

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

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

REZIME

U petom delu rada se prikazuju hidrauličke karakteristike preliva sa stepenastim brzotokom. Opisana je osnovna strujna slika u skokovitom i klizećem vodnom režimu i prikazane su empirijske jednačine za određivanje tipa strujanja i proračun odgovarajuće visine stepenica i visine bočnih zidova brzotoka. Postupak za određivanje količine rasute energije u brzotoku, zaštite od kavitacionih oštećenja betona i dimenzija objekta za rasipanje preostale kinetičke energije vodnog toka biće prikazan u sledećem, šestom, delu.

Ključne reci: stepenasti brzotoci, rezimi strujanja vode, ovazduseni vodni tok

1. UVOD

Brzotočni kanali sa stepenastim dnom koriste se više od 3000 godina. Početak primene ovih hidrotehničkih objekata poklapa se sa početkom izrade mačeva, kovanih od metalurškog gvožđa.

Najstariji sačuvani stepenasti brzotok u svetu je brzotok brane Akarnomia (Grčka), izgrađen oko 1300. godine pre nove ere. Nešto mlađe su dve brane na reci Khosr (Irak), izgrađene 694. godine pre nove ere. H. Shanson (2002) navodi duži spisak brana sa stepenastim brzotokom, izgrađenih do 1834. godine, visine od 3,0 m do 50,0 m. Interesantan podatak je da je 1/3 od izgrađenih brana u SAD u 19. veku imala stepenasti brzotok.

Stepenasto nizvodno lice najstarijih brana ovog tipa uglavnom je korišćeno zbog pozitivnog uticaja na stabilnost brane kao i zbog jednostavnije izgradnje

stepenastog oblika u odnosu na nagnuto nizvodno lice. U kasnijem periodu prepoznat je pozitivan uticaj na rasipanje kinetičke energije vodnog toka i smanjenje erozije nizvodnog rečnog dna. Između ostalih, ovu karakteristiku stepenskog brzotoka zapazio je i Leonardo da Vinci i zaključio da, ako se umesto objekta sa slobodno padajućim vodnim tokom, izgradi kanal na principu stepenica „voda ne može više da pada i stvara udar odviše velikom silom“. Zaključak je ilustrovao poznatom skicom stepenastog kanala sa skokovitim vodnim tokom „niz koji voda pada tako da ništa ne oštećuje“.

Prekretnica u shvatanju osnovne uloge stepenastog brzotoka (rasipanje energije vodnog toka) posebno je izražena pri projektovanju brane Gold Creek (1890, Australia) i brane New Sroton (1906, SAD). Brana Gold Creek je prva brana sa betonskim stepenastim brzotokom i smatra se rodonačelnikom savremenih stepenastih brzotoka na branama od valjanog betona. Brzotok brane New Croton je verovatno prvi stepenasti brzotok, specijalno projektovan da maksimizira rasipanje energije (Chanson, 2002).

Međutim, u prvoj polovini 20. veka znatno je opao interes za projektovanje i izgradnju stepenastih brzotoka zbog većeg broja oštećenja pragova na izgrađenim branama i velikog povećanja specifičnog protoka ($m^3/s/m$) koji je trebalo ispuštati iz akumulacija, planiranih za izgradnju na rekama sa velikim vodnim potencijalom. Tako, A. Schoklitsch u svojoj knjizi „Hydraulic Structures“ iz 1937. godine navodi „da kaskade nisu ispunile svoja očekivanja, niti su opravdale visoke troškove izgradnje, kao i da su danas poznata znatno jeftinija sredstva za rasipanje energije“. U isto vreme je učinjen značajan napredak u znanju o rasipanju energije u hidrauličkom skoku (Bakhmeteff, B.A. i Matzbe, A.E; 1936), što je

favorizovalo upotrebu umirujućih bazena tipa „hidraulički skok“, umesto rasipanja energije u stepenastim brzotocima. Poseban uticaj na primenu umirujućih bazena imala je monografija No 25 „Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipations“ (USBR, 1958), koja je omogućavala brzo i pouzdano projektovanje objekata za rasipanje energije, kako za male tako i za velike specifične protoke.

Interes za stepenaste brzotoke obnovljen je 60-ih godina prošlog veka. Razlog je bila potreba da se poveća kapacitet preliva na većini izgrađenih nasutih brana u SAD, što je bilo lako postići izgradnjom dodatnih betonskih ili gabionskih stepenastih brzotoka po nizvodnoj kosini nasute brane. Dodatni podstrek za primenu stepenastih brzotoka dala je procedura izgradnje brana od valjanog beton koje, normalno, imaju stepenasto nizvodno lice.

Karakteristike strujanja u stepenastim brzotocima počele su intenzivno da se ispituju u hidrauličkim laboratorijama pre oko 50 godina, a rezultati ispitivanja publikovani su u velikom broju stručnih radova. Ipak, evidentno je da projektanti još uvek ne raspolažu sa opšte prihvaćenim uputstvima za projektovanje stepenastih brzotoka, tipa pomenute Monografije No. 25.

U našoj zemlji je takođe pokazan interes za primenu stepenastih preliva. Tako, karakteristike stepenastog preliva brane Bogovina ispitivane su u hidrauličkoj laboratoriji instituta „Jaroslav Černi“, a rezultati ispitivanja publikovani su u radovima D. Žugić i dr., (2006) i R. Kapor i dr.,(2012).

Slično prelivima sa glatkim dnom brzotoka i stepenasti prelivi imaju tri različite komponente: manje ili više konvencionalan prelivni prag sa prelaznom deonicom, stepenasti brzotok i objekat za rasipanje preostale energije vodnog toka.

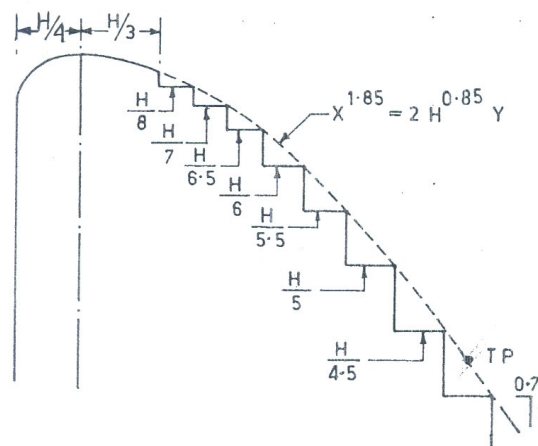
U ovom radu se iznose dosadašnja znanja o karakteristikama svake komponente, sa obimnijim osvrtom na znanja o hidrauličkim karakteristikama stepenastog brzotoka.

2. PRELIVNI PRAG I PRELAZNA DEONICA

Oblik prelivnog praga i prelazne deonice zavisi od nagiba brzotoka i nije isti za stepenaste prelive na betonskim branama (veliki nagib) i onih na nizvodnom

licu nasute brane ili brzotoka površinskih preliva van tela brane (mali nagib).

Kod preliva sa krivolinijskim prelivnim pragom i sa strmim brzotokom, profil prelivnog praga i stepenaste prelazne deonice treba da se poklapa sa standardnim WES ili USBR prelivnim profilom kako bi se iskoristile pozitivne karakteristike ovih profila. Pri tome, standardni profili treba da budu određeni za računsku visinu prelivnog mlaza (H_R), a poželjno je da ona bude manja od realne visine (H). Glatkim prelivnim pragom se obezbeđuje najveći kapacitet preliva za zadato H , a prelaznom deonicom, sa pragovima čija visina raste nizvodno, eliminiše se mogućnost da, pri malim protocima, mlaz vode odskače pri udaru u dno nizvodne stepenice. Način formiranja prelazne deonice, u literaturi često nazivan CEDEX-ovim profilom, prikazan je na slici 2.1 (R.M. Khatsuria, 2005).



Slika 2.1 – Profil prelivnog praga i prilazne deonice

Za stepenaste prelive sa malim nagibom brzotoka obično se koristi široki prelivni prag, a stepenice iste visine počinju neposredno nizvodno od ravne površine prelivnog praga, ukoliko je prag bez ustava. U tom slučaju preporučuje se da uzvodni energetski nivo (H) bude u granicama od 0.05 L do 0.5 L, gde je L – dužina praga u smeru kretanja vode, što stvara uslove da se kritična dubina toka formira na najnižvodnijoj trećini ili četvrtini dužine praga (L). (Frizell i dr., 1991). Na široki prag se mogu postaviti ustave koje se dižu (segmentne, tablaste). U tom slučaju neposredno nizvodno treba predvideti deonicu sa vrlo malim nagibom glatkog dna koja se prelaznom deonicom sa glatkim paraboličnim dnom spaja sa stepenastim brzotokom. Parabolični oblik glatke prelazne deonice treba da je približno jednak putanji slobodno padajućeg

mlaza pri merodavnom protoku ispod delimično otvorene ustave (izdizanje ustave pri kome je najduža putanja mlaza). Ne preporučuju se ustave koje padaju (kapne, vrečaste ustave) bez veštačkog uvođenja vazduha ispod prelivnog mlaza (M. Boes, 2012).

Sem glatkog i ravnog prelivnog praga, moguće je da se, kao uzvodni kontrolni objekat, primeni čunasti preliv standardnog ili PK (Piano Key) tipa. Tehnička i ekonomska prihvatljivost takvog rešenja potvrđena je na primeru dodatnog preliva brane Gloriettes (M. Bieri i dr., 2010).

3. STEPENASTI BRZOTOK

Stepenasti brzotoci su istovremeno i sprovodnici vode od prelivnog praga do bučnice i rasipači kinetičke energije vodnog toka. Zbog rasipanja energije duž stepenastog preliva smanjuju se dimenzije slapišta jer se usled povećane rapavosti i povećanog uvlačenja vazduha, smanjuju brzine vodnog toka u brzotoku. Međutim, povećano uvlačenje vazduha u vodni tok proizvodi naduvavanje toka, što uslovljava veću visinu bočnih zidova u odnosu na brzotoke sa glatkim dnom.

S obzirom na specifični protok ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), stepenasti brzotoci se mogu podeliti na sledeća dva osnovna tipa:

(a) Široke stepenaste brzotoke sa specifičnim protokom do oko $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, bez dodatnog ovazdušenja dna brzotoka.

(b) Uske stepenaste brzotoke sa specifičnim protokom znatno većim od $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ i sa dodatnim ubacivanjem vazduha na dno brzotoka, sa ciljem da se spreče kavitaciona oštećenja betona.

Brzotok tipa (a) je povoljniji ako hidrološki i topografski uslovi dozvoljavaju da specifičan protok preko prelivne krune bude najviše $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Međutim, u praksi je često neophodno da merodavni specifični prihod budu znatno veći, što uslovljava primenu stepenastog brzotoka tipa (b).

U svakom od dva osnovna tipa stepenastog brzotoka mogu da se formiraju sledeća tri znatno različita tipa strujanja vode, u zavisnosti od visine stepenica i protoka:

(1) skokovit tok pri kome vodni mlaz pada sa jedne na drugu stepenicu. Formira se pri malim protocima i visokim stepenicama.

(2) Klizeći tok pri kome vodni mlaz klizi preko nepravog dna, formiranog od nizvodnih ivica stepenica. Javlja se pri većim protocima kao što je projektni protok i pri nižim stepenicama.

(3) Prelazni tok pri kome skokovit tok postepeno prelazi u klizeći. Može se desiti da u ovom režimu voda struji kao skokovit tok na jednom delu brzotoka, dok se na drugom delu brzotoka formira klizeći tok.

Svaki od režima strujanja može se podeliti na više podrežima (Gonzales, S.A. i dr., 2007). U skokovitom režimu mogu se formirati tri podrežima, zavisno da li se, ili ne, formira hidraulički skok na horizontalnom delu stepenice. Klizeći tok se može podeliti na više podrežima u zavisnosti od geometrije, stepenica i strujne slike koja se formira u blizini vertikalnog dela stepenice. I prelazni tok se takođe može da podeli u dva podrežima (Slika 3.1). Međutim, ove podele nisu od praktičnog značaja za projektanta i neće se prikazivati u ovom radu.

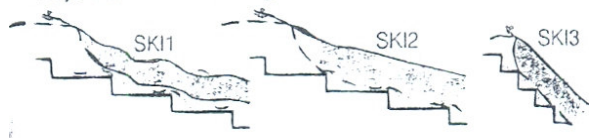
Skokovit skok



Prelazni tok



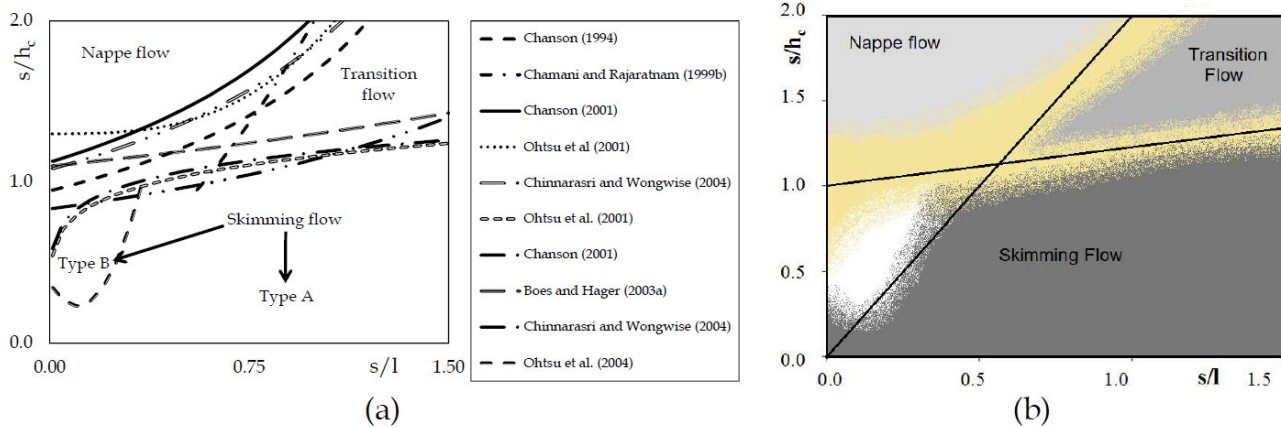
Klizeći tok



Slika 3.1 – Tipovi vodnog toka u stepenastom brzotoku

U istom brzotoku sa poznatom geometrijom (širina brzotoka i visina stepenica) može da se formira i stepenasti i klizeći tok na celoj njegovoj dužini, u zavisnost od protoka.

Prelaz iz jednog toka u drugi istraživan je u mnogim hidrauličkim laboratorijama i izvedene su eksperimentalne zavisnosti koje definišu granice prelaza jednog režima u drugi. Primetna je zapažena nepodudarnost graničnih linija (Slika 3.3).



Slika 3.2 – Kriterijumi za određivanje tipa toka
 (a) – Krive različitih autora, (b) – Prikaz četiri glavne oblasti i graničnog regiona (svetlo braon boja) između glavnih površina (Andrade Simoes i dr., 2012)

S tačke gledišta projektanta stepenastog preliva, najbitnije je da se odrede sledeće karakteristike ovog objekta: optimalna širina brzotoka, visina stepenica, granice različitih režima strujanja vode u zavisnosti od protoka, visina bočnih zidova, preostala kinetičkaenergija vodnog toka koju treba rasuti u bučnici i sigurnost protiv kavitacionih oštećenja betona.

3.1 Optimalna širina brzotoka

Ukoliko nisu predviđeni konvergentni bočni zidovi brzotoka, širina brzotoka je jednaka dužini prelivnog praga. Kod preliva na betonskim branama dužina prelivnog praga uglavnom zavisi od širine nizvodnog rečnog korita u koga treba uvesti vodni tok iz stepenastog brzotoka. Kod površinskih preliva van tela brane, dužinu prelivnog praga uslovljavaju topografske karakteristike rečne doline u pregradnom profilu. Dužina prelivnog praga, određena na ovaj način, i merodavni protok za dimenzionisanje preliva (vrh izlaznog poplavnog talasa), određuju specifični protok ($m^3/s/m$), merodavan za dimenzionisanje stepenastog preliva. Pri merodavnom specifičnom protoku se, skoro po pravilu, formira klizeći vodni tok, dok se druga dva režima formiraju pri znatno manjim protocima. Formiranje samo skokovitog režima moguće je na brzotocima sa malim nagibom, niskim vertikalnim licima i dugačkim horizontalnim delovima stepenica, što je vrlo redak slučaj u praksi.

Ako su predviđeni konvergentni bočni zidovi, specifični protok je promenljiv duž brzotoka, a

maksimalna vrednost je u najužem poprečnom preseku.

Prema dosadašnjim saznanjima, ako je specifični protok veći od $30 m^3/s/m$, neophodno je veštačko ubacivanje vazduha u prostor između horizontalnog i vertikalnog lica stepenice i nestvarnog dna klizećeg mlaza vode, sa ciljem da se spreče kavitaciona oštećenja betona.

3.2 Visina stepenica

Izbor visine stepenica je proces u kome se analiziraju sledeći uticaji na izbor predmetne visine: veličina rizika od kavitacionih oštećenja i rasuta količina kinetičke energije u stepenastom brzotoku. Izbor visine se određuje na osnovu eksperimentalno određenih kriterijuma za oba uticaja.

Kriterijumi izneti u sledećem tekstu važe samo za stepenaste brzotoke sa klizećim režimom strujanja vode. Prema tome, najmanja moguća visina stepenice pri kojoj se formira klizeći tok mora da bude izračunata iz jednačine koja određuje granicu između prelaznog i klizećeg toka. Preporučuje se da visina stepenice, određene na ovaj način, bude povećana za 20%.

Boes (2012) preporučuje da se konačna visina stepenica, za slučaj da nema potrebe za veštačkim ovazdušenjem toka ($q = \leq 30 m^3/s/m$), koriste podaci iz tabele 3.1 pri zadatom nagibu brzotoka i merodavnom specifičnom protoku. Na ovaj način određenje visine stepenica obezbeđuju kritičan kavitacioni broj $\sigma = 0,5$ u

zoni toka uzvodno od tzv. početne tačke u kojoj turbulentni granični sloj izbija na površinu vode.

Za specifične protoke veće od prikazanih u tabeli 3.1, za svaku od navedenih visina stepenice, neophodno je veštačko ubacivanje vazduha ispred nestavnog dna vodnog toka iznad prve stepenice. Ukoliko je specifični protok znatno veći od navedenih za poznatu visinu stepenica i nagib brzotoka, vazduh se mora ubacivati ispod vodnog toka u šupljinu jedne ili više nizvodnih stepenica.

Tabela 3.1 – Specifični protoci q ($m^3/s/m$) pri $\phi=0,5$ u zavisnosti od nagiba brzotoka i visine stepenice (h_s)

q [m^3/s]	slope (V:H)	1:2.5	1:2	1:1.5	1:1	1:0.8	1:0.7
		ϕ [°]	21.8	26.6	33.7	45.0	51.3
h_s [m]	0.3	27	24	20	17	16	16
	0.6	33	29	25	21	19	19
	1.2	41	35	30	25	23	23
	2.4	51	43	36	30	28	27
	3.0	54	46	39	32	30	29

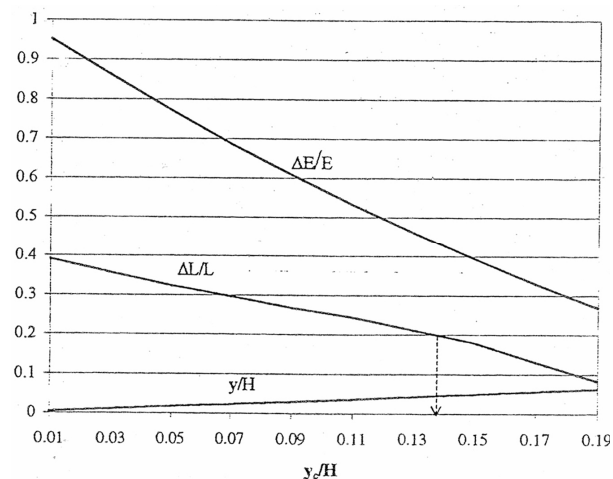
Tatewar i dr. (2000) sugerišu da se visina stepenice odredi iz uslova da dužina slapišta bude minimalna. Na osnovu obimnih proračuna po metodi postepenog približavanja zaključio je da je, za klizeći tok u brzotoku, ekonomski najpovoljnije da se koristi umirujući bazen USBR, tip II i da se najmanja njegova dužina postiže pri visini stepenice (h_s) pri kojoj Frudov broj na dnu brzotoka ima vrednost 5.3. Autori sugerišu sledeće visine stepenica za tri nagiba brzotoka, pri $Fr = 5.3$.

Nagib	Visina stepenice
1:0,6	$Y_s/1.557$
1:0,7	$Y_s/2.622$
1:0,8	$Y_s/4.01$

Takođe preporučuju da upotreba stepenastog brzotoka nema ekonomskog opravdanja ako je odnos Y_c/H manji od 0.125. Na slici 3.2 grafički je prikazana zavisnost između bezdimenzione vrednosti kritične dubine (Y_c) i dubine vode na dnu brzotoka (y), smanjenja dužine slapišta (ΔL) i gubitka energije (ΔE), sve za Frudov broj za rapavost $Fr_h=5.3$.

Korišćene su sledeće oznake: Y_c – kritična dubina za zadati merodavni specifični protok; H – visina brane od krune preliva do dna brzotoka; y – dubina vode u suženom preseku na dnu brzotoka; ΔL – skraćenje slapišta u odnosu na dužinu slapišta (L) za brzotok sa glatkim dnom; $\Delta E = E - E_1$ – gubitak energije na brzotoku; $E = H + 1.5Y_c$; $F_1 = y + V^2/2g$. U tehničkoj

literaturi se ne nailazi na komentare napred iznetih preporuka.



Slika 3.3 – Zavisnost između vrednosti Y_c/H i y/H ; $\Delta L/L$ i $\Delta E/E$

Minor i dr. (2001) preporučuju da se, na brzotocima brana od valjanog betona, visine stepenica prilagode proceduri izgradnje nizvodnog lica ovih brana i da su visine stepenica u granicama od 0.6 m do 1.2 m prihvatljive i sa izvođačke i sa hidrauličke tačke gledišta. Oni zaključuju da su više stepenice povoljnije jer rasipaju više energije i ne preporučuju da visina stepenica bude manja od 0.6 m.

Autor ovog rada smatra da visinu stepenica ne treba po svaku cenu prilagođavati proceduri izgradnje nizvodnog lica brane izvan zone brzotoka. Naime, stepenasto dno i bočni zidovi brzotoka su armirano-betonske konstrukcije koje, remete proceduru izgradnje nizvodnog stepenastog lica od nearmiranog valjanog betona, izvan zone brzotoka, što je, skoro po pravilu, znatno veće polje rada. Prema tome, kada je to tehnološki ostvarivo i ekonomski opravdano, visinu stepenica na brzotocima brana od valjanog betona treba određivati na osnovu maksimalno rasute energije u brzotoku i sigurnosti od kavitacionih oštećenja betona, bez obzira na visinu stepenica na nizvodnom licu brane van zone brzotoka.

Problem zavisnosti visine stepenica od procedure izgradnje ne postoji na brzotocima na nizvodnom licu gravitacionih brana od konvencionalnog betona ili nasutih brana, niti kod površinskih preliva van tela brana.

3.3 Granice promene režima vodnog toka u stepenastom brzotoku

Osobine vodnog toka u stepenastom brzotoku opisane su karakteristikama skokovitog ili klizećeg režima i prelaznog režima između njih. Svaki od ovih režima može da se formira u brzotoku bilo kog nagiba. Sva tri režima su karakteristična po veoma ovazdušenom toku nizvodno od tačke u kojoj turbulentni granični sloj izbija na površinu vodnog toka. Skokovit tok se dešava pri malim protocima i visokim stepenicama, pri čemu voda „skakuće“ sa jedne stepenice na drugu. Pri niskim stepenicama i velikim protocima voda klizi preko nizvodnih krajeva stepenica, pa odatle i naziv „klizeći tok“. Prelazni tok se formira pri međuprotocima i među visinama stepeništa i karakterističan je po jakim hidrodinamičkim fluktuacijama. U prelaznom režimu formiraju se simultano i skokoviti i klizeći tok na različitim delovima brzotoka. Zbog ovih karakteristika prelaznog režima tok bi, pri merodavnom (projektnom) protoku, trebalo da bude ili u skokovitom ili klizećem režimu. S projektantske tačke gledišta, veoma je bitno da se geometrijske karakteristike brzotoka odrede tako da se, pri merodavnom protoku, u brzotoku formira pogodan tok (skokovit ili klizeći) na celoj dužini stepenastog brzotoka.

Određivanjem granica pojave klizećeg i skokovitog toka bavili su se brojni istraživači. Dimenzionisana analiza je pokazala da promena jednog režima u drugi zavisi od bezdimenzionalne vrednosti kritične dubine h_c/h_s i bezdimenzionalne geometrije stepenica h_s/l_s (h_c – kritična dubina; h_s – visina stepenice; l_s – dužina stepenice).

Sledi nekoliko formula za određivanje gornje granice skokovitog toka i donje granice klizećeg toka, od većeg broja objavljenih u tehničkoj literaturi.

(a) Gornja granica skokovitog toka

- Rajaratnam i dr. (1995):

$$h_s/l_s = 0,405(h_s/l_s)^{-0,62} \quad 3.1(a)$$

- Yasuda i dr. (1999):

$$h_c/l_s = [1,4(h_s/l_s)^{0,26}] / 1,4 \quad 3.1(b)$$

- Chanson (2001):

$$h_c/h_s = 0,89 - 0,4 h_s/l_s \quad 3.1(c)$$

(b) Donja granica klizećeg toka

- Chanson (2001):

$$h_c/l_s = 1,2 - 0,325 h_s/l_s \quad 3.1(d)$$

formula važi za $0,05 \leq h_c/l_s \leq 1,7$

- Boes i dr. (2012):

$$h_c/l_s = 0,91 - 0,14 \tan \emptyset \quad 3.1(e)$$

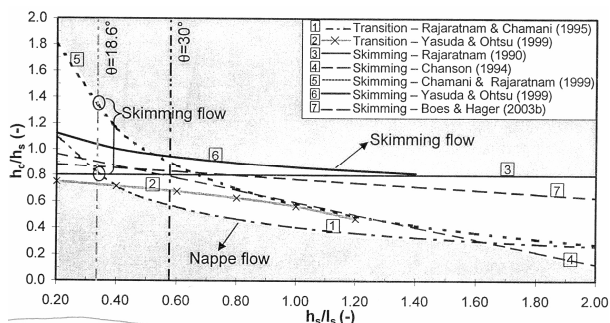
\emptyset – ugao nagiba brzotoka u odnosu na horizontalu

- Yasuda i dr. (1999):

$$h_c/l_s = 0,862 (h_s/l_s)^{-0,165} \quad 3.1(f)$$

Gornje formule su empirijske i mogu se koristiti samo u granicama geometrijskih karakteristika brzotoka za koje su realizovana hidraulička modelska ispitivanja.

Napred prikazane zavisnosti određene su na osnovu vizuelnih osmatranja i u velikoj meri su subjektivne. Ovo može da bude objašnjenje za veliki rastur postojećih empirijskih kriterijuma, što se vidi iz Slike 3.4 (André, 2004).



Slika 3.4 – Upoređenje empirijskih jednačina za početak prelaza jednog režima u drugi

Velike teškoće u određivanju promenljivih koje određuju pojavu jednog ili drugog režima čine da je vrlo teško da se odrede opšte prihvaćeni kriterijumi za definisanje granica režima toka kombinacijom geometrijskih i hidrauličkih parametara. Određivanje standarda za eksperimentalnu proceduru i preispitivanje sadašnjeg metodološkog prilaza problemu, trebalo bi da bude prvi zadatak istraživača predmetnog fenomena.

Danas poznate formule za određivanje granice prelaza iz jednog režima u drugi mogu se koristiti samo u ranim fazama projektovanja. Za glavni projekat neophodno je da se geometrijske karakteristike stepenastog preliva, na osnovu kojih je određen željeni

režim strujanja vode, provere na hidrauličkom modelu. Poželjno je da se ispitivanja izvrše na modelu sa odnosom dužina u prirodi i na modelu $L_p/L_m \leq 10$.

3.4. Visina bočnih zidova

Vodni tok u stepenastim brzotocima uvlači atmosferski vazduh nizvodno od kritične tačke na sličan način kao vodni tok u brzotocima sa glatkim dnom. Ovazdušeni tok ima povećanu dubinu mešavine voda – vazduh koja je merodavna za određivanje visine bočnih zidova. Dubina mešavine zavisi od koncentracije vazduha i povećava se sa koncentracijom. Tako, dubina mešavine (h_{95}) sa koncentracijom 0.95 veća je za 12% od dubine mešavine (h_{90}) sa koncentracijom 0.90, dok je odnos $h_{99}/h_{90} \approx 1.4$ (Boes i dr., 2003). U ovom radu Boes preporučuje sledeću formulu za određivanje visine bočnih zidova

$$h_z = \eta h_{90} \quad 3.2$$

gde je η – koeficijent sigurnosti ($\eta = 1,2$ za brzotoke na betonskim branama; $\eta = 1,5$ za brzotoke na nizvodnom licu nasute brane ili na terenu podložnom eroziji).

Koeficijentom sigurnosti se pokriva relativno veća visina zida na prototipu u odnosu na visinu definisanu modelom, zbog veće visine raspršene vode (sprej) nastale usled većeg stepena turbulencije u prirodi u odnosu na model. Formula važi samo za klizeći režim bez aeratora.

3.4.1 Visina bočnih zidova u skokovitom režimu

U skokovitom režimu, padajući mlaz odskoče usled udara o površinu vode i dno nizvodne stepenice, a raspršeni mlaz može da prelije bočne zidove sa visinama, određenim na osnovu dubine vode h_{90} . U tom slučaju Boes (2003) preporučuje da se na prvoj deonici nizvodno od krune prelivnog praga, visina bočnih zidova odredi iz uslova $h_B = 4h_s$ na dužini od $l = 25 h_s$ mereno od krune preliva.

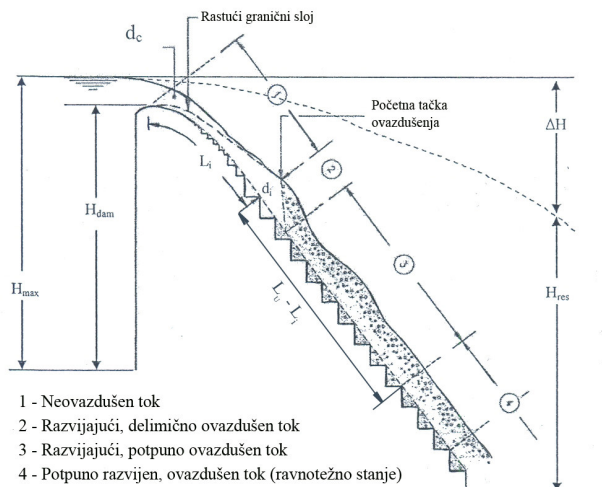
U klizećem režimu, visine bočnih zidova određuju se na osnovu karakteristika toka, ovazdušenog samo kroz gornju površinu vode ili dodatno ovazdušenog i veštačkim ubacivanjem vazduha ispod donje površine vodnog toka.

3.4.2 Visina bočnih zidova u klizećem režimu

U stepenastim brzotocima sa klizećim režimom, vodni tok je veoma turbulentan. Prirodno ovazdušenje toka

počinje od tačke u kojoj turbulentni granični sloj izbija na površinu (početna tačka ovazdušenja). Ova tačka udaljena je od krune preliva za dužinu L_i merenu duž brzotoka.

Nizvodno od početne tačke formira se delimično ovazdušen tok a dubina mešavine vode i vazduha se nizvodno postepeno povećava. Sledi region razvijajućeg potpuno ovazdušenog toka a, ako je dužine brzotoka veća od vrednosti L_{01} , počinje region potpuno razvijenog ovazdušenog toka (Slika 3.5).



Slika 3.5 – 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 između neovazdušenog toka, razvijajućeg (nejednolikog) delimično ili potpuno ovazdušenog toka i potpuno razvijenog (jednolikog) ovazdušenog toka, kao i hidrauličke karakteristike vodnog toka u ovim regionima bitni su elementi koje treba odrediti u procesu definisanja visine bočnih zidova brzotoka.

Uzvodno od donje granice neovazdušenog toka, visina bočnih zidova se određuje na osnovu dubine čiste vode i visine raspršenog vodnog mlaza. Donju granicu neovazdušenog toka određuje udaljenost početne tačke ovazdušenja (L_i) od prelivne krune.

Nizvodno od početne tačke ovazdušenja, dubina vode se određuje na osnovu dubine mešavine voda-vazduh (h_{90}) pri kojoj je ukupna koncentracija vazduha 90%. U regionu razvijajućeg vodnog toka, dubina h_{90} se nizvodno povećava sve do granice između razvijajućeg i potpuno razvijenog ovazdušenog toka. Ova granica je

udaljena od krune preliva za dužinu L_u . Nizvodno od ove dužine, dubina h_{0j} je konstantna.

Iz napred iznetog, proizilazi da je neophodno da se, u procesu projektovanja stepenastog brzotoka, odrede granice L_i i L_u i koncentracija vazduha u vodnom toku nizvodno od početne tačke ovazdušenja.

Karakteristike toka u početnoj tački ovazdušenja

U ovoj tački, normalne turbulentne brzine blizu površine toka, su dovoljno velike da izbace mlazeve vode u vazduh. Tokom pada zbog gravitacije, uvlače sa sobom vazduh u vodni tok. Ako je normalna/turbulentna brzina veća od površinskih napona i brzine izronjavanja mehura vazduha, vazduh će biti zadržan u vodnom toku i transportovan nizvodno velikom brzinom.

Položaj počente tačke ovazdušenja se određuje subjektivnim vizuelnim osmatranjem kako na hidrauličkom modelu, tako i u prirodi, što uvodi subjektivizam u ovu vrstu istraživanja. Naime, smatra se da se početna tačka ovazdušenja nalazi u poprečnom preseku brzotoka u kome voda postaje intenzivno bela. Subjektivizam u određivanju profila „u kome voda postaje intenzivno bela“ u celom poprečnom preseku je razlog neslaganju kriterijuma, preporučenih od raznih autora.

Postoji veći broj empirijskih zakonitosti za određivanje karakteristika toka u profilu u kome turbulentni granični sloj izbija na površinu kao što su: udaljenost početkne tačke ovazdušenja od krune preliva (L_i), dubina mešavine vode i vazduha ($Z_{m,i}$), dubina čiste vode ($Z_{w,i}$) i prosečna koncentracija vazduha. Neke od ovih zakonitosti su prikazane u sledećem tekstu, a uglavnom su vezane za sledeće definicije Frudovog broja

$$F_* = q_w / \sqrt{g \cdot k_s^3 \cdot \sin \theta} \quad 3.3(a)$$

gde je $k_s = h_s \cos \theta$

$$F_i = q_w / \sqrt{g(h_s / l_s) k_s^3} \quad 3.3(b)$$

$$F_s = q_w / \sqrt{g \cdot h_s^3 \cdot \sin \theta} \quad 3.3(c)$$

Chanson (1995)

Kanal sa prelivnim pragom $25^\circ < \theta < 75^\circ$

$$\frac{L_i}{k_s} = 9,719(\sin \theta)^{0,0796} F_*^{0,713} \quad 3.4(a)$$

$$\frac{Z_{m,i}}{k_s} = \frac{0,40034}{(\sin \theta)^{0,04}} F_*^{0,592} \quad 3.4(b)$$

Chamani (2000)

Zaobljena kruna preliva $50^\circ < \theta < 60^\circ$

$$\frac{L_i}{k_s} = 8,29 F_i^{0,85} \quad 3.4(c)$$

Matos (2000)

Kanal sa prelivnim pragom $\theta = 53^\circ$

$$\frac{L_i}{k_s} = 6,289 F_*^{0,734} \quad 3.4(e)$$

$$\frac{Z_{w,i}}{k_s} = 0,361 F_*^{0,606} \quad 3.4(f)$$

$$C_i = 0,163 F_*^{0,154} \quad 3.4(g)$$

Boes & Hager (2003)

Testovi su realizovani u kanalu sa ustavama ali formule važe i za brzotoke sa prelivnim pragom $26^\circ < \theta < 55^\circ$

$$\frac{L_i}{k_s} = \frac{5,90(\sin \theta)^{1/5}}{\sin \theta} F_*^{4/5} \quad 3.4(h)$$

$$\frac{Z_{m,i}}{h_s} = 0,40 F_s^{0,60} \quad 3.4(i)$$

$$C_i = 1,2 \cdot 10^{-3} (240 - \theta) \quad 3.4(j)$$

Hunt, S.L., & Kadavy, K.C. (2009)

$$L_i = 6,10(\sin \theta)^{0,08} (F_*)^{0,86} k_s \quad 3.4(k)$$

Boes, R.M., & Minor H-E (2000),

$$\frac{L_i}{k_s} = 9,72 F_*^{0,86} \quad 3.4(l)$$

Navedene formule pokazuju da visina stepenice i nagib brzotoka imaju mali uticaj na početak ovazdušenja toka, dok je specifični protok (ili dubina toka) dominantan parametar.

Granica između razvijajućeg (nejednolikog) i potpuno razvijenog (jednolikog) ovazdušenog toka

Ova granica određena je rastojanjem (L_u), merenim od krune preliva. Za određivanje ovog parametra raspoloživ je veći broj empirijskih formula od kojih se navode formule sledećih autora:

Christodoulou G. (1999) preporučuje zavisnost

$$\frac{L_u}{k_s} = \frac{8,60q_w^{0,713}}{k_s^{0,0695}(\sin \theta)^{0,277}} \quad 3.5(a)$$

gde je $k_s = h_s \cos \theta$

Boes & Minor (2000) su zaključili da početak jednolikog ovazdušenog toka zavisi od kritične dubine i nagiba brzotoka i izvode sledeće zavisnosti:

$$\frac{L_u}{h_c} = \frac{15}{\sin \theta} \quad \text{za } \theta = 30^\circ$$

$$\frac{L_u}{h_c} = \frac{35}{\sin \theta} \quad \text{za } \theta = 50^\circ \quad 3.5(b)$$

Ove dve formule su aproksimativne jer, za isti brzotok, položaji granice mogu da se razlikuju za

$$\Delta L_u = (1.3 \text{ do } 1.8) \cdot [h_c^{0,356} / (\sin \theta)^{0,723}]$$

Kasnije, Boes & Heger (2003) kombinuju prethodne dve jednačine i formiraju sledeću zavisnost dužine L_u od specifičnog protoka, (odnosno kritične dubine h_c), visine brane H_d i nagiba vodotoka (θ) i utvrđuju da jednolik ovazdušeni tok počinje u profilu u kome je postignut sledeći odnos pri $30^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$

$$H_d / h_c \approx 24 (\sin \theta)^{2/3} \quad 3.5(c)$$

Kasnije, isti autori pojednostavljaju gornju formulu u odnos:

$$H_d / h_c \geq 15 \text{ do } 20 \quad 3.5(d)$$

Međutim, isti autori u istom radu (Boes & Heger, 2003) navode i sledeću formulu za određivanje vrednosti (L_u):

$$L_u / h_c = 25,52 \cdot [1 - 0,55(\sin \theta)^{-1/2}] \cdot (\sin \theta)^{-1/3} \quad 3.5(e)$$

Bung (2011) preporučuje da u profilu u kome počinje jednoliki tok bude postignut sledeći odnos pri $18,4^\circ \leq \theta \leq 26,6^\circ$.

$$H_d / h_c = 20,5 (\sin \theta)^{1/2} \\ \text{za } 1,3 \leq h_c / h_s \leq 3,6 \quad 3.5(f)$$

Ovaj autor takođe navodi i sledeće približne odnose:

$$L_u \approx 2L_i \text{ za velike Frudove brojeve } F_s \\ L_u \approx 3L_i \text{ za male Frudove brojeve } F_s$$

Gonzales & Chanson (2007) utvrdili su da će se u brzotoku formirati jednoliki ovazdušeni tok ukoliko celokupna dužina (L) i nagib (θ) brzotoka zadovoljavaju sledeći odnos:

$$d_c / h_s < 1 / [0,1193 \cos \theta \cdot \sin \theta^{0,295} (L/h_s \cdot \cos \theta^{0,935})] \quad 3.5(g)$$

Procedura određivanja visine bočnih zidova zavisi od dužine brzotoka i parametara kojima se određuje profil u kome počinje jednoliki ovazdušeni vodni tok (region 4 na slici 3.5). Naime, ako je dužina brzotoka manja od udaljenosti profila u kome počinje jednoliki ovazdušeni tok (obe dužine merene od vrha prelivnog praga, duž nestvarnog dna brzotoka), dubina ovazdušenog toka, merodavna za određivanje visine bočnog zida, određuje se po proceduri za određivanje dubina vode u nejednolikom ovazdušenom vodnom toku. Ukoliko je dužina brzotoka veća od udaljenosti predmetnog profila, merodavna dubina ovazdušenog toka se određuje po proceduri koja važi za strujanje jednolikog ovazdušenog vodnog toka.

U prvom slučaju, merodavna dužina je promenljiva na celoj dužini nejednolikog toka (region 3), dok je u drugom slučaju merodavna dubina nepromenljive na celoj dužini jednolikog toka (region 4).

Uobičajena praksa u projektovanju stepenastih brzotoka je da se visina bočnih zidova određuje na osnovu dubine vode h_{90} sa koncentracijom vazduha 90%.

U praksi, merodavna dubina ovazdušenog toka h_{90} još uvek se određuje na osnovu empirijskih i poluempirijskih formula kako za jednoliki, tako i za nejednoliki ovazdušeni tok. U tehničkoj literaturi se najčešće navode sledeće zavisnosti:

(a) Hager & Boes (2000)

Nejednoliko ovazdušeno strujanje

$$\frac{h_{90}(x)}{h_{90}(u)} = tgh \left[1,1 \frac{h_{90}(u) \sin \theta}{h_c^3} (x - L_i) \right] \quad 3.6(a)$$

$$\frac{h_{90}(u)}{h_s} = 0,5 (F_h^*)^{0,1tg\theta+0,5} \quad 3.6(b)$$

$$F_h^* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta \cdot h_s^3}}$$

(b) Chanson (1994)

Nejednoliko ovazdušeno strujanje

$$h_{90} = h_c \sqrt[3]{\frac{f_e}{8(1 - C_e)^3 \sin \theta}} \quad 3.6(c)$$

gde je:

- Koncentracija vazduha $C_e = 0,9 \cdot \sin \theta$ za $\theta \leq 50^\circ$
- Darsijev faktor trenja

$$\frac{1}{\sqrt{f_e}} = 1,42 \ln \left(\frac{D_h}{h_s} \right) - 1,25$$

- srednja hidraulička dubina $D_h = \frac{4A}{P}$;
- A – proticajna površina, P – okvašeni obim.

(e) Boes & Miner (2000)

Predloženom formulom se definišu merodavne dubine h_{90} duž nejdenolikog, ovazdušenog regiona. Ukoliko na dužini brzotoka ne može da se formira jednoliko strujanje (region 4), merodavna dubina h_{90} je u krajnjem nizvodnom profilu stepenastog brzotoka.

$$h_{90} = 0,55 \left(\frac{q_w^2 \cdot h_s}{g \sin \theta} \right)^{0,25} \cdot tgh \left[\frac{\sqrt{g h_s \sin \theta}}{3q_w} \cdot (x - L_i) \right] + 0,42 \left[\frac{q_w^{10} h_s^3}{(g \sin \theta)^5} \right]^{1/18} \quad 3.6(d)$$

U gornjoj jednačini je:

$$L_i = 9,72 k_s \cdot F_*^{0,86}$$

$$k_s = h_s \cos \theta$$

x – rastojanje profila od vrha prelivne krune mereno duž nestvarnog dna brzotoka

(d) Boes & Hager (2003)

Jednoliki ovazdušeni tok; $26^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$

$$\frac{h_{90}}{h_s} = 0,5 F_s^{(0,1tg\theta+0,5)} \quad 3.6(e)$$

$$F_s = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \theta \cdot h_s^3}}$$

(e) Bung (2011)

Tačka na nepravom dnu stepenastog brzotoka u kojoj se određuje dubina h_{90} definisana je visinskom razlikom između visinskog položaja tačke i krune prelivnog praga (H_d). Na isti način definisana je i tačka u kojoj počinje jednoliko ovazdušeno strujanje. Oznaka za ovu visinsku razliku je H_u koja se određuje izradom

$$\frac{H_u}{h_c} = 20,5 \sqrt{\sin \theta}$$

$$\text{za } 1,3 \leq h_c / h_s \leq 3,6$$

Bung je predložio sledeću empirijsku zavisnost za određivanje dubine h_{90} duž brzotoka

$$\frac{h_{90}}{h_s} = 0,4691 F_s^{0,509} \cdot (H'_d)^{0,1018} \quad 3.6(f)$$

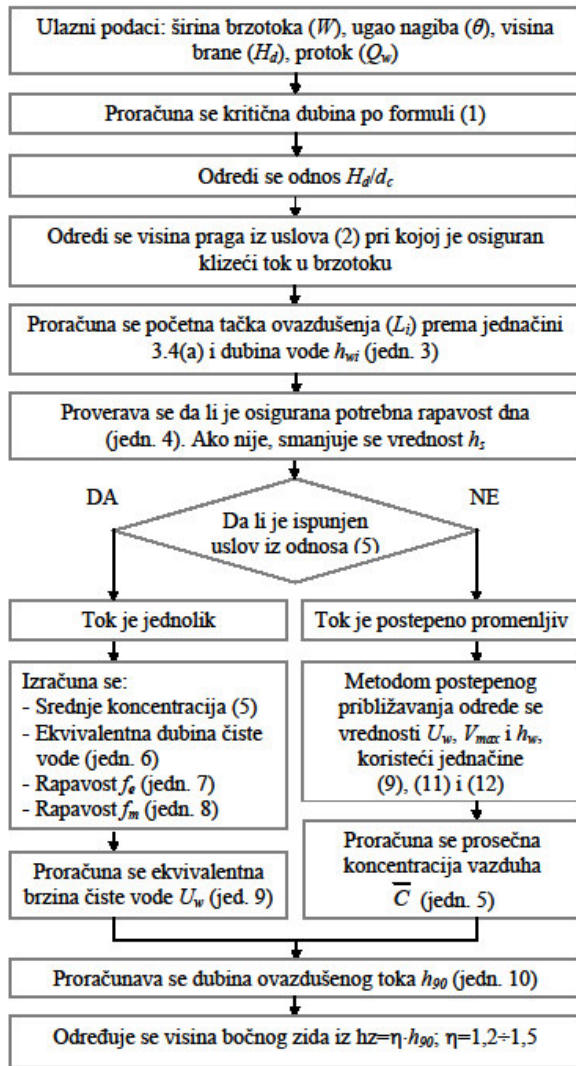
za $2,7 \leq F_s \leq 13$

U gornjoj jednačini je:

$$H'_d = \frac{H_d}{H_u} = \begin{cases} 0, \dots, 1 & \text{za } H_d \leq H_u \\ 1, \dots, \dots & \text{za } H_d > H_u \end{cases}$$

(f) Gonzales & Chanson (2007)

Autori predlažu sledeći dijagram toka za određivanje visine bočnih zidova (Slika 3.6) na stepenastom brzotoku sa nagibom dna $15^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$. Sličan dijagram toka se može izraditi i za brzotoke sa strmijim dnom uz korišćenje odgovarajućih empirijskih zavisnosti.



Slika 3.6 – Procedura za određivanje visine bočnih zidova stepenastog brzotoka

U proceduri proračuna visine bočnog zida koja je prikazana na slici 3.6 korišćene su sledeće empirijske zavisnosti;

- kritična dubina $h_c = \sqrt[3]{q^2 / g}$ (1)
- uslov za klizeći tok $h_c/h_s > 1,2 - 0,325 \operatorname{tg} \theta$ (2)
- rastojanje početne tačke ovazdušenja od krune brane (L_i) (3.4a)
- dubina vode u početnoj tački

$$\frac{h_{wi}}{h_s \cos \theta} = \frac{0,4034}{(\sin \theta)^{0,04}} (F_*)^{0,592} \quad (3)$$

- maksimalna visina stepenice (osiguranje najveće rapavosti)

$$h_s < 15 h_c \cos \theta \quad (4)$$

- zavisnost koja deli vodni tok u brzotoku na nejednoliki (region 3) i jednoliki (region 4)(3.5g)
- srednja koncentracija vazduha

$$\bar{C} = D - 0,3e^{\left[-5\left(\frac{h_s}{h_c}\right)^2 - 4\left(\frac{h_s}{h_c}\right)\right]} \quad (5)$$

$$D = 0,3 \text{ za } 5,7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$$

$$D = -0,00024 \theta^2 + 0,0214\theta - 0,0357 \quad \text{za } \theta \geq 19^\circ$$

- dubina čiste vode (karakteristična dubina vode)

$$h_w = h_c \sqrt[3]{\frac{f_e}{8 \sin \theta}} \quad (6)$$

- Darsijev faktor trenja za ovazdušeni tok

$$\frac{f_e}{f_m} = 0,5 \left\{ 1 + \operatorname{tgh} \left[2,5 \frac{0,5 - \bar{C}}{\bar{C}(1 - \bar{C})} \right] \right\} \quad (7)$$

- eksperimentalni faktor trenja za $\theta = 16^\circ$ i $h_s = 0,1$ m

$$\frac{1}{\sqrt{f_m}} = 2,43 - 0,2676 \ln \left[\frac{h_s \cos \theta}{D_h} \right] \quad (8)$$

- ekvivalentna brzina čiste vode

$$U_w = q_w / h_w \quad (9)$$

- ekvivalentna dubina čiste vode

$$h_w = (1 - \bar{C}) h_{90} \quad (10)$$

$$\frac{U_w}{V_{\max}} = 0,00107 \left(\frac{H_{\max}}{h_c} \right)^2 - 0,0634 \left(\frac{H_{\max}}{h_c} \right) + 1,202 \quad (11)$$

H_{\max} – ukupna raspoloživa energetska visina
 V_{\max} – brzina idealnog fluida na dnu brzotoka

$$V_{\max} = \sqrt{2g(H_{\max} - h_w \cos \theta)} \quad (12)$$

U_w – karakteristične brzine u dnu brzotoka

U jednačini (11) U_w je nepoznata promenljiva, H_{\max} i h_c su poznate vrednosti, a V_{\max} se izračuna po jednačini (12). Međutim, jednačina (11) važi samo za odnos $7 < H_{\max}/h_c < 20$. Ako je $H_{\max}/h_c > 20$ brzina U_w se računa po jednačini (9), a h_w po jednačini (6).

Iz poznatog odnosa U_w/V_{\max} proračunavaju se brzine U_w i dubine h_w u dnu brzotoka metodom postepenog približavanja. Pretpostavlja se da je $V_{\max} = \sqrt{2gH_{\max}}$ izračuna U_w po jednačini (11), a h_w po jednačini (9). Sa ovom vrednošću izračuna se V_{\max} po jednačini (12) i ponovo proračunavaju vrednosti U_w i h_w . Proces se ponavlja sve dok vrednosti U_w i h_w ne počnu da konvergiraju.

3.5 Uticaj konvergentnih bočnih zidova

Konvergencija bočnih zidova povećava dubinu vodnog toka u blizini zidova kako kod brzotoka sa glatkim tako i kod brzotoka sa stepenastim dnom. Međutim, modelska ispitivanja pokazuju da se kod stepenastih brzotoka može postići veća konvergencija zidova ili manja njihova visina u odnosu na brzotoke sa glatkim dnom pri istim ulaznim parametrima (USBR, 2006). U istom radu se zaključuje da se dubina vode uz zidove povećava sa povećanjem ugla konvergencije ali da na ispitivanim modelima nije primećena pojava dijagonalnih poprečnih talasa pri bilo kom ispitivanom uglu konvergencije.

Hunt i dr. (2008) su ispitivali uticaj konvergencije zidova na dubinu vode u blizini zidova nastalu usled udara burnog toka u konvergentni zid. Na modelu stepenastog brzotoka razmere 1:22 zaključili su da se dubina vode uz zidove povećava sa povećanjem ugla konvergencije. Tako, dubina vode uz konvergentni zid pri uglu konvergencije od 52° veća je 2,5 puta od predmetne dubine pri uglu konvergencije od 15° . Autori preporučuju da se visina konvergentnih bočnih zidova odredi na osnovu sledećih dubina vode u blizini zidova:

Konvergentni ugao	15°	30°	52°
Dubina vode	1,0 h_c	1,75 h_c	3,0 h_c

U gornjoj tabeli je h_c – kritična dubina vodnog toka. Međutim, pri formiranju ovih odnosa nije uzeto u obzir

ovazdušenje vodnog toka zbog neodgovarajuće razmere modela pa se gornja preporuka može koristiti samo u neovazdušenom ili malo ovazdušenom delu stepenastog brzotoka. Ako je ovazdušenje toka značajnije, visina bočnih zidova se mora značajno povećati.

U jednom kasnijem radu (Hunt i dr. 2012) autori preporučuju sledeću empirijsku zavisnost za određivanje dubine vode uz konvergentne zidove stepenastog preliva.

$$\frac{d_w}{d} = \sqrt{\frac{\cos \theta + 2F[\cos \theta \cdot \cos \psi \cdot \sin \phi + \sin \theta \cdot \sin \phi]^2}{\cos(\psi_2) \cos \psi - 0,46 \sin(\psi) \operatorname{tg}^{1,37}(\phi)}} \quad (3.7)$$

U gornjoj jednačini su korišćeni sledeći simboli:

d - dubina toka, upravna na nestvarno dno brzotoka duž centralne linije (zona koja nije pod uticajem talasa nastalih usled udara vodnog toka u konvergentne bočne zidove)

d_w - dubina vode uz zid merena uzajamno upravno na vektor brzine bočnog zida i lokalne površine vode (mereno duž jediničnog vektora koji leži u ravni konvergentnog zida i upravno je na vektor brzine duž zida)

θ - ugao nagiba nestvarnog dna stepenastog brzotoka

ψ - ugao konvergencije ($\psi \neq 0$ za bočne zidove paralelne sa vodnim tokom)

$$\psi = \operatorname{tg}^{-1}[\sin(\phi) \cdot \operatorname{tg}(\theta)]$$

$$\psi_2 = \operatorname{tg}^{-1}[\cos(\theta) \cdot \operatorname{tg}(\theta)]$$

Međutim, pri primeni jednačine 3.7 treba uzeti u obzir pretpostavke koje su učinjene u procesu njenog uspostavljanja. Naime, ni ova jednačina ne uzima u obzir uticaj ovazdušenja vodnog toka na dubinu vode uz konvergentni zid. Autori zaključuju da se ovaj uticaj mora uzeti u obzir na delu stepenastog brzotoka na kome je ovazdušenje toka značajno ali ne daju nikakve preporuke u vezi sa ovim problemom.

U serijalu članaka istog autora o problemima istraživanja hidrauličkih fenomena i pouzdanosti preliva visokih brana, publikovanih u časopisu Vodoprivreda, do sada su obrađivani sledeći hidraulički fenomeni i procesi, kao i načini njihove adekvatne obrade pri planiranju visokih brana. U prvom radu serijala (Erčić, 2005) analizirani su neki od hidrauličkih problema koji se susreću pri projektovanju preliva visokih brana (kavitacija i kavitaciona erozija, ovazdušenje vodnog toka, erozija rečnog dna nizvodno

od brane). Drugi rad (Erčić, 2007) obrađuje objekte za rasipanje energije, posebno bučnice sa klasičnim i prinudnim hidrauličkim skokom. U sledećem radu (Erčić, 2009) razmatraju se bučnice sa prinudnim hidrauličkim skokom formiranim pomoću blokova ili pragova ili kombinacijom ova dva osnovna elementa. U narednom radu (Erčić, 2011) analiziran je uticaj hidrodinamičkih sila na dimenzije donje ploče bučnice. Veoma važni aspekti pouzdanosti nekih specifičnih tipova preliva brana obrađuju i drugi autori. U radu (Kapor, 2009) razmatra se analiza propusne sposobnosti dvostrukog bočnog preliva. Specifična dispozicija stepenastog preliva sa odbojnom gredom razmatra se u radu (Savić, 2011), dok se konstrukcijski aspekti pouzdanosti takvog projektnog rešenja razmatraju u radi (Kuzmanović, 2011).

Veoma važna problematika hidrauličke pouzdanosti preliva nije ovim zaokružena, tako da će se proveriti količine kinetičke energije, rasute u stepenastom brzotoku, zaštiti betona od kavitacionih oštećenja i dimenzijama objekata za rasipanje preostale kinetičke energije vodnog toka, razmatrati u sledećem, šestom, delu serijala istog autora.

4. ZAKLJUČAK

Stepenasti brzotoci su istovremeno i sprovodnici vode od prelivnog praga do bučnice i rasipači kinetičke energije vodnog toka što ih čini ekonomski veoma atraktivnim evakuacionim objektima.

Vodni tok u stepenastom brzotoku može da bude u skokovitom ili klizećem režimu i u prelaznom režimu između njih, zavisno od protoka i visine stepenice. Preporučuje se da visine stepenica budu određene iz uslova da se u brzotoku formira klizeći tok pri maksimalnom protoku. Moguće je i formiranje skokovitog toka i pri maksimalnim protocima kada je nagib brzotoka dovoljno mali, a horizontalni deo stepenice znatno duži od visine stepenice.

Rasipanje kinetičke energije je veće u brzotocima sa skokovitim režimom.

Specifičan protok, merodavan za dimenzionisanje stepenastog brzotoka nije ograničen, ali je za specifične protoke od oko 30 m³/s/m i veće, neophodno veštačko uvođenje vazduha u donje slojeve vodnog toka, kako bi se sprečilo kavitaciono oštećenje betona.

I ovaj evakuacioni objekat ima tri komponente: prelivni prag, stepenasti brzotok i objekat za rasipanje preostale kinetičke energije vodnog toka.

Uobičajeno je da prelici sa stepenastim brzotokom u sklopu betonskih gravitacionih brana kao i preliva van tela brana, imaju glatki prelivni prag sa stepenastom prelaznom deonicom koja se uklapa u WES ili USBR profil prelivnog praga. Prelici sa stepenastim brzotocima po nizvodnoj kosini nasutih brana, obično imaju široki prelivni prag na početku brzotoka. U oba slučaja moguća je primena ustava ispod kojih ističe vodni tok pri delimičnom otvaranju. Primenjuju se i ustave preko kojih voda preliva pri delimično spuštenoj ustavi ali je u tom slučaju poželjno uvođenje vazduha ispod prelivnog mlaza. U praksi se primenjuju i čunasti prelici (standardni ili PVC tip) kao kontrolni objekti.

Osnovni zadatak projektanta stepenastog brzotoka je da odredi sledeće bitne karakteristike ovog objekta: optimalnu dužinu prelivne ivice i širinu brzotoka, visinu stepenice, granice regiona sa različitim režimom strujanja vode, visinu bočnih zidova, preostalu kinetičku energiju, sigurnost protiv kavitacionih oštećenja betona i dimenzije objekta za rasipanje preostale kinetičke energije vodnog toka.

Poželjno je da se poklapaju dužina prelivne ivice i širina brzotoka. Ovaj parametar se bira na osnovu geometrijskih karakteristika rečne doline.

Formirane su empirijske zavisnosti za određivanje visine stepenica pri kojoj se garantuje izabrani režim strujanja (obično klizeći) pri maksimalnom protoku.

Duž brzotoka sa klizećim vodnim tokom mogu da se formiraju četiri regiona sa različitim režimima strujanja: (1) neovazdušeni vodni tok uzvodno od početne tačke ovazdušenja, (2) razvijajući delimično ovazdušen tok, (3) razvijajući potpuno ovazdušeni tok i (4) potpuno razvijen ovazdušeni tok. Ukoliko je brzotok dovoljno kratak, izostaće formiranje četvrtog regiona. U posebnim okolnostima (kratak brzotok u blagom nagibu) moguće je da vodni tok bude neovazdušen na celoj dužini brzotoka (redak slučaj u praksi). Takođe su formirane empirijske formule za određivanje granica između regiona.

Visina bočnih zidova je u direktnoj zavisnosti od količine uvučenog vazduha u vodni tok. Uobičajena je praksa da se visina zida određuje na osnovu dubine ovazdušenog toka (h) pri koncentraciji vazduha u blizini površine toka od 90%. Vrednost h_{90} zavisi od

merodavnog režima koji se formira u brzotoku. Ako je kraj brzotoka u regionu 3, dubina h_{90} se određuje na osnovu empirijskih formula koje važi za ovaj region. Dubina h_{90} se povećava duž ovog regiona u nizvodnom pravcu. Ukoliko je kraj brzotoka u četvrtom regionu, dubina h_{90} je konstantna unutar ovog regiona i takođe se određuje pomoću empirijskih zavisnosti. Preporučuje se da se visina bočnog zida poveća 1,2 do 1,5 puta zbog neslaganja turbulentnih karakteristika vodnog toka na modelu i u prirodi.

Pomenute empirijske zavisnosti se mogu koristiti samo u ranim fazama projektovanja dok su u višim fazama projektovanja još uvek neophodna hidraulička modelska ispitivanja na modelima sa odnosom dužina u prirodi i na modelu, jednakim ili manjim od 10.

Izbor odgovarajuće empirijske formule koja će se primeniti u projektovanju pojedinih elemenata brzotoka treba izvršiti na osnovu podudarnosti uslova pod kojima su one formirane i geometrijskih i drugih karakteristika objekta koji se projektuje.

Posledica konvergencije bočnih zidova je pojava povećanja dubine vodnog toka u blizini zidova zbog udara burnog toka u čvrstu granicu. Na modelima i u prirodi nije primećeno rasprostiranje ovih poremećaja po širini preliva u obliku kosih stojećih talasa, premda nije ni isključena mogućnost pojave ovih talasa pri određenim hidrauličkim i geometrijskim uslovima.

U literaturi se nailazi na preporuke za određivanje dubine toka u blizini konvergentnog zida na delu brzotoka u kome vodni tok nije ovazdušen ili je malo ovazdušen. Ne nailazi se na opšte prihvaćena pravila za određivanje dubine potpuno ovazdušenog toka u blizini bočnih konvergentnih zidova.

LITERATURA

- [1] André, S. (2004), *High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements*; LCH, Communication 20, Lozana.
- [2] Bakhmeteff, B.A. & Matzke (1936), *The hydraulic jump in terms of dynamic similarity*; Transactions, ASCE, Vol 101
- [3] Bieri, M., Federspiel, M., Boillat, J.Z.V. (2010), *Spillway discharge capacity upgrade at Gloriettes dam*, Hydropower & Dams, Issue Five.
- [4] Boes, R.M. (2012), *Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways*, XXIV ICOLD congress; Q-94; Kyoto.
- [5] Boes, R.M., Hager, W.H. (2003), *Hydraulic design of stepped Spillways*; Journal of Hydraulic Engineering ASCE.
- [6] Boes, R. & Hager, W. (2003), *Two-phase flow characteristics of stepped spillways*; Journal of Hydraulic Engineering 129 (9).
- [7] Boes R.M. & Minor H-E (2000), *Guidelines for the hydraulic design of stepped spillways*, Proc. of jmt. Workshop on hydraulic of stopped spillways; IAHR, A.A. Balkema.
- [8] Bung, D.B. (2011): *Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways*, Journal of Hydraulics Research, Vol. 49; N°5
- [9] Chanson, H. (1994): *Hydraulics design of stepped cascades, channels weirs and spillways*, Elsevier Science Ltd. Oxford.
- [10] Chanson, Hubert (2002), *The hydraulics of stepped chutes and spillways*, A.A. Balekma
- [11] Chanson, H., (1995), *State of the art of the hydraulic design of stopped chutes spillways*, J. of hydropower and dams.
- [12] Chanson, H. (2001), *A Transition flow regime on stepped spillways*, The foct, Congress IAHR.
- [13] Chamani, M.R., (2000), *Air inception in skimming flow regime over stepped spillways*, Proc. of the International Workshop of Hydraulics of Stopped Spillways, IAHR, A.A. Balkema.
- [14] Christodoulou, G., (1999), *Design of stepped spillways for optimal energy dissipation*, Hydropower & Dams, issue 5.
- [15] Erčić, Ž. (2005): *Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana – Prvi deo*, Vodoprivreda, 216-218, str. 259-286.
- [16] Erčić, Ž. (2007): *Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana – Drugi deo*, Vodoprivreda, 228, str. 181-204.
- [17] Erčić, Ž. (2009): *Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana – Treći deo*, Vodoprivreda, 237-239, str. 47-60.

- [18] Erčić, Ž. (2011): *Pregled i primena razultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana – Četvrti deo*, Vodoprivreda, 252-254, str. 227-248.
- [19] Frizell, K.H., Mefford, B.W., Dodge, R.A., Vermeyen, T.B., (1991), *Embankment dams: Methods of Protection during overtopping*, Hydro Review Magazine.
- [20] Gonzales, C.A., Chanson, H., (2007), *Diseño hidráulico de vertederos escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental*, Ingenieria hidraulica en Mexico, Vol XXII.
- [21] Hager, W.H., Boes, R.M. (2000): *Backwater and drawdown curves in stepped spillway flow*; Proc. of Int. Workshop on hydraulic of stepped spillways; IAHR; A.A.Balbema.
- [22] Hunt, S., Temple, D., Abt, S., Kadavy, K., and Hanson, G. (2012): *Converging Stepped Spillways: Simplified Momentum Analysis Approach*; Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, September 2012.
- [23] Hunt, S., Kadavy, K., Abt, S., and Temple, D. (2008): *Impact of converging chute walls for Roller Compacted Concrete Stepped Spillways*; Journal of Hydraulic Engineering, ASCE; July, 2008.
- [24] Kapor, R. i drugi (2009): *Procena propusne moći dvostrukog bočnog preliva*, Vodoprivreda, 240-242, str. 103-108.
- [25] Kapor, R., Savić, Lj., Žugić, D., Petrović, N., Rula, M., *Poređenje proračuna preliva sa stepenastim brzotokom i merenja na hidrauličkom modelu*, 16. Savetovanje SDHI, Donji Milanovac.
- [26] Khatsuria, R.M., (2005), *Hydraulics of Spillways and energy dissipators*, Marcel Dekker.
- [27] Kuzmanović, V. i drugi (2011): *Statička analiza stepenastog preliva sa sa odbojnom gredom*, Vodoprivreda, 246-248, str.181-186.
- [28] Matos, J., (2000), *Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams*, Proc. of Int. Workshop on Hydraulic of stepped spillways, IAHR, A.A. Balkema.
- [29] Minor, H.E., Boes, R.M., (2001), *Hydraulic design of stepped spillways*, Congress IAHR.
- [30] Rajaratnam, N., Chamani, M., (1995), *Energy loss at drops*, J. of Hydr. Eng., 116(4).
- [31] Savić, Lj. i drugi (2011): *Stepenasti preliv sa odbojnom gredom*, Vodoprivreda, 246-248, str. 175-180.
- [32] Simoes, A.L.A., Schulz, H.E., Logosco, R.J., Porto, R., (2012), *Stepped Spillways: Theoretical, experimental and numerical studies*, Hydrodynamics – Natural Water Bodies, IN TECH.
- [33] Tatewar S.P., Ingle, R.N., (2000), *Design of stepped spillway for skimming flow regime*, Hydraulic of stepped spillways, Balkma.
- [34] USBR, (1958), *Hydraulic design of Stilling basins and energy Dissipators*.
- [35] USBR, (2006): *Research State-of-the-Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways*; Hydraulic Laboratory Report H1-2005-06.
- [36] Yasuda, Y., Ohtsu, J., (1999), *Flow resistance of Skimming flow in stepped channels*, Pros. 28 IAHR Congress.
- [37] Žugić, D., Kapor, R., Poptrajković, N., Rula, M., (2006), *Hidraulička modelska ispitivanja stepenastog preliva na dva modela različitih razmera*, 14. Savetovanje SDHI, Fruška Gora.

PRESENTATION AND APPLICATION OF RESULTS OBTAINED BY MODERN HYDRAULIC
INVESTIGATIONS IN DESIGNING LARGE DAM SPILLWAYS

(Part 5: SPILLWAYS WITH STEPPED CHUTE)

by

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

Summary

Part 5 of the paper discusses hydraulic characteristics of spillways with stepped chute. The basic flow pattern in nappe and skimming flow regime is described and main empiric equations applied for the determination of flow type and calculation of the adequate height of chute steps and lateral walls are given. The method applied for the determination of energy quantity

dissipated in chute, protection against cavitation damages in concrete and dimensions of structures used for dissipation of the remaining kinetic energy of water flow will be presented in Part 6.

Key words: stepped chutes, water flow regimes, aerated water flow.

Redigovano 05.07.2013.