

RIBLJE STAZE U SKLOPU „NATURALNOG” UREĐENJA MALIH VODOTOKA

Miodrag JOVANOVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

Ovaj rad se bavi projektovanjem ribljih staza shodno savremenom konceptu „naturalnog” uređenja malih vodotoka. Prikazana su konstruktivna rešenja ribljih staza u vidu regulisanih rečnih deonica, ribljih rampi i zaobilaznih kanala. Objašnjenje hidrauličkog proračuna ilustrovano je računskim primerima. Nekoliko fotografija potvrđuju da se „naturalnom” regulacijom malih vodotoka mogu ispuniti postavljeni hidraulički, ihtiološki i estetski uslovi.

Ključne reči: regulacija reka, riblje staze

UVOD

Koncept „naturalnog” uređenja malih vodotoka podrazumeva takvo uređenje koje je zasnovano na klasičnim metodama hidrološke, hidrauličke i morfološke analize, ali zahteva primenu određenih ekoloških i estetskih principa u pogledu izbora trase regulisanog korita, oblika poprečnih profila i materijala za izradu regulacionih građevina.

U kontekstu „naturalno” uređenih vodotoka, termin „riblje staze” označava regulisane deonice koje omogućavaju nesmetanu migraciju riba. Savremeni pristup u regulaciji reka zasniva se na shvatanju da su reke linijski ekosistemi za koje važi princip „rečnog kontinuuma” [10, 12] koji podrazumeva očuvanje biološke raznovrsnosti i dugoročne stabilnosti akvatične flore i faune na celoj dužini toka.

Jedan od osnovnih zadataka je obezbeđenje nesmetanog kretanja riba, posebno u zoni veštačkih prepreka u rečnom koritu, kao što su pragovi, kaskade i razne vrste pregrada. Slobodno kretanje riba je neophodno i zbog zaštite od ekološki rizičnih događaja - na primer, izlivanja i širenja zagađujućih materija.

Kod malih vodotoka, riblje staze, koje se projektuju tako da ispune određene hidrauličke i ihtiološke uslove, mogu da se formiraju: (i) regulacijom nepodesnih deonica i (ii) izgradnjom veštačkih ribljih prolaza na mestima pregradnih objekata, u vidu ribljih rampi ili zaobilaznih kanala.

Kod velikih kanalisanih reka, riblje staze se grade u sklopu hidroenergetskih objekata i mogu imati razna konstruktivna rešenja („riblje lestve”, „riblje prevodnice” i dr. [7]). Ovakve - „tehničke” riblje staze, ovde se neće razmatrati.

UREĐENE REČNE DEONICE

Pri regulaciji strmih rečnih deonica, javlja se problem malih dubina, a velikih brzina toka. Ne samo da se tada mora voditi računa o stabilnosti korita, već i o formiranju zaklonjenih, dubljih mesta, pogodnih za predah riba (riblja „odmorišta”), ili za njihov duži boravak u malovodnom periodu. Projektno rešenje zasnovano na korišćenju velikih kamenih blokova podražava pogodne uslove koji postoje na mnogim malim vodotocima (Slika 1).



Slika 1. Prisustvo kamenih blokova u koritu brdskih reka stvara režim tečenja koji povoljno utiče na održivost riblje populacije, a posredstvom turbulencije, povećava sadržaj kiseonika u vodi i time poboljšava njen kvalitet (levo: vodotok iz literature [10]; desno: reka Moravica u Soko Banji).

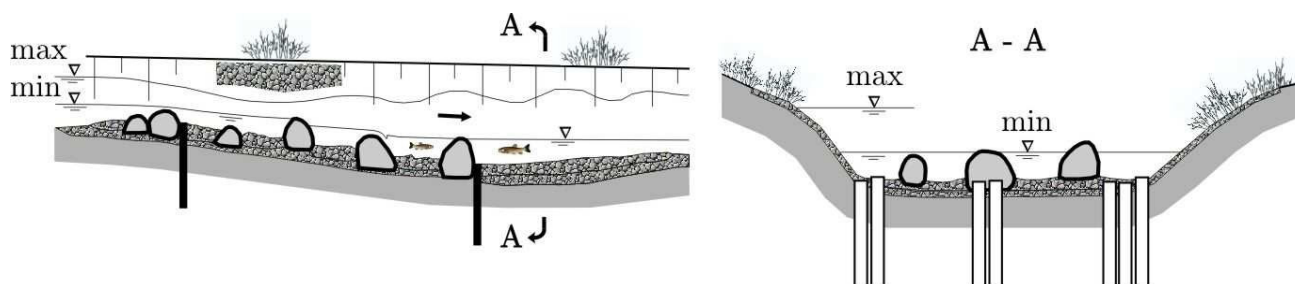
Tradicionalni pristup u regulaciji brdskih vodotoka predviđa smanjenje uzdužnog nagiba dna pomoću kaskada. Međutim, kako kaskade predstavljaju prepreku za riblju migraciju, sve više se primenjuju rampe od kamena [1, 13]. Betonske rampe nisu u trendu savremenog uređenja malih vodotoka (Slika 2).

Tipične vrednosti uzdužnog nagiba kamenih rampi su $1:3 \div 1:10$. Na podlozi od šljunka ili geotekstila, postavlja

se „tepih“ od najmanje dva sloja lomljenog kamena (Slika 3). Donji sloj je od sitnijeg, a gornji, od krupnijeg kamena. Najmanja debljina sloja treba da bude jednaka dvostrukom prečniku najkrupnijeg kamena tog sloja. U podlogu treba ukomponovati krupne kamene blokove prečnika $0,6 \div 1,0$ m, u nepravilnom rasporedu. Kameni blokovi služe za usporavanje toka i formiranje dubljih mesta – „bazena“, pogodnih za odmor i boravak riba.



Slika 2. Smanjenja uzdužnog nagiba rečnog korita pomoću rampi; levo: pogled nizvodno na rampu u koritu reke Murr (pritoke reke Neckar) u Nemačkoj [3]; desno: betonska rampa na reci Karaš.

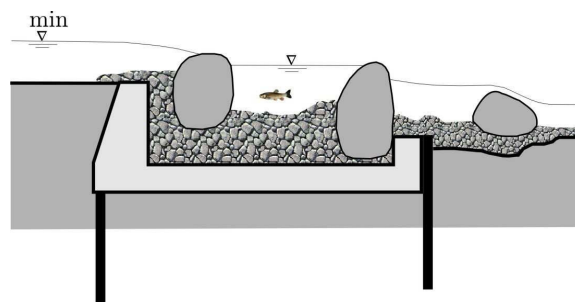


Slika 3. Primer konstruktivnog rešenja kamene rampe.

Dubina toka na kamenoj rampi treba da bude jednaka najmanje $1/3 \div 1/2$ denivelacije – razlike kota nivoa na uzvodnom i nizvodnom kraju rampe. Stabilnost kamena osigurana je talpama (Slika 3). Nizvodno od rampe, korito je zaštićeno od erozije tepihom od kamena na dužini koja nije manja od 10 denivelacija, odnosno 5 m [2, 3].

Obale se štite od erozije oblogom od kamenog nabačaja i vegetacijom, koja doprinosi estetskom kvalitetu ambijenta.

Na Slici 4 pokazano je kako se postojeća betonska kaskada može, uz relativno male troškove, pretvoriti u kamenu rampu koja ispunjava hidrauličke i ihtiološke zahteve.



Slika 4. Pretvaranje postojeće betonske kaskade sa bazenom za umirenje u rampu od kamena (prema [2]).

Na inženjerskom nivou, proračun regulacionih rampi je veoma uprošćen. Koristi se Manningova (Manning) jednačina ustaljenog jednolikog tečenja, sa empirijskim definisanim

otporima usled velike apsolutne rapavosti [5]. Pretpostavlja se da je poprečni presek trapeznog ili pravougaonog oblika. Projektni uslovi se zasnivaju na izboru protoka, krupnoće, broja i rasporeda kamenih blokova, kao i najveće brzine toka koja mora biti u granicama fiziološke izdržljivosti riblje populacije.

U proračunu se uzimaju u obzir dva projektna protoka - male i velike vode. Protok male vode (Q_{\min}) se najčešće usvaja kao protok zastupljenosti 90 ÷ 95% na krivoj trajanja. Pri ovom protoku, dubina toka mora biti dovoljna da obezbedi nesmetano kretanje riba (najmanje 0,2 m), a najveća brzina toka mora biti ograničena (2 m/s). Ograničenje brzine toka uslovljeno je da bi ribe mogle da savladaju otpore pri kretanju. Naime, količnik pređenog puta (dužine rampe) i relativne brzine kretanja ribe (u odnosu na brzinu toka) daje potrebno vreme plivanja. Ako je to vreme veće od vremena zamora ribe, premašen je prag njene izdržljivosti i ona neće biti u stanju da prevali dato odstojanje. Ne ulazeći u fiziologiju riba, ovde se samo spominje da postoje tri karakteristične brzine plivanja, u zavisnosti od vremena zamora i biohemijskih procesa koji snabdevaju mišićno tkivo neophodnim materijama [17, 18]: (i) „trajna“ („ustaljena“) brzina, održiva je u dužem vremenskom periodu, (ii) „produžena“ („prolongirana“) brzina, održiva je kod većine rečnih riba u periodu od 15 s do 200 min i (iii) „kratkotrajna“ („eksplozivna“) brzina, održiva je do desetak sekundi, najčešće samo 5 ÷ 6 s. Ribe optimizuju utrošak energije menjajući brzinu plivanja u skladu sa lokalnim uslovima [14]. Postoje podaci o karakterističnim brzinama plivanja raznih vrsta riba [15, 16, 17], kao i korelacije brzine plivanja sa veličinom ribe i vremenom zamora [15, 17]. Tako na primer, trajna brzina plivanja pastrmke iznosi 0,6 ÷ 1,4 m/s, prolongirana, 2 ÷ 4 m/s, a kratkotrajna, 4 ÷ 8 m/s.

Drugi projektni protok – protok velike vode (Q_{\max}), koji odgovara povratnom periodu od nekoliko godina, služi za proveru stabilnosti kamene rampe. U praksi se često usvaja velika voda povratnog perioda 10 godina. U načelu, izbor projektna velike vode predstavlja rezultat tehničko-ekonomske analize koja treba da pruži odgovor da li je isplativije graditi masivniju (skuplju) rampu, dimenzionisanu prema velikoj vodi dužeg povratnog perioda, ili manje masivnu (jeftiniju) rampu, dimenzionisanu na poplavu kraćeg povratnog perioda, koja zahteva veće troškove održavanja zbog češćih sanacija.

Stabilnost rampe počiva na pravilnom izboru krupnoće kamena koji čini podlogu rampe. Za ovo je na raspolaganju

veliki broj empirijskih obrazaca [3, 4, 6, 9, 13]. Na primer, izraz Vitaker i Jegija (Whittaker, Jäggi, [13]) definiše karakteristični prečnik kamena d_{65} u zavisnosti od projektnog jediničnog protoka $q_{\max} = f(Q_{\max})$ i uzdužnog nagiba rampe I_d :

$$d_{65} \approx (q_{\max} \cdot I_d^{7/6})^{2/3} \quad (1)$$

Sličan je izraz Robinsona i dr. (Robinson et al. [8, 13] koji daje srednju krupnoću kamena:

$$d_{50} = 0,5 (q_{\max} \cdot I_d^{0,58})^{0,529} \quad (2)$$

Ovaj izraz važi za $d_{50} < 0,3$ m, relativnu gustinu kamena $(\rho_s/\rho)/\rho = 2,45 \div 2,82$ i nagib rampe $10\% \leq I_d \leq 40\%$. Dobijene vrednosti potrebno je pomnožiti faktorom sigurnosti 1,15 ÷ 1,20. Izraz (1), koji važi za lomljeni kamen, daje manje vrednosti od izraza (2), koji je izveden za zaobljeni kamen. Najmanja debljina podloge je: $2 \cdot d_{50}$ [13].

RIBLJE RAMPE I ZAIBILAZNI KANALI

Na mestima pregradnih građevina, riblje staze se formiraju u vidu ribljih rampi ili zaobilaznih kanala. Riblje rampe se integrišu u postojeći objekat, a projektuju se tako da u potpunosti podražavaju prirodne brzake. Grade se od kamena i odlično se uklapaju u koncept „naturanlog“ uređenja malih vodotoka (Slike 5 i 6).

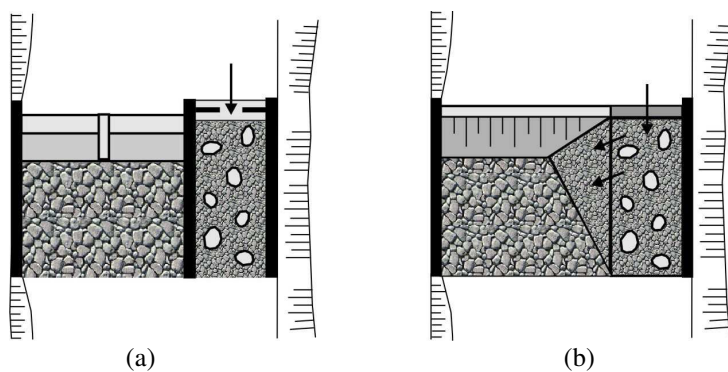
Proračun riblje rampe započinje određivanjem njene dužine i veličine poprečnog preseka (Slika 7). Dužina rampe L_r zavisi od veličine pada koji se rampom savlađuje. Tipični uzdužni nagib rampe iznosi: $I_d = 1 : 10 \div 1 : 30$. Poprečni presek je trapeznog oblika, sa širinom u dnu koja, pri protoku Q_{\min} , obezbeđuje dovoljnu dubinu za kretanje riba $h = 30 \div 40$ cm.

Krupnoća kamena u podlozi rampe određuje se na osnovu empirijskih izraza (1) ili (2). Kameni blokovi, širine $d = 50 \div 60$ cm i visine koja je bar jednaka dubini toka ($h_d \geq h$), postavljaju se naizmenično, na razmaku koji iznosi: $a_x = a_y \approx (1,5 \div 3,0) d$.

Proračun je iterativan. Usvajaju se dimenzije trapeznog poprečnog preseka i dubina toka. Površina (A), širina vodenog ogleđala (B), okvašeni obim (O) i hidraulički radijus (R) računaju se u funkciji date dubine (h).

Varira se broj i raspored kamenih blokova, sve dok računski protok ne bude približno jednak projektom

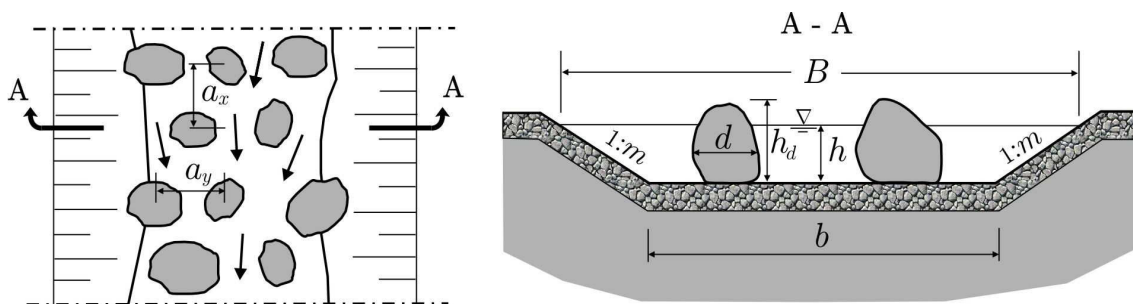
protoku Q_{\min} . Pri tome, brzina toka mora biti manja od dozvoljene brzine ($V_{\text{doz}} = 2 \text{ m/s}$).



Slika 5. Dispozicija dva tipa ribljih rampi u sklopu prelivnih građevina; (a) rampa sa ustavom za regulisanje protoka na uzvodnom kraju i (b) rampa sa slobodnim dotokom, pri čemu se prelivanje po celoj širini korita dešava samo u periodu velikih voda. Broj i raspored kamenih blokova definiše se na osnovu hidrauličkog proračuna.



Slika 6. Primeri ribljih rampi na rekama Doln (Dölln) i Fils (Fils) u Nemačkoj [2].



Slika 7. Osnova i poprečni presek riblje rampe sa oznakama veličina koje se koriste u proračunu

Da bi se sračunao potreban broj kamenih blokova, potrebno je najpre usvojiti visinu potopljenosti kamenih blokova (h_{pot}), koja može biti jednaka dubini toka (h), ili visini kamenog bloka (h_d).

Zatim se računaju geometrijske veličine:

- površina projekcije kam. bloka: $A_d = d \cdot h_{\text{pot}}$

- površina osnove kamenog bloka: $A_o = d^2 \pi / 4$
- zapremina kamenog bloka: $\forall_k = A_o \cdot h_{pot}$
- površina kruga preč. $d + a_x / 2$: $A_x = (d + a_x / 2)^2 \pi / 4$
- površina dna rampe: $A_r = b \cdot L_r$
- broj kamenih blokova: $n_k = A_r / A_x$.

Usvojeni broj kamenih blokova ($n_{k,usv}$) dobija se zaokruženjem sračunate vrednosti n_k .

Kao što je poznato, hidraulički otpori se sastoje od otpora trenja i otpora oblika. Pretpostavljajući turbulentno strujanje po hidraulički rapavom dnu, otpor trenja se može računati pomoću empirijskog izraza Darsi-Vajsbaha (Darcy-Weisbach) za koeficijent trenja [5]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{14,84 R} \right), \quad (3)$$

gde je k_s , ekvivalentna peščana rapavost, definisana u funkciji prosečne veličine kamena (d) ili najkrupnijeg zrna mešavine u podlozi (d_{90}), kao i hidrauličkog radijusa (R). Ograničenje za primenu obrasca (3) je: $k_s < 0,45 R$.

Koeficijent otpora oblika se takođe definiše empirijskim izrazom [2]:

$$\lambda_k = 4 C_d S_{Ad} / \Omega_r, \quad (4)$$

gde je $S_{Ad} = n_{k,usv} \cdot A_d$ – površina projekcije svih kamenih blokova na ravan upravnu na strujnice, $\Omega_r = O \cdot L_r$ – okvašena površina rampe, a $C_d = 1,5$ – koeficijent otpora kamenih blokova.

Koeficijent ukupnog otpora dobija se ponderisanjem prethodnih koeficijenata shodno njihovom relativnom uticaju:

$$\lambda = \frac{\lambda_k + \lambda_o (1 - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon_\forall)}, \quad (5)$$

gde su faktori ponderacije:

$$\varepsilon_o = \frac{S_{Ad}}{\Omega_r} \quad (6)$$

$$\varepsilon_\forall = \frac{n_{k,usv} \cdot \forall_k}{A \cdot L_r}. \quad (7)$$

Jednačina ustaljenog jednolikog tečenja daje brzinu toka

$$V = \sqrt{8 \cdot g \cdot R \cdot I_d / \lambda}, \quad (8)$$

a ako je računski protok $Q = V \cdot A$ približno jednak projektnom protoku Q_{min} , rešenje riblje rampe je prihvatljivo. U protivnom, projektni elementi se koriguju, sve dok navedeni uslov ne bude zadovoljen. Dodatni uslov je da je tečenje mirno: $Fr = V^2 B / (g A) < 1$.

Posebnu proveru zahteva brzina u suženim delovima korita, gde je proticajni profil smanjen usled prisustva kamenih blokova. Ako se uzme da su u profilu prisutna tri kamena bloka, tako da je širina vodenog ogleđala: $B_s = B - 3d$ i aktivna površina toka: $A_s = A - 3A_d$, na osnovu jednačine kontinuiteta proizilazi da je brzina toka u suženju: $V_s = V (A / A_s)$. Ova brzina treba da bude manja od dozvoljene brzine (V_{doz}), koja približno odgovara prolongiranoj brzini plivanja ribe. Proverava se i uslov: $Fr = V_s^2 B_s / (g A_s) < 1,7$.

Primer. Projektovati riblju rampu dužine $L_r = 15$ m, u nagibu $I_d = 5\%$ (1:20), pod uslovom da pri dubini koja omogućava migraciju riba $h = 0,5$ m, brzina toka ne premaši $V_{doz} = 2$ m/s pri protoku $Q_{min} = 1,5$ m³/s. Najveći protok iznosi $Q_{max} = 6$ m³/s.

Rešenje. Proračun se obavlja po sledećem redosledu.

(1) *Elementi poprečnog profila.* Pretpostavlja se da je poprečni presek riblje rampe trapezni, širine u dnu $b = 3$ m i nagiba kosine 1 : $m = 1:1$. Radi lakšeg proračuna, smatra se da je tečenje na rampi jednoliko, pa se pri zahtevanoj dubini $h = 0,5$ m, u „slobodnom“ poprečnom preseku (bez kamenih blokova), dobijaju sledeće vrednosti:

- površina $A = h(b + m \cdot h) = 1,75$ m²;
- okvašeni obim $O = b + 2h\sqrt{1 + m^2} = 4,41$ m;
- hidraulički radijus $R = A / O = 0,40$ m;
- širina vodenog ogleđala $B = b + 2m \cdot h = 4,0$ m.

(2) *Krupnoća kamena*. Primenjujući izraz (2), za $q_{\max}=1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, dobija se potrebna krupnoća kamena za podlogu rampe $d_{50}=0,2 \text{ m}$. Najmanja debljina podloge od ovog kamena iznosi: $2 \cdot 0,2=0,4 \text{ m}$, usvojeno $0,5 \text{ m}$. Dimenzije kamenih blokova se takođe usvajaju: širina $d=0,6 \text{ m}$ i visine $h_d=0,6 \text{ m}$, kao i razmak blokova u pravcu toka i upravno na njega: $a_x = a_y = 1 \text{ m}$ (Slika 7).

Ako je dubina potapanja kamena $h_{\text{pot}} = h=0,5 \text{ m}$, mogu se sračunati vrednosti: $A_d=0,30 \text{ m}^2$; $A_o=0,28 \text{ m}^2$; $\nabla_k=0,14 \text{ m}^3$; $A_x=0,95 \text{ m}^2$; $A_r=45,0 \text{ m}^2$; $n_k=47,38$; $n_{k,\text{usv}}=48$ blokova.

(3) *Provera propusne moći*. Procenjena vrednost ekvivalentne peščane rapavosti u datim uslovima je: $k_s=0,15 \text{ m}$ ($< 0,45 R=0,18 \text{ m}$), pa je na osnovu (3): $\lambda_o=0,10$. Za procenu vrednosti λ_k pomoću izraza (4), neophodno je prethodno sračunati površinu projekcije svih kamenih blokova na ravan upravnu na tok: $S_{Ad}=14,4 \text{ m}^2$ i površinu okvašenog korita rampe $\Omega_r=66,21 \text{ m}^2$. Sledi: $\lambda_k=1,30$ ($C_d=1,5$). Na osnovu (6) i (7), vrednosti faktora ponderacije su: $\varepsilon_o=0,205$ i $\varepsilon_\nabla=0,258$, a na osnovu (5): $\lambda=1,87$.

Upoređujući vrednosti λ_o i λ_k , može se primetiti da dominiraju otpori oblika usled kamenih blokova, dok je trenje po dnu od manjeg značaja.

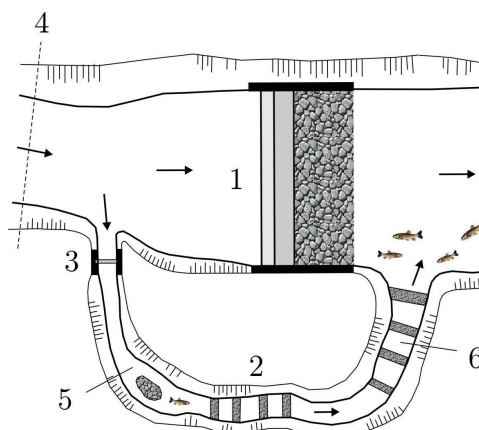
Primenom jednačine (8) dobija se srednja profilaska brzina $V=0,91 \text{ m/s}$. Računski protok $Q=V \cdot A=1,60 \text{ m}^3/\text{s}$ odgovara projektnom protoku $Q_{\min}=1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, a vrednost Frudovog broja: $Fr=0,19$, potvrđuje da je tečenje u mirnom režimu.

(4) *Provera brzine u suženjima*. Proračun tečenja u suženjima – poprečim profilima čiji proticajni presek smanjuju tri kamena bloka, daje sledeće vrednosti: $B_s=2,2 \text{ m}$; $A_s=0,85 \text{ m}^2$; $V_s=1,88 \text{ m/s}$. Kako je: $V_s < V_{\text{doz}}=2,0 \text{ m/s}$ i $Fr=0,93 < 1,7$, zadovoljena su oba, zadatkom postavljena ograničenja.

Konačna potvrda funkcionalnosti riblje staze je zasnovana na vremenu zamora ribe. Ako se, primera radi, uzme da je kratkotrajna brzina plivanja ribljih vrsta u slivu

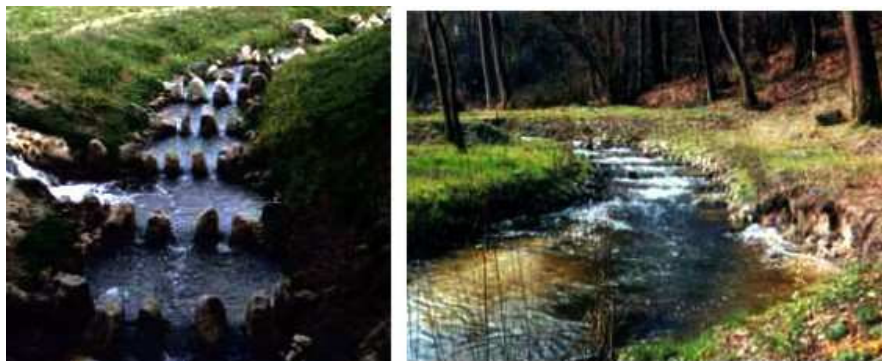
Velike Morave – klena (*Leuciscus cephalus*), skobalja (*Chondrostoma nasus*) i rečne mreke (*Barbus barbus*) oko 4 m/s , onda je relativna brzina uzvodnog kretanja ribe na rampi: $4,0-1,6=2,4 \text{ m/s}$, pa je za savlađivanje rampe dužine 15 m ribi potrebno $15/2,4 \approx 6 \text{ s}$, što je u granicama njene izdržljivosti.

U slučaju kada nije moguće formirati riblju rampu u sklopu pregradnog objekta, rešenje je riblja staza u vidu zaobilaznog kanala (Slike 8 i 9). Ovo rešenje je naročito primenjivo za postojeće pregradne objekte koji nisu projektovani i građeni u skladu sa savremenim ekološkim zahtevima, pa ih treba naknadno rekonstruisati.



Slika 8. Riblja staza u vidu zaobilaznog kanala: 1 – pregradni objekat; 2 – zaobilazni kanal; 3 – ustava za kontrolu protoka u kanalu; 4 – granica uspora; 5 – deonica kanala sa blagim nagibom dna koja služi kao odmorište za ribe; 6 – strma deonica sa kamenim pragovima. Na nizvom kraju kanala je izražena trubulencija, a ovazušenje toka privlači ribu ka zaobilaznom kanalu.

Kapacitet zaobilaznih kanala može biti različit, jer zavisi od eksploatacionih uslova postojećeg pregradnog objekta. Uzimaju se u obzir dva projektna protoka; najmanji protok je vezan za „biološki minimum“, a najveći, za određen procenat srednje vode. U slučaju kada pregradni objekat služi isključivo za zadržavanje poplavnih talasa, zaobilazni kanal se dimenzioniše na protok srednje vode. Najveći uzdužni nagib kanala je $1:100 \div 1:120$, ali se taj nagib najčešće ne može ostvariti bez pragova ili kaskada. Širina u dnu mora biti veća od 1 m , a dubina, veća od $0,2 \text{ m}$.



Slika 9. Primeri zaobilaznih kanala na rekama Varel Beke (Varrel Bäke) i Šteber (Stöbber) u Nemačkoj [2].

Pragovi kod zaobilaznih kanala (a takođe i u slučaju regulisanih deonica) treba da: (i) obezbede projektovani uzdužni nagib dna; (ii) budu izrađeni isključivo od kamena, sa biotehničkom zaštitom obala i (iii) omoguće formiranje „bazena“ (između pragova) u kojima će ribe imati povoljne uslove za predah i boravak u malovodnim periodima.

Ulazni podaci za proračun pragova sastoje se od hidroloških podataka – projektnih protoka (Q_{\max} , Q_{\min}) i ograničenja – najmanje dubine u „bezenima“ između pragova ($0,2 \div 0,3$ m) i najveće brzine toka koju ribe mogu da podnesu (2 m/s).

Na Slici 10 prikazane su karakteristične geometrijske veličine čije se vrednosti usvajaju. To su: razmak pragova (L_p), najveća denivelacija na prelivu ($\Delta h = 0,1 \div 0,2$ m), veličina kamenih blokova (prečnik $d = 0,5 \div 0,8$ m i visina

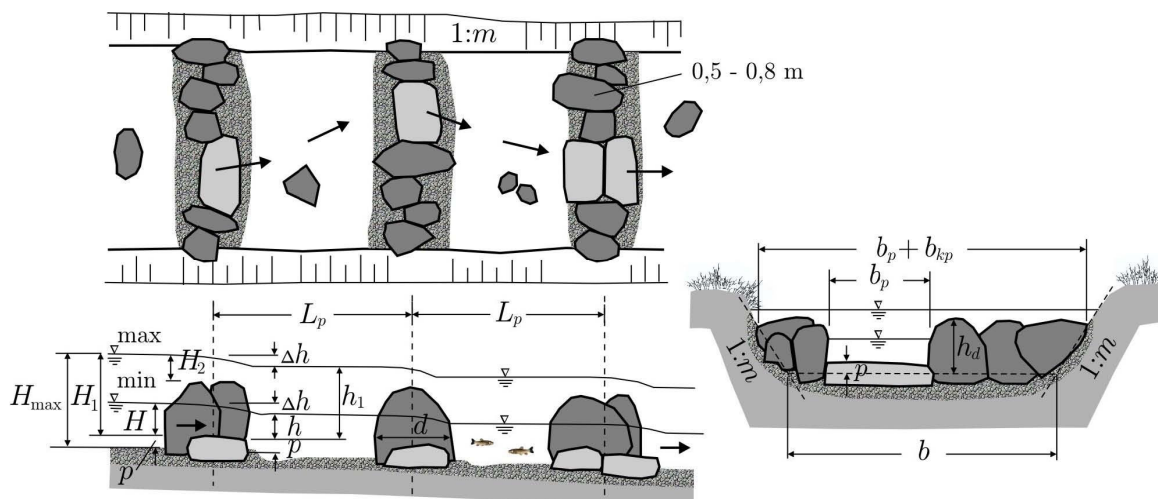
iznad dna h_d) i visina preliva (p) koji se formira delimičnim ukopavanjem krupnog pločastog kamena u šljunkovitu podlogu. Takođe se usvajaju: najmanja visina prelivnog mlaza (H) i vrednost koeficijenta preliivanja preko širokog praga ($C_Q = 0,5 \div 0,6$ za oštroični kamen, $0,6 \div 0,8$ za zaobljen kamen).

Hidraulički proračun je uprošćen. Koristi se jednačina (ne)potopljenog preliivanja preko širokog praga u kojoj se zanemaruje brzinska visina dolaznog toka:

$$Q = 2/3 \cdot C_Q \cdot \sigma \cdot b_p \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (9)$$

gde je H - visina prelivnog mlaza (Slika 10). Koeficijent potopljenosti σ u izazu (9) može se, na osnovu empirijskih dijagrama iz literature [2, 9], analitički definisati u obliku:

$$\sigma \approx 1 - (h/H)^{15}. \quad (10)$$



Slika 10. Kameni pragovi sa oznakama koje se koriste u proračunu.

Za $h/H < 0,8$: $\sigma \approx 1,0$ (nepotopljeno prelivanje). Pri malom protoku Q_{\min} , prelivanje je ograničeno samo na deo praga širine b_p (Slika 10). U tom slučaju se jednačina (9) rešava po b_p za zadatu vrednost Q_{\min} i usvojenju (projektovanu) visinu prelivnog mlaza H .

Pri protoku Q_{\max} , prelivanje se odvija i preko velikih kamenih blokova, po celoj širini praga $b_p + b_{kp}$ (Slika 10), pa se koriste dve jednačine tipa (9) – jedna za prelivanje pločastog kamena sa prelivnom širinom b_p , a druga, za prelivanje kamenih blokova, sa prelivnom širinom b_{kp} . (Aditivnost protoka na prelivu nije hidraulički sasvim ispravna, ali je za inženjerske proračune prihvatljiva.) Visine prelivnog mlaza H_1 i H_2 nisu poznate, već se određuju iterativno – probanjem, tojest variranjem dubine H_{\max} (Slika 10), sve dok ukupni protok (na oba preliva) ne bude približno jednak zadatom protoku Q_{\max} . Najveća brzina vode na pragu, koja zavisi od denivelacije Δh :

$$V_p = \sqrt{2g \cdot \Delta h}, \quad (11)$$

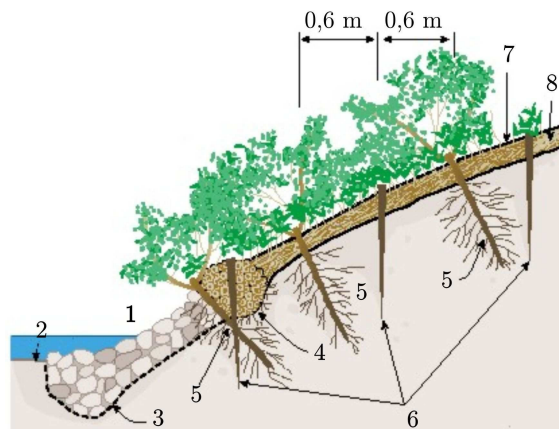
mora biti manja od najveće dozvoljene brzine 2,0 m/s.

Korito zaobilaznog kanala ima trapezni poprečni presek, sa širinom u dnu koja se usvaja na osnovu iskustvene preporuke: $b = 2,5 \cdot b_p$, dok nagib obala (m) zavisi od sastava tla i tipa projektovane obaloutvrde (Slika 10). U cilju očuvanja estetskog kvaliteta ambijenta, za obale se koriste isključivo biotehničke mere zaštite (Slika 11).

Jedan od bitnih aspekata funkcionisanja riblje staze je provera da li je energija koju ribe troše pri kretanju duž te staze u fiziološki prihvatljivim granicama. (Već je rečeno da su za pojedine vrste riba ustanovljene korelacije između brzine plivanja, untroška energije i vremena zamora, a razvijeni su i matematički modeli promenljive brzine plivanja riba pri optimalnom utrošku energije [14]). Kako naprezanje riba zavisi od brzine toka, odnosno od njegove kinetičke energije, u analizi ribljih staza uvedeni su odgovarajući indikatori, kao što su „snaga toka po jedinici dužine“: $\rho \cdot g \cdot Q \cdot I_e$ [W/m] [5] i „snaga toka po jedinici zapremine“ (brzina disipacije energije toka po jedinici zapremine) [2]:

$$\Delta E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot I_{\Pi}}{A_{sr}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{A_{sr} \cdot L_e} \quad [\text{W/m}^3] \quad (12)$$

gde je A_{sr} – osrednjena površina poprečnog preseka „bazena“ između pragova, a $L_e = L_p - d$ – efektivna dužina „bazena“. Prema navodima iz literature [2], gornja granica je: $\Delta E = 150 \div 200 \text{ W/m}^3$.



Slika 11. Primer biotehničke zaštite obale [10]: 1 – nožica od slaganog kamena; 2 – dno kanala; 3 – geotekstil; 4 – fašina; 5 – sadnice; 6 – drveno kolje dužine 0,8 ÷ 1,0 m; 7 – žičana mreža; 8 – sečeno granje.

Primer. Projektovati kamene pragove za smanjenje uzdužnog nagiba regulisanog vodotoka ili zaobilaznog kanala, ako su vrednosti merodavnih protoka: $Q_{\min} = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{\max} = 2,20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dubina u „bazenu“ (nizvodno od praga) ne sme biti manja od 0,5 m, a brzina toka na prelivu ne sme biti veća od 2 m/s.

Rešenje. Polazi se od usvojenih vrednosti nekih projektnih veličina i računskih parametara, kao ulaznih podataka:

- razmak pragova: $L_p = 10 \text{ m}$;
- najveća denivelacija na prelivu: $\Delta h = 0,2 \text{ m}$ ($I_{\Pi} = 0,02$);
- prečnik kamenog bloka: $d = 0,6 \text{ m}$;
- visina kamenog bloka iznad dna: $h_d = 0,4 \text{ m}$;
- visina pločastog kamena za preliv: $0,4 \text{ m}$;
- visina preliva: $p = 0,4/2 = 0,2 \text{ m}$;
- najmanja visina prelivnog mlaza: $H = 0,4 \text{ m}$;
- koeficijent prelivanja: $C_Q = 0,5$.

Najpre se razmatraju hidraulički uslovi preliivanja pri protoku $Q_{\min} = 0,20$ m. Ako se usvoji denivelacija $\Delta h = 0,2$ m, najveća brzina na prelivu: $V_p = \sqrt{2g \Delta h} = 1,98$ m/s je manja od dozvoljene brzine (2,0 m/s).

Dubina „donje vode“ iznosi $h = 0,3$ m, tako da dužina $h + p = 0,3 + 0,2 = 0,5$ m odgovara najmanjoj zahtevanoj dubini u bazenu. Za vrednost $h / H = 0,3 / 0,4 = 0,75$, izraz (10) daje vrednost redukcionog koeficijenta $\sigma = 1,0$, pa se na osnovu izraza (9) dobija potrebna širina preliiva (pločastog kamena):

$$b_p = \frac{Q_{\min}}{2/3 \cdot C_q \cdot \sigma \cdot \sqrt{2g \cdot H^{3/2}}} = \frac{0,20}{2/3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 4,429 \cdot 0,4^{3/2}} = 0,53 \approx 0,60 \text{ m.}$$

Sada se može pristupiti dimenzionisanju korita. Na osnovu preporuka: $b = 2,5 \cdot b_p = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5$ m. Ako se usvoji nagib kosina $m = 2$, širina korita po kruni kamenih blokova iznosi (Slika 10):

$$b_p + b_{kp} = b + 2 \cdot m \cdot h_d = 1,5 + 2 \cdot 2 \cdot 0,4 = 3,10 \text{ m,}$$

usvojeno 3 m.

Sledeći korak je razmatranje hidrauličkih uslova preliivanja pri protoku $Q_{\max} = 2,20$ m. Visina prelivnog mlaza i dubina u bazenu sada se moraju odrediti iterativno (probanjem), pri čemu se uzima u obzir istovremeno preliivanje preko pločastog kamena (na nižoj koti) i preliivanje preko kamenih blokova (na višoj koti). Proračun se ponavlja za više pretpostavljenih vrednosti dubine uzvodno od praga H_{\max} (Slika 10), sve dok zbir protoka na oba preliiva ne bude približno jednak protoku Q_{\max} . U nastavku se navode rezultati samo konačnog rešenja.

Za pretpostavljenu dubinu $H_{\max} = 1,0$ m, visina prelivnog mlaza iznad pločastog kamenog praga iznosi:

$$H_1 = H_{\max} - p = 1,0 - 0,2 = 0,8 \text{ m.}$$

Za $\Delta h = 0,2$ m, dubina „donje vode“ u bazenu je: $h_1 = H_1 - \Delta h = 0,6$ m. Tada je $h_1 / H_1 = 0,6 / 0,8 = 0,75$, pa sledi $\sigma = 0,99 \approx 1,0$, a na osnovu (9):

$$Q_1 = 2/3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 0,6 \cdot 4,43 \cdot 0,8^{3/2} = 0,63 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Visina prelivnog mlaza iznad kamenih blokova iznosi (Slika 10): $H_2 = H_{\max} - h_d = 1,0 - 0,4 = 0,6$ m. Odgovarajuća dubina „donje vode“ u bazenu je: $h_2 = H_2 - \Delta h = 0,6 - 0,2 = 0,4$ m. Sledi: $h_2 / H_2 = 0,67$ i $\sigma = 1,0$, pa je na osnovu (9):

$$Q_2 = 2/3 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 2,4 \cdot 4,43 \cdot 0,6^{3/2} = 1,64 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Ukupni protok na pragu $Q_1 + Q_2 = 0,63 + 1,64 = 2,27$ m³/s približno odgovara zadatom protoku.

Provera brzine toka u bazenu daje sledeće rezultate:

a) Pri Q_{\min} , srednja dubina je: $[(h + p) + (H + p)] / 2 = (h + H) / 2 + p = (0,3 + 0,4) / 2 + 0,2 = 0,55$ m, srednja površina poprečnog preseka: $1,5 \cdot 0,55 + 2 \cdot 0,55^2 = 1,43$ m², a srednja profilaska brzina: $0,2 / 1,43 = 0,14$ m/s.

b) Pri Q_{\max} , srednja dubina je: $[(h_1 + p) + H_{\max}] / 2 = (0,8 + 1,0) / 2 = 0,9$ m, srednja površina poprečnog preseka: $1,5 \cdot 0,9 + 2 \cdot 0,9^2 = 2,97$ m², a srednja profilaska brzina: $2,20 / 2,97 = 0,74$ m/s.

Može se konstatovati da su u oba slučaja brzine toka ispod dozvoljene granice. Provera brzine disipacije energije po jedinici zapremine prema izrazu (12) daje:

$$\Delta E = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,20 \cdot 0,2 / (1,9 \cdot 2,97) = 127 \text{ W/m}^3,$$

što je manje od granične vrednosti $150 \div 200$ W/m³.

Na kraju, treba još jednom naglasiti da je hidraulički proračun ribljih staza u praksi veoma uprošćen. Prisutne su *neizvesnosti ulaznih podataka i vrednosti računskih parametara* (veličine kamenih blokova, vrednosti koeficijentata rapavosti, preliivanja itd). Zbog toga, rezultati prikaznog načina proračuna mogu da posluže samo u početnoj fazi projektovanja. Za konačno rešenje uputno je preduzeti složenije hidraulički proračune i ispitivanje na fizičkom modelu. Po završetku radova, preporučuje se probni rad riblje staze, tokom koga će se pratiti njeno funkcionisanje u raznim hidrološko-hidrauličkim uslovima i preduzeti mere za korekciju projektnog rešenja, ukoliko se pokaže da je neophodno.

ZAKLJUČAK

Koncept „naturanog“ uređenja malih vodotoka obavezuje na igradnju ribljih staza, u okviru regulacije strmih deonica kod kojih hidraulički uslovi (male dubine, a velike brzine) otežavaju kretanje riba, ili u vidu posebnih objekata - ribljih rampi ili zaobilaznih kanala, na mestima pregradnih objekata koji sprečavaju migraciju riba. Riblje staze na malim vodotocima se projektuju uvažavajući hidrauličke, konstruktivne, ihtiološke i estetske uslove. Imajući u vidu neizvesnosti u pogledu ulaznih podataka i vrednosti računskih parametara, uputno je projektna rešenja revidovati po završetku izgradnje ribljih staza, u toku njihovog probnog rada.

LITERATURA

- [1] Armanini, A.: Scotton, P.: Criteri di dimensionamento e di verifica delle stabilizzazioni di alveo e di sponda con massi sciolti e massi legati, Univerzitet u Trentu, IDR 1/1995.
- [2] Fish Passes - Design, Dimensions and Monitoring, FAO, Rome, 2002.
- [3] Handbuch Wasserbau, Naturgemäße Gestaltung von Fließgewässern, Ministerium für Umwelt, Baden-Württemberg, 1990.
- [4] Hartung, F., Scheuerlein, H., Design of Overflow Rockfill Dams, X. Congress ICOLD, Montreal, 1970.
- [5] Jovanović, M.: Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija, drugo izmenjeno i dupunjeno izdanje, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [6] Jovanović, M., Rosić, N.: Proračun prelivanja kamenog praga u rečnom koritu pri malim vodama, Vodoprivreda, 2010/1-3 (243-245), 2010.
- [7] Orsborn, John: New Concepts in Fish Ladder Design, Volume I - IV, 1982-1984 Final Report, Project No. 198201400, 81 electronic pages, (BPA Report DOE/BP-36523-2)
- [8] Robinson, K.M., Rice, C.E., Kadavy, K.C., Design of Rock Shutes, Transactions of ASAE, Vol.41(3), 1998.
- [9] Smith, C.D.: Hydraulic Structures, University of Saskatchewan, 1995.
- [10] Stream Corridor Restoration -- Principles, Processes, and Practices, The Federal Interagency Stream Restoration Working Group, USDA, 2000.
- [11] Tamai, N., Matsuzaki, H.: Estimate of fish habitat for determination of ecological instream flow, 27. IAHR Congress, San Francisco, 1997.
- [12] Tsujimoto, T., Horikawa, N.: Methodology of ecological fishway design, 27. IAHR Congress, San Francisco, 1997.
- [13] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Rock Ramp Design Guidelines, Denver, 2007.
- [14] Videler, J.J., Weihs, D.: Energetic advantages of burst-and-coast swimming of fish at high speeds, Journal of exp. Biology, 97, 1982.

Izvori sa Interneta:

- [15] <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>
- [16] <http://www.fishbase.org/manual/English/>
- [17] <http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/>
- [18] <http://herkules.oulu.fi/isbn9514259777/html/index.html>

FISH PASSES IN CONTEXT OF "NATURAL" REGULATION OF SMALL WATERCOURSES

by

Miodrag JOVANOVIĆ
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

This article deals with fish passes design within the contemporary concept of "natural" regulation of small streams. Structural solutions of fish passes, which take various forms, such as regulated steep river reaches, fish ramps, and bypass channels, are presented. Explanation of hydraulic computations is illustrated by numerical

examples. Several photographs affirm that "natural" stream regulation can fully satisfy various hydraulic, ichthyologic, and aesthetic requirements.

Key words: river regulation, fish passes

Redigovano 31.10.2011.