

OTPORI TRENJA U NATURALNO UREĐENIM REČNIM TOKOVIMA

Dejan KOMATINA
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Predmet rada je proračun otpora trenja u naturalno uređenim vodotocima, koje odlikuje značajna neuniformnost morfoloških karakteristika, kao i karakteristika nanosa i vegetacije u rečnom koritu. Prikazani postupak proračuna se zasniva na primeni koeficijenta trenja Darcy-Weisbacha i omogućava definisanje otpora trenja u slučaju rečnog dna sačinjenog od peska, šljunka, kamena ili kamenih gromada, kao i u slučaju korita obraslog travnatim pokrivačem, odnosno visokom vegetacijom (drvećem i visokim žbunjem). Prednost izloženog postupka je mogućnost proračuna otpora trenja na osnovu parametara koje je na terenu moguće izmeriti (krupnoće nanosa, visine travnatog pokrivača, prosečnog prečnika stabala u inundaciji i rastojanja između njih, itd.), što je veoma značajno obzirom da su predmet naturalnog uređenja pretežno mali vodotoci, za koje najčešće ne postoje rezultati snimanja nivoa vode, koji bi poslužili za kalibraciju modela otpora trenja.

Ključne reči: naturalno uređenje reka, otpori trenja, koeficijent trenja Darcy-Weisbacha.

1. UVOD

Naturalno uređenje rečnih tokova je pristup koji se u svetu široko primenjuje već dve decenije, pre svega pri regulaciji manjih vodotoka. Postoji obimna literatura u kojoj se preporučuju postupci naturalne regulacije (na primer, [1-6]) u opsegu od lokalnih intervencija na rečnom koritu do kompleksnog uređenja rečnog koridora.

Pored tehničke funkcionalnosti, pouzdanosti i ekonomske opravdanosti tehničkog rešenja regulacije, u okviru naturalnog pristupa se postavlja dodatni uslov

ekološke (i estetske) prihvatljivosti. Uvođenje novog zahteva dovodi do "preraspodele težina" pojedinih faktora pri tehno-ekonomskom vrednovanju varijantnih rešenja, tako da postaju prihvatljive varijante koje odlikuje kraći vek trajanja, ali pozitivni ekološki efekti, najčešće uz znatno nižu cenu koštanja u poređenju sa rešenjima zasnovanim na klasičnom pristupu. Problem kraćeg veka trajanja regulacionih građevina prevazilazi se redovnim održavanjem (čišćenjem) vodotoka, osmatranjem, rekonstrukcijom i zamenom oštećenih građevina, što predstavlja jedan od osnovnih principa naturalnog uređenja vodotoka.

U cilju postizanja ekološke prihvatljivosti tehničkog rešenja, teži se što široj primeni prirodnih materijala (pre svega, materijala biljnog porekla), kao i povećanju hidrauličke i morfološke raznovrsnosti rečnog korita, radi povećanja biološke raznovrsnosti vodotoka i priobalja i, konačno, poboljšanja ekološkog i estetskog kvaliteta sredine. Kao posledica toga, naturalno regulisane tokove odlikuju složeniji uslovi tečenja u odnosu na vodotoke uređene prema klasičnom pristupu. Predmet ovog rada je proračun otpora trenja u naturalno uređenim vodotocima. Opisani su postupci određivanja otpora trenja za različite stepene hrapavosti dna korita i obraslosti rečnih obala vegetacijom, primenjivi u modelima za simulaciju linijskog ustaljenog tečenja sa slobodnom površinom.

2. TEORIJSKE OSNOVE

Povećanje biološke raznovrsnosti vodotoka, što predstavlja jedan od glavnih ciljeva naturalnog uređenja reka, postiže se povećanjem hidrauličke i morfološke raznovrsnosti rečnog korita. Korito vodotoka, regulisano po ovom principu, odlikuju:

- meandrirajuća trasa, kao posledica očuvanja starih i projektovanja novih meandera;

- neuniformnost uzdužnog nagiba dna;
- složenost oblika poprečnih profila;
- raznovrsnost poprečnih profila po obliku i dimenzijama;
- širok opseg hrapavosti dna korita (vrednost odnosa dubine toka i najkrupnijeg zrna nanosa kreće se u opsegu 0.1-100);
- raznovrsnost vegetacije u osnovnom i koritu za veliku vodu, u pogledu dimenzija i prostornog rasporeda, elastičnosti, stepena potopljenosti, itd.;
- neuniformnost karakteristika nanosa i vegetacije u poprečnom profilu.

U većini programa za hidraulički proračun tokova sa slobodnom površinom, prve četiri navedene karakteristike se obuhvataju na sličan način i zato nisu predmet razmatranja u ovom radu. Kada su u pitanju poslednje tri navedene odlike naturalno uređenih tokova, u praksi se za potrebe definisanja otpora trenja koriste koeficijenti Manninga, odnosno Darcy-Weisbacha. Obzirom da se u slučaju malih vodotoka, koji su predmet naturalne regulacije, najčešće ne raspolaže rezultatima snimanja nivoa vode, koji bi poslužili za kalibraciju modela otpora trenja, primena koeficijenta Darcy-Weisbacha ima određene prednosti, koje se ilustruju u nastavku.

Analizira se slučaj linijskog, ustaljenog, blago promenljivog nejednolikog tečenja sa dominantnim linijskim gubicima energije, koji se mogu opisati vezom:

$$I_E = \lambda \cdot \frac{1}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

gde su: I_E - nagib energetske linije; λ - koeficijent trenja Darcy-Weisbacha; R - hidraulički radijus; V - srednja profilna brzina tečenja vode, a g - gravitaciono ubrzanje.

Postupak izračunavanja vrednosti koeficijenta λ u izrazu (1) zavisi od izvora hrapavosti rečnog korita, od kojih se dva analiziraju u daljem tekstu - *rečno dno* i *vegetacija u rečnom koritu*.

Otpori trenja usled hrapavosti rečnog dna. Prema klasifikaciji Bathursta, postoje tri stepena hrapavosti rečnog dna (tabela 1).

Tabela 1. Klasifikacija hrapavosti rečnog dna [7].

| Hrapavost dna | Opseg vrednosti h / d_{50} | Opseg vrednosti h / d_{85} |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Mala | > 7.5 | > 4.0 |
| Srednja | 2.0 - 7.5 | 1.2 - 4.0 |
| Velika | < 2.0 | < 1.2 |

Oznake: h - dubina toka; d_n - prečnik zrna nanosa zastupljenosti n (%).

Pri *maloj hrapavosti* rečnog dna može se koristiti poznata Colebrook-White formula, prilagođena slučaju otvorenog toka uvođenjem koeficijenta oblika poprečnog preseka c [8,9]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -2.03 \cdot \log \left(\frac{2.51}{c \cdot Re \sqrt{\lambda_o}} + \frac{k_s}{c \cdot 14.84 \cdot R} \right), \quad (2)$$

gde je: λ_o - koeficijent trenja o rečno dno; $Re = V \cdot 4R / \nu$ - Reynoldsov broj; ν - koeficijent kinematičke viskoznosti, a k_s - ekvivalentna peščana hrapavost (tabela 2).

Vrednost koeficijenta c određuje se tako što se razmatrani segment poprečnog preseka rečnog korita (glavno korito ili inundacija) aproksimira geometrijskom slikom jednostavnog oblika (trougao, pravougaonik, trapez), za koju postoji empirijski izraz. Na primer, ukoliko je segment aproksimiran pravougaonikom dimenzija h_a i b_a , primenjuje se izraz [11]:

$$c = 0.9 - 0.38 \cdot e^{-5h_a/b_a}. \quad (3)$$

Za slučaj *srednje ili velike hrapavosti* rečnog dna, karakterističan za vodotoke sa velikim uzdužnim nagibom dna sačinjenog od krupnog, nevezanog materijala (šljunka ili kamena), izveden je veliki broj izraza (videti, na primer, pregled u radu [12]) u obliku:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = a_c + b_c \cdot \log \left(\frac{R}{d_n} \right), \quad (4)$$

gde su a_c i b_c - empirijski određeni koeficijenti. Za primenu se može preporučiti izraz Aguirre-Pe i Fuentes [13], koji važi za širok opseg vrednosti nagiba dna korita $I_o = 0.1-6.5$ % i vrednosti odnosa $R / d_{50} = 0.3-100$:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = 2.03 \cdot \log \left(\frac{1.623 \cdot R}{d_{50}} \right) + 0.265 \cdot \frac{d_{50}}{R}. \quad (5)$$

Tabela 2. Vrednosti ekvivalentne peščane hrapavosti k_s [10].

| Vrsta materijala | k_s (mm) |
|---|--------------------------------|
| Ravno dno: | |
| - peskovito | d_{90} |
| - šljunkovito | 60-200 |
| - od krupnog kamena | 200-300 |
| - osigurano blokovima od betona ili obrađenog kamena | 30-50 |
| Dno sa nanosnim formama: | |
| - riple (dužina $l_r < 0.3$ m; visina $h_r < 0.05$ m) | h_r |
| - dine (dužina $l_d < 2h$; visina $h_d < 0.06 \cdot l_d$) | $h_d = (1/6 \div 1/3) \cdot h$ |
| Obala osigurana obaloutvrdom: | |
| - od glatkog betona | 1-6 |
| - od hrapavog betona | 6-20 |
| - od opeke | 1-8 |
| - od lomljenog kamena | 15-20 |
| - od neobrađenog kamena | 80-100 |
| - u vidu kombinacije obrađenog kamena i trave | 300 |
| Inundacija: | |
| - poljoprivredna površina bez kultura | 20-250 |
| - poljoprivredna površina sa kulturama | 250-800 |
| - priobalni šumski pojas | 160-320 |
| - žbunje | 300-700 |
| - nisko žbunje i trava | 130-400 |
| - šišana trava | 60 |

Otpori trenja usled postojanja vegetacije u rečnom koritu. Vegetacija u rečnom koritu se, u zavisnosti od njene visine (h_p) i dubine toka, može podeliti u tri grupe [14]: niska ($h_p \ll h$), srednja ($h_p \approx h$) i visoka ($h_p > h$).

Niska vegetacija podrazumeva vegetaciju koja je u potpunosti potopljena i u određenoj meri povijena od strane rečnog toka (trava i nisko žbunje). U hidrauličkom smislu, niska vegetacija se tretira kao hrapavost samog rečnog dna. Za definisanje koeficijenta trenja koristi se poznati postupak Kouwena [15], zasnovan na izrazu:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = a_v + b_v \cdot \log\left(\frac{R}{k_v}\right), \quad (6)$$

gde su: a_v i b_v - koeficijenti, a k_v - apsolutna hrapavost trave, čije vrednosti zavise od karakteristika rečnog toka

i biljnog pokrivača. Postupak je detaljno opisan u radu [16].

Srednja i visoka vegetacija mogu se definisati kao kruta vegetacija, delimično potopljena od strane rečnog toka (visoko žbunje i drveće). Za razliku od prethodno pomenutih tipova hrapavosti, ovaj tip vegetacije se u hidrauličkom smislu tretira kao otpor oblika [14, 17-19], pa se za određivanje koeficijenta trenja λ_v može koristiti izraz [14, 18]:

$$\lambda_v = \frac{4A_p}{a_x a_y} \cdot c_p \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

gde su (slika 1): $A_p = h_p \cdot d_p$ - površina potopljenog dela biljke (stabla ili žbuna); h_p i d_p - visina i prečnik potopljenog dela biljke; a_x i a_y - prosečno rastojanje između biljaka u pravcu tečenja i u poprečnom pravcu; c_p - koeficijent otpora grupe biljaka; α - ugao poprečnog nagiba obale u odnosu na horizontalu.

Vrednosti d_p , a_x i a_y za neke tipove vegetacije date su u tabeli 3. Ukoliko je prečnik potopljenog dela drveta promenljiv, definiše se srednji prečnik $d_{p,m}$, tako da je $A_p = h_p \cdot d_{p,m}$ (slika 2).

Koeficijent otpora c_p u izrazu (7) se izračunava na sledeći način [18]:

$$c_p = 1.31 \cdot c_{p\infty} \cdot \left(\frac{V_p}{V}\right)^2 + \Delta c_p, \quad (8)$$

gde su: $c_{p\infty}$ - koeficijent otpora usled opstrujavanja usamljenog cilindra u vodi neograničene zapremine; V_p - brzina tečenja neposredno uzvodno od stabla (slika 3); V - brzina tečenja u neporemećenoj zoni toka uzvodno od stabla; Δc_p - koeficijent dodatnog otpora usled razlike hidrostatičkog pritiska uzvodno i nizvodno od stabla.

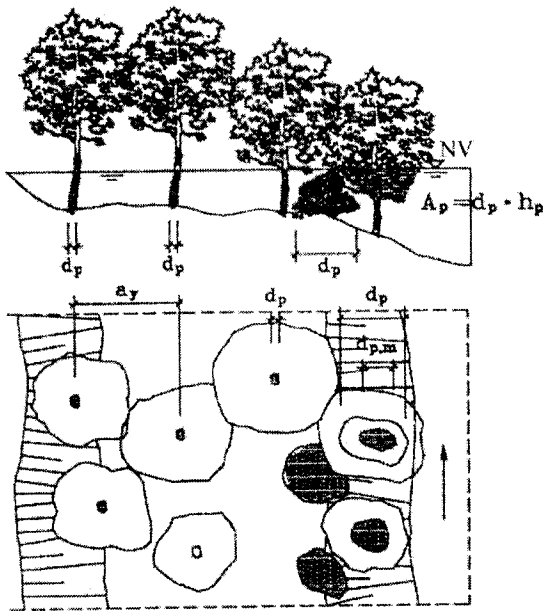
Odnos brzina u prethodnoj jednačini se izračunava pomoću izraza [14]:

$$\left(\frac{V_p}{V}\right)^2 = 1.15 \cdot \left(\frac{a_{wx}}{a_x}\right)^{-0.48} + 0.5 \cdot \left(\frac{a_{wy}}{a_y}\right)^{1.1}, \quad (9)$$

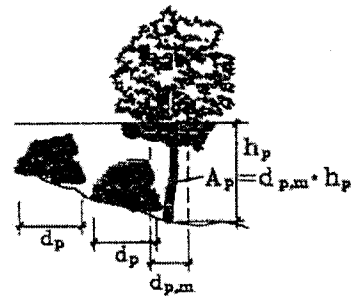
gde su a_{wx} i a_{wy} - dužina i širina "traga" usled opstrujavanja stabla (slika 4):

$$a_{wx} = 128.87 \cdot c_{p\infty} \cdot d_p \cdot \left(1 + \frac{g \cdot a_{wx} \cdot I_E}{V^2/2}\right)^{-2.14}, \quad (10)$$

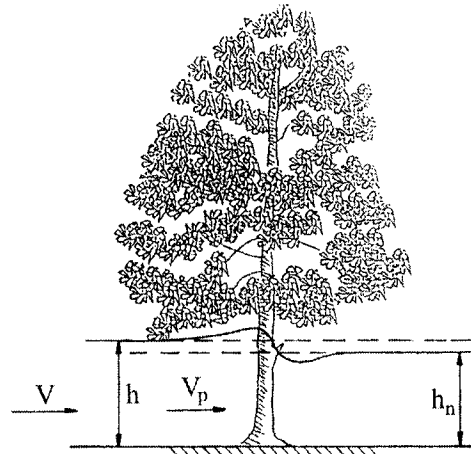
$$a_{wy} = 0.24 \cdot a_{wx}^{0.59} \cdot (c_{p\infty} \cdot d_p)^{0.41}. \quad (11)$$



Slika 1. Objašnjenje oznaka u izrazu (7).



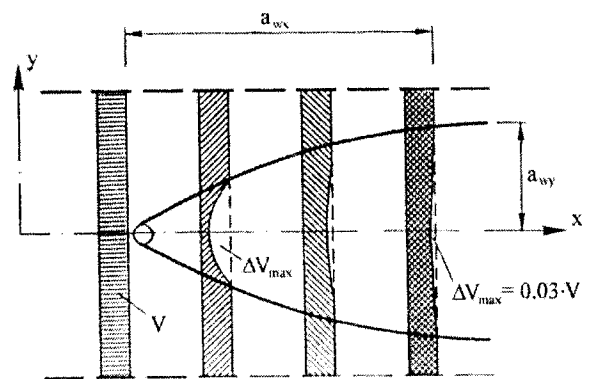
Slika 2. Shematski prikaz osrednjenog prečnika potopljenog dela drveta.



Slika 3. Objašnjenje oznaka u izrazima (8) i (13).

Tabela 3. Vrednosti d_p , a_x i a_y za neke tipove vegetacije [9].

| Tip vegetacije | d_p (m) | $a_x = a_y$ (m) |
|---|-----------|-----------------|
| Trska (gusta) | 0.01 | 0.05 |
| Žbunje: | | |
| - od mladica vrbe | 0.007 | 0.02 |
| - jednogodišnje | 0.03 | 0.3 |
| - višegodišnje | 0.045 | 0.2 |
| Obrađeno žbunasto rastinje: | | |
| - malo | 0.3 | 1.5 |
| - srednje | 0.4 | 3.0 |
| - veliko | 0.8 | 3.0 |
| - razređeno | 0.1 | 4.0 |
| - u malim grupama | 0.5 | 6.0 |
| - u velikim grupama | 1.0 | 7.0 |
| Drveće: | | |
| - razređeno | 0.5 | 10.0 |
| - mlado, gusto sađeno | 0.2 | 5.0 |
| - višegodišnje, srednje razvijeno, gusto sađeno | 0.4 | 5.0 |
| - višegodišnje, razvijeno, gusto sađeno | 0.8 | 5.0 |



Slika 4. Dimenzije "traga" usled opstrujavanja stabla.

Koeficijent otpora $c_{p\infty}$ se određuje na sledeći način [18]:

$$c_{p\infty} = \begin{cases} 3.07 \cdot Re_p^{-0.168}, & Re_p < 800 \\ 1.0, & 800 \leq Re_p < 8000 \\ 1.2, & 8000 \leq Re_p < 100000 \end{cases}, \quad (12)$$

gde je $Re_p = V \cdot d_p / \nu$ - Reynoldsov broj.

Koeficijent dodatnog otpora c_p se izračunava prema:

$$\Delta c_p = \frac{2}{Fr^2} \cdot \left(1 - \frac{h_n}{h}\right), \quad (13)$$

gde su: h - dubina toka u neporemećenoj zoni uzvodno od stabla; h_n - dubina toka nizvodno od stabla (slika 3), a Froudeov broj je definisan kao:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}. \quad (14)$$

Vrednost odnosa h_n/h se određuje izjednačavanjem $Fr = Fr_p$, gde je Fr_p - Froudeov broj "za stablo", izražen u obliku:

$$Fr_p = \frac{\frac{h_n}{h} \left[\left(\frac{h_n}{h} \right)^2 - 1 \right]}{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{h_n}{h} - \frac{a_y}{a_y - d_p} \right)}}. \quad (15)$$

Izraz (15) važi za vrednosti odnosa $h_n/h > 0.75$.

Vrednosti koeficijenta c_p , sračunate primenom izraza (8)-(15), kreću se u opsegu 0.6 - 2.4.

Otpori trenja u slučaju neuniformne hrapavosti u poprečnom profilu. Posmatra se jedan segment složenog poprečnog profila - *glavno korito* ili *inundacija*, sa različitim vrednostima koeficijenta trenja λ_j u pojedinim njegovim delovima $j = 1, \dots, n$.

Brzina tečenja u delu "j" razmatranog segmenta dobija se iz obrasca (1):

$$V_j = \sqrt{\frac{8g \cdot R_j \cdot I_E}{\lambda_j}}. \quad (16)$$

Srednja brzina tečenja vode u segmentu, V , po definiciji je jednaka:

$$V = \frac{\sum_{j=1}^n V_j A_j}{\sum_{j=1}^n A_j}, \quad (17)$$

gde je A_j - okvašena površina dela "j" poprečnog preseka.

Da bi se odredila reprezentativna vrednost koeficijenta trenja za ceo segment, λ , potrebno je izraziti srednju brzinu tečenja V pomoću formule (16), a zatim se iz odnosa V_j/V dobija:

$$\lambda = \left(\frac{V_j}{V} \right)^2 \cdot \frac{R}{R_j} \cdot \lambda_j, \quad (18)$$

pri čemu je:

$$\lambda_j = \lambda_{o,j} + \lambda_{v,j}, \quad (19)$$

$\lambda_{o,j}$ - koeficijent trenja rečnog dna, sračunat primenom izraza (2), (5) ili (6); $\lambda_{v,j}$ - koeficijent trenja usled postojanja visoke vegetacije, određen primenom obrasca (7).

U slučaju približno uniformnog rasporeda brzine po širini posmatranog segmenta ($V_j \approx V$ za svako "j"), obrazac (18) se svodi na Einsteinov izraz:

$$\frac{\lambda_j}{\lambda} = \frac{R_j}{R}, \quad (20)$$

odnosno:

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j O_j}{\sum_{j=1}^n O_j}, \quad (21)$$

gde je O_j - okvašeni obim dela "j" poprečnog preseka.

S obzirom na uslov pod kojim važe, izrazi (20) i (21) se najčešće koriste za glavno korito, dok se izraz (18) primenjuje za inundaciju.

Pored vidova otpora razmatranih u prethodnom tekstu, pri hidrauličkom proračunu je potrebno obuhvatiti i dodatni otpor, koji se javlja kao posledica hidrauličke veze tečenja u glavnom koritu i inundaciji. Pitanje modeliranja ovog dopunskog otpora biće razmatrano u posebnom članku.

3. POSTUPAK PRORAČUNA

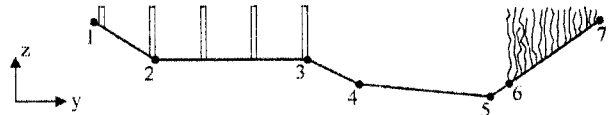
Koeficijent trenja se računa posebno za svaki deo "j" rečne obale (inundacije). Ulazni podaci su: I_E , h_j , $k_{s,j}$ (ili $d_{50,j}$ ili $k_{v,j}$), b_j , α_j , $d_{p,j}$, $a_{x,j}$, $a_{y,j}$ ($j = 1, \dots, n$), a vrednost λ se izračunava prema sledećem postupku [14]:

1. sračunati A_j , O_j , R_j ;
2. sračunati $\lambda_{o,j}$ koristeći izraz (2), (5) ili (6), uz zamenu $k_s = k_{s,j}$ (odnosno $d_{50} = d_{50,j}$, ili $k_v = k_{v,j}$);
3. pretpostaviti "prediktor" vrednost $c'_{p,j}$ (u prvom pokušaju: $c'_{p,j} = 1.0$);
4. sračunati $\lambda_{v,j}$ primenom obrasca (7);
5. sračunati λ_j prema obrascu (19);
6. sračunati V_j pomoću obrasca (16);
7. sračunati/usvojiti $c_{p,j}$ prema izrazu (12);
8. sračunati $a_{wx,j}$ iterativnim postupkom koristeći jednačinu (10);
9. sračunati $a_{wy,j}$ prema izrazu (11);
10. sračunati $(V_p/V_j)^2$ primenom obrasca (9);
11. sračunati Fr_j koristeći obrazac (14);
12. pretpostaviti vrednost (h_n/h_j) (u prvom pokušaju: $(h_n/h_j) = 1$);
13. sračunati $Fr_{p,j}$ koristeći (15) i dobijenu vrednost uporediti sa Fr_j iz koraka 11;
14. ponavljati korake 12-13 dok se ne dobije dovoljno mala razlika $Fr_{p,j} - Fr_j$; usvojiti vrednost (h_n/h_j) iz poslednjeg prolaza kroz ciklus;
15. sračunati $\Delta c_{p,j}$ prema obrascu (13);
16. sračunati "korektor" vrednost $c_{p,j}$ prema (8) i preuzeti je kao "prediktor" vrednost za sledeću iteraciju;
17. ponavljati korake 4-16 dok se ne postigne zadovoljavajuća tačnost ($1 - c'_{p,j}/c_{p,j} < \epsilon$); usvojiti vrednosti λ_j i V_j iz poslednjeg prolaza kroz ciklus.

Rezultati proračuna su vrednosti λ_j i V_j .

Ceo postupak ponoviti za $j = 1, \dots, n$. Na osnovu dobijenih vrednosti, pomoću obrasca (17) izračunati srednju brzinu V , a primenom izraza (18), (20) ili (21), odrediti ukupni koeficijent trenja λ .

Brojni primer. Analizira se poprečni presek čije su karakteristike date na slici 5 i u tabeli 4. Potrebno je sračunati vrednosti koeficijenta trenja i brzine tečenja u delovima datog poprečnog profila, obraslim vegetacijom (između tačaka 1 i 3, odnosno 6 i 7), ako je kota nivoa jednaka 159.00 mm (korito je u potpunosti ispunjeno vodom), a lokalni nagib energetske linije iznosi 0.1%.



Slika 5. Poprečni presek korita u brojnom primeru.

Tabela 4. Karakteristike poprečnog profila u brojnom primeru.

| Br. tačke | 1 | 2 | 3 | 6 | 7 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| y (m) | 0.00 | 2.25 | 8.25 | 16.25 | 20.00 |
| z (mm) | 159.0 | 157.5 | 157.5 | 156.5 | 159.0 |
| k_s (m) | | 0.20 | 0.05 | | 0.20 |
| d_p (m) | | 0.10 | 0.10 | | 0.03 |
| a_x (m) | | 2.00 | 2.00 | | 0.30 |
| a_y (m) | | 2.00 | 2.00 | | 0.20 |

Prema postupku objašnjenom u prethodnom tekstu, prvo se izračunavaju vrednosti geometrijskih parametara (tabela 5). Srednja dubina vode h_{sr} u delovima profila trougaonog oblika definisana je kao polovina visine trougla. Zatim je obavljen iterativni proračun ostalih parametara (tabela 6). U jednoj iteraciji, vrednost a_{wx} se dobija probanjem, sve dok razlika leve i desne strane izraza (10), označena sa $F(a_{wx})$, ne bude bliska nuli. Vrednost odnosa h_n/h se takođe određuje probanjem, sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje brojeva Fr i Fr_p .

Konačno, na bazi poznatih vrednosti λ i V za pojedine delove profila, mogu se sračunati ukupne vrednosti ovih parametara, pri čemu je neophodno pre toga definisati odgovarajuće vrednosti A , O i R . Na primer, za levu inundaciju razmatranog poprečnog preseka, dobija se $A = 10.69 \text{ m}^2$, $O = 8.70 \text{ m}$, $R = 1.23 \text{ m}$, $V = 0.76 \text{ m/s}$, $\lambda = 0.17$.

Tabela 5. Vrednosti geometrijskih parametara u brojnom primeru.

| Br. tačke | 1 | 2 | 3 | 6 | 7 |
|---------------------|---|-------|-------|---|-------|
| b (m) | | 2.25 | 6.00 | | 3.75 |
| cos α | | 0.832 | 1.000 | | 0.832 |
| h_{sr} (m) | | 0.75 | 1.50 | | 1.25 |
| A (m ²) | | 1.69 | 9.00 | | 4.69 |
| O (m) | | 2.70 | 6.00 | | 4.51 |
| R (m) | | 0.62 | 1.50 | | 1.04 |

Tabela 6. Rezultati proračuna u brojnom primeru.

| Br. tačke | 1 | 2 | 3 | 6 | 7 |
|------------------------------|---|--------|--------|---|--------|
| pred. c_p (/) | | 1.045 | 1.009 | | 1.218 |
| λ_o (/) | | 0.09 | 0.03 | | 0.07 |
| λ_v (/) | | 0.07 | 0.15 | | 2.53 |
| λ (/) | | 0.15 | 0.19 | | 2.60 |
| V (m/s) | | 0.57 | 0.80 | | 0.18 |
| Re _p (/) | | 56636 | 79567 | | 5314 |
| $c_{p\infty}$ (/) | | 1.2 | 1.2 | | 1.0 |
| a_{wx} (m) | | 11.067 | 12.658 | | 2.104 |
| F(a_{wx}) (m) | | 0.000 | 0.001 | | 0.000 |
| a_{wy} (m) | | 0.416 | 0.450 | | 0.088 |
| (V_p/V) ² (/) | | 0.595 | 0.571 | | 0.655 |
| Fr (/) | | 0.209 | 0.207 | | 0.051 |
| h_n/h (/) | | 0.9976 | 0.9976 | | 0.9995 |
| Fr _p (/) | | 0.208 | 0.208 | | 0.051 |
| Δc_p (/) | | 0.110 | 0.112 | | 0.360 |
| kor. c_p (/) | | 1.045 | 1.009 | | 1.218 |

4. ZAKLJUČAK

Izloženi postupak proračuna, zasnovan na primeni koeficijenta trenja Darcy-Weisbacha, omogućava definisanje otpora trenja za različite stepene i izvore hrapavosti rečnog dna (dno sačinjeno od peska, šljunka, kamena ili kamenih gromada, odnosno korito obraslo travom ili visokom vegetacijom). Obzirom da je pogodan za primenu u slučaju korita neuniformnih morfoloških karakteristika, kao i promenljivih karakteristika nanosa i vegetacije u poprečnom profilu i duž toka, postupak se može preporučiti za analizu prirodno uređenih vodotoka.

Prednosti ovog pristupa su sledeće:

- omogućava proračun na osnovu parametara koje je na terenu moguće izmeriti (krupnoća nanosa, visina travnatog pokrivača, prečnik stabala u inundaciji i prosečno rastojanje između njih, itd.);

- pruža znatno bolju predstavu o fizičkom aspektu problema, što je značajno, jer su predmet prirodnog uređenja pretežno mali vodotoci, za koje najčešće ne postoje rezultati snimanja nivoa vode, koji bi poslužili za kalibraciju modela otpora trenja. U tom slučaju, iskustvo projektanta pri usvajanju ulaznih parametara nije toliko presudno za kvalitet rezultata proračuna, kao što je to slučaj kod procene vrednosti Manningovog koeficijenta;

- ima širi domen primene, obzirom da u sebi sadrži nekoliko modela otpora trenja, a otvoren je za dalji razvoj i poboljšanja uvođenjem novih modela.

LITERATURA

- [1] Coppin, N.J., Richards, I.G. (1990) *Use of vegetation in civil engineering*, Butterworths, London, U.K.
- [2] Geitz, P. (1994). *Naturnaher Bachumbau, Garten und Landschaft*, 6, 8-13.
- [3] Hey, R.D. (1994). Environmentally sensitive river engineering, in: *The rivers handbook: hydrological and ecological principles*, Calow, P. & Petts, G.E., Eds., Blackwell scientific publications, Oxford, U.K., 337-362.
- [4] Komatina, D. (2001). Basics of the natural river engineering, in: *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*, Marchetti, M. & Rivas, V., Eds., Balkema, Rotterdam, 83-112.
- [5] Wesche, T.A. (1985). Stream channel modifications and reclamation structures to enhance fish habitat, in: *The restoration of rivers and streams, theories and experience*, Gore, J.A., Ed., Butterworth publishers, Boston, U.S., 103-163.
- [6] Zeh, H. (1983). Engineering biology. (Some Swiss examples of construction techniques using plant materials), *Garten und Landschaft*, 6, 471-476.
- [7] Bathurst, J.C. (1978). Flow resistance of large-scale roughness, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol.104, No.HY12, 1587-1603.
- [8] Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (1999). *Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern*, Merkblatt 1/BWK.
- [9] Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (2000). *Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern*, Berichte 1/2000.

- [10] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1991). *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern*, Merkblätter 220/1991.
- [11] Schröder, R.C.M. (1990). *Technische Hydraulik*, Kompendium für den Wasserbau, Springer-Verlag, Berlin.
- [12] Komatina, D. (1994). Hidraulički otpori u brdskim vodotocima, *Vodoprivreda*, god.26, br.4-6, 41-48.
- [13] Aguirre-Pe, J., Fuentes, R. (1990). Resistance to flow in steep rough streams, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.116, No.11, 1374-1387.
- [14] Pasche, E. (1984). *Turbulenzmechanismen in naturnahen Fließgewässern und die Möglichkeiten ihrer mathematischen Erfassung*, Mittl. Inst. für Wasserbau, No.52, RWTH Aachen.
- [15] Kouwen, N. (1988). Field estimation of the biomechanical properties of grass, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.26, No.5, 559-568.
- [16] Jovanović, M. (1999). Određivanje propusne moći zatravljenih kanala, *Vodoprivreda*, god.31, br.177-182, 127-136.
- [17] Klaassen, G.J., van der Zwaard, J.J. (1974). Roughness coefficients of vegetated flood plains, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.12, No.1, 43-63.
- [18] Lindner, K. (1982). *Der Strömungswiderstand von Pflanzenbeständen*, Mittl. des Leichtweißinstituts der TU Braunschweig, Heft 75.
- [19] Petryk, S., Bosmajian III, G. (1975). Analysis of flow through vegetation, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol.101, No.HY7, 871-884.

FRICTIONAL RESISTANCE TO FLOW IN NATURALLY TRAINED STREAMS

by

Dejan KOMATINA
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Natural watercourses are known for the extensive non-uniformity of their morphological characteristics, as well as of the properties of sediment and riparian vegetation. For such water courses, a calculation procedure is proposed for the estimation of the friction losses (based on the Darcy-Weisbach friction coefficient) in cases of both fine and coarse bed materials, as well as vegetated river beds. Methods to estimate the friction losses caused by high plants in a floodplain are described. The advantage of the proposed procedures is that they are based on

parameters that are easy to measure on site (such as bed material diameter, height of bed vegetation, diameter of plants and the mean distance between them, etc.). This is of particular importance for small, naturally trained streams, often lacking water level observations that could be used to calibrate the friction models.

Key words: natural river engineering, friction losses, Darcy-Weisbach friction coefficient.

Redigovano 12.09.2002.