivu Bele reke gde je na eksperimentalnoj vodomernoj stanici sa slivnom površinom od 11 km² registrovan maksimalni protok od 70 m³/s (ili 6.36 m³/(s·km²)), dok je dat podatak da je na HS Rakovica maksimalni protok iznosio 109 m³/s. I tokom ovog događaja došlo je do značajnog izlivanja vode i plavljenja naselja i industrijske zone u srednjem i donjem delu sliva sa značajnom materijalnom štetom. Treća po veličini velika voda na slivu Topčiderske reke zabeležena je jula 1999. godine, kada je na pluviografu GMS Beograd-Observatorija palo 162 mm kiše tokom nepuna dva dana, dok je maksimalni protok na HS Rakovica bio 92.1 m³/s. Ostali godišnji maksimumi protoka na slivu Topčiderske reke bili su bar dvostruko manji od pomenuta tri ekstrema (slika 3).

Uprkos značajnoj količini nedostajućih podataka, određena je raspodela verovatnoće velikih voda na profilu HS Rakovica. U ovom slučaju nije proveravana pretpostavka da su raspoloživi godišnji maksimumi međusobno nezavisni podaci i da potiču iz iste teorijske raspodele jer veći broj prekida obesmišljava primenu statističkih testova homogenosti i slučajnosti. Raspoloživ niz od 46 podataka ima izraženu asimetriju (koeficijent asimetrije iznosi 2.81) zbog tri izuzetne vrednosti maksimalnih protoka, a za teorijsku raspodelu usvojena je opšta raspodela ekstremnih vrednosti (slika 3).



Slika 3. Empirijska i teorijska raspodela maksimalnih godišnjih protoka Topčiderske reke na HS Rakovica za period 1959-2015 (sa prekidima).



Slika 4. Lokacije postojećih i planiranih akumulacija i retenzija u slivu Topčiderske reke.

2.2 Postojeći i planirani objekti za zaštitu od plavljenja

Nakon velike poplave koja se dogodila 1985. godine, izgrađene su dve akumulacije sa osnovnom namenom zaštite nizvodnih površina od plavljenja, i to na potoku Pariguz i na Beloj reci. Pored toga, u poslednjih dvadesetak godina razmatrana je opravdanost izgradnje većeg broja sličnih objekata na celom slivu. U studiji [3] razmatrano je deset planiranih objekata. Lokacije postojećih i razmatranih planiranih objekata označene su na slici 4. Slivne površine do profila ovih objekata su relativno male, od 2.3 do 4.2 km².

Dve postojeće akumulacije Pariguz i Bela reka imaju sličnu konfiguraciju. Za evakuaciju velikih voda ove akumulacije su opremljene bočnim prelivima i tzv. evakuatorima (stabilizatorima nivoa), namenjenim održavanju konstantnog nivoa vode u akumulaciji i fiksiranju zapremine za prijem poplavnog talasa. Obe akumulacije su dimenzionisane da u potpunosti prime velike vode povratnog perioda 1000 godina, dok se veće velike vode evakušu preko preliva.

Planirani objekti su projektovani u različitim projektnim dokumentacijama, uglavnom na nivou studija i generalnih projekata (spisak ove dokumentacije se može videti u studiji [3]). Naručilac studije je predvideo da se deset planiranih objekata realizuje u dve faze, i to:

- faza 1, koja obuhvata tri najnižvodnija objekta, i to: retenziju Rakovica, Vrbin potok i akumulaciju Sikijevac, i
- faza 2, koja uključuje i preostalih sedam planiranih objekata (Prečica gornja, Hajdučki potok, Dućevac, Zbeg, Palanka, Šutilovac i Koviona).

Treba primetiti da su zahtevi naručioca studije u pogledu redosleda uvođenja objekata u suprotnosti sa principom da velike vode treba kontrolisati što uzvodnije, odnosno što bliže mestu nastanka.

Na svim planiranim objektima predviđeni su prelivi za evakuaciju velikih voda povratnog perioda većeg od 1000 godina (verovatnoće prevazilaženja manje od 0.1%). U pogledu ostalih karakteristika, planirani objekti se mogu grupisati na sledeći način:

- Akumulacija Hajdučki potok ima konfiguraciju sličnu postojećim akumulacijama Pariguz i Bela reka. Za evakuaciju velikih voda ove akumulacije su opremljene bočnim prelivima i evakuatorima (stabilizatorima nivoa), namenjenim održavanju nivoa vode u akumulaciji na konstantnom nivou i fiksiranju zapremine za prijem poplavnog talasa.

- Retenzija Vrbin potok je takođe opremljena bočnim prelivom, a umesto evakuatora predviđen je ispust na niskoj koti.
- Akumulacije Koviona, Šutilovac, Dućevac, Zbeg, Palanka i Sikijevac takođe imaju bočne prelive za velike vode, dok se kao stabilizatori nivoa predviđaju vertikalne čelične cevi sa ulazom na koti koja odgovara planiranoj mrtvoj zapremini akumulacija. Ove vertikalne cevi uvode se u temeljni ispust, takođe od čeličnih cevi, koji bi se u fazi gradnje koristio kao privremeno korito, a po završetku gradnje bi se zatvorio na ulazu.
- Retenzija Prečica gornja je predviđena da ima bočni preliv istih karakteristika kao prethodna grupa i stalno funkcionalan temeljni ispust. Zbog male zapremine, smatra se da nije racionalno da funkcioniše kao akumulacija.
- Retenzija Rakovica se koncepcijski razlikuje od ostalih rešenja jer je predviđeno da se sastoji od betonske brane centralno u osi vodotoka kombinovane sa zemljanim bokovima. Centralni betonski deo ima propust kvadratnog poprečnog preseka za male i srednje vode i čeonu preliv praktičnog profila sa stepenastim prelivom na nizvodnom licu brane za disipaciju energije.

2.3 Metodološki pristup

Cilj studije prikazane u ovom radu je bio da se odrede računski hidrografi velikih voda na profilima duž Topčiderske reke i njenih pritoka za postojeće stanje sa dva objekta za zaštitu od plavljenja i za hipotetičko stanje sa još planiranih deset objekata. Da bi se taj zadatak ispunio, bilo je neophodno da se formira hidrološki model kojim bi se simuliralo ponašanje sliva u sadašnjim i u hipotetičkim budućim uslovima. Metodološki, to je urađeno u sledećim koracima:

- razvoj modela na osnovu osmotrenih epizoda padavine-otica,
- formiranje računskih kiša,
- primena modela sa računskim kiša za postojeće stanje (2 akumulacije),
- primena modela za fazu 1 planiranog stanja (2 postojeće i 3 planirane akumulacije) i za fazu 2 planiranog stanja (2 postojeće i 10 planiranih akumulacija),
- analiza efekata planiranih akumulacija.

3. RAZVOJ HIDROLOŠKOG MODELA

Hidrološki model sliva je razvijen kao model epizoda velikih voda pomoću paketa HEC-HMS [8]. Model je

kalibrisan i verifikovan na osnovu podataka o osmotrenim epizodama velikih voda, i to časovnih kiša sa stanice Beograd-Observatorija i časovnih protoka sa HS Rakovica u periodu posle 1991. godine.

3.1 Opis strukture modela

Sliv Topčiderske reke je za potrebe modeliranja dekomponovan na podslivove koji odgovaraju profilima postojećih i planiranih akumulacija i retenzija, kao i ušćima pritoka u Topčidersku reku. Model sliva se sastoji od ukupno 31 podsliva, 20 rečnih deonica, 12 akumulacija i retenzija (2 postojeće i 10 planiranih) i 12 sabirnih čvorova. Skica modela sliva prikazana je na slici 5.

Za modeliranje efektivne kiše izabrana je metoda SCS, prema kojoj se efektivna kiša računa na osnovu pale kiše i dva parametra: broja krive CN i početnih gubitaka. Broj krive CN za svaki podsliv određen je na osnovu namene površina na podslivu. Početni gubici u metodi SCS treba da odlikuju početne uslove vlažnosti sliva. U tipičnim primenama metode SCS pretpostavlja se da početni gubici iznose 20% kapaciteta tla za upijanje vode, ali u realnim epizodama zavise od konkretnih uslova na slivu. Ovaj parametar zato nije kalibrisan, već je podešavan za svaku razmatranu epizodu.



Slika 5. Shematski prikaz konfiguracije hidrološkog modela sliva Topčiderske reke.

Kao model za transformaciju efektivne kiše u hidrogram direktnog oticaja korišćen je Klarkov jedinični hidrogram, koji kombinuje metode izohrona i linearnog rezervoara. Ova metoda ima dva parametra koji definišu oblik jediničnog hidrograma: vreme koncentracije podsliva i koeficijent linearnog rezervoara. Prvi parametar utiče na vreme porasta hidrograma, a drugi na oblik i trajanje opadajuće grane hidrograma. Vreme koncentracije je procenjeno na osnovu fizičkih karakteristika podslivova (kao što su dužina i nagib glavnog toka) pomoću više formula, tako da je više skupova vrednosti vremena koncentracije isprobano u procesu kalibracije modela, a usvojene su vrednosti koje su dale najbolja slaganja. Vrednosti koeficijenta linearnog rezervoara dobijene su usvajanjem optimalnog odnosa prema vremenu koncentracije (usvojeno je da je ovaj koeficijent 1.3 puta veći od vremena koncentracije).

Bazni oticaj je modeliran recesionom metodom iz paketa HEC-HMS. Iako proračun baznog oticaja na slivu Topčiderske reke nije od značaja za talase velikih voda, ovaj deo proračuna je uključen da bi se izbeglo subjektivno odvajanje baznog od direktnog oticaja u osmotrenim epizodama. Parametri ove metode su: početni protok, recesioni koeficijent i relativni protok pri kome prestaje direktni oticaj (u odnosu na maksimalnu ordinatu hidrograma). Nakon analize osetljivosti modela na ove parametre, došlo se do zaključka da njihove vrednosti praktično ne utiču na kvalitet simulacija, pa su za sve podslivove izabrane fiksirane vrednosti recesionog koeficijenta i relativnog protoka pri prestanku direktnog oticaja. Izuzetak je bio početni protok za svaki podsliv, koji je podešavan za svaku epizodu u procesu kalibracije kao početni uslov.

Transformacija hidrograma oticaja u na rečnim deonicama modelirana je metodom Maskingam. Ova metoda ima dva računski parametra: vreme putovanja na deonici K i bezdimenzionalni koeficijent X sa vrednostima između 0 i 0.5 (prva vrednost odgovara najvećem ublaženju talasa po modelu linearnog rezervoara, a druga čistoj translaciji talasa). Pored toga, stabilnost numeričkog proračuna se obezbeđuje podešavanjem broja segmenata unutar deonice (tj. broja računskih koraka po dužini toka Δx) za izabrani vremenski računski korak Δt . U razvijenom modelu izabran je računski korak od 10 minuta, pa je broj prostornih koraka računat kao $K/\Delta t$. Vreme putovanja na deonici K procenjeno je na osnovu dužina i nagiba deonica i procenjenih brzina putovanja vode uz pretpostavke o hrapavosti korita. Analiza osetljivosti je pokazala da izbor vrednosti koeficijenta X nema značajnog uticaja na rezultate, pa je usvojena vrednost $X = 0.25$. Na nekoliko veoma kratkih

deonica, gde je procenjeno vreme putovanja manje od računskog koraka od 10 minuta, umesto metode Maskingam korišćena je čista translacija talasa. Ova metoda ima samo jedan parametar, a to je vreme putovanja talasa.

Retenzioni prostori se mogu predstaviti na različite načine u paketu HEC-HMS. Za model Topčiderske reke izabran je metod sa poznatom zavisnošću izlaznog protoka od zapremine vode u akumulaciji. U ovoj metodi korisnik zadaje dve zavisnosti: zavisnost izlaznog protoka od zapremine vode u akumulaciji (u daljem tekstu: zavisnost zapremina-ispuštanje) i zavisnost zapremine od nivoa vode u akumulaciji (u daljem tekstu: kriva zapremine).

3.2 Postavka modela za postojeće i planirano stanje

U model postojećeg stanja sliva Topčiderske reke uključene su dve postojeće akumulacije (Pariguz i Bela reka), dok su za planirano stanje formirana dva modela za dve faze realizacije planiranih objekata. Svi modeli sadrže sve akumulacije kao čvorove, pri čemu čvorovi planiranih akumulacija nisu aktivni u modelu postojećeg stanja, a u modelu faze 1 nisu aktivni čvorovi iz faze 2.

Podaci o krivama zapremine akumulacija nisu bili dostupni za sve planirane objekte u prethodnoj projektnoj dokumentaciji, pa su u tim slučajevima krive zapremina konstruisane približno između kote koja odgovara mrtvoj zapremini i kote krune brane.

Krive propusnih moći evakuatora i preliva su takođe konstruisane uz određene pretpostavke. Za akumulacije u prvoj grupi (grupe definisane u odeljku 2.2) propusna moć evakuatora je računata kao prelivanje za nivo u jezeru koji ne prelaze kotu vrha ulaznog kraja cevi evakuatora, dok je za više kote računato kao isticanje sa potopljenim ulazom. Sličan proračun sproveden je za isticanje kroz temeljni ispust za retenziju Prečica. Kombinacija vertikalne cevi i cevi temeljnog ispusta u drugoj grupi akumulacija tretirana je kao šahtni preliv. Za retenziju Rakovica tečenje kroz propust je računato kao tečenje sa uzvodnim kontrolnim presekom, najpre kao nepotpoljeno, a zatim kao potopljeno na ulazu.

Kao početni uslov, u hidrološkom modelu je za sve akumulacije pretpostavljeno da se nivo vode pre nailaska talasa nalazi na koti stabilizatora nivoa (evakuatora), a u retenzijama Prečica gornja, Vrbin potok i Rakovica da je izlazni protok jednak dotoku u akumulaciju.

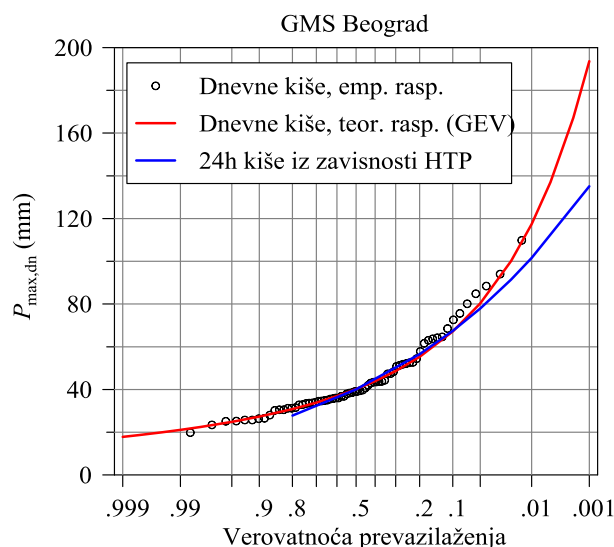
3.3 Računske kiše

Za formiranje računskih kiša na raspolaganju su bile zavisnosti visina – trajanje – povratni period kratkotrajnih jakih kiša za Beograd dobijene od RHMZ-a Srbije. Pored toga, prikupljeni su podaci o godišnjim maksimumima dnevnih kiša za period 1946-2015. Na slici 6 prikazane su empirijska i teorijska raspodela godišnjih maksimuma dnevnih visina kiša (primenjena je opšta raspodela ekstremnih vrednosti), kao i raspodela visina kiša trajanja 24 sata prema podacima dostavljenim iz RHMZ-a. Sa slike se može videti da su računске visine 24-časovnih kiša za male verovatnoće znatno manje od odgovarajućih računskih visina dnevnih kiša. Ovakva situacija nije realna jer 24-časovne računске kiše moraju po svojoj prirodi biti najmanje jednake, a moguće i veće od odgovarajućih dnevnih visina kiša. Kako bi se izbeglo potcenjivanje računskih kiša manje verovatnoće, određene su nove zavisnosti visina kiše – trajanje kiše – povratni period korekcijom dostavljenih zavisnosti. Korekcija je zasnovana na metodi za konsistentno određivanje računskih kiša ([9], [10]), prema kojoj se računski intenziteti kiša mogu prikazati u obliku kojim se razdvaja uticaj trajanja kiše i verovatnoće pojave:

$$i(t_k, T) = \frac{A(T)}{B(t_k)}$$

Prema ovoj metodi, deo $A(T)$ se može shvatiti kao transformisani intenzitet kiše koji ne zavisi od trajanja, pa se do njegovog oblika može doći statističkom analizom transformisanih intenziteta kiše svih trajanja. Deo $B(t_k)$ zavisi samo od trajanja kiše i određuje se iz podataka osmatranja u obliku $B(t_k) = (t_k + c)_m$. U ovoj studiji, prvo je određen deo $B(t_k)$ iz podataka za HTP krivu kako bi se zadržao odnos između intenziteta kiša različitih trajanja, dok je deo $A(T)$ određen iz raspodele dnevnih visina kiše kao $A(T) = B(t_k) \cdot P_{dn}(T) / 24h$ da bi se korigovali intenziteti za različite verovatnoće pojave.

Za proračun računskih velikih voda formirani su računski oblici kiša trajanja 24 sata metodom naizmeničnih blokova, koja obezbeđuje da unutar kiše od 24 sata budu zastupljene i sve računске kiše kraćeg trajanja. Na taj način se omogućava da računске kiše budu primenljive na različite slivne površine i da pri tome daju merodavne računске protoke. Pored toga, kiše trajanja 24 sata su primerene usvojenoj metodi SCS za proračun gubitaka u modelu. Usvojena je diskretizacija računskih kiša sa vremenskim intervalom od 1 čas, što generalno odgovara veličini podslivova u modelu sliva Topčiderske reke i procenjenim vremenima koncentracije za te podslivove.



Slika 6. Raspodela 24-časovnih visina kiša na GMS Beograd-Opservatorija iz zavisnosti HTP i raspodela dnevnih visina kiša izračunata u ovoj studiji.

4. REZULTATI

4.1 Kalibracija i verifikacija modela

Model je kalibrisan i verifikovan na osnovu osmotrenih kiša sa pluviografske stanice Beograd-Opservatorija i registrovanih talasa na HS Rakovica. Broj mernih mesta za padavine i oticaj u ovom slučaju je u velikom raskoraku u odnosu na složenost modela u pogledu dekompozicije sliva (31 slivna površina, 20 rečnih deonica i 2 akumulacije). Veliki broj parametara modela koji treba optimizovati u odnosu na jedan izlazni hidrogram oticaja čini problem kalibracije ovog modela veoma neodređenim.

Pregledom registrovanih hidrograma velikih voda na HS Rakovica može se uočiti širok dijapazon oblika hidrograma, uključujući i različite nagibe rastućih i opadajućih grana hidrograma. To ukazuje na izraženu heterogenost sliva, tj. različite doprinose pojedinih delova sliva u ukupnom oticaju. Takva heterogenost predstavlja veliku prepreku sa gledišta razvoja modela u situaciji kada se ne raspolože hidrološkim osmatranjima na više mernih mesta na slivu. Takođe, nedostatak pluviografskih merenja na više lokacija na slivu ili u njegovoj blizini onemogućava procenu prostorne raspodele padavina na slivu, koja ima veliki uticaj na oblik hidrograma oticaja na profilu HS Rakovica. U kombinaciji sa veoma različitim namenama površina na slivu, od šumskih do urba-

nih, prostorni raspored kiše u situacijama kada kiša ne zahvata ceo sliv može da proizvede veoma različite hidrograme oticaja na izlazu sa sliva. Za kalibraciju i verifikaciju modela je poželjno izabrati epizode za koje je poznato da su zahvatile ceo sliv, ali nedostatak informacija o prostornoj raspodeli padavina otežava prepoznavanje takvih događaja.

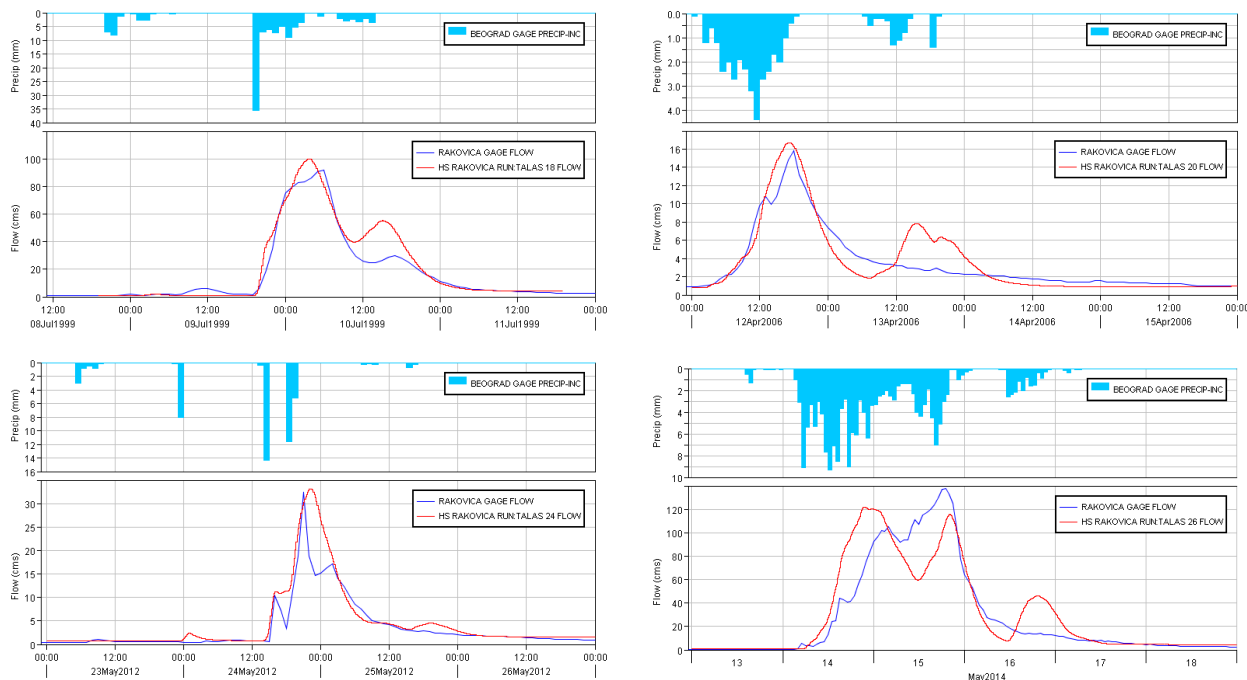
Imajući navedeno u vidu, cilj kalibracije hidrološkog modela Topčiderske reke nije bio da se numeričkom optimizacijom parametara postigne maksimalno moguće slaganje osmotrenih i simuliranih hidrograma, već da se u modelu u najvećoj meri koriste vrednosti parametara koji su procenjeni na osnovu karakteristika sliva čime bi se stvorila solidna fizička osnova da model reprodukuje procese u slivu. Zato je veća pažnja posvećena kvalitativnom slaganju osmotrenih i simuliranih hidrograma nego kvantifikaciji kroz procentualne greške i druge pokazatelje. Pri tome se imalo u vidu da je od najvećeg značaja reprodukcija maksimalnog protoka i zapremine talasa velikih voda. Pored toga, smatralo se da je od većeg značaja reprodukovati rastuću granu hidrograma nego opadajuću, pa se u modeliranju nije težilo idealnim slaganjima opadajućeg dela hidrograma.

U širi izbor talasa uzeti su najznačajniji događaji koji su zabeleženi na HS Rakovica. Nakon preliminarnih ana-

liza, odbačeni su talasi kod kojih količina i dinamika osmotrenih padavina na GMS Beograd nije odgovarala osmotrenim hidrogramima na HS Rakovica. Kalibracija je sprovedena na talasu iz 1999. godine kao jednom od najznačajnijih događaja, a verifikacija na ostalim talasima. U kalibraciji su na izabranom talasu podešeni jedinstveni parametri modela, osim početnih gubitaka u proračunu efektivne kiše i početnog protoka u proračunu baznog oticaja. Ova dva parametra su smatrana početnim uslovima i podešavani su posebno za svaki događaj u verifikaciji. Na slici 7 prikazani su simulirani i osmotreni hidrogrami za kalibracionu epizodu iz 1999. godine i za izabrane verifikacione epizode.

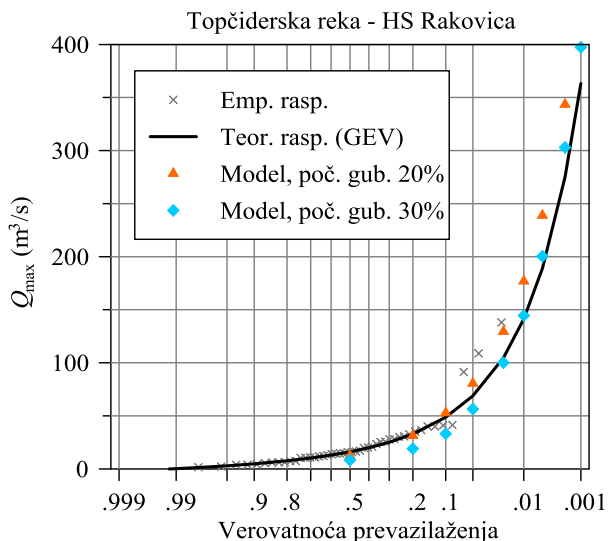
4.2 Velike vode za postojeće stanje

Simulacije oticaja velikih voda su sprovedene pomoću razvijenog hidrološkog modela za postojeće stanje sa dve akumulacije na slivu i računskim kišama kao ulazom. Model je korišćen sa parametrima usvojenim u postupku kalibracije, pri čemu je za parametar početnog baznog oticaja usvojeno da iznosi isto kao i u kalibracionoj epizodi (vrednost ovog parametra ima zanemarljiv uticaj na maksimalni protok). Posle analize osetljivosti, za parametar početnih gubitaka u ovom modelu usvojeno je da iznosi 30% kapaciteta tla za upijanje vode, što je vrednost koja odgovara prethodnoj vlažnosti sliva za



Slika 7. Osmotreni i simulirani hidrogrami oticaja za kalibracioni talas iz 1999. godine i izabrane verifikacione talase.

kalibracionu epizodu. Naime, konstatovano je da su, u zoni verovatnoća od interesa (manjih od 5%), ovako modelirane računске velike vode na profilu HS Rakovica uporedive sa raspodelom velikih voda dobijenom statističkom analizom (slika 8).



Slika 8. Računski protoci dobijeni statističkom analizom i modelom sa računskim kišama uz različite početne uslove vlažnosti sliva.

4.3 Velike vode za postojeće i buduće stanje

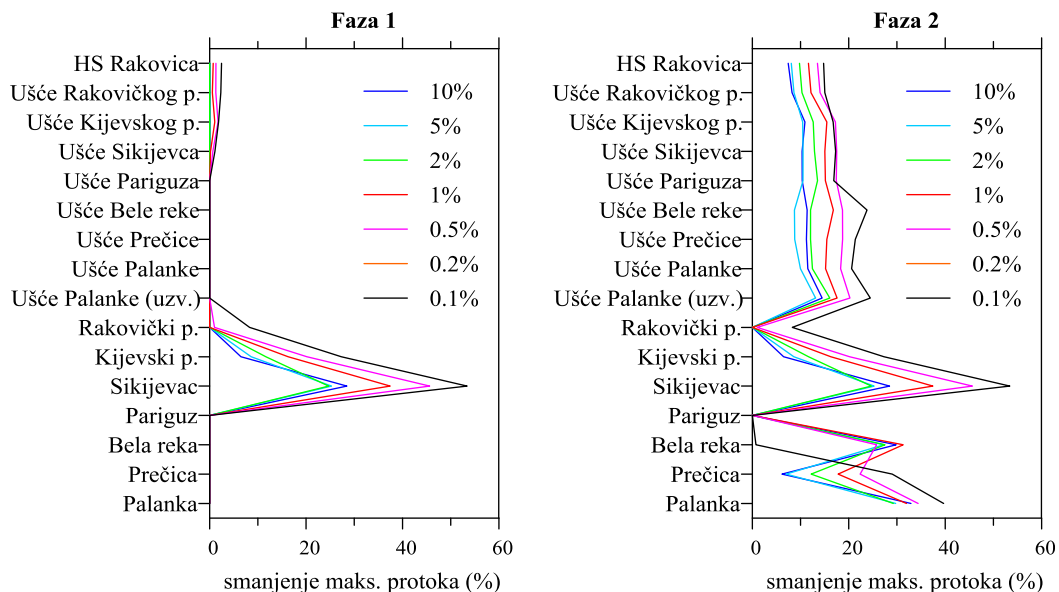
Simulacije oticaja velikih voda za buduće stanje sprovedene su sa planiranim akumulacijama i retenzijama za fazu 1 i za fazu 2. U oba slučaja simulirano je sa parametrima usvojenim u postupku kalibracije, dok je za početni uslov vlažnosti usvojena varijanta tzv. prosečne prethodne vlažnosti sliva prema SCS metodi (početni gubitak iznosi 20% kapaciteta tla za upijanje vode). Ova varijanta je usvojena kao standardna varijanta u proračunima velikih voda za buduće objekte.

Efekat akumulacija na smanjenje velikih voda Topčiderske reke i pojedinih pritoka sa objektima iz faze 1 i iz faze 2 je prikazan na slici 9. Smanjenje je računato kao smanjenje maksimalnog protoka na razmatranom profilu u odnosu na sadašnje stanje. Sa slike 9 se može se videti da je, u opštem slučaju, smanjenje maksimuma poplavnih talasa u odnosu na sadašnje stanje veće za talase manje verovatnoće pojave.

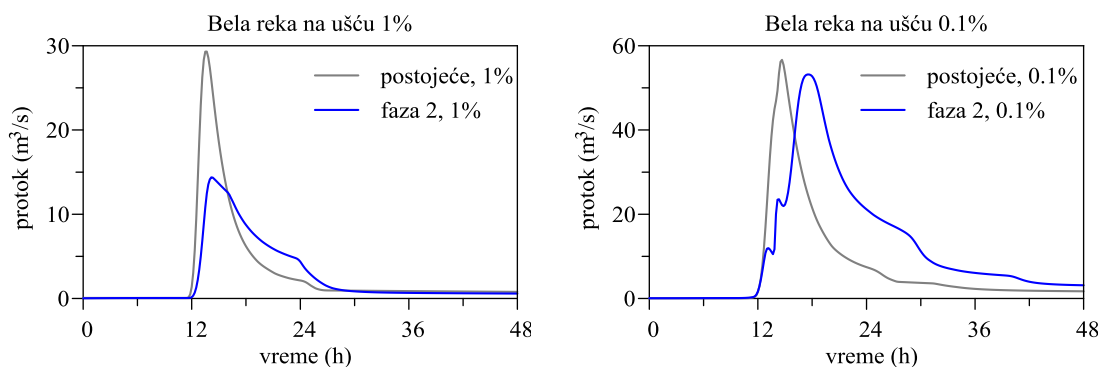
Na osnovu rezultata simulacija velikih voda za postojeće i planirano stanje može se videti da planirani objekti iz faze 1 doprinose smanjenju maksimalnih protoka

samo lokalno, tj. na vodotoku na kojem su predviđeni, dok nemaju značajan uticaj na velike vode Topčiderske reke. Smanjenje na pritokama gde su objekti planirani je različito na tri razmatrana vodotoka, u zavisnosti od odnosa slivnih površina do objekta i do ušća pritoke. Na primer, akumulacija Sikijevac je planirana na lokaciji koja obuhvata 2.34 km² od ukupno 3.12 km² površine sliva potoka Sikijevca, pa u odnosu na postojeće stanje doprinosi smanjenju maksimuma poplavnih talasa na ovoj pritoci od 25% do 51% za različite verovatnoće pojave. S druge strane, retenzija Rakovica je planirana na lokaciji koja obuhvata svega 3.1 km² od ukupno 13.6 km² sliva Rakovičkog potoka, pa doprinosi smanjenju maksimuma na ušću ovog potoka za manje od 8% u odnosu na postojeće stanje. Duž Topčiderske reke efekat zadržavanja talasa u planiranim akumulacijama je mali, jer smanjenja ili nema ili je manje od 3% u odnosu na sadašnje stanje.

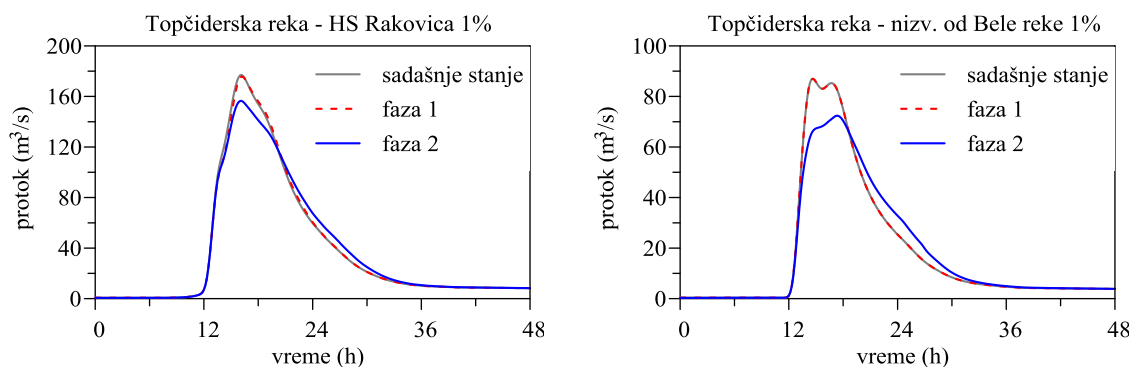
U fazi 2, kada bi se uključile u rad i akumulacije na uzvodnom delu sliva, postiže se značajniji efekat na smanjenje velikih voda duž toka Topčiderske reke u odnosu na postojeće stanje. Dve najuzvodnije akumulacije (Koviona i Šutilovac) doprinose smanjenju maksimuma u Topčiderskoj reci uzvodno od ušća Palanke za 13% do 24%, dok tri akumulacije u podslivu reke Palanke doprinose smanjenju maksimuma na ušću ove reke za 29% do 40%, a na Topčiderskoj reci nizvodno od uliva Palanke smanjenje iznosi od 10% do 22%. Retenzija Prečica gornja smanjuje maksimume poplavnih talasa na reci Prečici za 4% do 29%, dok se maksimumi na Topčiderskoj reci nizvodno od ušća ove pritoke smanjuju za 9%-22%. Akumulacija Hajdučki potok u slivu Bele reke doprinosi na ovoj pritoci smanjenju maksimalnih protoka poplavnih talasa svih verovatnoća osim 0.2% i 0.1% za 27-32% u odnosu na sadašnje stanje kada na ovom podslivu funkcioniše samo akumulacija Bela reka. Za ekstremne velike vode 0.2% i 0.1% akumulacija Hajdučki potok sa projektovanim karakteristikama nema dodatni efekat jer dolazi do preliivanja iz obe akumulacije, pa se izlazni hidrogrami superponiraju međusobno i sa značajnim oticajem sa dela sliva nizvodno od akumulacija. Ovo je ilustrovano na slici 10 gde su prikazani hidrogrami na ušću Bele reke verovatnoća 1% i 0.1%. Smanjenje maksimuma u Topčiderskoj reci nizvodno od ušća Bele reke iznosi od 9% do 24%. Efekti nizvodnih planiranih retenzija se ne osećaju, pa je smanjenje maksimuma nizvodno od ušća Pariguza manje i kreće se od 7% do 18%. Ilustracije radi, na slici 11 prikazani su računski hidrogrami verovatnoća 5% i 1% na dva profila na Topčiderskoj reci (nizvodno od ušća Bele reke i HS Rakovica) za sadašnje stanje i za dve buduće faze.



Slika 9. Smanjenje maksimalnih protoka na Topčiderskoj reci i pritokama uvođenjem u rad planiranih akumulacija za različite verovatnoće velikih voda.



Slika 10. Poređenje računskih hidrograma Bele reke na ušću za sadašnje stanje sa postojećom ak. Bela reka i fazu 2 sa planiranom ak. Hajdučki potok.



Slika 11. Poređenje računskih hidrograma verovatnoće 1% za sadašnje stanje i dve planirane faze na dva profila na Topčiderskoj reci.

Iako su prelive svih akumulacija dimenzionisani tako da do preliivanja dođe pri pojavi velikih voda većih od 1000-godišnjeg protoka, simulacije sa pretpostavljenim karakteristikama evakuacionih organa su pokazale da do preliivanja dolazi i pri talasima velikih voda manjih povratnih perioda (to je slučaj kod planiranih akumulacija Hajdučki potok, Koviona, Sikijevac i retenzija Vrbina potok i Rakovica, kao i kod postojećih akumulacija Pariguz i Bela reka). Kod akumulacija Pariguz i Hajdučki potok do preliivanja dolazi čak i pri 100-godišnjim velikim vodama, što ukazuje na to da su u ovoj studiji procenjene računске velike vode veće od onih koje su bile procenjene u momentu projektovanja ovih akumulacija, odnosno, da su u ovom trenutku njihovi evakuacioni organi poddimenzionisani.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu svih rezultata i prethodno iznetih zaključaka, ističu se dva najvažnija aspekta. Prvo, rezultati su pokazali da se najveći deo velikih voda formira u gornjim delovima sliva i da je njihovo zadržavanje u planiranim akumulacijama u tom delu iz faze 2 od mnogo većeg značaja za kontrolu velikih voda na donjem toku Topčiderske reke nego u nizvodnim objektima iz faze 1, čiji je efekat vidljiv samo na pritokama Topčiderske reke na kojoj se nalaze, a ne i na samoj Topčiderskoj reci. Takođe, čak i sa svim planiranim akumulacijama, efekat ublaženja maksimalnih protoka ne prelazi 20% u odnosu na postojeće stanje, pa se može postaviti pitanje isplativosti izgradnje svih ovih objekata u odnosu na postignut efekat. Najverovatniji razlog za ovako mali efekat planiranih objekata je to što oni kontrolišu velike vode sa malih slivnih površina do oko 4 km², pa se za 12 objekata može grubo reći da kontrolišu velike vode sa manje od polovine sliva. Ipak, treba reći da u vezi sa efektom rada objekata postoji određena neizvesnost jer su simulacije velikih voda sprovedene sa pretpostavljenim karakteristikama postojećih i planiranih objekata u pogledu retenziranja talasa velikih voda. Precizniji rezultati o efektima rada ovih objekata mogli bi se sagledati ako bi postojali precizniji podaci o akumulacijama kao što su krive zapremine i pažljivije konstruisane zavisnosti propusne moći evakuacionih organa od nivoa i zapremine vode u akumulaciji.

Drugi aspekt se odnosi na činjenicu da se najbrži oticaj javlja sa najnižvodnijeg urbanizovanog dela sliva, gde nisu predviđene nikakve mere za kontrolu velikih voda. Na tim delovima sliva bi svakako trebalo predvideti savremene pristupe kontrole kišnog oticaja, bilo u obliku mera zasnovanih na infiltraciji, bilo mera na zadržavanju vode u mikro retenzijama koje bi se urbanistički

uklopile u postojeću infrastrukturu i doprinele kvalitetu života u ovim naseljima.

Na kraju, prikazani primer jasno ukazuje da neplansko i nekontrolisano širenje urbanih zona, koje je rezultat odsustva razvojne politike ili njene loše primene, ne predstavlja poželjan pravac urbanog razvoja jer dovodi do povećanih rizika od plavljenja i smanjenja manevarskog prostora za zaštitu od plavljenja. Samo jedna vrsta mera obično nije dovoljna kao rešenje za ove probleme. Kako pronalaženje sveobuhvatnih i pouzdanih rešenja nije jednostavno, mora se poći od izrade strategije za integralno uređenje slivnih površina uz tesnu saradnju vodoprivrede i urbanog planiranja.

ZAHVALNOST

Rad je nastao u okviru projekta „Hidrološko-hidraulička analiza sliva Topčiderske reke sa Idejnim rešenjem regulacije vodotoka za prvu fazu realizacije“ koji je finansirala Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju grada Beograda, dok su u radu korišćeni i rezultati istraživanja iz projekta tehnološkog razvoja TR 37010 kod Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja pod nazivom „Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture“.

LITERATURA

- [1] Davies A.P. and McCuen R.H. (2005) *Stormwater management for smart growth*. Springer.
- [2] Braud I., Fletcher T.D., Andrieu H. (2013) Hydrology of peri-urban catchments: processes and modelling. *Journal of Hydrology*, 485: 1-4.
- [3] Blagojević V., Sudar N., Vukićević M., Đorđević B. (2015) Urbana regulacija i integralno uređenje dolinskog prostora, na primeru reke Bosne u zoni grada Doboja. *Vodoprivreda*, 47(4-6), str. 301-310.
- [4] Ehting (2017) Hidrološko-hidraulička analiza sliva Topčiderske reke sa Idejnim rešenjem regulacije vodotoka za prvu fazu realizacije. Investitor: JP Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju Beograda.
- [5] Institut „Jaroslav Černi“ (2005) Generalni projekat regulacije malih vodotoka u slivu Topčiderske reke – Dućevac i Palanka, investitor: JVP Srbijavode.
- [6] Petrović A., Kovačević-Majkić J., Milošević M. (2016) Application of run-off model as a contribution to the torrential flood risk management in Topčiderska Reka watershed, Serbia. *Natural hazards*, 82: 1743-1753.

- [7] Prohaska S., Matović Ž., Spasova D. (1987) Hidrološka analiza poplavnog talasa u slivu Topčiderske reke iz perioda 28-30. VIII 1985. god., *Vodoprivreda*, 19 (1-2), str. 29-42.
- [8] Hydrologic Engineering Center (2016) Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, Version 4.2, US Army Corps of Engineers.
- [9] Koutsoyiannis D., Kozonis D., Manetas A. (1998) A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206: 118-135.
- [10] Plavšić J., Topalović Ž., Despotović J. (2015) Konsistentno određivanje računskih kiša, *Vodoprivreda*, 47(4-6), str. 151-159.

EFFECTS OF PLANNED RETENTION BASINS FOR FLOOD ATTENUATION IN THE TOPČIDERSKA RIVER CATCHMENT

by

Jasna PLAVŠIĆ

University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering, jplavsic@grf.bg.ac.rs

Danijela JELUŠIĆ, Dragomir JEVTIĆ

Ehting d.o.o., Belgrade

Summary

The paper presents a study of the effects of the planned retention basins for attenuation of floods. A rainfall-runoff event model is developed for this study for simulations of flood hydrographs of the Topčiderska River and its tributaries at sites of the existing and planned retention basins and other important sections. The model is calibrated and evaluated using the observed rainfall events and runoff hydrographs at the Rakovica hydrologic station, and applied with design storms as the input for simulation of flood hydrographs in present conditions and in future at all key locations in the basin. The results have shown that the effects of three most downstream retention basins are negligible, while the effects of the retention basins from the head parts of the

catchment on the downstream reaches of the Topčiderska River are greater, providing attenuation of flood peaks by 10% to 20%, depending on the section and return period. The results clearly show that additional measures for flood control are necessary in this catchment, especially in its most downstream and most urbanized part, as well as the measures for preventing uncontrolled urban sprawl that could even worsen the conditions for generation of flood runoff in this peri-urban catchment.

Key words: flood flows, rainfall-runoff model, observed events, design storms, design flows, Topčiderska River, retention basins, small reservoirs.

Redigovano 4.11.2018.