

PREGLED I PRIMENA REZULTATA SAVREMENIH HIDRAULIČKIH ISTRAŽIVANJA U PROJEKTOVANJU PRELIVA VISOKIH BRANA (šesti deo: PRELIVI SA STEPENASTIM BRZOTOKOM – deo II)

Živodar ERČIĆ
Energoprojekt-Hidroinženjering
E-mail: erra@eunet.rs

REZIME

U šestom delu rada prikazani su postupci za procenu količine rasute energije u stepenastom brzotoku i određivanje dimenzija objekta za rasipanje preostale kinetičke energije. Navode se primeri o upotrebi stepenika na evakuacionim objektima koji nisu na nizvodnim licima gravitacionih i nasutih brana.

Ključne reči: stepenasti brzotoci, rasipanje energije, bučnice, kavitacija

1. UVOD

Stepenasti brzotoci su ekonomski atraktivni hidrotehnički objekti jer su istovremeno i sprovodnici vode od prelivnog praga do donje vode i rasipači kinetičke energije vodnog toka. Čine ih nagnuti otvoreni kanal i serija stepenika po dnu zbog kojih je vodni tok veoma ovazdušen. Intenzivno uvlačenje vazduha u vodni tok je velika prednost stepenastih brzotoka u odnosu na konvencionalne brzotoke sa glatkim dnom jer se većim prisustvom vazduha u vodi smanjuje rizik od kavitacije usled smanjenja brzine ovazdušenog vodnog toka. Druga velika prednost stepenastih brzotoka je intenzivno rasipanje energije usled povećanja površinske rapavosti što, kao posledicu, ima smanjenje dimenzija (i koštanje) objekata za rasipanje preostale kinetičke energije. (U tehničkoj literaturi je uobičajena upotreba izraza “rasipanje (disipacija) energije” premda je reč o pretvaranju mehaničke energije u toplotnu). Negativne posledice povećanog uvlačenja vazduha u vodni tok su viši bočni zidovi brzotoka, formiranje spreja i eventualna abrazija betona nanosom. U praksi su zabeležena oštećenja i rušenja brana sa stepenastim brzotokom, uglavnom zbog grešaka u projektovanju,

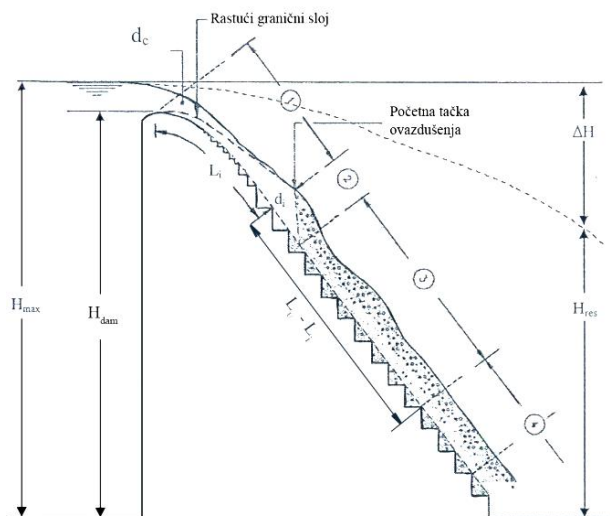
lošeg kvaliteta izvedenih građevinskih radova i lošeg održavanja (*Chanson, 2000*)

Geometrija stepenika stepenastog brzotoka je ili horizontalna ili u nagibu (usponu ili padu) ili sa vertikalnim pragom na nizvodnom kraju. U dosadašnjoj praksi najčešće su primenjivani stepenasti brzotoci sa stepenicima sa horizontalnom gornjom površinom, premda su značajno laboratorijski ispitivane i druge dve geometrije.

Moguća su tri režima strujanja vode u stepenastom brzotoku: skokoviti, prelazni i klizeći režim. Formiranje tipa režima strujanja zavisi od geometrije stepenika (visine i dužine) i specifičnog protoka ($m^3/s/m$) ali su u praksi najzastupljeniji brzotoci sa geometrijom stepenika koja omogućava formiranje klizećeg režima pri merodavnom specifičnom protoku.

Karakteristično za klizeći tok je formiranje dve zone strujanja: gornja zona iznad nestvarnog dna brzotoka (zamišljena linija koja spaja uglove stepenika) i donja zona ispod nestvarnog dna, formirana od ćelija u kojima je struganje vode recirkulaciono i sa malim uticajem gornje zone na ovo strujanje.

U stepenastim brzotocima sa klizećim režimom vodni tok je intenzivno turbulentan, i veoma ovazdušen što je jasno vidljivo i na modelu i na prototipu i sa zamršenom i nejasnom talasastom vodnom površinom. U tački izlaska turbulentnog graničnog sloja na površinu počinje prirodno uvlačenje vazduha u vodni tok. Nizvodno od ove početne tačke ovazdušenja mogu da se formiraju sledeća tri regiona: razvijajući delimično ovazdušeni tok, razvijajući potpuno ovazdušeni tok i, ako je dužina brzotoka veća od Ln , potpuno razvijeni ovazdušeni tok.



Slika 1.1 – Regioni u stepenastom toku sa klizećim režimom; ① – neovazdušeni region; ② – razvijajući delimično ovazdušeni tok; ③ – razvijajući potpuno ovazdušeni tok; ④- potpuno razvijeni ovazdušeni tok

Granice ovih regiona i hidrauličke karakteristike vodnog toka u njima, su bitni elementi koje treba odrediti u procesu definisanja preostale kinetičke energije na kraju brzotoka. Empirijske jednačine za određivanje granica svakog od pomenutih regiona kao i hidrauličkih karakteristika toka u svakom od njih prikazani su u radovima (Erčić, 2013; Kapor i dr., 2009; Kuzmanović i dr. 2011; Savić i dr. 2011). U svakom od ovih radova priložen je obiman spisak korišćenje literature.

U ovom radu prikazane su metode za određivanje veličine preostale energije na nizvodnom kraju stepenastog brzotoka, sa strujanjem vode u klizećem režimu kao i karakteristike objekata za rasipanje preostale energije u nastavku brzotoka.

U poslednjem poglavlju je prikazano nekoliko primera stepenastih brzotoka, nevezanih za brane od valjanog betona ili za nizvodno lice nasutih brana.

2. RASIPANJE ENERGIJE U BRZOTOKU

Količina energije, rasute duž stepenastog brzotoka, je neophodan ulazni podatak pri određivanju dimenzija bučnice sa hidrauličkim skokom ili bilo kog drugog objekta za rasipanje preostale energije.

Gubitak energije u klizećem režimu eksperimentalno je određivan u mnogim hidrauličkim laboratorijama. Istraživan je efekat vazduha, smičućih sila, dimenzije stepenika i forme dodatnih elemenata na stepenicima. Međutim, opšta saglasnost rezultata ispitivanja nisu postignuta, uglavnom zbog velikog opsega raznolikih eksperimentalnih uslova. Ipak, veliki broj formiranih empirijskih jednačina omogućavaju određivanje karakteristika strujanja ako se uzmu u obzir eksperimentalni uslovi pri kojima su izvedene predmetne empirijske jednačine.

U tehničkoj literaturi su, uglavnom, prikazane sledeće dve metode za procenu preostale energije na kraju stepenastog brzotoka:

- procena na osnovu Bernulijeve jednačine;
- procena pomoću poznatih vrednosti koeficijenta trenja.

Procena preostale energije po prvoj metodi vrši se na osnovu Bernulijeve jednačine u preseku na nizvodnom kraju brzotoka:

$$H_{res} = d_w \cos \theta + \left(\alpha q_w^2 / 2gd_w^2 \right) \quad (2.1)$$

U jednačini su korišćene sledeće oznake: d_w – dubina čiste vode, θ – ugao nagiba nestvarnog dna brzotoka, $\alpha=1,1 \div 1,16$; q_w – specifični protok čiste vode; g – ubrzanje Zemljine teže.

Korišćenje ove metode za procenu preostale kinetičke energije na kraju stepenastog brzotoka zahteva da se poznaje dubina čiste vode što zavisi od režima strujanja (jednolikog ili nejednolikog). Ukoliko je režim strujanja jednolik (potpuno razvijeni aerisani tok), dubina čiste vode može se izračunati iz jednačine (Boes i dr. 2000).

$$\frac{d_{w,u}}{d_c} = 0,23(\sin \theta)^{-1/3} \quad (2.2)$$

gde je d_c – kritična dubina.

Isti autori preporučuju da se ekvivalentna dubina čiste vode duž stepenastog brzotoka određuje iz jednačine:

$$d_w(x) = \frac{d_{w,u}}{1 - \left(1 - \frac{d_{w,u}}{d_c} \right) \exp \left(\frac{10}{3} \frac{d_{w,u}^3 \sin \theta}{d_c^3} x \right)} \quad (2.3)$$

gde je x - rastojanje predmetnog preseka od vrha preliva, mereno duž brzotoka.

U proceni preostale kinetičke energije po drugoj metodi koriste se empirijske vrednosti koeficijenta rapavosti u dnu stepenastog preliva. U skupu empirijskih jednačina za procenu preostale energije po ovoj metodi je i poznata jednačina (Chanson, 1994) za potpuno razvijen, ovazdušen tok (ravnotežno stanje), pri slobodnom prelivanju preko prelivne glave i pri parcijalno ostvarenim ustavama na prelivu, respektivno

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}} \quad (2.4)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-2/3}}{\frac{H_{dam} + H_0}{d_c}} \quad (2.5)$$

Gornjim jednačinama se procenjuje veličina rasute energije duž brzotoka (ΔH). Preostale oznake su: f_e - koeficijent trenja za aerisani protok, H_{dam} - visina prelivnog praga iznad nizvodnog kraja brzotoka, H_0 - rastojanje između gornje vode i krune preliva, $H_{max} = H_{dam} + H_0$, d_c = kritična dubina pri merodavnom protoku, $H_{res} = H_{max} - \Delta H$.

Za visoke brane pogodnije je da se procenjuje vrednost preostale energije (H_{res}) umesto vrednosti rasute energije (ΔH) [Chanson, 2002] prema empirijskoj jednačini:

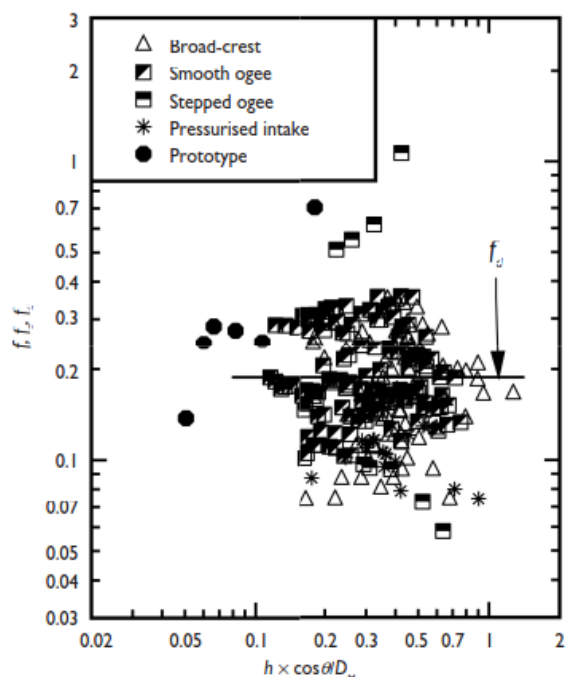
$$\frac{H_{res}}{d_c} = \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f_e}{8 \sin \alpha}\right)^{-2/3} \quad (2.6)$$

Isti autor u publikaciji iz 2015. (Chanson, 2015) grafički prikazao zavisnost Darsijevog (Darcy) koeficijenta trenja u funkciji bezdimenzionalne visine čelije ispod nestvarnog dna brzotoka ($h \cos \alpha$)/ D_H gde je D_H – hidraulički dijametar (slika 2.1).

Interval promene i srednja vrednost koeficijenta trenja prikazani su u sledećoj tabeli:

Tabela 1. Interval promene i srednja vrednost koeficijenta trenja

	Model		Prototip
	Slobodan preliv	Zahvat pod pritiskom	
Srednja vrednost	0,18	0,10	0,32
Interval	0,10-0,36	0,7÷0,13	0,14÷0,70



Slika 2.1. Darsi – Vajsbahov koeficijent trenja u zavisnosti od parametra ($h \cos \alpha$)/ D_H (Chanson, 2015)

Navedene vrednosti koeficijenta trenja mogu se koristiti za razarajući i potpuno razvijen ovazdušeni tok. U radu (Chanson, 2015) preporučuje se da se preostala energija na kraju brzotoka procenjuje na osnovu sledećih jednačina:

- potpuno razvijen aerisani tok

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{F}{1,5 + H_{dam}/d_c} \quad (2.7)$$

gde je $F = (f/8 \sin \alpha)^{1/3} + 0,55(f/8 \sin \alpha)^{-2/3}$

- razvijajući aerisani tok

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -(f/8) \cdot (q_w^2 / g d_w^3) \quad (2.8)$$

gde je x - krivolinijsko rastojanje tačaka duž nizvodno nagnutog nestvarnog dna brzotoka.

Boes i dr. (2003) preporučili su sledeću modifikaciju jednačine (Chanson, 1994) za određivanje preostale energetske visine pri jednolikom režimu strujanja, odnosno pri $H_{dam}/d_c \approx 24(\sin\theta)^{2/3} \geq 15 \div 20$:

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{F}{\frac{H_{dam}}{d_c} + F} \quad (2.9)$$

$$F = \left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{1/3} \cos\theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{f_b}{8\sin\theta}\right)^{2/3} \quad (2.10)$$

gde je $H_{max} = H_{dam} + 1,5d_c$; f_b = koeficijent trenja, izračunat prema sledećim jednačinama (Boes i dr. 2003)

$$f_b = [0,5 - 0,42 \sin(2\theta)] \left(\frac{K}{D_{hw}}\right)^{0,2} \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_b}} = \frac{1}{\sqrt{0,5 - 0,42 \sin(2\theta)}} \left[1 - 0,25 \log\left(\frac{K}{D_{hw}}\right)\right] \quad (2.12)$$

gde su: $D_{hw} = 4R_{hw}$; R_{hw} - hidraulički radijus čiste vode; $K = s \cos\theta$; s - visina stepenika; θ - ugao nagiba nepravog dna.

Ako nije ostvareno jednoliko strujanje u brzotoku ($H_{dam}/d_c < 15 \div 20$), u istom radu je preporučena jednačina:

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \exp\left\{\left[-0,045 \left(\frac{K}{D_{hw}}\right)^{0,1} (\sin\theta)^{-0,8}\right] \frac{H_{dam}}{d_c}\right\} \quad (2.13)$$

U literaturi se preporučuje da se za dalje proračune koristi manja vrednost f_b .

Iz obe jednačine se vidi da je uticaj ugla θ mnogo veći od visine rapavosti (K), upravne na nagib nepravog dna. Ovaj važan zaključak takođe se odnosi na jednačinu 2.2 koja definiše ekvivalentnu dubinu čiste vode.

Primena jednačina (2.9) do (2.13) se takođe preporučuje i u radu (Boes, 2012).

Matos i dr (2000) su, na osnovu terenskih i laboratorijskih istraživanja, zaključili da je rasuta energija u stepenastim brzotocima ograničena protokom koji je jednak protoku glatkog preliva iste visine kada je $H_{dam}/d_c < 10$. Ovaj zaključak izgleda da nije podržan od ostalih istraživača ali bi određivanje gornje granice korisnosti stepenastih brzotoka bilo dragoceno.

Proračun rasipanja energije po napred opisanoj procedure ponekad je komplikovano. Zbog toga su Valentin i dr. (2004) analizirali raspoložive podatke sa ciljem da odrede jednostavnije odnose između glavnih geometrijskih i hidrauličkih parametara i omoguće jednostavniji projektni proces. Analizirani su raspoloživi podaci istraživača za uglove nagiba od 19°, 30°, 40° i 50° i uspostavljena sledeća zavisnost između relativne preostale energetske visine na kraju brzotoka i relativne visine brzotoka.

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = a \left(\frac{H_{dam}}{d_c}\right)^b \quad (2.14)$$

Jednačina (2.14) je formirana na osnovu merenih podataka za relativnu visinu brane $H_{dam}/d_c > 8$.

Koeficijenti a i b u jednačini (2.14) prikazani su u sledećoj tabeli, u zavisnosti od ugla nagiba nepravog dela brzotoka (θ):

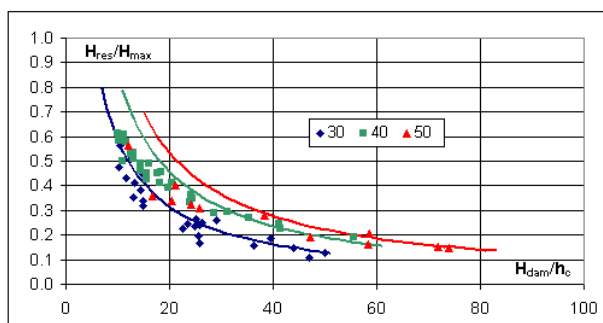
Tabela 2. Koeficijenti a i b u zavisnosti od ugla nagiba nepravog dela brzotoka

θ	a	b
19°	5.0	-1.14
30°	3.6	-0.81
40° i 50°	2.1	-0.56

Preostala energetska visina na nizvodnom kraju brzotoka (H_{res}), određena jednačinom (2.14), nešto je veća od energetske visine određene prema tačnijoj proceduri. U praktičnoj primeni, tj. pri projektovanju bučnica, ovi rezultati su na strani sigurnosti.

U tehničkoj literaturi je, sem napred navedenih jednačina, prikazan veći broj empirijskih jednačina i grafičkih priloga. Nekoliko postupaka je prikazano u nastavku.

U radu (Minor i dr. 2001) grafički je prikazana zavisnost između parametara (H_{res}/H_{max}) i (H_{dam}/d_c) za nagibe brzotoka od 30° , 40° i 50° .



Slika 2.2. $H_{res}/H_{max} = \varphi(H_{dam}/d_c)$

Dijagram je primenljiv u slučajevima da je dužina preliva veće od dužine L_n definisane izrazom:

$$L_n = (57 - 13/\sin\theta)d_c \quad (2.15)$$

Jednačina važi u intervalu $26^\circ < \theta < 55^\circ$ gde je θ ugao nagiba nestvarnog dna u odnosu na horizontalu.

Yasuda i dr (2001) izveli su sledeći izraz za procenu izgubljene energije na kraju brzotoka, pri potpuno razvijenom ovazdušenom toku (jednoliki režim strujanja):

$$\frac{\Delta H_1}{H_{max}} = 1 - \frac{(d_w/d_c)^2 + 2(d_w/d_c)\cos\theta}{3 + 2(H_s/d_s)} \quad (2.16)$$

gde je: $d_c = (q_w^2/q)^{1/3}$, q_w – specifični protok; d_w – dubina čiste vode; H_s – visina preliva iznad nizvodnog kraja brzotoka.

Ohtsu i dr (2004) ispitivali su karakteristike vodenog toka u klizećem režimu i za veliki interval promene eksperimentalnih uslova i padove nestvarnog dna brzotoka u intervalu $5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$. Zaključili su da nivo vode u podužnom preseku može da bude ili potpuno paralelan sa nestvarnim dnom (tip A strujanja) ili delimično paralelan nestvarnom dnu (tip B strujanja).

Za nagibe iz intervala $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ uvek se formira strujanje tipa A. Međutim, u intervalu nagiba $5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ moguće je formiranje strujanja i tipa A i tipa B u zavisnosti od vrednosti s/d_c , gde je s – visina praga i $d_c = (q^2/q)^{1/3}$. Gornja granica za formiranje klizećeg toka definisana je izrazom:

$$(s/d_c)_s = (7/6)(\text{tg}\theta)^{1/6} \quad (2.17)$$

Jednačina važi za interval nagiba $5,7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$.

Tipovi strujanja A i B razgraničeni su krivom linijom:

$$(s/d_c)_B = 13(\text{tg}\theta)^2 - 2,73 \cdot \text{tg}\theta + 0,373 \quad (2.18)$$

Jednačine važi za nagib nestvarnog dna u granicama $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$.

Rezidualna energija u potpuno razvijenom ovazdušenom toku sa strujanjem tipa A definisana je izrazom:

$$\left(\frac{E_{res}}{d_c}\right)_u = \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{1/3} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{-2/3} \quad (2.19)$$

Ukoliko je, u potpuno razvijenom ovazdušenom toku, formirano strujanje tipa B, koristi se jednačina:

$$\left(\frac{E_{res}}{d_c}\right)_u = \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{1/3} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\sin\theta}\right)^{-2/3} \quad (2.20)$$

U ovom redu definisane su i dve formule za određivanje koeficijenta trenja za vrednost s/d_c u intervalu $0,1 \leq s/d_c \leq (s/d_c)_s$ i to za interval $5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$ i interval $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$.

Hunt i dr (2010) su ispitivali veličinu izgubljene energije na blago nagnutom stepenastom brzotoku (4H:1V) i ustavili sledeću formulu pri potpuno razvijenom ovazdušenom toku.

$$\Delta H/H_{max} = 1 - \left[(L/L_t) + 0,51 \right]^{-0,87} \quad (2.21)$$

gde je: L – krivolinijska dužina brzotoka od krune preliva do preseka koji se analizira (na primer, nizvodni kraj

brzotoka); L_i -krivolinijska dužina od krune preliva do tačke u kojoj granični sloj izbija na površinu, određene izrazom:

$$L_i = 9,719(\sin\theta)^{0,0796} (F)^{0,713} h(\cos\theta) \quad (2.22)$$

gde je $F = q / \left\{ g(\sin\theta) [h(\cos\theta)^3]^{0,5} \right\}$; h -visine stepenica.

Sarfaraz i dr (2010) upoređivali su gubitak energije na kraju brzotoka na hidrauličkim modelima za četiri brane sa gubicima energije, procenjenim na osnovu jednačina (Christodoulou, 1993., Chanson, 1994; Yasuda i dr. 2001 i Boes i dr, 2003). Zaključeno je da se rezultat modelskih ispitivanja najbolje slažu sa gubicima energije prema formuli (Chanson, 1994) u koju je uveden koeficijent trenja prema formuli (Ohitsu i dr., 2004)

U radu (Felder i dr, 2011) iznosi se zaključak da stepenasti brzotoci sa promenljivosti stepenica ne povećavaju rasipanje energije na nizvodnom kraju brzotoka. Ispitivan je fizički model u nagibu 1V:2H a visina stepenica menjana je u granicama $0,7^\circ \leq \theta \leq 1,9^\circ$.

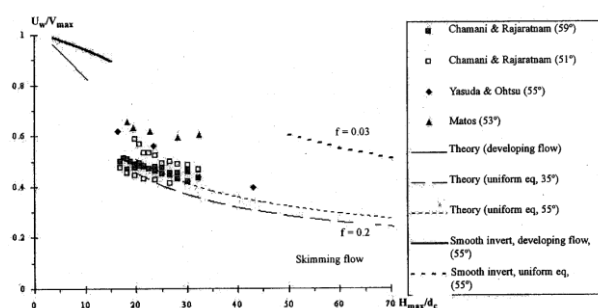
U radu (Salmasi, 2013) analiziran je uticaj broja stepenika na veličinu izgubljene energije na nizvodnom kraju brzotoka. Korišćeni su rezultati eksperimentalnih ispitivanja raznih istraživanja i konstruisani dijagrami na osnovu kojih se, za zadatu visinu brane i specifičan protok, tačno može odrediti broj stepenika pri kome je najveće rasipanje energije duž brzotoka a zatim i odgovarajuća visina stepenika (h). Prikazan je i grafička veza između koeficijenta trenja, nagiba brzotoka u intervalu $10^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ i bezdimenzionalne visine stepenica (h/d_c). Prikazani su i dijagrami za određivanje srednje koncentracije vazduha u vodi i dijagrami za određivanje ekvivalentne dubine čiste vode (d_w).

3. RASIPANJE PREOSTALE ENERGIJE U BUČNICAMA

Energija koja uvek preostaje na kraju stepenastog brzotoka treba da bude rasuta u nizvodnom objektu za tu namenu. Tipovi rasipača preostale energije mogu da budu isti kao kod brzotoka sa glatkim dnom: standardna bučnica sa hidrauličkim skokom, odskok sa erozionom jamom ili betonskim slapištem i potopljeni odskok u donjoj vodi.

Suprotno od realizovanih obimnih istraživanja vezanih za rasipanje energije duž stepenastog brzotoka, realizovano je vrlo malo istražnih radova na osnovu kojih bi mogli da se definišu projektni kriterijumi za dimenzionisanje slapišta uz stepenaste brzotoke. Do sada nisu dovoljno rasvetljene ni razlike ovih objekata uz brzotoke sa stepenastim ili sa glatkim dnom (uticaj ovazdušenja, raspodela brzina po vertikali, preporučeni maksimalni specifični protoci i dr.).

U dosadašnjoj praksi su uz stepenaste brzotoke najčešće korišćene bučnice sa hidrauličkim skokom. Druga spregnuta dubine bučnice može se, u nižim fazama projektovanja, odrediti na osnovu poznate jednačine za hidraulički skok. Određuje se dubina d_2 (razlika između nivoa donje vode i dna bučnice) na osnovu dubine čiste vode $d_{1w} = Q_w / U_w$. Chanson (2001) je preporučio da se preostala brzina čiste vode određuje na osnovu dijagrama sa slike 3.1.



Slika 3.1. Grafička zavisnost između $U_w i V_{max}$ i H_{max}/d_c

Druga spregnuta dubina (d_2) određuje se na osnovu formule:

$$d_2 = \frac{d_w}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_w} \right) \quad (3.1)$$

gde je $Fr_w = v_w^2 / (gd_w)$

Za pravougaonu bučnicu sa horizontalnim dnom jednostavniji izraz je:

$$\frac{d_2}{d_{1w}} = 1,41\sqrt{F} \quad (3.2)$$

U sadržaju rada (Simoes, A.L.A. i dr, 2010) su prikazane jednačine za određivanje dužine standardnih USBR dubina tipa I, II, III (Monografija N°25, 1959).

Korišćeni su rezultati eksperimentalnih istraživanja u periodu od 1991 do 2007. godine. Dužina bučnice definisana je izrazom

$$L_j / H_{dam} = \psi (H_{dam} / d_c)^{-\psi_2} \quad (3.3)$$

Vrednosti ψ_1 i ψ_2 zavise od koeficijenta trenja i tipa bučnice i prikazani su u sledećoj tabeli:

Tabela 3. Vrednosti ψ_1 i ψ_2 u zavisnosti od koeficijenta trenja

Tip bazena	C _{b1}	C _{b2}	C _{b3}	C _{b4}	C _{b5}	C _{b6}
I	-11.28	-6.83	-15.09	-1.22	0.56	0.92
II	-15.55	-0.69	8.82	-1.82	0.87	0.86
III	-7.39	-0.44	4.65	-1.89	0.98	0.80

Gornja jednačina važi za sledeće intervale vrednosti H_{dam}/d_c kao i za koeficijent trenja u intervalu $0,08^\circ \leq f \leq 0,20^\circ$.

Tabela 4. Vrednosti ψ_1 i ψ_2 u zavisnosti od tipa bučnice

Tip bučnice	H_{dam}/d_c
I	$5 \leq H_{dam}/d_c \leq 80$
II	$2,5 \leq H_{dam}/d_c \leq 80$
III	$1,26 \leq H_{dam}/d_c \leq 80$

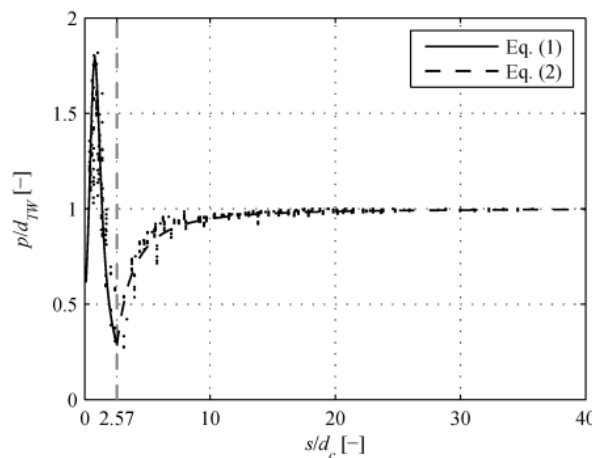
Autori preporučuju da se, u prvog aproksimaciji, koeficijent trenja odrađuje prema jednačini:

$$f = 1,66Fr^{-1,23} \quad (3.4)$$

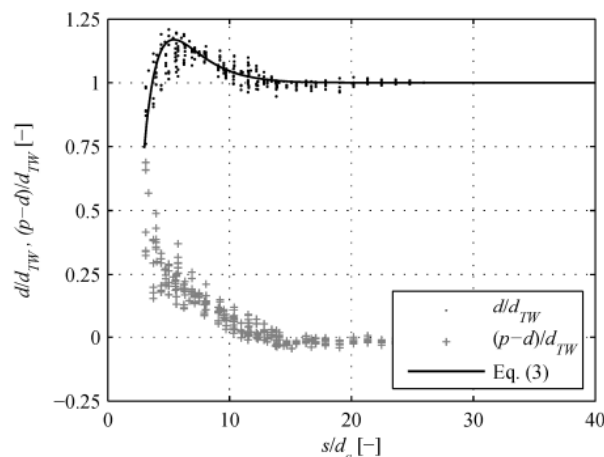
gde je $Fr = v/\sqrt{gd_w}$. Gornja jednačina važi za interval $4,01 \leq Fr \leq 11,6$.

Bund i dr, (2012) ispitivali su uticaj blokova na nizvodnom kraju stepenastog brzotoka na ovazdušenu dubinu vode na početku bučnice i pijezometarske nivoe.

Zaključeno je da ovi blokovi nisu obavezni u bučnici USBR tip III. Na osnovu eksperimentalnih podataka formirane su formule za procenu pijezometarski pritisaka (P) i dubine ovazdušeni vode (d) duž bučnice. Formule su grafički prikazane na slikama 3.2 (a) i 3.2. (b).



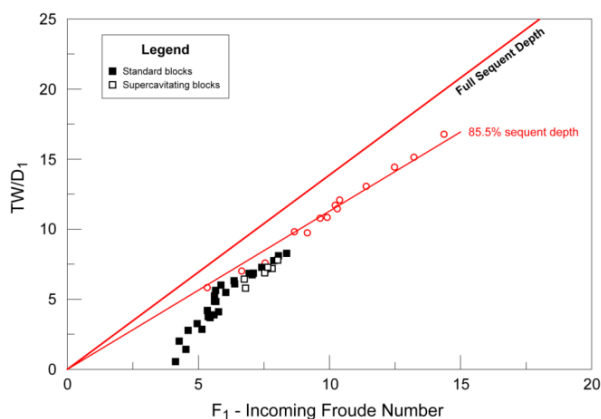
Slika 3.2a. Raspedela bezdimenzionalnih pritisaka p/d_w



Slika 3.2b. Raspedela bezdimenzionalnih dubina vode d/d_w

U radu (Frizell, K.W., 2012) se prikazuju zaključci eksperimentalnih ispitivanja na osnovu kojih utvrđeni odnosi između spregnutih dubina u bučnici USBR tip III uz stepenasti brzotok. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je, za isti specifični protok Frudov broj na ulazu u bučnicu $Fr = v_w/\sqrt{gd_w}$ uz stepenasti brzotok znatno manji od odgovarajućeg ulaznog Frudovog broja uz bučnicu brzotoka sa glatkim dnom. Razlog ovome je rasipanje kinetičke energije duž stepenastog brzotoka kao i povećane dubine vode zbog povećanog uvlačenja vazduha u vodni tok. Kod ovog tipa bučnice uz stepenaste brzotoke, manji protoci ne zahtevaju

prisustvo donje vode jer se stabilan hidraulički skok formira i održava betonskim blokovima i nizvodnim pragom. Slika 3.3. pokazuje stalno smanjenje vrednosti TW/D_1 za $Fr < 6$ kao i da je $TW/D_1 \approx 0$ za $Fr = 4$.



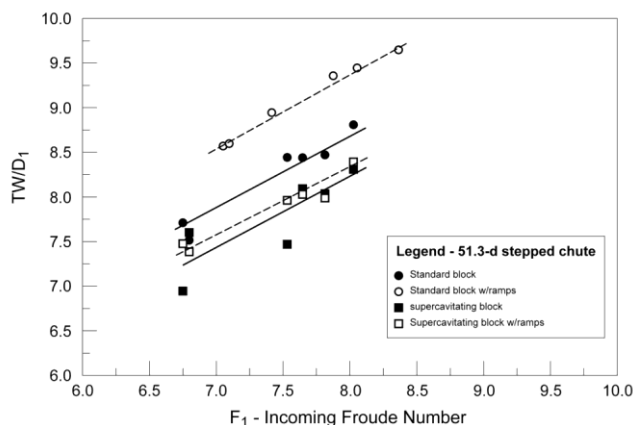
Slika 3.3. – Grafička zavisnost TW/D_1 od Fr ;
 TW – oznaka za drugu spregnutu dubinu

U radu se preporučuje primena superkavitacionih blokova jer se njihovom upotrebom smanjuje potrebna druga spregnuta dubina (TW) zbog dodatnog rasipanja energije usled povećanog povratnog strujanja vode na bočnim stranama superkavitacionih. Takođe se, preporučuje upotreba rampi između superkavitacionih blokova (slika 3.4).



Slika 3.4 Superkavitacioni blok sa rampom

Interesantan zaključak u ovom radu je da standardni blokovi sa rampom povećavaju drugu spregnutu dubinu u odnosu na potrebnu dubinu sa standardnim blokovima bez rampe. Obrnut slučaj je pri korišćenju superkavitacionih blokova sa i bez rampe (slika 3.5).



Slika 3.5. Uticaj oblika blokova sa i bez rampi na potrebnu drugu konjugovanu dubinu pri nizvodnom nagibu stepenastog brzotoka 53.1° .

Sem napred iznetih bučnica uz stepenaste prelive u praksi su korišćeni i drugi tipovi objekata za rasipanje preostale energije. Tako, na dodatnom prelivu brane Gloritte (Francuska) izgrađen je dodatni stepenasti brzotok, kapaciteta $80 \text{ m}^3/\text{s}$, sa bučnicom sa naglim proširenjem i pragom.

Na brani Murum (Malezija) od valjanog betona, visine 145 m , izgrađen je stepenasti brzotok kapaciteta $2160 \text{ m}^3/\text{s}$, koji se završava odskokom kružnog preseka sa odskočnim uglom od 25° . Maksimalni specifični protok brzotoka je $42,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Nizvodno od odskoka izgrađena je zaštitna betonska ploča, dužine $24,0 \text{ m}$.

4. PRIMERI IZVEDENIH STEPENASTIH BRZOTOKA

Masovno korišćenje stepenastih brzotoka počelo je 60-tih godina prošlog veka, izgradnjom dodatnih betonskih ili gabionskih stepenastih brzotoka po nizvodnim kosinama nasutih brana radi povećanja kapaciteta bez izgrađenih preliva. Jedan od dograđenih stepenastih brzotoka po nizvodnoj kosini brane prikazan je na slici 4.1.

Dodatni podstrek za primenu stepenastih brzotoka dala je procedura izgradnje brana od valjanog betona koje, normalno, imaju stepenasto nizvodno lice. Na slici 4.2 prikazana je brana Wala (Jordan) od valjanog betona sa stepenastim brzotokom i bučnicom USBR tip I.



Slika 4.1 - Stepenasti preliv na nizvodnom licu nasute brane

Stepenasti brzotoci mogu da budu i izvan nasutih i betonskih brana. Površinski stepenasti brzotok lučne brane Gloriette (Francuska) izgrađen je po površini terena na desnoj dolinskoj strani, slika 4.3.

Stepenasti šahtni preliv svakako pripadaju klasi neobičnih preliva. Vodni tok u ovoj vrsti preliva ima manji kavitacioni potencijal u odnosu na glatke šahtne prelive. U Engleskoj su izgrađena dva stepenasta šahtna preliva u pregradnim profilima akumulacija Ladybower i Dove Stone. Prvi od njih pušten je u pogon 1945.

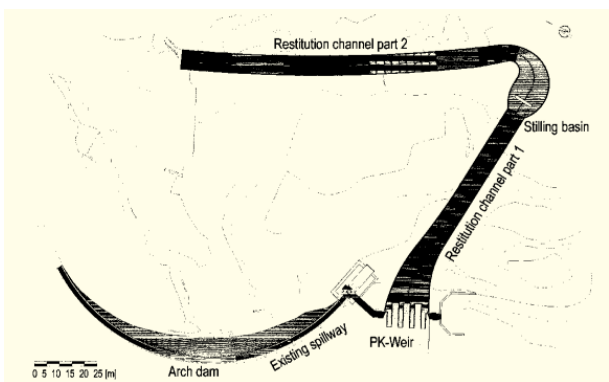
Stepenasti brzotoci mogu da budu u nastavku brzotoka sa glatkim dnom a može da bude i obrnuto. Karakterističan primer ovih kombinacija su dva preliva brane Lahontan, sa svake dolinske strane po jedan.



Slika 4.2 Stepenasti preliv i brzotok na brani Wala



Slika 4.4 Stepenasti šahtni preliv brane Ladybower



Slika 4.3 Stepenasti brzotok brane Gloriette



Slika 4.5 Kombinovani prelivi Lahontan brane, reka Carson, Nevada USA

5 ZAKLJUČAK

Kinetička energija vodnog toka se rasipa duž stepenastog brzotoka što ga čini ekonomski pogodnim, uglavnom zbog smanjenja troškova izgradnje objekata za rasipanje preostale kinetičke energije vodnog toka. Karakteristike stepenastih preliva analizirane su u mnogim hidrauličkim laboratorijama. Na osnovu rezultata ovih ispitivanja formiran je veći broj empirijskih formula za procenu preostale kinetičke energije na kraju stepenastog brzotoka. U jednoj vrsti formule preostala energija se procenjuje uz korišćenje Bernulijeve jednačine i procenjenju ekvivalentnu dubinu čiste vode dok se u drugoj vrsti empirijskih formula koristi koeficijent trenja, procenjen na osnovu empirijskih formula. Vrednost dubine čiste vode i koeficijenta trenja (odnosno vrednost preostale energije) zavisi od režima strujanja vode na kraju brzotoka (razvijajući ovazdušeni ili potpuno razvijen ovazdušeni tok). Veliki broj empirijskih jednačina omogućavaju određivanje preostale energije samo ako se uzmu u obzir eksperimentalni uslovi pri kojima su izvedene empirijske formule.

U praksi je uobičajeno da se geometrijske karakteristike stepenastih preliva određuju iz uslova da se, pri merodavnom protoku duž brzotoka formira klizeći režim vodnog toka.

U praksi se, u većini slučajeva, koriste bučnice sa hidrauličkim skokom. Modelska ispitivanja su pokazala da se mogu koristiti četiri standardna tipa USBR bučnica. Međutim, dosadašnja istraživanja nisu omogućila formiranje standarda za dimenzionisanje bučnica uz stepenaste brzotoke pa su neophodna ispitivanja na hidrauličkom modelu. Sem bučnica sa hidrauličkim tokom, u praksi se primenjuju i drugi tipovi objekata za rasipanje preostale kinetičke energije kao što su odskoci i bučnice sa naglim proširenjem i pragom. U praksi se zapaža i izostanak posebnih objekata za rasipanje preostale energije toka ukoliko je ona mala i ukoliko su povoljne geomehaničke karakteristike nizvodnog terena.

Stepenasti brzotoci se mogu formirati po nizvodnom licu nasute ili betonske brane, ili po površini terena jedne ili obe dolinske strane.

LITERATURA

- [1] Boes, R.M. & Miror, H.E. (2000), Guidelines for the hydraulic design of stepped spillways, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH-Zentrum, Zürich, Switzerland
- [2] Boes, R.M. & Hager, W.H. (2003), Hydraulic Design of Stepped Spillways, Journal of hydraulic engineering/September 2003
- [3] Bung, D.B.; Sun, Q.; Meireles, I.; Viseu, T.; Matos, J. (2012), USBR type III basin performance for steep stepped spillways, 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal
- [4] Boes, R.M. (2012), Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways, XXIV ICOLD Congress 2012
- [5] Chanson, H. (1994), Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, Journal of hydraulic research, vol. 32, NO. 2
- [6] Chanson, H. (2000), A review of accidents and failures of stepped spillways and weirs, Proc. Instn Civ. Engrs Water and Maritime Engrg, UK, Vol. 142, Dec
- [7] Chanson, H. (2001), Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators, Dam Engineering Vol. XI Issue 4
- [8] Chanson, H. (2015), Energy Dissipation in Hydraulic Structures, IAHR monograph
- [9] Erčić, Ž. (2013), Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana (peti deo: Prelici sa stepenastim brzotokom), Vodoprivreda, 45
- [10] Felder, S. & Chanson, H. (2011), Energy Dissipation down a Stepped Spillway with Nonuniform Step Heights, Journal of hydraulic engineering/November 2011
- [11] Frizell, K.W. & Svoboda, C.D. (2012), Performance of Type III Stilling Basins – Stepped Spillway Studies, USBR Hydraulic Laboratory Report HL – 2012 – 02

- [12] Kapor, R., Savić, Lj., Žugić, D., Petrović, N., Rula, M. (2012), Poređenje proračuna preliva sa stepenastim brzotokom i merenja na hidrauličkom modelu, 16. Savetovanje SDHI, Donji Milanovac
- [13] Kuzmanović, V. i drugi (2011), Statička analiza stepenastog preliva sa odbojnom gredom, Vodoprivreda, 246-248
- [14] Matos, J., (2000), Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams, Proc. of Int. Workshop on Hydraulic of stepped spillways, IAHR, A.A. Balkema
- [15] Minor, H.E. & Boes, R.M. (2001), Hydraulic Design of Stepped Spillways, XXIX IAHR Congress
- [16] Ohtsu, I. & Yasuda, Y. & Takashi, M. (2004), Flow Characteristics of Skimming Flow in Stepped Channels, J. Hydraul. Eng. 2004. 130:860-869
- [17] Salmasi, F. (2013), Optimum design of stepped spillways with skimming flow, Academic Research Online Publisher
- [18] Safraz, M. & Atteri, J. (2011), Selection of Empirical Formulae for Design of Stepped Spillways on RCC Dams, World Environmental and Water Resources Congress 2011
- [19] Savić, Lj. i drugi (2011), Stepenasti preliv sa odbojnom gredom, Vodoprivreda, 246-248
- [20] Simoes, A.L.A. & Schulz, H.E. (2010), Stepped and smooth spillways: resistance effects on stilling basing lengths, Journal of Hydraulic Research Vol. 48, No. 3
- [21] Valentin, G. & Volkart, P.U. & Minor, H.E. (2004), Energy disipation along stepped spillways, Hydraulics of Dams and River Structures – Yazdandoost & Attari (eds)
- [22] Yasuda, Y. & Takahashi, M. & Ohtsu, I. (2001), Energy dissipation of skimming flow on stepped – channel chutes, IAHR Congress 2001
- [23] Lučić, M., Savić, Lj., Kapor, R., Mladenović, N. (2015), Burno tečenje u horizontalnoj krivini zatvorenog provodnika, 17. Savetovanje SDHI i SDH, Vršac, Srbija

PRESENTATION AND APPLICATION OF RESULTS OBTAINED BY MODERN HYDRAULIC
INVESTIGATIONS IN DESIGNING LARGE DAM SPILLWAYS
(Part 6: SPILLWAYS WITH STEPPED CHUTE – part II)

by

Živodar ERČIĆ
Energoprojekt, Beograd
E-mail: erra@eunet.rs

Summary

The sixth part of the paper discusses methods applied in assessment of energy dissipated in a stepped chute and in definition of dimensions of structures for dissipation of remaining kinetic energy. It gives examples of the use

of steps in outlet structures that are not located on the downstream face of a gravity or embankment dam.

Keywords: stepped chutes, energy dissipation, classical stilling basins

Redigovano 21.11.2015.