

METODOLOGIJA PRORAČUNA SPREGNUTIH DUBINA KOD UMIRUJUĆIH BAZENA NEPRIZMATIČNIH STEPENASTIH BRZOTOKA

Robert LJUBIČIĆ, Budo ZINDOVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Radomir KAPOR, Ljubodrag SAVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

REZIME

Cilj rada je da se na osnovu zakona mehanike fluida, postojećih rezultata modelskih ispitivanja i empirijskih izraza, analizira uticaj neprizmatičnosti stepenastog brzotoka na potrebne dimenzije umirujućih bazena kod gravitacionih betonskih brana. Analizirani su parametri koji utiču na sile od vode na ulasku u umirujući bazen, na osnovu kojih je predložena metodologija za dimenzionisanje umirujućih bazena. Na osnovu merenja na fizičkom hidrauličkom modelu, upoređeni su rezultati proračuna razmatranih metoda i na osnovu njih date preporuke, kako za projektovanje, tako i za buduća istraživanja.

Ključne reči: hidraulika, umirujući bazen, stepenasti brzotok, gravitacione brane

1. UVOD

Razvoj tehnologije valjanog betona u velikoj meri je doprineo povećanom interesovanju za korišćenje stepenastih brzotoka kod betonskih brana. Stepenasti brzotok, kao provodnik vode od akumulacije do nizvodnog korita, nudi mogućnost veće disipacije energije vode od klasičnih (glatkih) brzotoka. Početkom XXI veka su obavljena značajna istraživanja na fizičkim hidrauličkim modelima, kako bi se kvantifikovala količina energije „potrošena“ na stepenastom brzotoku (Boes, Hager 2003a, 2003b, Gonzales, Chanson 2012, Frizzell et al. 2009, i dr). Važno je napomenuti da su ova istraživanja obavljena uglavnom na prizmatičnim brzotocima.

Prizmatični brzotoci, čiji su poprečni preseki identični, često su nepovoljni jer zahtevaju veliku širinu nizvodnog umirujućeg bazena, sa velikim količinama iskopa. Zato se neprizmatični stepenasti brzotok, koji se od širine koja odgovara dužini prelivne ivice sužava u nizvodnom smeru do širine nizvodnog korita, nameće kao pogodno rešenje koje omogućava dobru disipaciju energije uz minimalne investicije. Smanjenje investicija se ne ogleda samo kroz smanjenje količine iskopa, već i kroz manju potrebnu visinu brane, jer se otvara mogućnost povećanja dužine prelivne ivice, a samim tim i smanjenja visine prelivnog mlaza i ukupne visine brane, u odnosu na odgovarajuće rešenje sa prizmatičnim brzotokom.

Kvantitativna ocena disipacije energije na neprizmatičnom stepenastom brzotoku ne predstavlja lak zadatak jer je strujanje u njemu složeno – vrtlozi na stepenastoj konturi brzotoka, pojava kosih stojećih talasa uz razdelne zidove, znatno ovazdušenje mlaza i dr. Istraživanja ukazuju i na to da stepenasti brzotoci u kombinaciji sa USBR III bazenima mogu da zahtevaju veću relativnu dužinu bazena L_s/h_2 od klasičnih zbog drugačijeg vertikalnog rasporeda brzina (Cardoso et al. 2007). U ovom radu istražuje se uticaj neravnomernog rasporeda brzina i protoka na ulazu u umirujući bazen neprizmatičnog brzotoka, na potrebnu nizvodnu spregnutu dubinu.

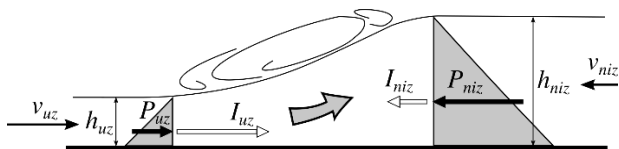
Pošto je merenje dubina u burnom režimu, uzvodno od hidrauličkog skoka, izuzetno teško zbog intenziteta aeracije i fluktuacija nivoa vode, rezultati računskih metoda poređiće se sa merenjima dubine u mirnom režimu, nizvodno od hidrauličkog skoka, čije je merenje jednostavnije i tačnije.

2. METODOLOGIJA

Na osnovu hidrauličkih ispitivanja poznato je da na nizvodnom kraju neprizmatičnih brzotoka dubine i srednje brzine nisu ravnomerno raspoređene po širini preseka. Zbog toga se može dovesti u pitanje upotreba izraza koji se koristi za umirujuće bazene prizmatičnih brzotoka:

$$\frac{h_{niz}}{h_{uz}} = \frac{1}{2} (\sqrt{8Fr_{uz} + 1} - 1), \quad (1)$$

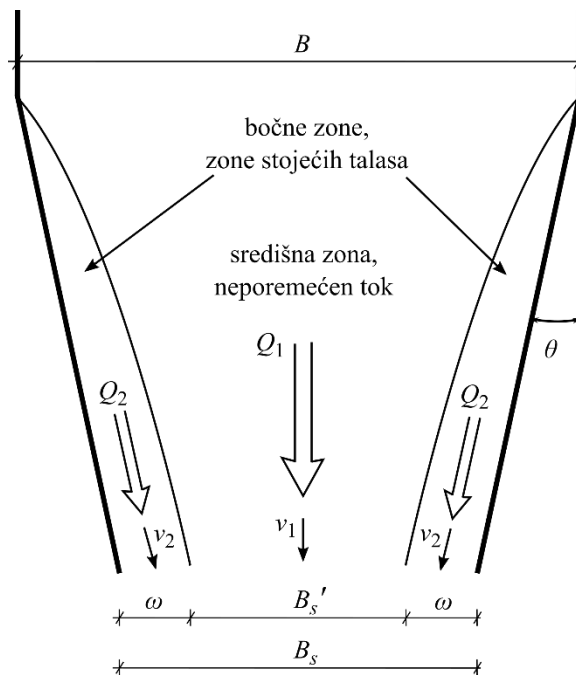
gde su h_{niz} i h_{uz} dubine u umirujućem bazenu neposredno nizvodno i uzvodno od hidrauličkog skoka (slika 1), a Fr_{uz} Frudov broj na ulazu u bazen.



Slika 1. Veličine koje figurišu u dinamičkoj jednačini hidrauličkog skoka

U nastavku će se, polazeći od dinamičke jednačine za masu vode unutar umirujućeg bazena, analizirati uticaj neprizmatičnosti brzotoka na hidrodinamičke sile. Pretpostavlja se da je tok vode na brzotoku klizeći (Savić 2009, Kapor 2015). Posmatra se neprizmatični stepenasti brzotok kao na slici 2. Izdvajaju se 3 zone tečenja:

- središnja zona, za koju će se pretpostaviti da je neporemećena, odnosno da uslovi tečenja u njoj ne zavise od bočnih zona (zona stojećeg talasa). Parametri tečenja za ovu zonu – dubina i brzina – mogu se odrediti nekom od metoda za prizmatične brzotoke (npr. Boes & Hager 2003a, 2003b),
- dve bočne zone – zone kosih stojećih talasa, koje se odlikuju povećanjem dubina uz razdelne zidove, ali i većim brzinama tečenja (Hunt 2008, 2012, Starinac et al. 2013). Ovo poslednje se može objasniti činjenicom da je sa povećanjem dubine smanjena delotvornost stepenaste konture u pogledu disipacije energije. U ovom radu se pretpostavlja da ni u jednom preseku brzotoka ne dolazi do sudaranja dve bočne zone, tj. da u svakom preseku brzotoka postoji središnja zona. Pretpostaviće se i da su bočne zone u poprečnom preseku trapeznog oblika, kao na slici 3.



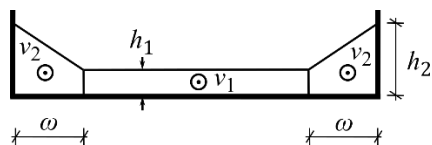
Slika 2. Zone tečenja u osnovi brzotoka

Osnovne veličine, prikazane na slici 2, su:

- θ – ugao suženja (konvergencije) brzotoka u osnovi,
- B – uzvodna širina brzotoka, ujedno i dužina prelivne ivice,
- B_s – nizvodna širina brzotoka, ujedno i širina umirujućeg bazena,
- B_s' – širina središnje zone na nizvodnom kraju brzotoka,
- ω – širina zone kosog stojećeg talasa na nizvodnom kraju brzotoka, odnosno na ulazu u umirujući bazen,
- Q_1, Q_2 – protok „čiste“ vode (vode u kojoj nema mehurova vazduha) u središnjoj zoni na nizvodnom kraju brzotoka, odnosno u zoni kosog talasa na nizvodnom kraju brzotoka,
- v_1, v_2 – srednja profilska brzina „čiste“ vode u središnjoj zoni na nizvodnom kraju brzotoka, odnosno u zoni kosog talasa na nizvodnom kraju brzotoka.

Na slici 3 prikazani su:

- h_1, h_2 – dubina „čiste“ vode u središnjoj zoni na nizvodnom kraju brzotoka, odnosno uz razdelne zidove na nizvodnom kraju brzotoka.



Slika 3. Zone tečenja u preseku na kraju brzotoka

Za najnižvodniji presek brzotoka, na ulazu u umirujući bazen, piše se jednačina kontinuiteta:

$$Q = Q_1 + 2Q_2. \quad (2)$$

Prema slici 2 protok u središnjoj zoni na nizvodnom kraju brzotoka, odnosno na ulazu u umirujući bazen jednak je:

$$Q_1 = B_s h_1 v_1. \quad (3)$$

Protok u bočnim zonama u istom preseku može se izraziti kao:

$$Q_2 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} \omega v_2. \quad (4)$$

Zamenom izraza (3) i (4) u izraz (2), imajući u vidu da je jedinični protok u središnjoj zoni definisan kao $q = Q/B = h_1 v_1$, za širinu zone kosog talasa dobija se:

$$\omega = \frac{q(B - B_s)}{(h_1 + h_2)v_2 - 2q}, \quad (5)$$

dok se brzina v_2 može izraziti kao:

$$v_2 = \frac{q(B - B_s + 2\omega)}{\omega(h_1 + h_2)}. \quad (6)$$

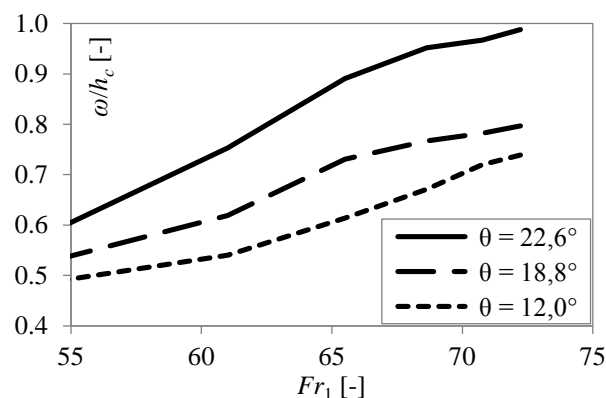
U izrazima (5) i (6) figuriše 5 nepoznatih veličina: dubine h_1 i h_2 , odgovarajuće srednje brzine v_1 i v_2 , i širina zone kosog stojećeg talasa na ulazu u umirujući bazen ω . Za određivanje dubine h_1 i brzine v_1 može se koristiti postupak Boes-a i Hager-a (2003a, 2003b). Nešto veći izazov predstavlja određivanje dubine vode uz razdelne zidove h_2 , usled nedostatka dovoljnog broja istraživanja koji se ovom problematikom bave. Hunt (2012) daje analitičko rešenje za određivanje ove dubine u funkciji geometrije brzotoka, zasnovano na pojednostavljenoj jednačini održanja količine kretanja:

$$\frac{h_2}{h_1} = \sqrt{\frac{\cos(\varphi) + 2Fr_1 [\cos(\varphi)\cos(\psi)\sin(\theta) + \sin(\varphi)\sin(\theta)]^2}{\cos(\psi_2)\cos(\psi) - 0,46\sin(\psi)\text{tg}^{1,37}(\theta)}}, \quad (7)$$

gde je $Fr_1 = v_1^2/(gh)$ Frudov broj za središnju zonu brzotoka. Dubinu dobijenu preko izraza (7) treba uzeti

uz određenu dozu opreza, imajući u vidu da postoje istraživanja koja ukazuju na značajna odstupanja u odnosu na vrednosti dobijene preko izraza (7), pri istoj geometriji brzotoka, a pri različitim visinama stepenika (Wadhai et al. 2015).

Za određivanje širine zone kosog talasa ω , analizirani su rezultati dobijeni na hidrauličkom modelu brane „Buzina“, koji je izrađen u hidrauličkoj laboratoriji Instituta „Jaroslav Černi“ u Beogradu (Starinac et al. 2013). Fizički model brane napravljen je u razmeri 1:40, a ispitane su 3 konfiguracije neprizmatičnog brzotoka – sa uglovima suženja $12,0^\circ$, $18,8^\circ$, $22,6^\circ$, a pri podužnom nagibu brzotoka $H:V = 8:9$ (ugao brzotoka prema horizontali $\varphi = 48,37^\circ$) koji se često sreće kod brzotoka gravitacionih betonskih brana. Rezultati tih merenja su prikazani na slici 4, u zavisnosti od Frudovog broja središnje zone brzotoka.



Slika 4. Dijagram zavisnosti bezdimenzionalne širine zone kosog stojećeg talasa od Frudovog broja središnje zone, brana „Buzina“, $Q = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$, $B = 80 \text{ m}$

Pretpostaviće se da je bezdimenzionalna širina zone kosog talasa funkcija oblika:

$$\frac{\omega}{h_c} = f(\theta, \varphi, Fr_1), \quad (8)$$

gde je h_c kritična dubina na prelivu.

Pošto su merenja obavljena samo pri jednom podužnom nagibu brzotoka φ , trenutno nije moguće definisati uticaj ovog parametra, što bi u budućim istraživanjima trebalo ispitati. Izraz (8) se može aproksimirati empirijskom funkcijom (Ljubičić 2015, Hunt 2012):

$$\frac{\omega}{h_c} = a \operatorname{tg}^b(\theta), \quad (9)$$

gde se koeficijenti a i b mogu dobiti kalibracijom podataka sa slike 4 i iznose:

$$\begin{aligned} a &= -1,201 \times 10^{-4} Fr_1^3 + 2,282 \times 10^{-2} Fr_1^2 \\ &\quad - 1,407 Fr_1 + 29,267 \\ b &= 0,4. \end{aligned} \quad (10)$$

Za kontrolnu zapreminu vode u umirujućem bazenu u kojoj se nalazi hidraulički skok piše se jednačina održanja količine kretanja (slika 1):

$$P_{uz} + I_{uz} = P_{niz} + I_{niz}, \quad (11)$$

gde su P i I sile pritiska, odnosno fiktivne inercijalne sile u presecima neposredno uzvodno i nizvodno od hidrauličkog skoka. Za nizvodni presek je usvojena pretpostavka da je linija nivoa vode u poprečnom preseku horizontalna, pa izrazi za silu pritiska i fiktivnu inercijalnu silu glase:

$$P_{niz} = \rho g \frac{h_{niz}^2}{2} B_s, \quad (12)$$

$$I_{niz} = \rho g v_{niz}^2 h_{niz} B_s. \quad (13)$$

gde su h_{niz} i v_{niz} dubina, odnosno srednja profilska brzina u preseku neposredno nizvodno od hidrauličkog skoka. Daljom analizom je moguće pokazati da je uticaj sila pritiska u uzvodnom preseku bazena kod visokih brana zanemarljiv u odnosu na uticaj fiktivnih inercijalnih sila, koje predstavljaju hidrodinamički uticaj usled velikih brzina strujanja vode. Stoga se sile pritiska u ovom preseku bazena nadalje neće uzimati u razmatranje (detaljnija analiza prikazana u Ljubičić 2015).

Ukupan intenzitet fiktivne inercijalne sile na uzvodnom kraju umirujućeg bazena u središnoj zoni iznosi:

$$I_1 = \rho v_1 Q_1 = \rho v_1^2 h_1 (B_s - 2\omega). \quad (14)$$

Na sličan način, za zonu kosog talasa može se napisati (posmatrano u pravcu ose brzotoka i slapišta):

$$I_2 = \rho v_2 Q_2 \cos(\theta) = \rho v_2^2 \frac{(h_1 + h_2)}{2} \omega \cos(\theta). \quad (15)$$

Jednačina održanja količine kretanja (11) može se sada napisati kao:

$$I_{uz} = I_1 + 2I_2 = P_{niz} + I_{niz}. \quad (16)$$

3. PROVERA TAČNOSTI METODE I NJENA MODIFIKACIJA

Nadalje će se metodologija opisana u prethodnom poglavlju primeniti na tečenje na fizičkom modelu izgrađenom u hidrauličkoj laboratoriji Instituta za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog fakulteta u Beogradu (slika 5). Ovaj model gravitacione betonske brane sa stepenastim brzotokom je konstruisan tako da se pojedine njegove karakteristike mogu menjati kako bi se ispitali različiti fenomeni od značaja za ovaj tip brana. Parametri koji su varirani na modelu, a koji su od značaja za ovaj rad, su:

- Protoci vode, u opsegu $20 \div 60$ L/s, mereni na Tomsonovom prelivu i pomoću ultrazvučne sonde,
- Visina stepenika brzotoka. Ispitane su dve varijante: (a) $s = 4,5$ cm, (b) $s = 9,0$ cm.
- Ugao suženja brzotoka. Ispitane su varijante sa uglovima suženja 5° , 10° i 15° , odnosno sa odgovarajućim širinama umirujućih bazena od 82 cm, 64 cm i 46 cm.

Visina modela, merena od kote krune brane do kote dna umirujućeg bazena iznosila je 0,98 m, dok je dužina prelivne ivice, koja ujedno predstavlja i uzvodnu širinu brzotoka, iznosila 1,00 m. Dužina umirujućeg bazena u okviru eksperimentalne instalacije iznosila je 2,50 m, što se pokazalo kao dovoljno za formiranje hidrauličkog skoka u bazenu pri svim ispitanim varijantama. Kao merodavni rezultati merenja odabrani su oni kod kojih je hidraulički skok nepotopljen, tj. čije formiranje započinje u bazenu i u potpunosti se u njemu formira.

Rezultati merenja i proračuna nizvodne spregnute dubine h_{niz} prikazani su u tabeli 1, i to prema oznakama kolona:

- (1) Izmerene vrednosti na modelu,
- (2) Prema proračunu linije nivoa za neprizmatične brzotoke, korišćenjem energetske i Šezi-Maningove jednačine, sa apsolutnom hrapavošću obračunatom putem izraza (18),
- (3) Prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 2,
- (4) Kao (3), uz korekciju brzine u zonama kosih stojećih talasa putem izraza (20), parametri tečenja u središnjoj zoni izračunati putem postupka koji predlažu Boes i Hager (2003a, 2003b).

Tabela 1. Rezultati proračuna nizvodne spregnute dubine

Manji stepenici, $d = 4,5$ cm					
θ [°]	Q [L/s]	(1) [cm]	(2) [cm]	(3) [cm]	(4) [cm]
5	20	9,00	9,45	9,48	9,72
	40	14,00	15,11	14,98	15,04
	60	18,00	19,82	19,86	19,29
10	20	11,00	10,94	10,29	11,11
	40	17,00	17,54	17,00	17,04
	60	21,00	22,94	23,53	21,76
15	20	13,00	13,43	11,92	13,22
	30	17,00	17,61	16,21	16,88
	40	21,00	21,27	20,56	20,03
Veći stepenici, $d = 9,0$ cm					
θ [°]	Q [L/s]	(1) [cm]	(2) [cm]	(3) [cm]	(4) [cm]
5	20	9,00	8,94	9,68	9,54
	40	14,00	14,53	15,47	14,78
	60	18,00	19,10	20,64	18,97
10	20	10,00	10,51	10,93	10,91
	40	16,00	16,89	18,33	16,75
	60	21,00	22,15	24,46	21,41
15	20	13,00	12,91	13,28	13,00
	30	20,00	20,51	22,06	19,78
	40	25,00	26,68	33,13	24,92

Uočava se da tačnost metodologije prikazane u poglavlju 2 opada sa porastom protoka, ugla suženja i povećanjem visine stepenika. Poređenja radi, u tabeli 1 dati su i rezultati proračuna linije nivoa pod pretpostavkom horizontalnog nivoa u poprečnom preseku i uz korišćenje energetske i Šezi-Maningove jednačine (metoda koja se koristi kod klasičnih, glatkih brzotoka; za detalje proračuna pogledati Kapor 2015), gde je vrednost Maningovog koeficijenta hrapavosti dobijena putem izraza:

$$n = \frac{k^{1/6}}{26}, \quad (17)$$

gde je k apsolutna hrapavost, obračunata putem izraza:

$$k = s \cos(\varphi), \quad (18)$$

a gde φ predstavlja ugao podužnog nagiba brzotoka. Apsolutna hrapavost u ovom slučaju predstavlja visinu

stepenika merenu upravno na ravan brzotoka. Rezultati proračuna nizvodne spregnute dubine dobijene proračunom linije nivoa pokazuju znatno bolje slaganje sa izmerenim vrednostima u poređenju sa metodom prikazanom u poglavlju 2, pri gotovo svim ispitanim varijantama. Međutim, i kod ove metode primetno je preceñivanje nizvodne spregnute dubine, što ukazuje na to da je na brzotoku hidrauličkog modela „potrošena“ veća količina energije vode od one dobijene proračunom linije nivoa. Ovo se delimično može objasniti činjenicom da metoda proračuna linije nivoa nije u stanju da vrednuje uticaj intenzivne aeracije kakva nastaje kod stepenastih brzotoka.



Slika 5. Model preliava sa stepenastim brzotokom

U nastavku će se prikazati modifikacija koja bitno poboljšava tačnost metodologije predložene u okviru poglavlja 2. Naime merenja na hidrauličkom modelu brane „Buzina“ pokazala su da, iako prosečna brzina strujanja vode u zonama bočnih talasa ne može biti proizvoljno veća od prosečne brzine strujanja u središnjoj zoni usled razmene količine kretanja duž njihove zone smicanja, odnos ovih prosečnih brzina nesumnjivo zavisi i od ugla suženja brzotoka. Teorijska maksimalna brzina strujanja koja može da se ostvari na datoj denivelaciji između gornje i donje vode ΔH iznosi:

$$v_{\max} = \sqrt{2g\Delta H}, \quad (19)$$

gde se za vrednost ΔH može usvojiti visina brane od kote krune preliava do kote dna umirujućeg bazena (0,98 m). Shodno merenjima i zapažanjima sa modela brane „Buzina“, predlaže se korekcija prosečne brzine strujanja u zoni kosih stojećih talasa u obliku:

$$v_2 = \chi v_{\max} + (1 - \chi)v_1, \quad (20)$$

gde χ predstavlja težinski koeficijent koji u sebi sadrži uticaj ugla suženja:

$$\chi = \frac{\theta^n}{C}, \quad (21)$$

gde su vrednosti η i C konstante, dok se vrednost ugla θ unosi u stepenima [°]. Prema rezultatima merenja, vrednosti ovih konstanti iznose $\eta = 1$ i $C = 100$. Dodatna ispitivanja imala bi zadatak da pouzdanije definišu oblik izraza (21) i vrednosti koeficijenata u njemu. Kako bi jednačina održanja mase za brzotok bila zadovoljena, za računanje širine zone kosog talasa ω , kao jedine preostale nepoznate veličine, koristi se izraz (5).

Relativna odstupanja računskih vrednosti od onih izmerenih na hidrauličkom modelu prikazana su u tabeli 2, gde oznake kolona predstavljaju različite metode:

- (2) proračun linije nivoa za neprizmatične brzotoke,
- (3) metodologija prikazana u okviru poglavlja 2,
- (4) metoda zasnovana na korekciji brzine u zonama kosih stojećih talasa putem izraza (20).

Prosečna odstupanja rezultata proračuna linije nivoa (2) iznosi 4,8% kod varijante sa manjim stepenicima, odnosno 3,8% kod varijante sa većim stepenicima. Metoda iz poglavlja 2, pokazuje znatno veće rasipanje rezultata, u opsegu od -8% do +32%. Najbolje slaganje sa izmerenim vrednostima pokazuje metoda zasnovana na korekciji prosečne brzine strujanja u zoni kosih stojećih talasa prema izrazu (20), sa prosečnim odstupanjima +2,6% za varijantu sa manjim stepenicima i +3,5 % kod varijante sa većim stepenicima.

4. ZAKLJUČAK

Analiza prikazana u ovom radu pokazala je neke od nedostataka i prednosti postojećih metoda za proračun spregnutih dubina u umirujućem bazenu stepenastih neprizmatičnih brzotoka. Složena strujna slika unutar ovakvih brzotoka stvara teškoće pri proceni neravnornosti brzina, koje zauzvrat definišu intenzitet hidrodinamičke sile vode na ulazu u umirujući bazen.

Metoda proračuna linije nivoa koja je izvedena za klasične brzotoke i koja se oslanja na energetska jednačinu, može se koristiti sa zadovoljavajućom tačnošću za dobijanje preliminarnih procena potrebne

Tabela 2. Relativna odstupanja rezultata računskih metoda od izmerenih vrednosti nizvodne spregnute dubine

Manji stepenici, $d = 4,5$ cm				
θ [°]	Q [L/s]	(2) [%]	(3) [%]	(4) [%]
5	20	4,98	5,33	8,04
	40	7,96	7,00	7,45
	60	10,12	10,33	7,18
10	20	-0,54	-6,45	0,99
	40	3,19	0,00	0,25
	60	9,23	12,05	3,63
15	20	3,28	-8,31	1,67
	30	3,56	-4,65	-0,73
	40	1,29	-2,10	-4,62
Veći stepenici, $d = 9,0$ cm				
θ [°]	Q [L/s]	(2) [cm]	(3) [cm]	(4) [cm]
5	20	-0,63	7,56	5,99
	40	3,80	10,50	5,55
	60	6,13	14,67	5,39
10	20	5,09	9,30	9,09
	40	5,55	14,56	4,70
	60	5,48	16,48	1,93
15	20	-0,66	2,15	-0,02
	30	2,57	10,30	-1,09
	40	6,73	32,52	-0,33

nizvodne dubine, imajući u vidu da tačnost ove metode opada sa povećanjem jediničnog protoka i povećanjem ugla suženja brzotoka.

Metoda zasnovana na korekciji prosečne brzine strujanja u zonama kosih stojećih talasa pokazuje lošije rezultate pri najmanjem uglu suženja od 5° (prosečno odstupanje +6,6%) u odnosu na metodu proračuna linije nivoa, ali daje bolja opšta slaganja za srednji i najveći ugao suženja od 10°, odnosno 15° (prosečno odstupanje +1,3%). Potencijal ove metode ogleda se i u mogućnosti daljeg usavršavanja izraza (21) na osnovu rezultata budućih hidrauličkih modelskih ispitivanja, čime se njena tačnost može značajno unaprediti.

LITERATURA

- [1] Boes, R., Hager, W.H.: Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003., Vol. 129, br. 9, str. 661-670.
- [2] Boes, R., Hager, W.H.: Hydraulic Design of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003., Vol. 129, br. 9, str. 671-679.
- [3] Cardoso, G., Meireles, I., Matos, J.: Pressure head along baffle stilling basins downstream of steeply sloping stepped chutes, *Proceedings 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, 2007.*
- [4] Frizzell, K.W., Kubitschek, J.P., Matos, J.: Stilling Basin Performance for Stepped Spillways of Mild to Steep Slopes – Type III Basins, *33rd IAHR Congress, Canada, 2009.*
- [5] Gonzalez, C.A., Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams, *Dam Engineering*, 2012, Vol. XXVII, br. 4, str. 224-244.
- [6] Hunt, S., Kadavy, K., Abt, S., Temple, D.: Impact of Converging Chute Walls for Roller Compacted Concrete Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, Vol. 134, br. 7, str. 1000-1003.
- [7] Hunt, S., Temple, D., Abt, S., Kadavy, K., Hanson G.: Converging Stepped Spillways: Simplified Momentum Analysis Approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012., Vol. 138, br. 9, str. 796-802.
- [8] Hunt, S., Kadavy, K.: Energy Dissipation on Flat-Sloped Stepped Spillways. 2. Downstream of the Inception Point, *Transactions of the ASABE* 53, br 1, 2010, str. 111-118.
- [9] Wadhai, P.J., Ghare, A.D., Deshpande, N.V., Vasudeo, A.D.: Comparative Analysis for Estimation of the Height of Training Wall of Convergent Stepped Spillway, *International Journal of Engineering & Technology*, 2015., Vol. 4, br. 2, str. 294-303.
- [10] Kapor, R.: *Hidraulika*, Građevinski fakultet, Beograd, 2015.
- [11] Ljubičić, R.: Proračun umirujućeg bazena stepenastog prelivasa primerom na brani „Arilje“, master rad, Građevinski fakultet, Beograd, 2015.
- [12] Savić, Lj.: *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet, Beograd, 2009.
- [13] Savić, Lj., Milovanović, B., Kuzmanović, V., Komatina, D.: *Hidrosoft – softverska podrška za projektovanje hidrotehničkih građevina*, Građevinski fakultet, Beograd, 2010.
- [14] Starinac, D., et al.: *Hidraulička modelska ispitivanja brane Buzina – konačni izveštaj*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2013.

METHODOLOGY FOR SEQUENT DEPTH ESTIMATION FOR CONVERGING STEPPED-CHUTE STILLING BASINS

by

Robert LJUBIČIĆ, Budo ZINDOVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Radomir KAPOR, Ljubodrag SAVIĆ
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

The influence of converging stepped spillways on the dimensions of the stilling basins for RCC dams was examined, based on the results of physical modeling, existing empirical expressions, and basic laws of fluid mechanics and hydraulics. The study includes analysis of parameters that affect the magnitude of the hydrodynamic force which is transferred into the stilling basin, and presents an original design methodology.

Analysis of the measured data and the methods for estimation of the sequent depth in the stilling basin are presented, with recommendations for design purposes and future studies.

Keywords: hydraulics, stilling basin, stepped spillway, gravity dams

Redigovano 08.11.2016.