

## PROCENA KRIVE PROTOKA I REKONSTRUKCIJA POPLAVNOG TALASA U DUBOKOM KORITU SA USKIM PLAVNIM POVRŠINAMA

Dejana ĐORĐEVIĆ  
Građevinski fakultet u Beogradu  
Ranka ERIĆ  
Šumarski fakultet u Beogradu  
David JACIMOVIC  
Ehting

### REZIME

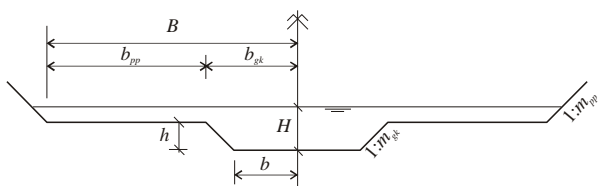
U ovom radu razmatra se svrsishodnost primene metode razmene količine kretanja za procenu krive protoka i rekonstrukciju talasa velikih voda u dubokim koritima za veliku vodu koja imaju uske plavne površine. Ovo pitanje nametnulo se tokom procene krive protoka na hidrološkoj stanici Ub korišćenjem zabeleženog nivoograma velike vode iz maja 2014. godine i rekonstrukcije odgovarajućeg hidrograma. Na ovoj hidrološkoj stanici vrednost odnosa dubine korita za veliku vodu i njegove širine u dnu znatno je veća od uobičajenih vrednosti i iznosi 1,46 (uobičajene vrednosti su mnogo manje od 1), a širina berme sa stazom za šetanje na koju se izliva voda iz glavnog korita je 2,5 m. Pored toga, korito odlikuje neujednačena rapavost zbog korišćenja različitih materijala za obradu kinete glavnog korita, kosina i bermi. Sve ovo utiče na to da presek vrlo brzo nakon izlivanja postaje hidraulički homogen, sa praktično zanemarljivom razmenom količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, zbog čega se vrednosti protoka dobijene metodom razmene količine kretanja razlikuju za oko 10% od vrednosti dobijenih primenom tradicionalne metode jedinstvenog preseka. S obzirom na to da za konstrukciju nove krive protoka u domenu velikih voda RHMZ nije imao dovoljno podataka, jer je stanica rekonstruisana svega godinu dana pre ovog talasa velike vode, zvaničnu krivu protoka i sve zaključke ove analize treba preispitati kada na raspolaganju bude dovoljno podataka za pouzdaniju procenu i zaključke.

**Ključne reči:** poplavni talas, korito za veliku vodu, kriva protoka, metoda razmene količine kretanja, hidrogram poplavnog talasa

### 1. UVOD

Opšte je poznato da ne postoje univerzalni modeli koji bi se koristili za rešavanje širokog spektra inženjerskih problema. To, naravno, važi i za modele kojima se opisuju tečenja u koritu za veliku vodu. Đorđević i sar. [3] su našoj stručnoj javnosti predstavili jedan od modela razvijenih u okviru radne grupe za izučavanje tečenja u koritu za veliku vodu pri Međunarodnom društvu za hidraulička istraživanja (IAHR) To je model zasnovan na razmeni količine kretanja (MRKK) između glavnog korita i plavnih površina. Model su predložili Buzmar i Zek [2]. Detaljna poređenja sa rezultatima laboratorijskih istraživanja [2, 3] pokazala su da ovaj model daje znatno bolju procenu krive protoka u domenu velikih voda od tradicionalnih metoda kao što su metoda jedinstvenog preseka (MJP) ili metoda hidraulički homogenih segmenata (MHHS). Stojnić i sar. [8] su kroz numeričke ogledе ispitivali uticaj geometrijskih i hidrauličkih činilaca na razmenu količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina i na njen udeo u ukupnom gubitku energije toka. U svom istraživanju obuhvatili su korita sa vrednostima odnosa širine korita za veliku vodu u nivou obala ( $2B$ ) i širine glavnog korita u dnu ( $2b$ ) (slika 1) koje se kreću od 2 do 75 i korita sa odnosom širine i dubine glavnog korita  $2b/h$  od 5 do 75. Đorđević i sar. [5 i 6] uspešno su primenili ovu metodu za procenu krive protoka u koritu za veliku vodu (KVV) na dve hidrološke stanice – h.s. Slovac na reci Kolubari [5] i hidrološkim stanicama Jaša Tomić i Sečanj na reci Tamiš [6]. U oba slučaja, vrednosti odnosa  $B/b$  i  $2b/h$  bile su veće od 5.

U ovom radu nastavlja se sa razmatranjem mogućnosti primene MRKK za procenu krive protoka u KVV, a po-



Slika 1. Geometrijske karakteristike poprečnog preseka korita za veliku vodu

tom i za rekonstrukciju talasa velike vode / poplavnog talasa u rečnim koritima. Ovaj put izabrana je h.s. Ub na reci Ub, koja se nalazi u slivu reke Tamnave - leve pritoke reke Kolubare. Hidrološka stanica Ub izabrana je zato što se nalazi na pravolinijskoj deonici regulisanog korita sa složenim poprečnim presekom u obliku dvogubog trapeza i činjenice da na njoj tokom poplavnog talasa 2014. godine nije zabeleženo izlivanje vode iz projektovanog KVV. Na ovoj h.s. vrednost odnosa  $2b / h$  približno iznosi 2,6, a vrednost odnosa  $B / b = 2,9$ . Međutim, ono što poprečni presek h.s. Ub razlikuje od prethodno razmatranih preseka je velika dubina KVV, tj. velika vrednost odnosa dubine KVV i njegove širine u dnu, koja u ovom slučaju iznosi 1,46, i mala širina plavnih površina (bermi). Uobičajene vrednosti odnosa dubine korita za veliku vodu i širine u dnu znatno su manje od 1. Zahvaljujući ovoj činjenici, na h.s. Ub 2014. godine, kao što je već rečeno, nije zabeleženo izlivanje vode iz projektovanog dvogubog trapeznog KVV. Imajući to u vidu, cilj ovog rada je da sagleda svrsishodnost primene MRKK u dubokim KVV sa uskim plavnim površinama i da se veliki povodanj iz maja 2014. godine sagleda iz još jednog ugla.

## 2. MATEMATIČKI MODEL

Model linijskog tečenja u KVV zasnovan na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina (MRKK), koji su predložili Buzmar i Zek [2], predstavljen je našoj stručnoj javnosti 2015. godine [3]. U ovom modelu poprečni presek KVV deli se na glavno korito i plavne površine, a jednačine održanja mase i količine kretanja pišu se za svaki deo poprečnog preseka. Podelom poprečnog preseka na delove, uvode se novi članovi u jednačine kojima se obuhvataju međusobni uticaji susjednih segmenata. Tim članovima opisuju se razmena mase (jednačina održanja mase) i razmena količine kretanja turbulentnom difuzijom (jednačina održanja količine kretanja), a u slučaju neprizmatičnih korita, i usled promene protočnosti segmenata. Model se može primeniti za rešavanje dva problema: 1) procenu krive protoka u KVV na osnovu zabeleženih tragova velike vode ili zabeleženih

nivograma, ili 2) proračun linije nivoa u KVV. U oba slučaja, proračuni se za sada još uvek zasnivaju na pretpostavci ustaljenog ili blago promenljivog tečenja. Ova pretpostavka omogućava da se jednačine održanja količine kretanja transformišu u jednačine održanja energije u kojima se, osim gubitka energije usled trenja, pojavljuje i gubitak energije usled razmene količine kretanja:

$$I_e \equiv \frac{d}{dx} \left( Z + \frac{U^2}{2g} \right) = I_{tr,i} + \frac{q_{ul,i} (U_i - u_{b,i})}{g A_i} =$$

$$= I_{tr,i} + I_{rkk,i} \quad (1)$$

Segmenti su, radi kraćeg pisanja označeni brojevima: 1 – leva plavna površina, 2 – glavno korito i 3 – desna plavna površina. U prethodnoj jednačini prostorna koordinata  $x$  je nezavisno promenljiva,  $I_e$  je nagib linije energije za ceo poprečni presek,  $Z$  je kota nivoa u poprečnom preseku, koja je takođe jedinstvena za ceo presek,  $U_i$  je srednja brzina u segmentu  $i$  ( $U_i = Q_i / A_i$ ),  $A_i$  je površina segmenta  $i$ ,  $q_{ul,i}$  je jedinični bočni dotok u segment  $i$ ,  $u_{b,i}$  je komponenta brzine susjednog segmenta u pravcu glavnog toka kojom se ostvaruje unos količine kretanja u segment  $i$ . Kao što iz (1) vidi, nagib linije energije u poprečnom preseku  $I_e$  sastoji se od nagiba linije energije usled trenja  $I_{tr,i}$  i nagiba linije energije usled razmene količine kretanja  $I_{rkk,i}$ . Zbog različite rapavosti, a shodno tome i različitih brzina toka, vrednosti ovih komponenta razlikuju se po segmentima, uz napomenu da ove komponente u zbiru uvek daju istu vrednost  $I_e$ . Buzmar i Zek su odnos dve komponente nagiba linije energije označili sa  $\chi_i = I_{rkk,i} / I_{tr,i}$ . Uvođenjem ove oznake, jednačina (1) može se napisati u kompaktnom obliku:

$$I_e = I_{tr,i} (1 + \chi_i), \quad i = 1, 2, 3.$$

Jedinični bočni dotok u segment  $i$  ( $q_{ul,i}$ ) posledica je: 1) turbulentne difuzije usled razlike brzina u glavnom koritu i na plavnim površinama (oznaka  $t$ ) i 2) razmene mase između ovih segmenata usled neprizmatičnosti korita (oznaka  $g$ ), pa se može predstaviti zbirom odgovarajućih komponenta:

$$q_{ul,i} = q_{ul,i}^t + q_{ul,i}^g \quad (2)$$

Jedinični dotok iz susjednog segmenta  $i$  isticanje iz posmatranog u susjedni segment koji su posledica turbulentne difuzije istog su intenziteta, ali suprotnog

smera i u MRKK modeliraju se pomoću modela mešanja u horizontalnoj ravni [2]:

$$q'_{2i} = q'_{i2} = \left| \overline{v'} \right| (H - h_i) = \psi' |U_2 - U_i| (H - h_i) \quad (3)$$

U ovom modelu, apsolutna vrednost vremenski osrednjene fluktuacije brzine u ravni preseka  $\left| \overline{v'} \right|$  srazmerna je apsolutnoj vrednosti razlike srednjih brzina susednih segmenata, a koeficijent proporcionalnosti je  $\psi'$ . Ovaj koeficijent je ujedno i parametar MRKK. Razlika dubine u glavnom koritu  $H$  i dubine osnovnog korita na strani plavne površine  $h_i$ ,  $i = 1,3$  je, zapravo, dubina vode na prelazu iz glavnog korita na plavnu površinu i određuje površinu kroz koju se ostvaruje razmena količine kretanja između ova dva segmenta.

Znak (smer) jediničnog bočnog protoka usled neprizmatičnosti korita zavisi od toga da li se plavne površine šire ( $q_{i2}^g$  - doticanje) ili sužavaju ( $q_{2i}^g$  - isticanje) (za objašnjenje pogledati sliku 5 u [4]), a njegov intenzitet zavisi od brzine promene protočnosti plavnih površina. Smer kretanja vode u odnosu na ort normale na granicu između glavnog korita i plavne površine uzima se u obzir preko koeficijenta  $\kappa$ . Izrazi za ove jedinične bočne protoke glase:

$$q_{i2}^g = \psi^g \kappa_{i2} \frac{dK_i}{dx} I_{rr,i}^{1/2} \quad \text{i} \quad q_{2i}^g = \psi^g \kappa_{2i} \frac{dK_i}{dx} I_{rr,i}^{1/2} \quad (4)$$

pri čemu se koeficijenti  $\kappa$  definišu u zavisnosti od promene protočnosti  $K$  na sledeći način:

$$\kappa_{i2} = \begin{cases} 0, & \frac{dK_i}{dx} > 0 \\ -1, & \frac{dK_i}{dx} < 0 \end{cases} \quad \wedge \quad \kappa_{2i} = \begin{cases} 1, & \frac{dK_i}{dx} > 0 \\ 0, & \frac{dK_i}{dx} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Kada je  $\kappa = 1$ , voda ističe iz glavnog korita na plavnu površinu, jer se smer kretanja vode poklapa sa smerom orta spoljne normale, a kada je  $\kappa = -1$  voda sa plavne površine dotiče u glavno korito, tj. smer kretanja vode je suprotan od smera orta spoljne normale.

### 3. HIDROLOŠKA STANICA UB

Reka Ub izvire na nadmorskoj visini od oko 450 mnm, na obroncima planine Vlašić u zapadnom delu Srbije, u blizini mesta Osečina. Pripada slivu reke Tamnave sa kojom teče gotovo paralelno, do njihovog ušća kod sela

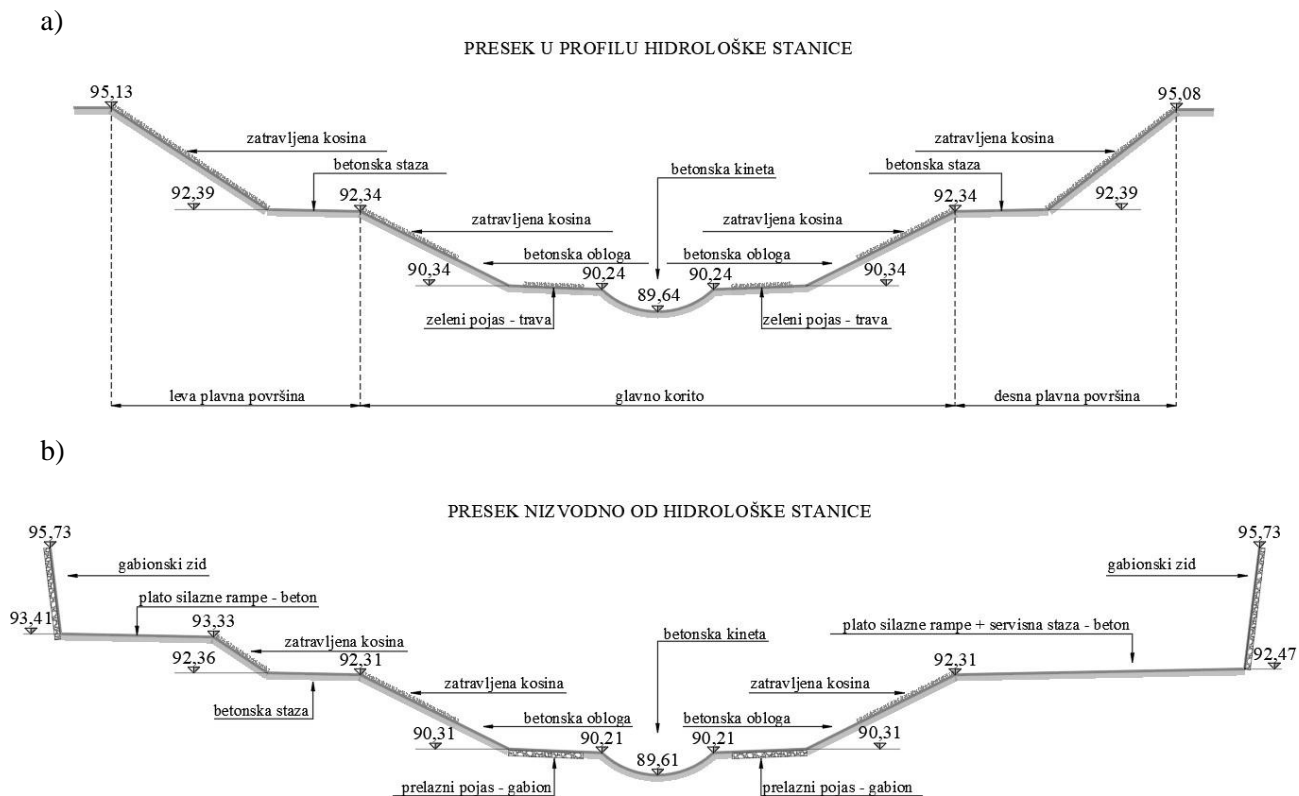
Rupljani na nadmorskoj visini od oko 84 mnm. Dužina toka reke Ub iznosi oko 57 km, pri čemu površina sliva iznosi oko 270 km<sup>2</sup>.

Na reci Ub postoji jedna hidrološka stanica, locirana na desetom rečnom kilometru mereno od ušća u Tamnavu. Stanica je osnovana 1959. godine. Kota „nule“ vodomera menjala se kroz vreme, shodno regulacionim radovima i morfološkim promenama vodotoka. Nakon regulacionih radova izvedenih 2013. godine postavljena je aktuelna kota „nule“ vodomera na 89,62 mnm. Površina sliva do poprečnog preseka hidrološke stanice iznosi oko 241 km<sup>2</sup>. Na hidrološkoj stanici (h.s.) Ub vodostaji su se merili vodomernom letvom od njenog osnivanja 1959. godine, sve do 1977. godine, kada je vodomerna letva zamenjena limnigrafom (slika 2). Protoci se na ovoj h.s. mere od 1960. godine.

Regulacionim radovima 2013. godine, poprečni presek neregulisanog korita reke Ub, koji je do tada bio znatno manjih dimenzija, proširuje se u dvogubi trapezni presek (slike 2 i 3). U dnu glavnog korita izvedena je betonska kineta (slika 3), dok su kosine glavnog korita delom zatravljene, a delom obložene betonskim elementima. Kosine glavnog korita izvedene su u nagibu 1:2. Zeleni pojasevi sa obe strane kinete su širine 1,3 m. Korito za veliku vodu čine berme širine 2,5 m izvedene od betona, u nagibu od 2% prema glavnom koritu i kosine gornjeg trapeza. Kosine korita za veliku vodu su zatravljene i izvedene pod nagibom 1:1,5, sa manjim odstupanjima od projektovane geometrije. Ukupna dubina KVV iznosi 5,44 m, a uzdužni nagib dna u zoni hidrološke stanice približno 0,1%.



Slika 2. Regulisano korito za veliku vodu u blizini h. s. Ub sa naznačenim računskim preseccima (sliku ustupilo JVP „Srbijavode“)



Slika 3. Poprečni presecci regulisanog KVV na mestu h.s. i silaznih rampi na donju pešačku stazu (crteže ustupilo JVP „Srbijavode“)

Nizvodno od hidrološke stanice izvedene su servisne rampe (slika 3), pri čemu je projektovani stepen zaštite na ovom potezu obezbeđen izgradnjom zidova od gabiona (približno vertikalne strane u poprečnom preseku – slika 3b). Na levoj plavnoj površini ovog preseka postoji još jedna zatravljena kosina u nagibu 1:1,5 visine oko 1,0 m. Ova kosina povezuje donju bermu na kojoj je šetalište, i plato servisne rampe. Na desnoj plavnoj površini na istom nivou nalaze se plato servisne rampe i staza za šetanje, izvedene od betona, ukupne širine 7,8 m. Glavno korito, za razliku od preseka h.s., umesto zelenog pojasa sa obe strane kinete ima izveden prelazni pojas od gabiona. Izbor materijala, odnosno završna obrada delova korita direktno utiče na vrednost otpora trenja, koji se i u uzvodnom i u nizvodnom preseku razlikuju po segmentima poprečnog preseka. O usvojenim vrednostima Maningovog koeficijenta rapavosti biće više reči u tački 4. S obzirom na to da je zbog izgradnje servisnih rampi KVV na tom potezu,

nizvodno od h.s., neprizmatično, u proračunu je potrebno uzeti u obzir promenu protočnosti u smeru tečenja – izraz (4). Za potrebe ove analize, iskorišćen je poprečni presek na rastojanju od 30,0 m nizvodno od hidrološke stanice, zato što reka Ub teče u mirnom režimu. Poprečni presecci uzvodno od hidrološke stanice nisu razmatrani.

#### 4. KRIVA PROTOKA U DOMENU VELIKIH VODA

Metoda razmene količine kretanja prvo je primenjena za procenu krive protoka u domenu velikih voda, a potom je, u tački 5, korišćenjem dobijene računске krive protoka i osmotrenog nivograma rekonstruisan hidrogram poplavnog talasa iz 2014. godine. U nastavku će se prikazati uslovi pod kojima je obavljen proračun krive protoka i dobijeni rezultati, a potom će se računске krive protoka uporediti sa zvaničnom krivom Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije koja je važila u vreme povodnja iz maja 2014. godine.

#### 4.1 Parametri proračuna

Metoda razmene količine kretanja, pored Maningovih koeficijenata trenja koji se standardno koriste prilikom procene krive protoka, sadrži dva dodatna parametra. To su parametri  $\psi^f$  i  $\psi^g$  u izrazima (3) i (4) za izračunavanje bočnih protoka nastalih usled turbulentne difuzije i neprizmatičnosti KVV.

Za svaki segment KVV potrebno je definisati Maningov koeficijent rapavosti, pri čemu je raspored rapavosti u poprečnom preseku određen vrstom materijala upotrebljenih za završnu obradu površina unutar projektovanog KVV (slika 3). Na slikama 2 i 3 može se primetiti da se čak i u okviru osnovnih segmenata KVV (u osnovnom koritu i na plavnim površinama) koriste različiti materijali, što znači da je rapavost unutar svakog segmenta promenljiva. Iz tog razloga je pri svakoj vrednosti računskog nivoa potrebno proceniti ekvivalentnu vrednost Maningovog koeficijenta rapavosti, za svaki segment korita za veliku vodu. U ovom radu je ekvivalentna vrednost Maningovog koeficijenta rapavosti računata na osnovu učešća okvašenog obima delova segmenata sa konstantnom rapavošću u ukupnom okvašenom obimu segmenta:

$$n_{e,i} = \frac{\sum_j O_j n_j}{\sum_j O_j} \quad (6)$$

gde su  $O_j$  i  $n_j$  okvašeni obim i Maningov koeficijent rapavosti dela  $j$ , u okviru segmenta  $i$ . U tabeli 1 prikazane su usvojene vrednosti koeficijenata rapavosti, u zavisnosti od završne obrade obloge korita (slika 3). Vrednosti koeficijenta rapavosti usvojene su na osnovu preporuka iz [7]. Pošto se radi o poplavnom talasu iz maja, dakle o periodu godine sa razvijenom niskom vegetacijom, za zatravljene površine usvojena je vrednost koeficijenta rapavosti bliska gornjoj granici preporučenog opsega vrednosti. Za betonske površine preporučuje se opseg vrednosti 0,013-0,014  $m^{-1/3}s$ , pa je usvojena srednja vrednost.

Tabela 1. Usvojene vrednosti Maningovog koeficijenta rapavosti prema vrsti završne obrade

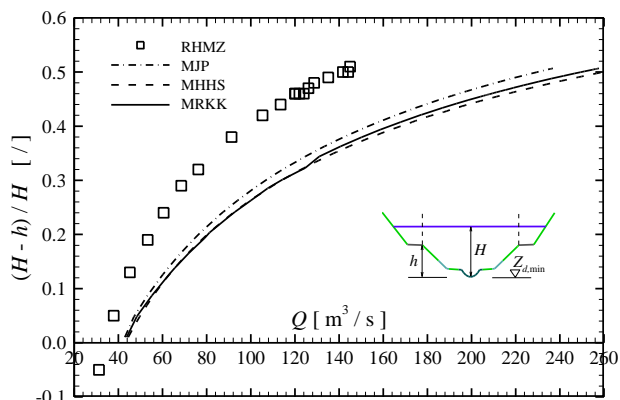
tip završne obrade korita	$n$ [ $m^{-1/3}s$ ]
betonska površina	0,135
zatravljena površina	0,035
gabion	0,040

Pored vrednosti Maningovih koeficijenata rapavosti, za proračun protoka po metodi razmene količine kretanja potrebno je usvojiti i vrednosti koeficijenata proporcionalnosti  $\psi^f$  i  $\psi^g$ . Za koeficijent proporcionalnosti  $\psi^g$  usvojena je vrednost 0,5 (do sada korišćene tipične vrednosti su 0,5 i 1,0, [2 i 4]). Koeficijent proporcionalnosti  $\psi^f$  variran je u rasponu od 0,05 do 0,15 [3]. Zbog ograničenog prostora, rezultati će biti prikazani samo za  $\psi^f = 0,15$ . Pored MRKK, za procenu krive protoka primenjene su i metoda hidraulički homogenih segmenata (MHHS) i metoda jedinstvenog preseka (MJP), sa ciljem poređenja rezultata dobijenih primenom tradicionalnih metoda i savremene metode, koja u obzir uzima razmenu količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina.

#### 4.2 Rezultati proračuna

Proračun protoka obavljen je samo za nivoa iznad 92,34 mm, odnosno za nivoa koji se javljaju nakon izlivanja vode iz glavnog korita. Na slici 4 prikazane su računke krive protoka i zvanična kriva protoka dobijena od Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije.

Može se primetiti da su primenom MHHS i MRKK dobijene približno iste vrednosti protoka u kompletnom opsegu nivoa u domenu velikih voda. Sa povećanjem koeficijenta proporcionalnosti  $\psi^f$  povećava se uticaj razmene količine kretanja posredstvom turbulentne difuzije, pa su za  $\psi^f = 0,15$  dobijene najniže vrednosti protoka. Pri vrednosti  $\psi^f = 0,05$  (rezultati nisu prikazani) dobijeni su praktično isti rezultati kao po metodi hidraulički homogenih segmenata. U opštem slučaju, MHHS daje veće vrednosti protoka u odnosu na MRKK [3], s obzirom na to da ne uzima u obzir razmenu količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, pa je gubitak energije manji od stvarnog. Međutim, kao što se na slici 4 može primetiti, u slučaju hidrološke stanice Ub, ove razlike nisu značajne. Primenom MJP dobijene su najmanje vrednosti protoka. Može se zapaziti da računski protoci u svim varijantama proračuna značajno odstupaju od odgovarajućih vrednosti sa zvanične krive protoka RHMZa. Takođe se uočava da relativna odstupanja računskih od izmerenih protoka rastu sa porastom nivoa. Za vrednost  $\psi^f = 0,15$  relativno odstupanje po MRKK iznosi 77,26%, dok su odstupanja za MHHS i MJP, redom 84,45% i 62,93%. Vrednost protoka pri bezmalo punom KVV, prema proceni RHMZa iznosi 145,40  $m^3/s$ , dok su odgovarajuće računke vre-



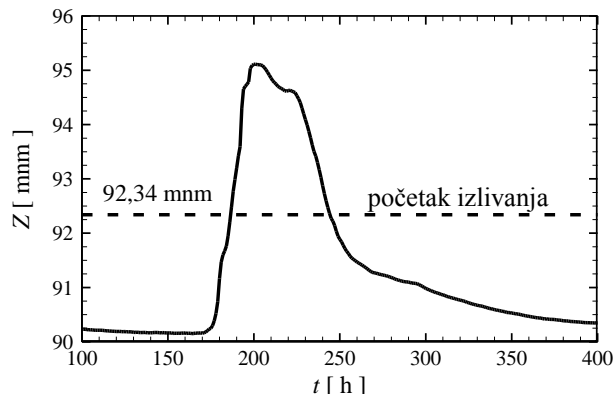
Slika 4. Zvanična kriva protoka RHMZa i računске krive protoka za korito za veliku vodu (računске krive protoka nisu prikazane za osnovno korito –  $(H - h) / H < 0$ )

dnosti protoka za MHHS, MJP i MRKK redom, 268,20, 236,84 i 257,74  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Imajući u vidu da su razlike između računskih i zvaničnih vrednosti protoka značajne, sa relativnim odstupanjima i do 85%, postavlja se pitanje uzroka dobijenih odstupanja. Merenja protoka tokom poplavnih epizoda su teško izvodljiva i opasna, pa se krive protoka u domenu velikih voda često određuju računski ili ekstrapolacijom. Pretpostavlja se da su ovako velika odstupanja računskih od zvanične krive protoka posledica činjenice da je poprečni presek h.s. Ub značajno promenjen 2013. godine, i da od uspostavljanja nove h.s. do maja 2014. godine u slivu reke Ub nije bilo poplavnih epizoda po intenzitetu sličnih povodnju iz maja 2014. godine na osnovu kojih bi RHMZ mogao da da pouzdanu procenu krive protoka u domenu velikih voda.

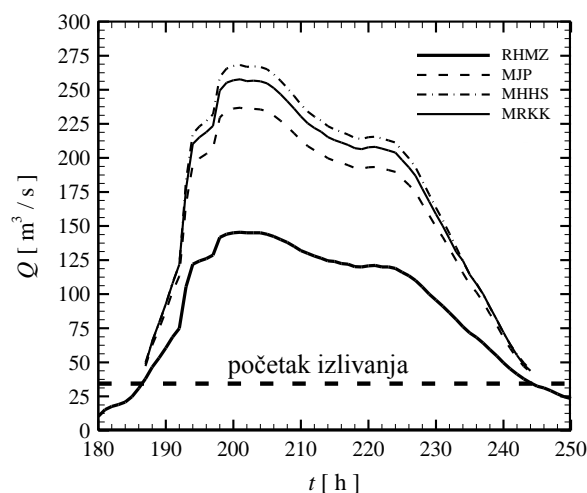
## 5. REKONSTRUISAN HIDROGRAM POPLAVNOG TALASA

Hidrogram poplavnog talasa iz maja 2014. godine rekonstruisan je, kao što je već pomenuto, korišćenjem računskih krivih protoka (za MJP, MHHS i MRKK) sa slike 4 i zabeleženih nivoa tokom prolaska talasa velike vode na h.s.Ub (slika 5). Na nivogramu je obeležena kota berme (92,34 mm) na kojoj se nalazi šetalište, tj. kota nivoa od koje počinje izlivanje iz glavnog korita. Vrednosti protoka određene su samo za period izlivanja ( $T_{\text{prel}} = 58 \text{ h}$ ). Za poređenje je korišćen hidrogram dobijen na osnovu zabeleženog nivograma i zvanične krive protoka Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije.



Slika 5. Zabeležen novogram talasa velike vode iz maja 2014. godine na h.s. Ub (RHMZ Srbije) sa naznačenom kotom pri kojoj počinje izlivanje iz osnovnog korita

Ovo poređenje prikazano je na slici 6. S obzirom na to da su u tački 4 utvrđena značajna neslaganja između računskih krivih protoka i zvanične krive RHMZa, ova neslaganja odrazila su se i na računске hidrograme. Najveća odstupanja utvrđena su u trenutku pojave vršnog protoka, jer relativna odstupanja procenjenog protoka rastu sa porastom nivoa (slika 4). Imajući u vidu da je korito za veliku vodu tokom poplavnog talasa iz maja 2014. godine bilo praktično potpuno ispunjeno, najveća relativna odstupanja odgovaraju najvećim odstupanjima određenim za računске krive protoka (~77,0% za MRKK, ~63,0% za MJP i ~85,0% za MHHS).



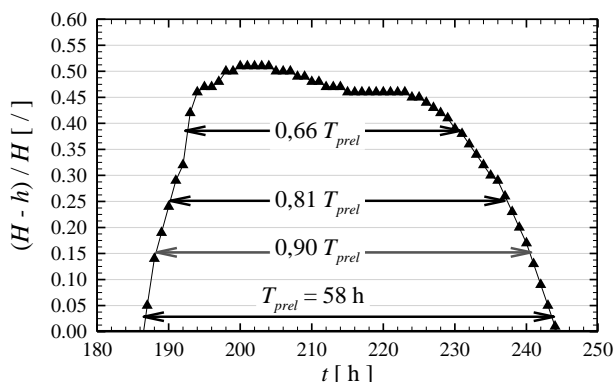
Slika 6. Poređenje računskih hidrograma dobijenih metodom jedinstvenog preseka (MJP), metodom hidraulički homogenih segmenata (MHHS) i metodom razmene količine kretanja (MRKK) sa zvaničnim hidrogramom Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije (RHMZ)

Kao što je u tački 4 rečeno, zbog nedostatka izmerenih vrednosti protoka u periodima povodnja, RHMZ Srbije nije imao dovoljno podataka za pouzdaniju procenu krive protoka u domenu velikih voda. Shodno tome, konkretne razloge za pojavu značajnih odstupanja računskih i osmotrenih vrednosti, koja u slučaju MHHS iznose i do 85%, za sada nije moguće utvrditi. Međutim, moguće je međusobno poređenje rezultata dobijenih primenom ove tri računске metode. Kao što se na slici 6 vidi, MJP daje najmanje, dok MHHS daje najveće vrednosti protoka. Postavlja se pitanje zbog čega MJP daje namanje vrednosti protoka, kada MRKK uzima u obzir dodatne gubitke energije usled razmene količine kretanja. Do odgovora na ovo pitanje autori će pokušati da dođu kroz diskusiju rezultata u narednoj tački.

## 7. DISKUSIJA REZULTATA

Da bi se došlo do odgovora na pitanje zašto MJP u slučaju h.s. Ub daje najmanje vrednosti protoka, na slici 7 prikazan je bezdimenzijski nivogram, odnosno deo nivograma koji odgovara periodu izlivanja vode iz glavnog korita ( $T_{prel} = 58$  h).

Umesto apsolutne vrednosti nivoa, na ordinati je prikazana relativna dubina vode na plavnoj površini ( $(H-h)/H$ ). Na nivogramu su označene karakteristične vrednosti relativne dubine pomoću kojih mogu da se protumače razlike u rezultatima. Uočava se da je oko 90% vremena izlivanja ( $> 52$  h) relativna dubina bila veća od 0,15, a oko 80% vremena ( $> 46$  h) veća od 0,25. Intuitivno je jasno, a to su pokazala i dosadašnja istraživanja, da je pri manjim relativnim dubinama razmena količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina intenzivnija, jer je razlika brzina između



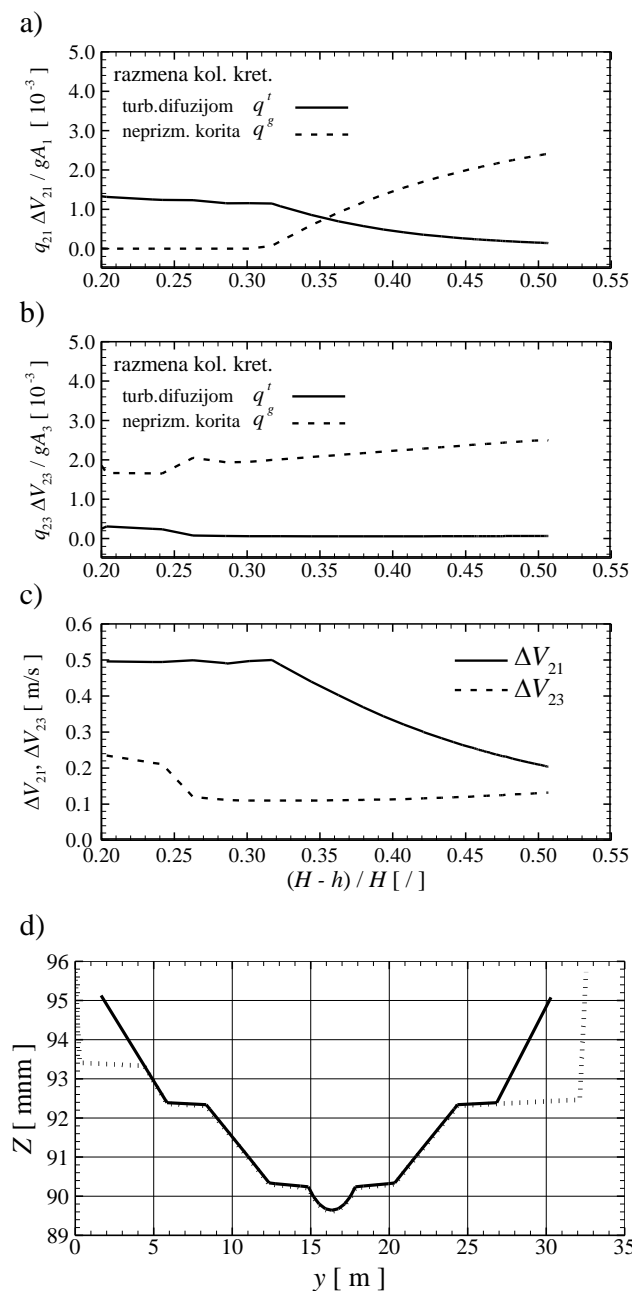
Slika 7. Bezdimezijski nivogram – deo nivograma koji odgovara periodu izlivanja vode iz glavnog korita

ova dva dela poprečnog preseka veća (gradijent brzine po širini poprečnog preseka je veći), i da se sa povećanjem dubine ta razmena smanjuje, jer se i razlika brzina (gradijent brzine po širini poprečnog preseka) smanjuje. Prema nekim autorima, među kojima je i Piter Ekers [1], poprečni presek KVV postaje hidraulički homogen pri vrednosti relativne dubine od 0,40. Na slici 7 vidi se da su tokom 66% vremena izlivanja ( $> 38$  h) relativne dubine bile veće od 0,40. To znači da je tokom poplavnog talasa iz maja 2014. godine oko dve trećine vremena  $T_{prel}$  poprečni presek u profilu h.s. Ub bio hidraulički homogen. Ovom činjenicom može da se objasni zbog čega MJP u slučaju hidrološke stanice Ub daje manje vrednosti protoka od MRKK.

Pretpostavka da je poprečni presek h.s. Ub tokom 66% vremena izlivanja vode iz glavnog korita bio hidraulički homogen potvrđuju visoke vrednosti koherencije (jednačina 7) kao pokazatelja hidrauličke homogenosti preseka. Tako koherencija pri relativnoj dubini na plavnoj površini od 0,16 iznosi 0,94, pri  $(H-h)/H = 0,25$  uzima vrednost 0,93, pri 0,40 vrednost 0,91 i pri najvećoj relativnoj dubini od 0,506, vrednost 0,88. Dakle, više od 90% vremena izlivanja (slika 7) vrednosti koherencije su visoke, što ukazuje na to da je presek korita za veliku vodu h.s. Ub hidraulički homogen, tj. da se ponaša kao jedinstven presek. Izraz za koherenciju glasi [1]:

$$COH = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 A_i}{8g \sum_{i=1}^3 \frac{n_i^2 O_i}{R_i^{1/3}}}}}{\sum_{i=1}^3 A_i \sqrt{\frac{A_i}{8g \frac{n_i^2 O_i}{R_i^{1/3}}}}} \quad (7)$$

Ako se analizira udeo razmene količine kretanja, u ukupnom gubitku energije (slika 8), može se zaključiti sledeće. Na levoj plavnoj površini (slika 8a) primećuje se da je pri manjim relativnim dubinama dominantnija razmena količine kretanja usled turbulentne difuzije, dok razmene usled neprizmatičnosti korita praktično nema. Vrednost razmene količine kretanja turbulentnom difuzijom približno je konstantna do vrednosti relativne dubine od približno 0,30, nakon čega počinje polako da se smanjuje, a razmena količine kretanja usled neprizmatičnosti polako počinje da se povećava.



Slika 8. Promena razmene količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina sa promenom stepena potopljenosti plavne površine. a) razmena sa levom plavnom površinom i b) razmena sa desnom plavnom površinom. Odvojeno se posmatraju razmene turbulentnom difuzijom ( $q^t$ ) i usled neprizmatičnosti korita ( $q^g$ ); c) razlika brzina između glavnog korita i plavnih površina; d) “preklapljeni” računski preseki

Ovakva promena je sasvim očekivana s obzirom na to da se na levoj plavnoj površini geometrija između preseka hidrološke stanice Ub i nizvodnog poprečnog preseka poklapa sve do nivoa 92,39 mm (slike 3 i 8d). Nakon toga, korito nizvodnog poprečnog preseka širi se horizontalnom bermom, dok se na mestu hidrološke stanice nastavlja kosina (slike 3 i 8d). U skladu sa tim, promena geometrije predstavlja razlog povećanja geometrijske razmene količine kretanja. S druge strane, takva geometrija leve plavne površine, na početku izlivanja, dovodi do većeg povećanja brzine nego na desnoj plavnoj površini (slike 8a i b), pa se razlika brzina u glavnom koritu i na plavnoj površini smanjuje (slika 8c) što smanjuje mogućnost formiranja velikih vrtloga, a sa tim i razmenu količine kretanja usled trubulentne difuzije.

Na desnoj plavnoj površini, koja počinje znatno ranije da se širi od leve (slike 3 i 8d), razmena količine kretanja usled neprizmatičnosti korita izraženija je od razmene turbulentnom difuzijom (slika 8b). Primećuje se da je ta promena konstantna, pa je zbog toga i razmene količine kretanja usled neprizmatičnosti korita ujednačenija. Razmena količine kretanja turbulentnom difuzijom na desnoj plavnoj površini manja je u odnosu na levu plavnu površinu, jer je površina poprečnog preseka na levoj plavnoj površini u proseku za oko 5,4% veća od površine poprečnog preseka na desnoj plavnoj površini. Prema tome, manja proticajna površina na desnoj plavnoj površini prouzrokuje veće brzine, a to smanjuje razliku između brzine u glavnom koritu i brzine na plavnoj površini (slika 8c). Zbog toga je razmena količine kretanja usled turbulencije na desnoj plavnoj površini manja u odnosu na razmenu na levoj plavnoj površini.

## 7. ZAKLJUČCI

U radu je prikazana primena metode razmene količine kretanja za određivanje krive protoka u dubokom koritu za veliku vodu sa uskim plavnim površinama. Pored MRKK, za određivanje krive protoka u domenu velikih voda primenjene su i dve tradicionalne metode: metoda jedinstvenog preseka (MJP) i metoda hidraulički homogenih segmenata (MHHS). Na osnovu zabeleženog nivograma iz maja 2014. godine i računskih krivih protoka, rekonstruisan je hidrogram poplavnog talasa. Konstatovano je neslaganje zvaničnih i računskih vrednosti protoka, pri čemu maksimalna odstupanja za MRKK, MJP i MHHS iznose redom, 77,26%, 62,93% i



84,45%. Razlog ovako velikih relativnih odstupanja trenutno nije moguće utvrditi, s obzirom na to da RHMZ Srbije nema dovoljno merenja u domenu velikih voda i činjenicu da su za ocenu ovih računskih metoda od presudnog značaja kvalitet i pouzdanost ulaznih podataka.

Pored neslaganja između osmotrenih i računskih vrednosti protoka, uočeno je i da MJP u slučaju hidrološke stanice Ub daje najmanje vrednosti protoka, iako za procenu gubitaka energije uzima u obzir samo otpore trenja. Ovo je posledica geometrijskih karakteristika poprečnog preseka korita. Korito za veliku vodu je duboko – vrednost odnosa dubine korita za veliku vodu i njegove širine u dnu znatno je veća od uobičajenih vrednosti i iznosi 1,46 (uobičajene vrednosti su mnogo manje od 1), a širina bermi koje su u proračunu razmatrane kao plavne površine, iznosi svega 2,5 m, što je procentualno mala širina u odnosu na ukupnu širinu preseka od oko 30,0 m. U ovakvim uslovima uskih plavnih površina i dubokog korita, uticaj razmene količine kretanja između plavnih površina i glavnog korita na raspodelu protoka i ukupan protok u koritu za veliku vodu je zanemarljiv, zbog čega presek relativno brzo postaje hidraulički homogen, pa primena MRKK ne donosi prednosti u odnosu na tradicionalne metode proračuna.

Naredni koraci podrazumevaju proveru MRKK u profilima hidroloških stanica sa širim plavnim površinama, odnosno sa većim odnosom širine i dubine korita, gde uticaj razmene količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina postaje značajan.

## ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije i JVP „Srbijavode“ na ustupljenim podacima.

## LITERATURA

- [1] Ackers, P. (1993): Flow formulae for straight twostage channels, *J. Hydr. Res.*, 31(4), 509-531.
- [2] Bousmar, D. and Zech, Y. (1999) Momentum transfer for practical flow computation in compound channels, *J. Hydr. Eng., ASCE*, 125(7), 696-706.
- [3] Đorđević, D., Stojnić, I., Muhić, F., (2015) Prikaz modela linijskog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovanog na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, *Vodoprivreda*, 47 (273-275): 79-91.
- [4] Đorđević, D., Stojnić, I., Rosić, N., (2017) Proračun linije nivoa u neprizmatičnom koritu za veliku vodu primenom metode razmene količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina (Primer korita jednostavne geometrije), *Vodoprivreda*, 49 (288-290): 349-361.
- [5] Đorđević, D., Ivković, M., Stojnić, I. (2018) Primena modela razmene količine kretanja za procenu krive protoka u koritu za veliku vodu prirodnog vodotoka, *Zbornik radova 18. naučnog savetovanja SDHI i SDH*, 507-516.
- [6] Đorđević, D., Ivković, M. & Stojnić, I. (2019) On the possibilities of application of exchange discharge model in estimation of a rating curve at a river gauging station. In: *E-proceedings of the 38th IAHR World Congress*, 2783-2790 (doi: 10.3850/38WC092019-0815).
- [7] Jovanović, M. (2008) *Regulacija reka*, Građevinski fakultet, Beograd.
- [8] Stojnić, I., Muhić, F. & Đorđević, D. (2015) Primena modela razmene količine kretanja u analizi uticaja geometrije i hidrauličkih otpora na osnovne odlike tečenja u koritu za veliku vodu. *Vodoprivreda*. 47(276-278): 261-268.

ESTIMATION OF THE STAGE-DISCHARGE CURVE AND  
RECONSTRUCTION OF THE FLOOD HYDROGRAPH IN A DEEP RIVER CHANNEL  
WITH NARROW FLOODPLAINS

by

Dejana ĐORĐEVIĆ

Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Ranka ERIĆ,

Faculty of Forestry, Belgrade

David JAĆIMOVIC

Ehting

Summary

In this paper the appropriateness of the exchange discharge method for the estimation of the stage-discharge curve and the reconstruction of the flood flow hydrograph in deep compound channels with narrow floodplains is discussed. This issue has been raised while estimating the stage-discharge curve at Ub gauging station based on the recorded stage hydrograph of the 2014 May flood and an attempt to reconstruct the corresponding flow hydrograph. The ratio of the depth of the compound channel to its bottom width takes a high value of 1.46 when compared to the usual values, which are far less than one. The berm width with the walking path where the overbank flow spills, is 2.5 m. Additionally, the compound channel is characterised by different surface covers which results in non-homogeneous roughness. Because of all these facts, the compound channel starts to behave as a single unit or a simple channel shortly after the initiation of the

overbank flow, i.e. the momentum transfer between the main channel and the floodplain becomes negligible. Consequently, the discharge values calculated by the exchange discharge method differ by 10% from those calculated by the traditional, single channel method. Since the Republic Hydrometeorological Service of Serbia had no flood data from the re-established Ub gauging station for the estimation of the overbank stage-discharge curve, there is a high level of uncertainty in the official stage-discharge curve. Thus, both the curve and the conclusions derived from this analysis should be reconsidered once there is enough data for proper estimation of the curve and proper conclusions about the appropriateness of the exchange discharge model.

Key words: flood wave, compound channel, stage-discharge curve, exchange discharge model, flood hydrograph, coherence

Redigovano 5.9.2021.