

PRIMENA MODELA RAZMENE KOLIČINE KRETANJA U ANALIZI UTICAJA GEOMETRIJE I HIDRAULIČKIH OTPORA NA OSNOVNE ODLIKE TEČENJA U KORITU ZA VELIKU VODU

Ivan STOJNIC, Filip MUHIĆ, Dejana ĐORĐEVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

U radu je sproveden niz numeričkih oglada sa ciljem da se utvrdi kako geometrija korita za veliku vodu (KVV) i rapavost plavnih površina utiču na razmenu količine kretanja (RKK) između glavnog korita i plavnih površina i njen udeo u ukupnom „gubitku” mehaničke energije toka. U tu svrhu korišćen je model linijskog ustaljenog tečenja u KVV vodu koji je zasnovan na RKK između glavnog korita i plavnih površina. Ispitivanje je pokazalo da se na plavnim površinama, zbog ujednačavanja hidrauličkih uslova u poprečnom preseku KVV, udeo RKK u ukupnom „gubitku” energije smanjuje sa povećanjem dubine nezavisno od geometrije korita i rapavosti plavnih površina i da razmena i njen udeo postaju veći u sledećim slučajevima: 1) kada je glavno korito dublje, 2) kada se isključi jedna plavna površina, i 3) kada se poveća rapavost plavnih površina. Promena udela RKK sa povećanjem dubine toka u glavnom koritu zavisi samo od rapavosti plavnih površina.

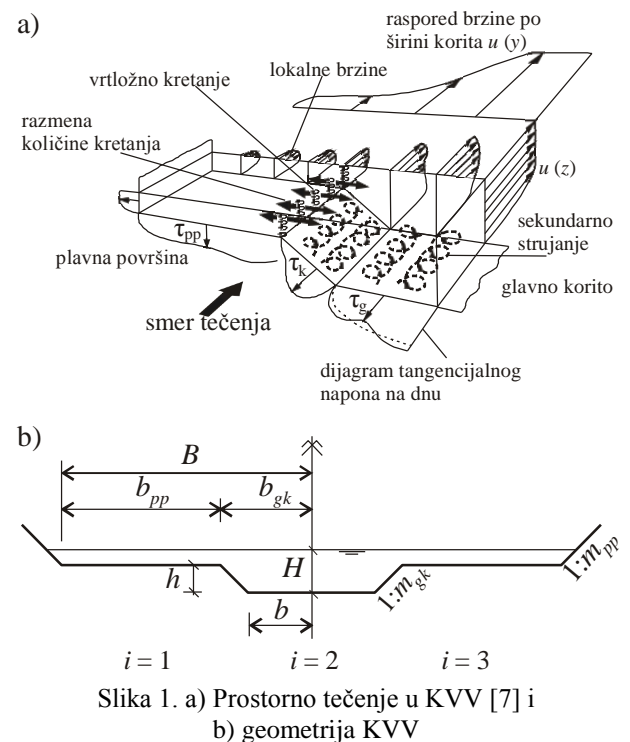
Ključne reči: korito za veliku vodu, razmena količine kretanja, „gubitak” mehaničke energije toka, širina i rapavost plavne površine, odnos dubine i širine glavnog korita

1. UVOD

Jedna od glavnih odlika tečenja u koritu za veliku vodu, po kojoj se ono razlikuje od tečenja kada se voda nalazi samo u glavnom koritu, jeste razmena količine kretanja između bržeg toka u glavnom koritu i sporijeg toka preko plavnih površina (slika 1a). Usporavanje toka na plavnim površinama posledica je naglog proširenja korita i znatno veće rapavosti plavnih površina izazvane prisustvom različitih vrsta rastinja. To znači da se u koritu za veliku vodu energija toka, osim za savlađivanje

otpora trenja i oblika, troši i na razmenu količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina. Za razliku od tradicionalnih, savremeni modeli linijskog tečenja uzimaju u obzir ovu razmenu i, kao takvi, pružaju mogućnost da se proceni udeo razmene količine kretanja u ukupnom „gubitku” mehaničke energije toka.

U ovom radu se, pomoću jednog takvog modela, ispituje kako geometrija složenog korita i rapavost plavnih površina utiču na razmenu količine kretanja i njen udeo u ukupnom „gubitku” energije pri različitim relativnim dubinama vode na plavnoj površini. Reč je o tzv. modelu razmene količine kretanja (MRKK) koji su krajem 1990ih predložili Buzmar i Zek [2]. Model je prethodno



proveren korišćenjem rezultata laboratorijskih oglada [2, 3, 4 i 6]. Od geometrijskih karakteristika razmatraju se uticaj širine korita za veliku vodu $2B/2b$ (gde je $2B$ širina korita za veliku vodu (KVV) u nivou obala, a $2b$ širina u dnu glavnog korita) i uticaj oblika glavnog korita koji je određen odnosom $2b/h$ (gde je h dubina glavnog korita) – slika 1b. Kada je reč o uticaju rapavosti plavnih površina, razmatraju se dva slučaja – jedan sa nepromenljivom rapavošću ($n_{pp}(H-h) = \text{const}$, gde je H dubina vode u glavnom koritu), koji odgovara slučaju stalno potopljene niske vegetacije i drugi, sa rapavošću koja se menja sa promenom dubine na plavnoj površini ($n_{pp} = f(H-h)$), koji odgovara drvenastom i žbunastom rastinju koje štrči iznad vode. U cilju sagledavanja i raščlanjivanja pojedinačnih uticaja svakog od razmatranih činilaca, posmatra se pojednostavljen slučaj tečenja u KVV, a to je jednoliko tečenje u simetričnom, prizmatičnom, dvogubom trapeznom koritu.

2. MATEMATIČKI MODEL

Matematički model linijskog neustaljenog/ustaljenog tečenja u KVV, koji su predložili Buzmar i Zek, svrstava se u grupu tzv. fizički zasnovanih modela. U njemu se, prilikom procene nagiba linije energije, pored trenja o čvrstu granicu, uzimaju u obzir i „gubici” mehaničke energije usled razmene količine kretanja između glavnog korita i plavne površine turbulentnom difuzijom, kao i oni usled tzv. „geometrijske” razmene. „Gubici” mehaničke energije usled razmene količine kretanja turbulentnom difuzijom posledica su smicanja između bržeg toka u glavnom koritu i sporijeg toka na plavnoj površini, dok su gubici usled geometrijske razmene posledica neprizmatičnosti korita. U cilju obuhvatanja ovih gubitaka, KVV deli se vertikalnim ravnima na glavno korito i plavne površine, a osnovne jednačine ispisuju se za svaki deo KVV posebno. Uticaj izostavljenog susednog segmenta/susednih segmenata uzima se u obzir uvođenjem dodatnih članova u jednačine. Tako se u jednačinu održanja mase uvodi jedinični bočni protok $q_b = q_{ul} + q_{izl}$ kroz graničnu površinu između segmenata, a u jednačinu održanja količine kretanja, komponenta proticaja količine kretanja u pravcu glavnog toka – $\rho q_{ul}u_b + \rho q_{izl}U$. Komponenta bočnog protoka koji ulazi u segment (bočni dotok) označena je sa q_{ul} , a komponenta koja iz njega izlazi (bočno isticanje), sa q_{izl} . Brzina u susednom segmentu, kojom se ostvaruje unos količine kretanja u pravcu glavnog toka, označena je sa u_b , dok je U odgovarajuća brzina u razmatranom segmentu kojom se „predaje” količina kretanja susednom segmentu.

Jednačine održanja mase i količine kretanja za segmente $i = 1, 2, 3$ tada redom glase:

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = q_{b_i} = q_{ul,i} - q_{izl,i}$$

(1)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho A_i U_i) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho A_i U_i^2) + \rho g A_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} + \rho g A_i I_{tr,i} - \rho q_{ul,i} u_{b,i} + \rho q_{izl,i} U_i = 0$$

(2)

Prostorna koordinata x i vreme t u prethodnim jednačinama predstavljaju nezavisno promenljive, ρ je gustina vode, a g ubrzanje Zemljine teže. Zavisno promenljive veličine su: površina razmatranog dela poprečnog preseka A_i , koja zavisi od kote nivoa Z_i i protok kroz taj deo poprečnog preseka Q_i . Srednja brzina u tom delu preseka je $U_i = Q_i / A_i$, a nagib linije energije usled trenja, $I_{tr,i}$. Jednačina održanja količine kretanja može se, nakon odgovarajućih transformacija i kombinovanja sa jednačinom održanja mase, prevesti u jednačinu održanja energije. Ona u uslovima ustaljenog tečenja glasi:

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

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

(3)

Drugi sabirak sa desne strane znaka jednakosti predstavlja „gubitak” mehaničke energije toka usled razmene količine kretanja između susednih segmenata. Njime su obuhvaćeni razmena količine kretanja turbulentnom difuzijom i razmena usled neprizmatičnosti korita. U MRKK sa χ se obeležava odnos dve komponente nagiba linije energije ($I_{rkk} / I_{tr} = \chi$). Razmena količine kretanja turbulentnom difuzijom za segmente $i = 1, 2, 3$ modelira se na sledeći način:

$$q_{ul,i}^t (U_i - u_b) = \psi^t |U_i - u_b| (H - h_i) (U_i - u_b) \quad (4)$$

a razmena količine kretanja usled neprizmatičnosti korita:

$$q_{ul,i}^g (U_i - u_b) = \psi^g \kappa_i \frac{dK_{pp}}{dx} \sqrt{I_{tr,pp}} (U_i - u_b)$$

(5)

U prethodnim izrazima ψ^t i ψ^s predstavljaju parametre modela čije se vrednosti podešavaju poređenjem sa rezultatima laboratorijskih ili terenskih merenja, K_{pp} i $I_{r,pp}$ su protočnost plavne površine i nagib linije energije usled trenja za plavnu površinu, a κ uzima vrednosti iz skupa $\{-1, 0, 1\}$ u zavisnosti od toga koji se segment KVV posmatra i da li se KVV sužava ili širi (videti [2, 3, 4 i 6]).

U ovom radu posmatra se prizmatično korito ($q_{ul,i}^g = 0$), tako da gubitak usled razmene količine kretanja obuhvata samo deo koji potiče od turbulentne difuzije.

3. UTICAJNI ČINIOCI

Tečenje u KVV zavisi od niza činilaca koji se, grubo, mogu razvrstati u nekoliko kategorija. To su: geometrijski, hidraulički, psamološki i antropogeni. U geometrijske činioce ubrajaju se: širina u dnu glavnog korita $2b$ i njegova dubina uz svaku od obala h_1 i h_3 , širina KVV u nivou obala $2B$ (ili širina plavne površine $B - b - m_{gk}h_i$) – svi prikazani na slici 1b, stepen zakrivljenosti trase glavnog korita i uzdužni nagib dna I_d . Od hidrauličkih činilaca to su protoci Q_{gk} i Q_{pp} ili brzine V_{gk} i V_{pp} u glavnom koritu i na plavnim površinama, dubina vode u glavnom koritu H , odnosno dubina vode na plavnoj površini $H - h_i$, $i = 1, 3$ i visina, raspored, gustina i krutost elemenata rapavosti na plavnim površinama. U psamološke se ubrajaju fizičke osobine nanosa, a u antropogene, način korišćenja plavnih površina. Kao što je već rečeno, u ovom radu se posmatraju samo neki od geometrijskih i hidrauličkih činilaca i to u prizmatičnom, pravolinijskom, simetričnom/asimetričnom kanalu u uslovima jednolikog tečenja. Bez ulaženja u detalje dimenzionalne analize, koja prevazilazi obim ovog rada, može se napisati da je bez-dimenzionalna razmena količine kretanja između dva segmenta korita za veliku vodu funkcija sledećih bez-dimenzionalnih veličina:

$$I_{rkk} = f\left(\frac{B}{b}, \frac{2b}{h}, \frac{H-h}{H}, \frac{n_{pp}}{n_{gk}}, Re, Fr\right) \quad (6)$$

od kojih prve dve odražavaju uticaj geometrijskih, a druge dve, uticaj hidrauličkih činilaca. Poslednje dve su pokazatelji uticaja viskoznosti i gravitacije. Prvim članom u izrazu (6) obuhvata se uticaj širine KVV, odnosno širine plavne površine, a drugim, uticaj oblika poprečnog preseka glavnog korita na razmenu količine kretanja (RKK) između glavnog korita i plavnih po-

vršina. Treći član predstavlja relativnu dubinu vode na plavnoj površini, a četvrtim se obuhvata uticaj rapavosti plavnih površina.

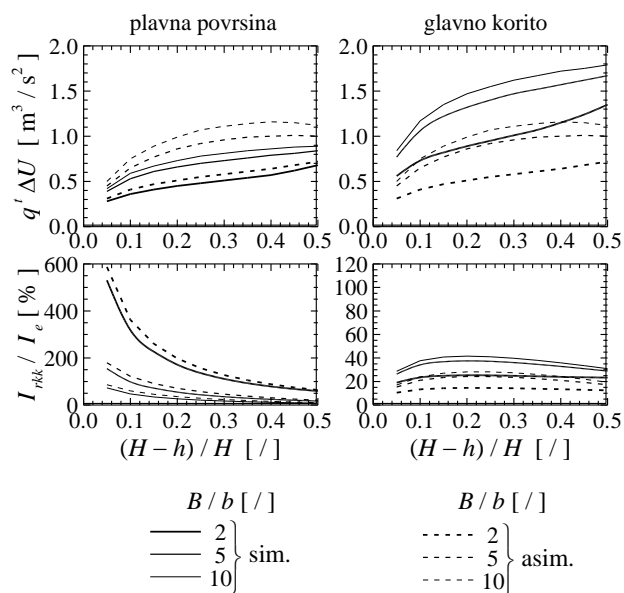
Širina KVV variraće se u širokom rasponu vrednosti $B/b = \{2, 5, 10, 20, 40, 50, 75\}$. Razmatranjima će se obuhvatiti dva granična slučaja – slučaj KVV ograničene širine $B = 2b$ i hipotetički slučaj široke rečne doline bez objekata kojima se ograničava KVV ($B = 75b$) da bi se utvrdilo da li postoji vrednost B/b pri kojoj širina plavne površine prestaje da utiče na RKK. Istovremeno će se ispitati i uticaj isključenja jedne plavne površine (asimetrično KVV). U svim analiziranim slučajevima glavno korito je široko pravougaono ($2b/h \geq 5$). S obzirom na to da vrednost $2b/h$ duž trase korita može da se menja, u jednoj grupi numeričkih ogleda variraće se vrednost ovog odnosa u rasponu od 5 (što odgovara donjoj granici za kategorizaciju korita kao širokog pravougaonog) do 50 (što, npr., odgovara koritu reke Dunav u blizini Beograda), a razmatrani skup obuhvatiće sledeće vrednosti $2b/h = \{5, 10, 20, 50, 75\}$. Uticaj geometrijskih činilaca sagledaće se u KVV sa „glatkim“ dnom ($n_{pp} = n_{gk} = 0,010 \text{ m}^{-1/3}$ s). Imajući u vidu da plavne površine pokrivaju različite vrste rastinja, ispitivanje uticaja rapavosti plavnih površina obuhvatiće dva slučaja. Prvi, sa stalno potopljenom vegetacijom (livade, niske povrtarske kulture) u kojem se pretpostavlja da se rapavost plavne površine ne menja po dubini ($n_{pp}(H-h) = \text{const}$) i drugi, sa drvenastim i žbunastim rastinjem koje štrči iznad vode, kada se rapavost menja po dubini ($n_{pp} = f(H-h)$). U slučaju promenljive rapavosti pretpostavlja se da se ona menja po zakonu utvrđenom laboratorijskim ogledima [1], a u slučaju nepromenljive rapavosti razmotriće se sledeći slučajevi: $n_{pp}/n_{gk} \in [1,5; 5,0]$, pri čemu će se vrednost ovog odnosa uvećavati sa korakom 0,5. U svim numeričkim ogledima relativna dubina na plavnoj površini $(H-h)/H$ biće u rasponu od 0,05 do 0,50.

4. NUMERIČKI OGLEDI

Početna geometrija glavnog korita u odnosu na koju su u numeričkim ogledima varirane vrednosti ispitivanih parametara podrazumeva širinu u dnu glavnog korita od $2b = 50 \text{ m}$ i jednaku dubinu korita uz svaku od obala $h_1 = h_3 = h = 5 \text{ m}$ (slika 1b). Vrednost Reynoldsovog broja u svim ogledima bila je veća od 1×10^6 , a vrednost Frudovog broja za ceo presek kretala se između 0,40 i 0,95 izuzev u ogledima u kojima je $B/b = 2$. U tom slučaju, vrednosti Frudovog broja bile su malo veće od 1,0.

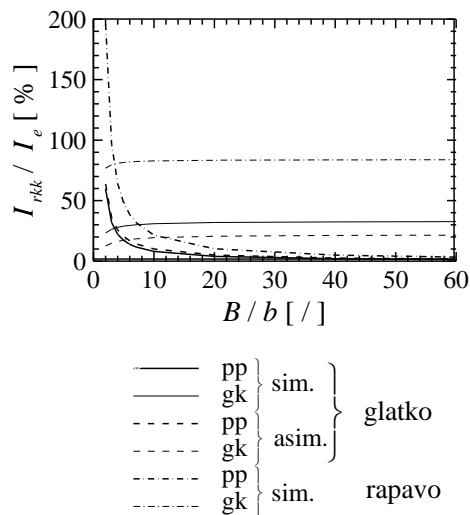
Uticaj širine plavne površine ispitan je za vrednost parametra $2b / h = 10$ pod pretpostavkom da je dno KVV „glatko”. Ogljedima je obuhvaćen i slučaj isključenja jedne plavne površine (asimetrično korito). Rezultati proračuna prikazani su na slici 2.

Može se primetiti da i u simetričnom i u asimetričnom koritu RKK u oba smera – između glavnog korita i plavne površine $q_{pp}^t \Delta U$ i između plavne površine i glavnog korita $q_{gk}^t \Delta U$, monotono raste sa porastom vrednosti oba parametra – relativne dubine na plavnoj površini $(H - h) / H$ i relativne širine plavne površine B / b (slika 2, prvi red). Razmena količine kretanja na plavnoj površini kod asimetričnih korita veća je od razmene u simetričnim koritima za 7% do 45%, jer se isključenjem jedne plavne površine pri istom nivou vode povećava gradijent brzine između glavnog korita i plavne površine. U simetričnom koritu razlika brzina ΔU kreće se između 1,7 m/s i 5,9 m/s, a u asimetričnom između 1,9 m/s i 6,5 m/s. Sa druge strane, RKK za glavno korito je u simetričnom KVV za 27% do 45% veća nego u asimetričnom, jer u ukupnom doprinosu RKK u simetričnom koritu učestvuju dve plavne površine, za razliku od asimetričnih korita gde učestvuju samo jedna plavna površina.



Slika 2. Uticaj širine plavne površine na razmenu količine kretanja između susednih segmenata (prvi red) i udeo te razmene u ukupnom „gubitku” energije (drugi

red) za simetrična i asimetrična KVV sa glatkim plavnim površinama ($2b / h = 10$)



Slika 3. Uticaj širine plavnih površina na udeo razmene količine kretanja između susednih segmenata u ukupnom „gubitku” energije za simetrična i asimetrična KVV sa glatkim i rapavim plavnim površinama ($(H - h) / H = 0,50$).

Razlika između plavnih površina i glavnog korita postaje još očitija kada se posmatra udeo RKK u ukupnom gubitku energije (I_{rkk} / I_e). Za plavne površine to je monotono opadajuća funkcija, dok za glavno korito ona ima oblik parabole. Udeo RKK u ukupnom gubitku energije na plavnim površinama (slika 2, drugi red) veći je za asimetrična korita, kao i sama RKK (slika 2, prvi red). U glavnom koritu situacija je obrnuta. Smanjenje udela RKK u ukupnom gubitku energije na plavnim površinama sa povećanjem relativne dubine, rezultat je ujednačavanja hidrauličkih uslova u poprečnom preseku KVV, odnosno smanjenja gradijenta brzine između glavnog korita i plavnih površina. U glavnom koritu, udeo razmene količine kretanja dostiže najveću vrednost za $(H - h) / H = 0,20$, a sa daljim povećanjem relativne dubine on monotono opada, što je u skladu sa zaključcima laboratorijskih ispitivanja [5].

Na slici 3 je, primera radi, prikazan uticaj promene širine plavne površine za jednu vrednost relativne dubine na plavnoj površini ($(H - h) / H = 0,50$). Odmah se uočava da je u koritima sa užim plavnim površinama ($B / b < 10$) razmena količine kretanja između plavnih površina i glavnog korita izraženija ($I_{rkk} / I_e > 25\%$), jer je u tom slučaju širina vrtloga sa vertikalnom osovinom, kroz koji se razmenjuje količina kretanja, približno jednaka širini plavne površine i uticaj obala nije zane-

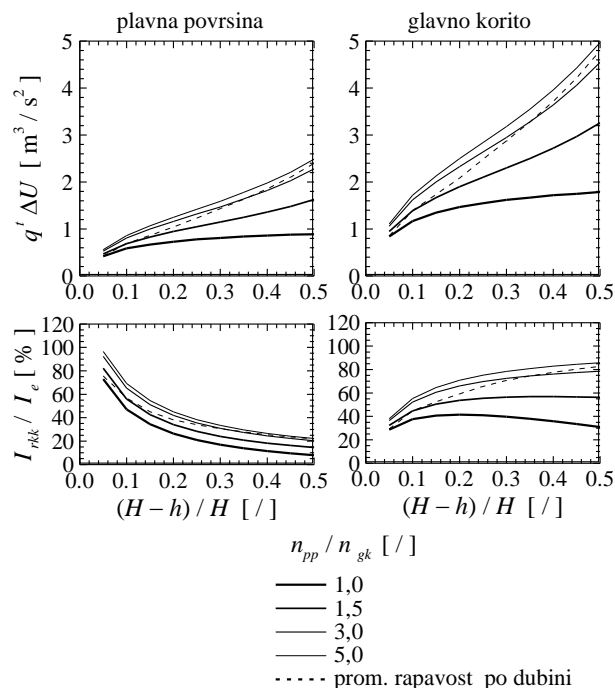
marljiv. Na širim plavnim površinama ($B/b > 10$) uticaj obala na pojave koje se dešavaju na prelazu iz glavnog korita na plavne površine postaje zanemarljiv i praktično se gubi kada je $B/b = 60$ (I_{rkk}/I_e postaje manje od 2%). U glavnom koritu je promena udela RKK sa povećanjem širine KVV manje izražena nego na plavnim površinama. Kada je $B/b < 10$, povećanja su manja od 5%, a od $B/b = 10$ učešće RKK u ukupnom „gubitku” energije paratično se ne menja. U simetričnim koritima ono je za 50% veće nego u asimetričnim. Za datu vrednost relativne dubine, $I_{rkk}/I_e \approx 30\%$ u simetričnom, a $I_{rkk}/I_e \approx 20\%$ u asimetričnom KVV.

Sledeći korak u ispitivanju uticaja izabranih činilaca jeste uvođenje u razmatranje rapavosti plavnih površina. Zbog veće rapavosti plavnih površina u odnosu na rapavost glavnog korita, tok preko plavne površine je sporiji u odnosu na tok preko „glatke” plavne površine, što za posledicu ima veće smicanje između dva toka i veću razmenu količine kretanja između susjednih segmenata KVV. Najpre će se razmotriti uticaj nepromenljive rapavosti po dubini, a potom i uticaj rapavosti koja se po dubini menja.

Uticaj nepromenljive rapavosti plavne površine ispitan je na primeru simetričnog KVV kod koga je $B/b = 10$, a $2b/h = 10$. Rezultati za nekoliko izabranih vrednosti rapavosti plavne površine uključujući i slučaj „glatke” plavne površine ($n_{pp}/n_{gk} = 1,0$) prikazani su na slici 4.

Kada je plavna površina rapava, RKK kao i u slučaju „glatkih” plavnih površina, monotono raste sa povećanjem relativne dubine na plavnoj površini, a taj porast je brži i veći što je plavna površina rapavija (slika 4, prvi red). Tako se povećanje RKK u odnosu na „glatke” plavne površine za $n_{pp}/n_{gk} = 1,5$ kreće se u rasponu od oko 10% pri manjim dubinama do 80% pri $(H-h)/H = 0,50$, a za $n_{pp}/n_{gk} = 5,0$ ono raste od oko 30% do približno 180%. Zanimljivo je zapaziti da se za jednu dubinu vode na plavnoj površini priraštaj RKK usled povećanja rapavosti nelinearno smanjuje. Primera radi, za $(H-h)/H = 0,50$, priraštaj se smanjuje od oko 80% za $n_{pp}/n_{gk} = 1,5$, do približno 1% za $n_{pp}/n_{gk} = 5,0$.

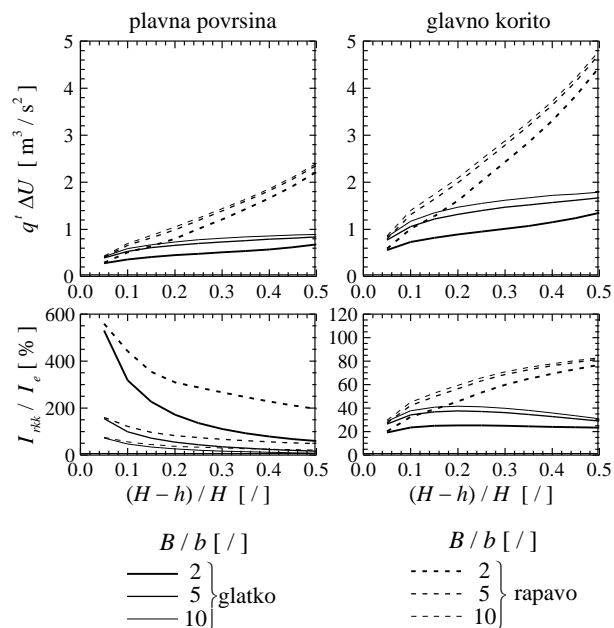
Kao i kod „glatkih” plavnih površina, udeo RKK u ukupnom „gubitku” energije na rapavim plavnim površinama monotono opada sa porastom relativne dubine. Priraštaj udela RKK sa porastom rapavosti plavnih površina ujednačeniji je od priraštaja same RKK. Linije $I_{rkk}/I_e((H-h)/H)$ su približno paralelne



Slika 4. Uticaj rapavosti plavne površine na razmenu količine kretanja između susjednih segmenata (prvi red) i udeo te razmene u ukupnom „gubitku” energije (drugi red) za simetrična KVV (slučaj nepromenljive rapavosti po dubini; $2b/h = 10$ i $B/b = 10$). Na slici je prikazano i poređenje sa slučajem rapavosti koja se menja po dubini

(slika 4, drugi red, levo), za razliku od linija $q'\Delta U((H-h)/H)$ koje se „zrakasto” razilaze (slika 4, prvi red). Linija koja pokazuje promenu udela RKK u glavnom koritu u zavisnosti od dubine na plavnoj površini menja oblik sa promenom rapavosti. Pri manjim vrednostima rapavosti plavnih površina ona ima oblik parabole, a sa povećanjem rapavosti postaje monotono neopadajuća funkcija. Zbog toga priraštaj udela RKK sa povećanjem dubine nije ujednačen kao na plavnim površinama, već zadržava isti karakter kao dimenzionalna veličina $q'\Delta U$.

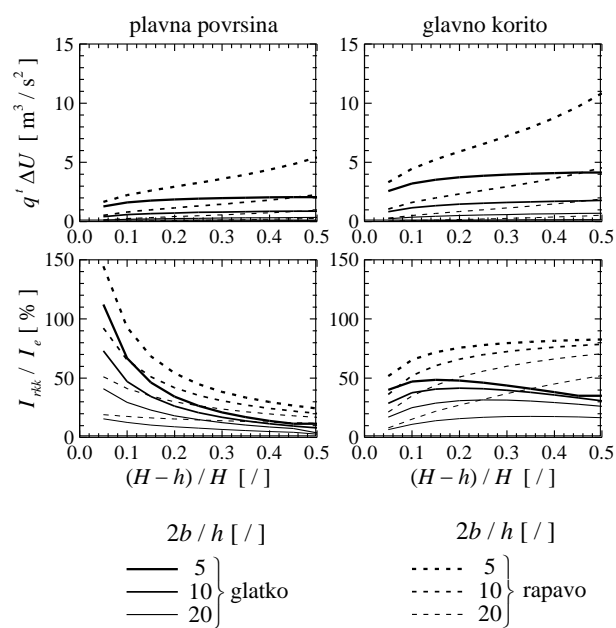
Uticaj promenljive rapavosti plavne površine ispitan je na primeru simetričnog KVV kod koga je $2b/h = 10$. Razmatranjima je obuhvaćen ceo raspon širina KVV $B/b = [2, 75]$. Rezultati za nekoliko izabranih vrednosti B/b uključujući i odgovarajuće slučajeve „glatkih” plavnih površina ($n_{pp}/n_{gk} = 1,0$) prikazani su na slici 5. Odmah se zapaža da su na rapavim plavnim površinama, zbog značajnijeg smanjenja brzine, i RKK i gradijent njenog porasta veći nego na „glatkim” plavnim



Slika 5. Uticaj širine i rapavosti plavne površine na razmenu količine kretanja između susjednih segmenata (prvi red) i udeo te razmene u ukupnom „gubitku” energije (drugi red) za simetrična KVV (slučaj rapavosti koja se menja po dubini; $2b/h=10$)

površinama (slika 5, prvi red). Povećanje RKK pri malim relativnim dubinama najveće je na uskim plavnim površinama ($B/b=2$) i iznosi oko 5%, a u KVV kod kojih je $B/b \geq 10$ ono se smanjuje na približno 2%. Pri najvećim relativnim dubinama $(H-h)/H=0,50$, RKK na rapavim plavnim površinama je od 1,6 do 2,3 puta veća od one na „glatkim” plavnim površinama. Isto važi i za glavno korito, gde je, zbog simetrije, RKK dvostruko veća nego na plavnoj površini.

Povećanje RKK na plavnim površinama sa promenljivom rapavošću za posledicu ima njen veći udeo u ukupnom nagibu linije energije i znatno sporije i manje opadanje tog udela sa povećanjem dubine na plavnoj površini (slika 5, drugi red, levo). Primera radi, za $B/b=10$, udeo RKK pri $(H-h)/H=0,5$ na rapavim plavnim površinama iznosi oko 20%, dok se na „glatkim” površinama smanjuje na približno 8%. Povećanje rapavosti plavnih površina odražava se i na zakon promene udela RKK u glavnom koritu – parabole koje na „glatkim” plavnim površinama dostižu najveću vrednost pri $(H-h)/H=0,20$, postaju monotono rastuće linije na plavnim površinama kod kojih se rapavost menja po dubini (slika 5, drugi red, desno).



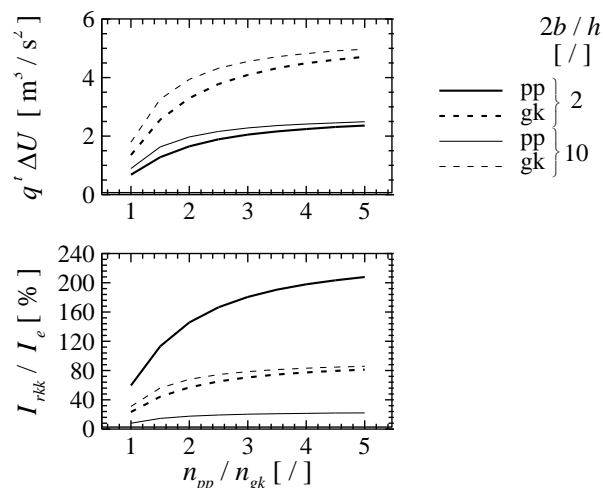
Slika 6. Uticaj odnosa širine i dubine glavnog korita na razmenu količine kretanja između susjednih segmenata (prvi red) i udeo te razmene u ukupnom „gubitku” energije (drugi red) za simetrična KVV ($B/b=10$)

Zanimljivo je zapaziti da se za $B/b=10$ i $2b/h=10$ RKK u KVV sa plavnim površinama kod kojih se rapavost menja po dubini povećava sa porastom nivoa vrlo slično kao RKK u KVV u kojem je rapavost plavnih površina konstantna i pet puta veća od rapavosti glavnog korita. To, međutim, ne važi za promenu udela RKK u ukupnom „gubitku” energije. Udeo RKK manji je kada se rapavost menja sa dubinom i na plavnoj površini se znatno sporije smanjuje sa porastom nivoa nego kada je $n_{pp}/n_{gk}=5,0$, dok u glavnom koritu neznatno brže raste. Udeo RKK za ravnomernu i udeo za neravnomernu rapavost se pri velikim dubinama vode $(H-h)/H \approx 0,5$ praktično izjednačavaju i na plavnoj površini i u glavnom koritu.

Pored ovoga, zanimljivo je zapaziti i to da je u slučaju KVV sa plavnim površinama promenljive rapavosti trend smanjenja udela RKK u ukupnom „gubitku” energije pri povećanju širine plavne površine isti kao i u slučaju KVV sa glatkim plavnim površinama. Do vrednosti odnosa $B/b=10$, razmena količine kretanja između plavnih površina i glavnog korita je izražena ($I_{rkk}/I_e > 20\%$), a sa daljim proširenjem korita smanjuje se ispod 10% (za $B/b=60$, $I_{rkk}/I_e \approx 3,3\%$). Promena udela RKK u glavnom koritu sa povećanjem širine KVV

takodje je manje izražena nego na plavnim površinama. Kada je $B/b < 10$, povećanja su zanemarljivo mala – manja od 3%, a od $B/b = 10$ učešće RKK u ukupnom „gubitku” energije praktično se ne menja i iznosi oko 83%, što je oko 2,5 puta više nego u slučaju glatkih plavnih površina.

Uticaj odnosa širine i dubine glavnog korita ispitan je na primeru simetričnog KVV kod koga je $B/b = 10$. Na slici 6 upoređeni su rezultati za KVV sa „glatkim” plavnim površinama i rapavim plavnim površinama kod kojih je $n_{pp}/n_{gk} = 3,0$. Zapaža se da je RKK manja u plićem koritu (slika 6, prvi red), jer su gradijenti brzine između glavnog korita i plavne površine manji kod plićih nego kod dubljih korita. Primera radi, u KVV sa „glatkim” plavnim površinama za $2b/h = 50$ razlika brzina je oko $\Delta U = 2,0$ m/s, dok je za $2b/h = 5$ ta razlika oko $\Delta U = 3,0$ m/s. U koritu sa rapavim plavnim površinama ove razlike iznose oko 2,7 m/s kada je $2b/h = 50$, odnosno oko 5,5 m/s kada je $2b/h = 5$. Zbog toga je i promena udela RKK u ukupnom „gubitku” energije na plavnim površinama izraženija kod dubljih nego kod plićih korita. Primera radi, za $2b/h = 5$ udeo I_{rkk}/I_e se sa porastom dubine nelinearno smanjuje od oko 110% na 11% na „glatkim”, odnosno od 145% na 25% na rapavim plavnim površinama. Za $2b/h = 75$ odgovarajući rasponi promene kreću se od 10–3% i od 12–10% (slika 6, drugi red, levo). Na promenu RKK u glavnom



Slika 7. Uticaj nepromenlive rapavosti plavnih površina na razmenu količine kretanja između susjednih segmenata (prvi red) i udeo te razmene u ukupnom „gubitku” energije (drugi red) za simetrična KVV sa različitim vrednostima odnosa širine i dubine glavnog korita ($2B/h$) kod kojih je $B/b = 10$

koritu utiču i njegova dubina i rapavost plavnih površina. Kada su plavne površine glatke, funkcija $I_{rkk}/I_e((H-h)/H)$ sa smanjenjem dubine glavnog korita prelazi od parabolične u monotono neopadajuću, a kada su rapave, monotono neopadajuća, prelazi u monotono rastuću funkciju (slika 6, drugi red, desno).

Slika 7 prikazuje kako u KVV sa različitim vrednostima odnosa širine i dubine glavnog korita plavne površine kod kojih se rapavost ne menja po dubini utiču na RKK. Razmena količine kretanja $q'\Delta U$ između glavnog korita i plavnih površina izraženija je kada je glavno korito dublje i za $2b/h = 2$ dva puta je veća od razmene koja se ostvaruje kada je $2b/h = 10$ (slika 7 gore). Na plavnim površinama je situacija obrnuta – kada je glavno korito pliće, $q'\Delta U$ je 1,1 do 1,3 veća nego u slučaju dubokog glavnog korita. Kada se posmatra udeo ove razmene u ukupnom „gubitku” energije, ova prividna nelogičnost nestaje, jer je u koritu sa $2b/h = 2$ ovaj udeo 7,5 do 9,5 puta veći nego u koritu sa $2b/h = 10$ (slika 7 dole).

5. ZAKLJUČCI

U ovom radu sproveden je niz numeričkih ogleda korišćenjem modela linijskog ustaljenog tečenja u koritu za veliku vodu. Reč je o modelu koji je prethodno detaljno proveren korišćenjem rezultata laboratorijskih ogleda i koji uzima u obzir razmenu količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina. Variranjem geometrije korita za veliku vodu i rapavosti plavnih površina utvrđeno je sledeće.

1. Kod simetričnih korita RKK između plavnih površina i glavnog korita dvostruko je veća od razmene između glavnog korita i plavne površine, zato što glavno korito ima dva, a plavna površina samo jedan susjedni segment.
2. Udeo RKK u ukupnom "gubitku" mehaničke energije na plavnoj površini smanjuje se sa povećanjem dubine nezavisno od geometrije KVV i rapavosti plavnih površina zbog ujednačavanja hidrauličkih uslova u poprečnom preseku KVV, odnosno zbog smanjenja gradijenta brzine između glavnog korita i plavnih površina.
3. Isključenje jedne plavne površine, produbljenje glavnog korita (smanjenje vrednosti odnosa $2b/h$) i povećanje rapavosti plavnih površina kod simetričnih korita utiču na povećanje udela RKK u ukupnom "gubitku" mehaničke energije toka, jer se u sva tri slučaja povećava RKK sa glavnim koritom.

4. U glavnom koritu promena udela RKK po dubini prvenstveno zavisi od rapavosti plavnih površina. Kada su plavne površine glatke, ovaj udeo se menja po paraboličnom zakonu, a najveća vrednost se dostiže pri onoj relativnoj dubini pri kojoj presek prestaje da bude hidraulički heterogen. Na rapavim plavnim površinama promena udela RKK zavisi od toga da li se rapavost menja po dubini ili ne. Kada se rapavost ne menja po dubini, promena udela RKK je monotono neopadajuća funkcija, a kada se rapavost povećava sa dubinom, prelazi u monotono rastuću funkciju.
5. Što je glavno korito pliće, tj. što je vrednost odnosa širine i dubine korita veća, presek KVV je u hidrauličkom smislu homogeniji, pa se udeo RKK i za plavnu površinu i za glavno korito smanjuju.

LITERATURA

- [1] Ackers, P., (1993), Flow formulae for straight two-stage channels, *J. Hydr. Res.*, 31(4), pp 509-531
- [2] Bousmar, D. and Zech, Y., (1999), Momentum transfer for practical flow computation in compound channels, *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(7), pp 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* 2015/1-3, 273-275, p. 79-91
- [4] Muhić, F., (2015), Model linijskog ustaljenog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovan na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina – uticaj rapavosti plavnih površina na krivu protoka, seminarski rad iz predmeta Odbrana od poplava, Građevinski fakultet, Beograd
- [5] Myers, W.R.C. and Brennan, E.K., (1990), Flow resistance in compound channels, *J. Hydr. Res.*, 28(2), pp 141-155
- [6] Stojnić, I., (2014), Model linijskog ustaljenog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovan na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina – uticaj širine plavnih površina na krivu protoka, seminarski rad iz predmeta Odbrana od poplava, Građevinski fakultet, Beograd
- [7] Shiono, K., and Knight, D.W., (1991), Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel, *J. Fluid Mech.* Vol. 222, pp 617-646

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHANNEL GEOMETRY AND HYDRAULIC RESISTANCE ON FLOW CHARACTERISTICS IN COMPOUND CHANNELS WITH THE EXCHANGE DISCHARGE METHOD

by

Ivan STOJNIĆ, Filip MUHIĆ, Dejana ĐORĐEVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Summary

A series of numerical experiments is conducted to determine how compound channel geometry and floodplain roughness affect both a momentum transfer between main channel and floodplains and its contribution to the total energy "loss". To this aim, a 1D, exchange discharge model, which accounts for the momentum exchange between the main channel and floodplains, is used. It is found that the contribution of the momentum exchange to the total energy "loss" reduces on floodplains with the flow depth regardless of the compound channel geometry and floodplain roughness and that both, the momentum

exchange and its contribution to the total energy "loss", are increased in the following cases: 1) when the main channel aspect ratio decreases, 2) when compound channel is asymmetrical and 3) when the roughness of the floodplain increases. In the main channel, the variation in the momentum exchange contribution with the flow depth depends only on the floodplain roughness.

Keywords: compound channel, momentum exchange, energy "loss", floodplain width and roughness, main channel aspect ratio

Redigovano 19.11.2015.