

IZBOR OBLIKA I TRAJANJA TALASA VELIKIH VODA U METODI BILANSIRANOG HIDROGRAMA

Borislava BLAGOJEVIĆ * i Vladislava MIHAILOVIĆ **

* Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

** Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

Hidrogram velikih voda je potreban za mnoge namene u toku projektovanja hidrotehničkih objekata i sprovođenja različitih vodoprivrednih mera. Računski hidrogram velikih voda u profilima hidroloških stanica se određuje na osnovu statističke analize karakterističnih veličina, koja kao rezultat daje vršni protok, zapreminu i oblik hidrograma. Metoda bilansiranog hidrograma za određivanje računskog hidrograma koristi zadati oblik opaženog hidrograma i rezultate statističke analize zapremina različitih trajanja. Cilj rada je da se prikažu mogući pristupi prilikom izbora trajanja i oblika zabeleženih talasa za dobijanje računskih bilansiranih hidrograma različitih povratnih perioda. Odabrane stanice su Pirot (r. Nišava) i Senta (r. Tisa), značajno različitih površina sliva i ponašanja u periodu nailaska velikih voda. Na ove dve stanice su primenjeni različiti postupci za izdvajanje karakterističnih poplavnih epizoda u okviru kojih se bliže određuju karakteristični oblik i trajanje bilansiranih računskih hidrograma. Takođe je prikazano i nekoliko tehnika za obradu ordinata računskih bilansiranih hidrograma, kojima se vrši izgladivanje hidrograma u fazi podizanja i opadanja.

Ključne reči: velike vode, oblik talasa, trajanje talasa, epizode suficita, bilansirani hidrogram

1. UVOD

Kada se izučavaju velike vode za potrebe hidrotehnike i vodoprivrede, najčešće se analiziraju maksimalni protoci – vršne ordinate hidrograma velikih voda, zatim zapremine talasa, a za neke namene traži se i poznavanje celog hidrograma [10]. Na hidrološki izučanim profilima, na kojima ima dovoljno podataka osmatranja protoka za statističku analizu, moguće je primeniti statističke metode. Međutim, kada su u pitanju

zapremine talasa, metodologiju statističke analize treba primenjivati sa dozom opreza, zbog toga što talasi imaju različita trajanja i moguće različite uzroke (sneg, kiša i kombinacija) [4].

U domaćoj praksi se koriste dve metode za određivanje računskih hidrograma u izučanim profilima: metoda oblika hidrograma [8] ili njena varijanta, tipski hidrogram [12] i kompozicioni postupak [11], [19]. Obe metode se zasnivaju isključivo na podacima osmatranja protoka. U nedavno objavljenoj monografiji [13], prikazani su računski hidrogrami u profilima 143 hidrološke stanice (HS) na teritoriji Srbije. Hidrogrami su određeni po navedenim metodama, a uz njih i po metodi graničnog intenziteta oticaja, po kojoj se kao ulazni podaci koriste padavine.

Postupak po metodi oblika hidrograma podrazumeva određivanje jedinstvenog hidrograma oticaja u bezdimenzionalnom obliku, kao i analizu verovatnoće pojave vršnih protoka i zapremina talasa direktnog oticaja. Iz osmotrenih talasa se razdvajaju bazni i direktni oticaj, pa za svaki talas računa koeficijent punoće koji predstavlja odnos zapremine i proizvoda trajanja i maksimalne ordinate talasa. Dalje se obrađuju samo talasi direktnog oticaja – pretvaraju se u bezdimenzionalni oblik i osrednjavaju u celom periodu obrade. Na osnovu bezdimenzionalnog osrednjenog hidrograma i srednjeg koeficijenta punoće rekonstruiše se hidrogram željene verovatnoće pojave. Ordinate hidrograma se dobijaju preko maksimalnog protoka koji ima tu verovatnoću pojave. Da bi se dobio konačni računski hidrogram, na krajeve ovako dobijenog hidrograma treba dodati još i bazni oticaj. Nedostatak ove metode je u tome što ne daje jednoznačne rezultate, najviše zbog toga što je potrebno odvojiti direktni oticaj, a to kod složenih talasa može biti komplikovano. Takođe, bazni oticaj koji se na kraju postupka “vraća” na hidrogram, osrednjava se na početku i na kraju

talasa. U metodi tipskog hidrograma, početna obrada talasa se razlikuje po tome što se umesto promenljivog baznog protoka uzima konstantna vrednost. Za tu vrednost se može uzeti i srednja vrednost protoka [13]. Kako se ističe u [13], potencijalni nedostatak metode tipskog hidrograma su širok opseg u kome varira koeficijent punoće talasa i nejednoznačna veza maksimalnih protoka i zapremina talasa.

Kompozicioni postupak se zasniva na statističkoj analizi zapremina talasa različitih trajanja. Osnovna pretpostavka je da isti odnos verovatnoće maksimalne ordinate i zapremine talasa u celoj sezoni velikih voda važi i u kraćim periodima, za pojedinačne talase ili epizode [19]. Posmatraju se svi talasi koji se nalaze pre i posle vršnog protoka. Zapremine se formiraju naizmeničnim dodavanjem (blokova) zapremina iz rastuće i opadajuće grane hidrograma, širenjem vremenskog intervala. Na osnovu priraštaja zapremine razmatranog povratnog perioda u različitim vremenskim intervalima dobijaju se protoci tog povratnog perioda.

Metoda bilansiranog hidrograma ima sličnosti sa obe navedene metode. Formiranje zapremina za statističku analizu je slično kao kod kompozicionog postupka, a traži se oblik hidrograma koji će se "očuvati", kao u metodi oblika/tipskog hidrograma. Kod ove metode se isti oblik osmotrenog hidrograma primenjuje za sva trajanja talasa, a zapremine dobijene statističkom analizom se iterativnim postupkom uklapaju u taj oblik. Ova metoda je postojala u Preporukama za proračun velikih voda u USA, Biltenu 17B [7], a preuzeta je bez izmena i u njegovoj reviziji, Biltenu 17C [6].

Cilj istraživanja je prikaz analize zabeleženih talasa velikih voda radi usvajanje oblika hidrograma, kao i izbora trajanja talasa, u postupku dobijanja računskog hidrograma metodom bilansiranog hidrograma, na primeru dve suštinski različite HS. Razlike u površini pripadajućeg slivnog područja stanicama i načinu formiranja velikih voda, omogućile bi da se sagledaju najprikladniji načini izbora talasa velikih voda prilikom primene metode bilansiranog hidrograma u hidrološkoj/hidrotehničkoj praksi.

2. METODOLOGIJA

2.1 Ulazni podaci

Procedura proračuna bilansiranog hidrograma sprovodi se na potpunom nizu zabeleženih protoka, bilo da su oni dnevni ili časovni. Izbor HS za sprovođenje ovog istraživanja je, prema tome, uslovljen obimom dnevnih, javno dostupnih podataka osmatranja.

Prema [9], na slivovima koji imaju manju površinu (200 - 1000 km²) u modeliranju velikih voda treba koristiti vremensku rezoluciju kraću od jednog dana. Pored toga, prilikom izbora HS trebalo bi voditi računa i o uticaju zastupljenosti trenutnih maksimuma u nizu godišnjih maksimuma, koji utiče na vrednost dobijenih kvantila velikih voda [5]. Ispitivanje podobnosti nizova godišnjih maksimuma za statističku analizu na sedamnaest HS, obavljeno je u prethodnim istraživanjima na nizovima formiranim za kalendarsku godinu [5] i hidrološku godinu [3]. Ispitivano je i stanje podataka na HS osmatračke mreže površinskih voda Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZS) u smislu podobnosti za statističku analizu, preko uobičajenih testova [5].

HS Pirot na reci Nišavi izabrana je kao jedina stanica koja u periodu osmatranja ima sve trenutne maksimume godišnjih protoka i sa površinom slivnog područja od 1745 km² omogućava da se analiza nesmetano sprovede na srednjim dnevnim podacima. Od stanica koje imaju značajnu površinu sliva, na koju u analizi velikih voda nema uticaj zastupljenost trenutnih maksimuma u nizu godišnjih maksimuma, izabrana je HS Senta na reci Tisi, površine sliva 141715 km². Ova stanica ima potpun niz podataka osmatranja srednjih dnevnih protoka počevši od 1931. godine.

Uvažavajući rezultate testiranja podobnosti za statističku analizu, ulazni podaci o protocima na HS Pirot (RHMZS, -) su nizovi osmotrenih srednjih dnevnih protoka u periodu 01.10.1977 - 30.09.2020. i odgovorajući niz osmotrenih godišnjih maksimuma u hidrološkoj godini (01.10-30.09.). Problem nedostatka podataka osmatranja u celoj kalendarskoj 1985. godini je prevaziđen tako što je ta godina preskočena u analizi zapremina, a u analizi verovatnoće pojave maksimalnih godišnjih protoka, podatak koji nedostaje nadoknađen je preko praga percepcije – intervalnoj predstavi podataka preko donjeg i gornjeg praga percepcije [1], koji se koristi u novim Preporukama za proračun velikih voda u SAD – Biltenu 17 C [6].

Ulazni podaci o protocima na HS Senta (RHMZS, -) su nizovi osmotrenih srednjih dnevnih protoka u periodu 01.10.1931 - 30.09.2016. i odgovorajući niz osmotrenih godišnjih maksimuma u hidrološkoj godini (01.10-30.09.). Podaci su, na osnovu primenjenih testova, u celom periodu od početka osmatranja podobni za statističku analizu.

Obe izabrane stanice nisu u potpuno prirodnom režimu. HS Pirot zbog rada Hidroelektrane 'Pirot' od 1990. godine, a HS Senta, zbog obimnih hidrotehničkih

intervencija u slivu, pre ulaska u našu zemlju. Prilikom interpretacije rezultata istraživanja o ovoj činjenici se vodilo računa.

2.2 Bilansirani hidrogram

Računski bilansirani hidrogram dobija se kroz proceduru koja se sastoji od dve glavne faze sprovedene u istraživanju pomoću softverskog paketa HEC-SSP, verzija 2.2 [18]. U prvoj fazi analiziraju se zapremine [16], a u drugoj se korišćenjem tih rezultata bilansiraju hidrogrami željenih verovatnoća pojave [17]. Procedura dobijanja merodavnog bilansiranog hidrograma podrazumeva i pripremnu fazu (pretprocesiranje) i naknadnu fazu obrade rezultata (postprocesiranje). Naglasak u ovom istraživanju je stavljen na pretprocesiranje podataka osmatranja, a delimično i na postprocesiranje.

Prva faza obuhvata statističku analizu zapremina talasa različitih trajanja, a kao rezultat se dobijaju krive protok-trajanje-povratni period (QTP). (Zapremine talasa su izražene kao prosečni protoci.) Moguće je birati između četiri teorijske raspodele za modeliranje QTP krivih (normalna, log-normalna, Pirson3 i log-Pirson3). Postupak treba ponoviti ukoliko se uoče nelogični rezultati – preklapanje krivih verovatnoće za različita trajanja. Tada je moguće izabrati drugu teorijsku raspodelu, a može se i blago korigovati nagib krive koja odstupa od opšte tendencije promenom statistika raspodele.

U drugoj fazi se proračunava bilansirani hidrogram, na osnovu zadatog oblika hidrograma i rezultata iz prve faze analize. Ova faza ima nekoliko koraka: (i) odabir talasa (iz osmotrenog hidrograma srednjih dnevnih protoka), koji će biti uzet kao model za oblik hidrograma; (ii) definisanje trajanja za koja će hidrogrami biti bilansirani (ne moraju se odabrati sva trajanja za koja su određene QTP krive); (iii) izračunavanje bilansiranog hidrograma. Postupak je iterativan, pošto je potrebno ispitati nekoliko oblika talasa i za svaki od njih nekoliko kombinacija trajanja, da bi se dobio konačni bilansirani hidrogram.

Konačni bilansirani hidrogram se prikazuje preko srednjih vrednosti protoka u intervalu za koji je definisan oblik talasa, pri čemu su vrednosti protoka na početnu i na kraju jednake osmotrenim (nema potrebe za rekonstrukcijom). Kvantili trenutnih vrednosti protoka mogu se ubaciti u bilansirane hidrograme na odgovarajućem mestu, ali i ne moraju, jer je utvrđeno da za zapremine ova intervencija nije relevantna [4].

2.3 Definisane kriterijuma za izbor oblika hidrograma


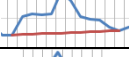
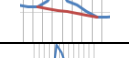
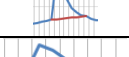
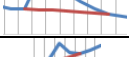

Izborom oblika talasa teži se da se odrazi kritično ponašanje sliva u periodu velikih voda, koje se može izabrati i s obzirom na namenu proračuna.

U istraživanju su postavljeni sledeći kriterijumi za uži izbor talasa za stanicu manje površine sliva, HS Pirot [2]:

1. Talas sa najvišom zabeleženom trenutnom vršnom ordinatom – Q_{max} (IDF),
2. Talas sa najvišom zabeleženom srednjom dnevnom ordinatom – Q_{max} (MDF),
3. Talas najveće zapremine direktnog oticaja – V_{dmax} ,
4. Talas najveće ukupne zapremine oticaja – V_{max} ,
5. Talas najdužeg trajanja direktnog oticaja – T_{bmax}
6. Najintenzivniji talas – $(V/T_b)_{max}$
7. Najintenzivniji talas u fazi porasta – $(V_p/T_p)_{max}$
8. Najkraće vreme porasta talasa – T_{pmin}
9. Talas za koji je dobijena najveća vrednost koeficijenta punoće $(\alpha=V/Q_{max} \cdot T_b) - \alpha_{max}$,
10. Simetričan talas – preporuka iz literature [4].

Tabela 1 sadrži talase koji ispunjavaju postavljene kriterijume na HS Pirot. Nekoliko talasa ispunjava više njih, što je i očekivano.

Tabela 1. Izdvojeni godišnji talasi velikih voda na HS Pirot i HS Senta koji zadovoljavaju postavljene kriterijume za izbor oblika hidrograma (Preuzeto iz [2]).

Ispunjava kriterijum #	Datum pojave trenutne vršne ordinate - Q_{max} (IDF)	Oblik zabeleženog hidrograma
1, 2, 4, 10	14.03.1981.	
3, 5, 10	28.05.2012.	
6	11.01.2003.	
7, 8	01.04.1987.	
8	09.05.1989.	
9	28.03.1988.	

Pretprocesiranje talasa na HS Pirot i proračun osnovnih karakteristika, podrazumevali su odvajanje direktnog i baznog oticaja, u smislu procene početka i kraja direktnog oticaja. Kod opadajućih grana bez sekundarnih talasa, primenjena je logaritamska transformacija recesione grane hidrograma da bi se

precizno odredio kraj direktnog oticaja (npr. talasi iz 1987, 1989. i 2003.). Utvrđena su orijentaciona trajanja za razmatranje u metodi bilansiranog hidrograma, tako da je ova pripremna analiza neophodna da bi mogao da se stekne uvid u talase.

U retkim situacijama zabeleženim na HS Pirost, dešavalo se da se dan pojave maksimalne srednje dnevne ordinate $Q_{max}(MDF)$ ne poklapa sa danom pojave maksimalne trenutne ordinate $Q_{max}(IDF)$ u istoj hidrološkoj godini. Talasi su tom prilikom uzimani u uži izbor samo ukoliko su deo iste poplavne epizode.

Identifikacija karakterističnih talasa velikih voda na HS Senta je urađena metodom pragova. Pragovi su postavljeni tako da predstavljaju protoke koji odgovaraju koti redovne odbrane od poplava ($Q_{prag1} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$) i koti vanredne odbrane od poplava ($Q_{prag2} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$). Na taj način su obuhvaćene sve epizode suficita protoka (odnosno zapremina) u godinama u kojima je došlo do prekoračenja ovako definisanih pragova.

Za svaku izdvojenu epizodu iznad praga posmatrane su po tri vrednosti karakteristika epizoda suficita: Zapremina – V_{suf} , intenzitet – $I_{suf} = V_{suf}/T_{suf}$ i trajanje – T_{suf} .

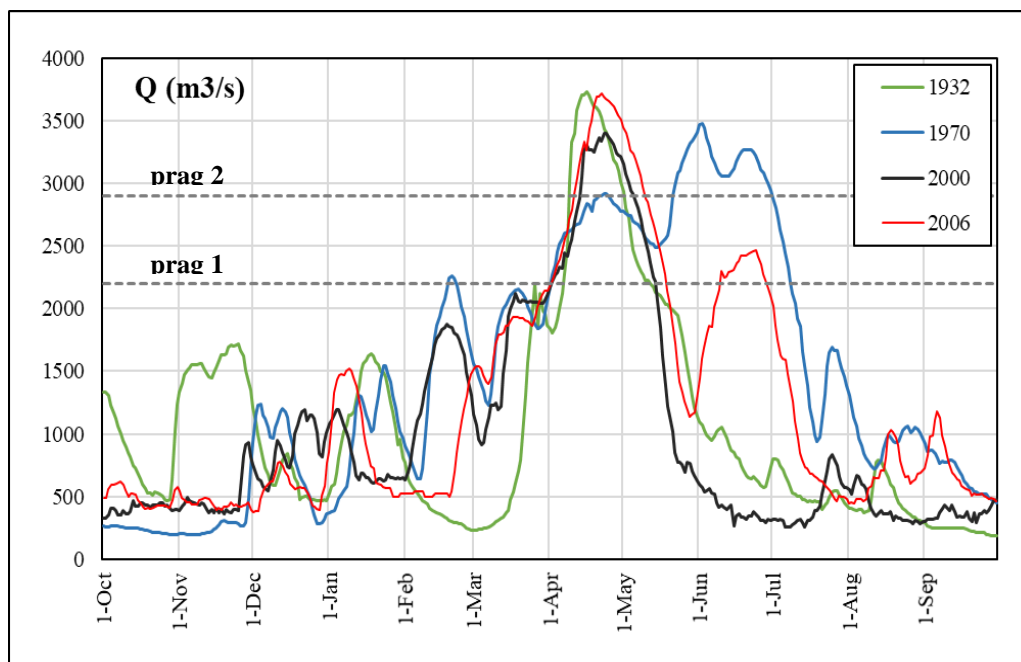
Prema navedenim karakteristikama epizoda suficita postavljeni su sledeći kriterijumi za izbor oblika (i trajanja) talasa na HS Senta:

1. Zapremina preko praga 1 – V_{suf1}
2. Intenzitet preko praga 1 – $I_{suf1} = V_{suf1}/T_{suf1}$
3. Trajanje preko praga 1 – T_{suf1}
4. Zapremina preko praga 2 – V_{suf2}
5. Intenzitet preko praga 2 – $I_{suf2} = V_{suf2}/T_{suf2}$
6. Trajanje preko praga 2 – T_{suf2}
7. Najveći zabeleženi protok (godišnji) - Q_{max}

U okviru svakog kriterijuma, potom su rangirani talasi, tako što je najvećim realizovanim veličinama prema svakom pojedinačnom kriterijumu dodeljena vrednost 1, sledećem, 2 itd. Na osnovu vrednosti prosečnog ranga talasa iz pojedine godine, izvršen je konačni izbor talasa (Tabela 2). Godišnji hidrogrami četiri talasa iz konačnog izbora prikazani su na Slici 1.

Tabela 2. Rangovi godišnjih talasa velikih voda na HS Senta prema postavljenim kriterijumima za izbor talasa

HG	Kriterijum #							Konačno
	1	2	3	4	5	6	7	
1932	4	1	10	2	1	4	1	3
1940	8	5	11	6	3	6	4	6
1941	2	6	3	5	6	3	6	4
1970	1	3	1	3	5	1	3	1
2000	5	4	7	4	4	5	5	5
2006	3	2	5	1	2	2	2	1



Slika 1. HS Senta – Godišnji hidrogrami protoka najvećih zabeleženih epizoda velikih voda

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Veza računskih protoka i zapremina hidrograma

Provera veze protoka i zapremina talasa različitih trajanja je neophodan korak u procesu provere podobnosti talasa za bilansiranje. Takva provera je ovde izvršena nanošenjem vrednosti kvantila protoka različitih trajanja iz talasa koji su ušli u uži izbor (Tab. 1 i Tab. 2) na QTP krive (Slika 2 i Slika 3). Ispravna veza bi se manifestovala porastom vrednosti protoka i smanjenjem verovatnoće prevazilaženja sa smanjenjem trajanja talasa.

Sa Slike 2 za HS Pirost, očigledno je da su od izabranih šest talasa, kod jednog talasa tačke raspoređene u skladu sa očekivanjima (2012. god.), a kod jednog sasvim suprotno (1988. god.). Kod ostalih talasa raspored se menja sa promenom trajanja talasa, što ukazuje da su mehanizmi generisanja talasa različitih trajanja različiti i da talasi nisu iz iste epizode velikih voda. Na ovaj način mogu se eliminisati i talasi u kojima se tokom trajanja hidrograma velikih voda meša uticaj rada HE Pirost.

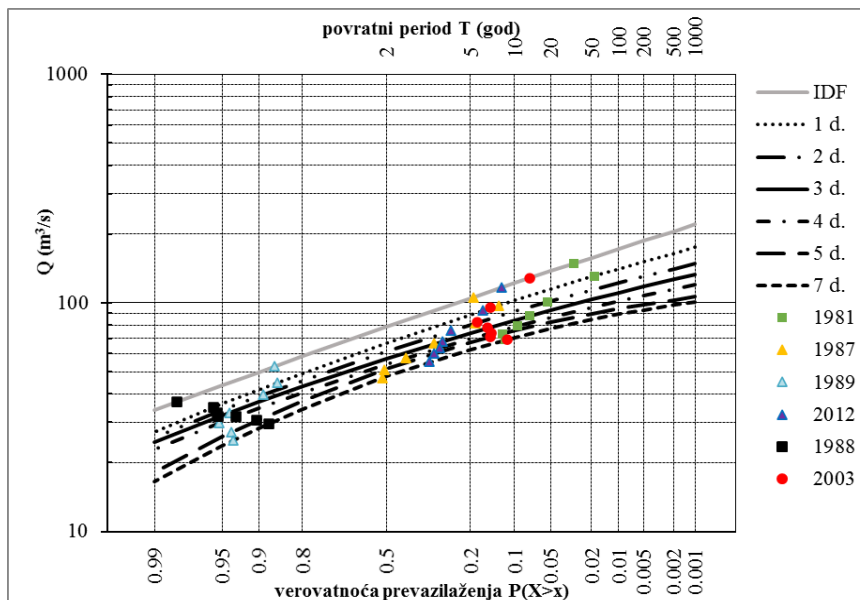
Kada je trajanje talasa u pitanju, sa Slike 2 se uočava da trajanje 7 dana svakako treba odbaciti zbog talasa iz 1981. god. a zbog talasa iz 1989. god. ne bi trebalo uzeti u obzir trajanja 5 i 7 dana. Talas iz 2003. godine pokazuje povezanost protoka i zapremina samo za

kratka trajanja talasa – 1 i 2 dana, zbog toga što za veća trajanja obuhvata predtalas, tako da se nadalje neće uzimati u obzir.

Prema razmatranjima QTP krivih i kvantila protoka/zapremina i preliminarno odabranih talasa, bilansirane hidrograme na HS Pirost bi trebalo uraditi za sve talase (osim za 1988. i 2003.) uz odabrana trajanja 1, 2, 3 i 4 dana.

Probom izrade bilansiranih hidrograma za trajanja duža od 4 dana, na opadajućoj i/ili rastućoj grani hidrograma, dobijen je nemoguć redosled verovatnoća prevazilaženja (npr 0.1% ispod 1 i 2 %, itd.), što pokazuje da je prikazana kontrola veze protoka i zapremina potrebna da bi se odabrao opseg trajanja talasa za bilansiranje i suzio set registrovanih talasa za izbor oblika.

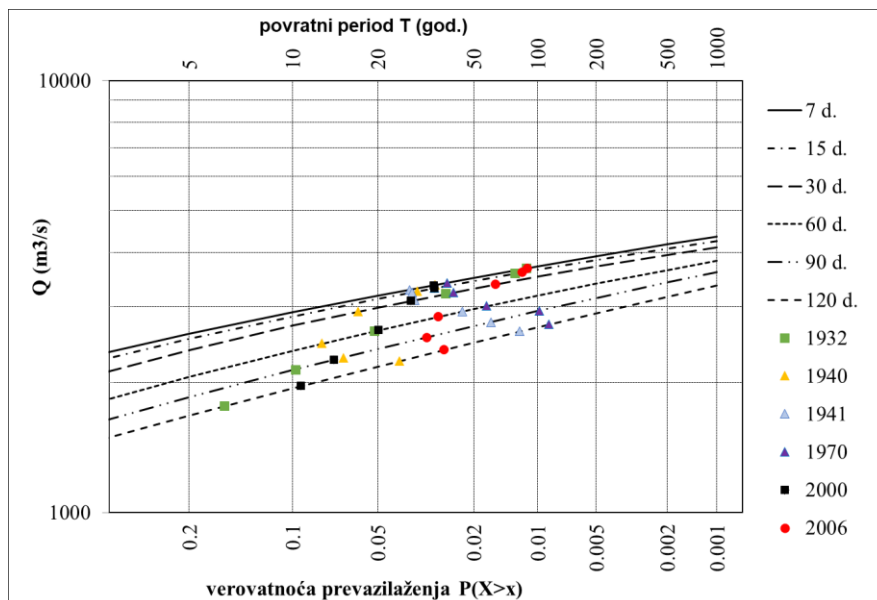
Od epizoda navedenih u Tabeli 2, na HS Senta iz daljeg razmatranja su isključene godine (talasi) kod kojih je raspored tačaka na dijagramu QTP (Slika 3) takav da sa porastom Q raste i verovatnoća prevazilaženja (najveći Q ima najmanji povratni period - najveću verovatnoću prevazilaženja). Na primer, takvi su talasi iz 1970 i 1941. godine. Ovaj dijagram može da detektuje i talase kojima prethode ili iza kojih sledi bliska epizoda velike vode, kada su tačke raspoređene nepravilno, kao npr. za 1940. godinu.



Slika 2. HS Pirost: Krive protok-trajanje-povratni period (QTP) i karakteristični kvantili protoka različitog trajanja zabeleženih poplavnih talasa (Preuzeto iz [2]).

Talasi koji su uzeti u razmatranje na HS Senta su iz 1932, 2000. i 2006. godine, a trajanja, zaključno sa 90

dana, zbog anomalije koju pokazuje talas iz 2006. za trajanje 120 dana.



Slika 3. HS Senta: Krive protok-trajanje-povratni period (QTP) i karakteristični kvantili protoka različitih trajanja zabeleženih poplavnih talasa.

3.2 Računski bilansirani hidrogram

Bilansirani hidrogrami na HS Piro, prikazani na Slici 4 levo, dobijeni su za trajanja 1 do 4 dana, verovatnoće prevazilaženja 0.1 %, 1 %, 2 % i 5 %, korišćenjem oblika registrovanih talasa iz sledećih godina: 1981, 1987, 1989, i 2012.

Način na koji bilansirani hidrogram koristi odabrani oblik talasa, najbolje se može uočiti sa Slike 4 levo. Odabrano trajanje talasa je četiri dana i izračunate su po četiri ordinate bilansiranog hidrograma za svaku verovatnoću pojave. Te ordinate se raspoređuju prema obliku zadanog hidrograma, tako da se najveća nalazi u danu u kom je zabeležena najveća ordinata osmotrenog hidrograma, druga po veličini odgovara danu u kom je zabeležena druga po veličini ordinata hidrograma, i tako redom.

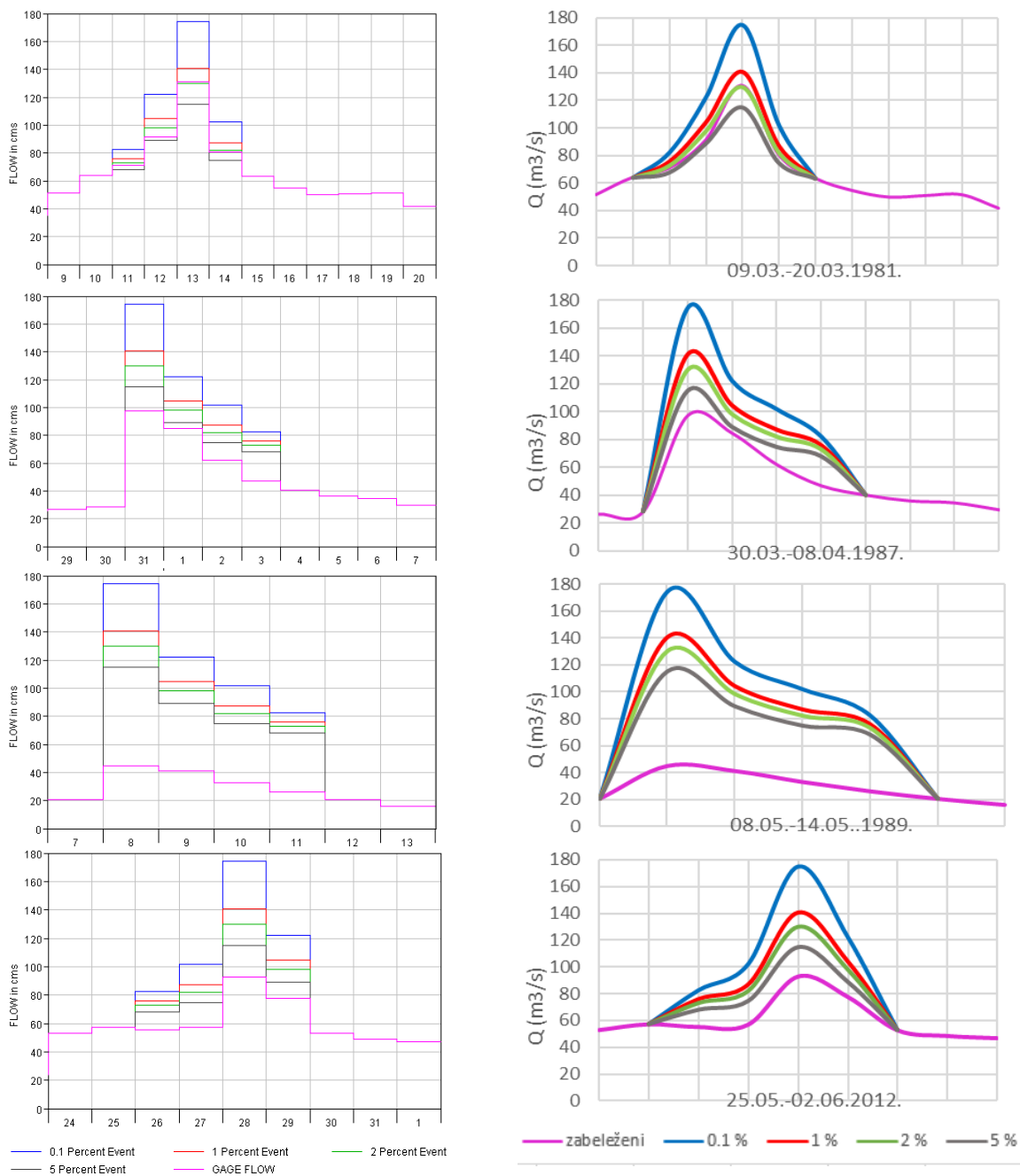
Na Slici 5 levo, nalazi se računski bilansirani hidrogram na HS Senta, dobijen na osnovu oblika iz 2006. godine, preko trajanja 7, 15, 30 i 60 dana. Trajanje 90 dana za oblik ovog talasa je dalo loš bilansirani hidrogram. Ni ostali talasi nisu davali dobre rezultate zbog asimetričnog oblika - talasi kojima prethodi ili iza kojih sledi bliska epizoda velike vode

nisu pogodni za modeliranje, pošto se ne zna da li je isti uzrok generisanja oticaja za oba talasa (npr. jake dugotrajne kiše i otapanje snega). Takođe, posmatrajući proces modeliranja bilansiranih hidrograma sa čisto tehničke strane, ovakvi događaji remete proračun – može se desiti da vršni protok za duža trajanja pada u sledeći događaj, ili u prethodni, tako da su rezultujući bilansirani hidrogrami nepravilnog oblika. Nepravilan oblik rastuće ili opadajuće grane hidrograma, kao što je rastuća grana talasa iz 1932. godine (Slika 1), za posledicu takođe ima bilansirani hidrogram izrazito nepravilnog oblika.

3.3 Izgladivanje računskog hidrograma

Za dobijanje izgladenih hidrograma na HS Piro (Slika 4 desno), korišćena je splajn transformacija ugrađena u Microsoft Excel 2016. Kod talasa kraćih trajanja, ova intervencija je korisna jedino zbog vizuelnog prikaza talasa, a sa crteža se eventualno mogu očitati međuordinate dobijene izgladivanjem, radi daljeg korišćenja hidrograma kod namena za koje su potrebni kraći vremenski koraci.

Računski hidrogram trajanja 60 dana na HS Senta izrazito testerastog oblika (Slika 5 levo), ublažen je



Slika 4. HS Pirot - Sirovi bilansirani hidrogrami (levo) i izgladjeni (desno) (Preuzeto iz [2]).

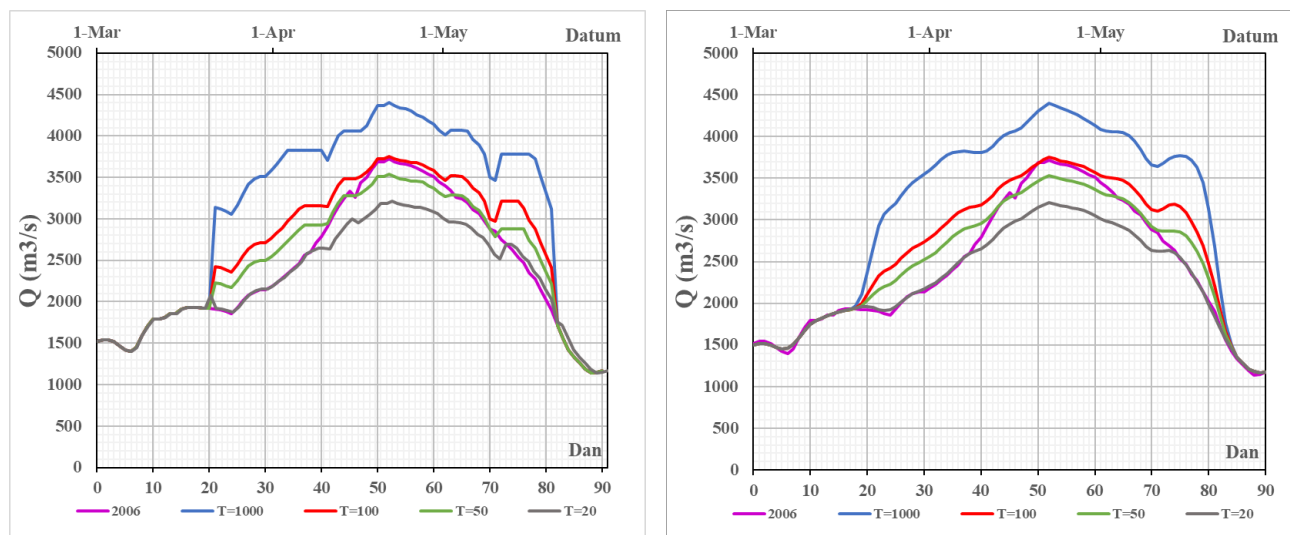
izgladivanjem dvostrukim MA(3) filterom (pokretnim prosecima), što je prikazano na Slici 5, desno. Posebno su izgladene grane u fazi porasta i opadanja hidrograma, uz očuvanje vršnog protoka - maksimalne računске vrednosti. Provera uticaja primenjenog MA filtera na zapremine poplavnih talasa sirovog bilansiranog

hidrograma, pokazala je da je procenat promene za talase svih povratnih perioda neznatan (manji od 0.6 %).

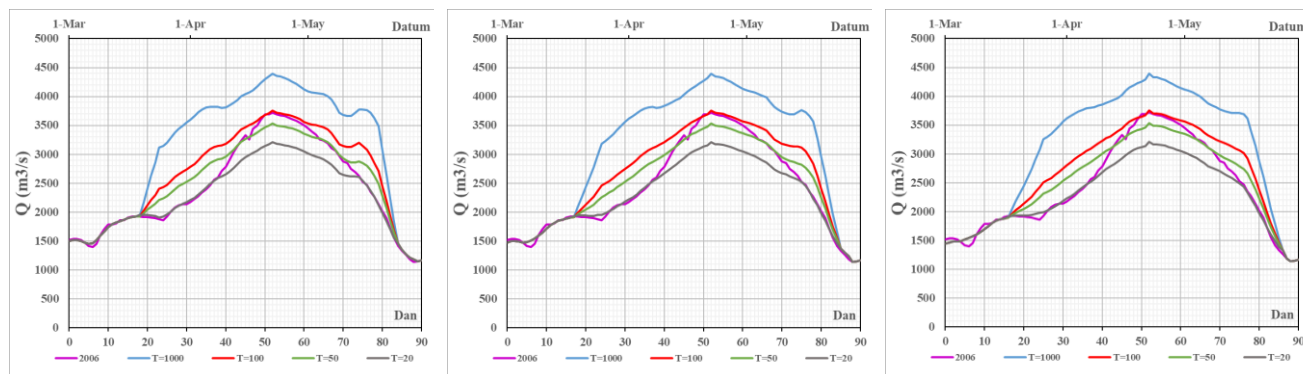
Na Slici 6 su prikazana tri bilansirana hidrograma dobijena primenom MA(5), MA(7) i MA(9) filtera, kod kojih su promene zapremine u odnosu na originalni

računski hidrogram takođe zanemarive. Svaki od prikazanih izgladenih hidrograma je kandidat za merodavni bilansirani hidrogram na HS Senta. Izgladivanje se može i nastaviti sve do postizanja

glatkog oblika hidrograma, ukoliko je to cilj koji se želi postići. Pri tome se mogu kontrolisati promene zapremina, iako je malo verovatno da može doći do značajne promene.



Slika 5. HS Senta - Sirovi bilansirani hidrogrami (levo) i izgladeni MA(3_3) (desno).

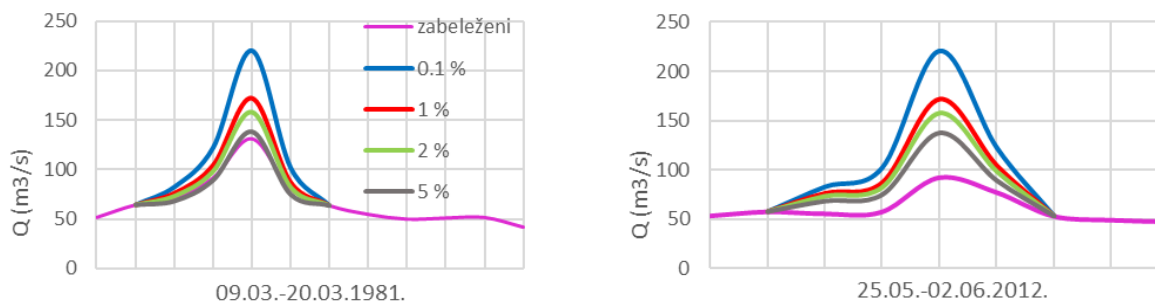


Slika 6. HS Senta: Bilansirani hidrogrami, izgladeni na drugi način, primenom MA(5), MA(7) i MA(9) filtera.

3.4 Rekonstrukcija maksimalne ordinatne

Izgladeni hidrogrami zasnovani na srednjim dnevnim protocima na HS Senta su konačni, dok na HS Piroto ne moraju biti, zato što postoje i rezultati analize trenutnih godišnjih maksimuma. U završnoj fazi obrade računskih hidrograma može se intervenisati na vršnim ordinatama hidrograma, bez uticaja na zapreminu hidrograma [4]. Rezultati takve intervencije su prikazani na Slici 7 za oblike hidrograma iz 1981. i 2012. godine na HS Piroto, koji nemaju izražene sekundarne talase.

Strogo uzevši, intervencija na maksimalnoj ordinati hidrograma mogla bi biti urađena jedino na bilansiranom hidrogramu oblika iz 2012. godine. Naime, sa Slike 2 se vidi da je samo za taj talas ispunjen uslov da sa smanjenjem trajanja raste protok, a smanjuje se verovatnoća prevazilaženja. Za ovaj talas to važi za sva trajanja, uključujući i trenutnu vrednost protoka. Prema tome, za opštu namenu, ovaj hidrogram bi bio usvojen za merodavni.



Slika 7. Bilansirani hidrogram sa umetnutom trenutnom vrednošću vršne ordinate, oblik talasa iz 1981. (levo) i 2012. godine (desno) (Preuzeto iz [2]).

4 ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metoda bilansiranog hidrograma za dobijanje računskih hidrograma velikih voda u izučanim profilima. Postupak određivanja bilansiranog hidrograma ima sličnosti sa metodama koje se koriste u domaćoj praksi: metodom oblika/tipskog hidrograma i kompozicionim postupkom, a naročito sa ovom drugom. Dobra strana prikazane metode je to što se za tipski oblik hidrograma uzima baš osmotreni hidrogram. Tako se na početku i na kraju računskih talasa pojavljuju osmotrene vrednosti protoka, čime je uklonjena neizvesnost u oceni baznog protoka ili nekog drugog referentnog protoka korišćenog u pripremi podataka. Nedostatak metode u našim uslovima je potreba za kompletnim dnevnim ili časovnim serijama zabeleženih protoka u periodu obrade.

Postupak određivanja bilansiranog hidrograma prikazan je za dve HS, značajno različitih površina slivova i hidrološkog režima. Zbog razlike u karakteristikama slivova, koje se prenose i na karakteristike hidrograma oticaja, kriterijumi za izbor oblika (i trajanja) talasa su morali biti različiti. Za HS Pirot, sa manjom površinom sliva (1745 km^2) kriterijumi su bili raznovrsniji, i demonstrirani su svi kriterijumi koji bi mogli doći u obzir pri izboru talasa koji će poslužiti kao model za bilansirani hidrogram. Kada se radi o HS sa velikom površinom sliva, kao što je HS Senta (141715 km^2), brzina nailaska talasa je sekundarna u odnosu na zapreminu i trajanje poplavnog talasa, pa i kriterijumi moraju biti drugačiji. Ovde je postupak izbora talasa za modeliranje generalizovan uvođenjem praga koji odgovara koti redovne, odnosno vanredne odbrane od poplave, čime je demonstrirana još jedna primena metode pragova.

Način kontrole veze između protoka i zapremina talasa određenog trajanja, prikazan u radu, predstavlja dobar alat za sužavanje skupa talasa iz kog će se odabrati „model” za izbor oblika. Ovom kontrolom stiže se uvid u to koji talasi potencijalno dolaze iz različitih populacija (npr. jake dugotrajne kiše i otapanje snega), a to su talasi koje treba isključiti iz razmatranja.

Modeliranje bilansiranog hidrograma na HS Pirot i HS Senta, dovelo je do konačnih, merodavnih hidrograma. Međutim, postoje i situacije kada nijedan od isprobanih zabeleženih oblika hidrograma ne daje zadovoljavajuće bilansirane hidrograme. Tada je moguće kombinovati oblike talasa iz različitih epizoda za dobijanje bilansiranih hidrograma različitih povratnih perioda [15].

U praksi se predlaže i da se kroz modele zbog kojih se radi hidrološka analiza velikih voda (npr. hidrodinamički model tečenja, model rada akumulacije itd.), isproba više varijanti bilansiranog hidrograma, pa da se prema rezultatima modeliranja utvrdi koji je kritični/merodavni hidrogram [4].

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju RHMZ Srbije na podacima korišćenim u ovom istraživanju. Rad je finansiran iz sredstava Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Blagojević, B., Mihailović, V., Đokić, N. (2021) Ocena kvantila velikih voda iz nepotpunih nizova osmatranja na većim slivovima u Srbiji primenom

- pragova percepcije. *Vodoprivreda* (52), str. 259-272
- [2] Blagojević, B., Mihailović, V. (2021) Određivanje računskog hidrograma velikih voda metodom bilansiranog hidrograma. Zbornik radova 19. Naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH). Beograd, 18-19. oktobar 2021. Izdavač: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet Beograd (u štampi)
- [3] Bogojević, A., Đenić, N., Blagojević, B. (2021) Statistička analiza velikih voda: Kalendarska i hidrološka godina. Zbornik radova 19. Naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH). Beograd, 18-19. oktobar 2021., Izdavač: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet Beograd (u štampi)
- [4] Cudworth, A.G. (1989) *Flood Hydrology Manual: A Water Resources Technical Publication*, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO
- [5] Đokić, N., Blagojević, B., Mihailović, V. (2021) Postupci za dobijanje trenutnih maksimuma na osnovu mešovitih nizova maksimalnih godišnjih protoka. Zbornik radova 19. Naučnog savetovanja Srpskog društva za hidraulička istraživanja (SDHI) i Srpskog društva za hidrologiju (SDH). Beograd, 18-19. oktobar 2021., Izdavač: Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet Beograd (u štampi)
- [6] England, J.F.Jr., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas, W.O.Jr., Veilleux, A.G., Kiang, J.E., Mason, R.R.Jr. (2018) Bulletin 17C Guidelines for Determining Flood Flow Frequency. Chapter 5 of Section B, Surface Water, Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation
- [7] Interagency Committee on Water Data (ICWD) (1982) Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17B (revised and corrected), ICWD, Hydrol. Subcomm., Washington, D.C.
- [8] Jovanović, S. (1989). Tehničar 6. Deo II Hidrologija. Beograd: Građevinska knjiga
- [9] Plavšić, J. (2019) Inženjerska hidrologija. Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
- [10] Petković, T., Janković, D. (1986) Minimalni obim hidroloških analiza i proračuna za potrebe projektovanja hidrotehničkih i vodoprivrednih objekata. Zbornik radova sa IX savetovanja JDHI i redovnog godišnjeg savetovanja JDH, Split 1986, str. 59-65
- [11] Petković, T., Anđelić, M., Erdeljan, K. (1977) Određivanje računskog hidrograma velikih voda na profilima gde postoje podaci osmatranja, *Vodoprivreda* (48-49). Beograd
- [12] Prohaska, S., Petković, T. (1989) Metode za proračun velikih voda, Deo I: Proračun velikih voda na hidrološki izučeni profilima, Građevinski kalendar 1989, Beograd: Društvo građevinskih inženjera i tehničara
- [13] Prohaska, S., Bartoš-Divac, V., Ilić, A. (2020) Velike vode Srbije u profilima hidroloških stanica. Beograd: Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi"
- [14] Republički hidrometeorološki zavod Srbije (RHMZ) (-). http://www.hidmet.gov.rs/ciril/hidrologija/povrsinske_godisnjaci.php (Preuzeto 02.08.2021.)
- [15] Tetra Tech (2009) Lower Puyallup River flood protection investigation. Ch.2 Hydrology. Project #135-3540028. Pierce County Public Works and Utilities Surface Water Management. Tacoma, Washington
- [16] U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1975a) Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development: Volume 3, Hydrologic Frequency Analysis, Hydrologic Engineering Center, Davis, California
- [17] U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1975b) Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development: Volume 5, Hypothetical Floods, Hydrologic Engineering Center, Davis, California
- [18] US Army Corps of Engineers (USACE) (2019) Statistical Software Package HEC-SSP User's Manual Version 2.2., Hydrologic Engineering Center, Davis, California
- [19] Zelenhasić, E., Ruski, M. (1991) Inženjerska hidrologija, Naučna knjiga, Beograd

FLOOD HYDROGRAPH SHAPE AND DURATION SELECTION FOR BALANCE HYDROGRAPH ASSESSMENT

by

Borislava BLAGOJEVIĆ* and Vladislava MIHAILOVIĆ**

*University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture

**University of Belgrade, Faculty of Forestry

Summary

A flood flow hydrograph is required for many purposes during the design of hydraulic structures and the implementation of various water resources management measures. The computational flood hydrograph at hydrological station is based on statistical analysis of characteristic quantities, resulting in the peak flow, volume and shape of the hydrograph. The balanced hydrograph method uses the shape pattern of the observed hydrograph and the statistical analysis results of volumes for different flood duration. The aim of this paper is to present possible approaches when choosing the duration and shape of the gauged hydrographs for obtaining balanced hydrographs of different return

periods. The selected stations are Pirot (river Nisava) and Senta (river Tisa), characterized by significantly different catchment area and behavior in the period of flood flow. At these two stations, different procedures have been applied to preselect the flood events according to shape pattern and consecutively duration of balanced hydrographs. A several smoothing techniques for postprocessing the computed balanced hydrograph ordinates are presented.

Keywords: flood, hydrograph shape, hydrograph duration, episodes of sufficit, balanced hydrograph

Redigovano 2.11.2021.