

PROCENA POLOŽAJA I DIMENZIJA EROZIONE JAME SKI ODSKOKA

Ljubodrag SAVIĆ, Vladan KUZMANOVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

Rad se bavi problemima koji se javljaju pri projektovanju ski odskoka kod visokih brana. Iako je u ovoj oblasti urađen veliki broj istraživanja i napisano mnogo radova, i dalje postoji potreba da se znanja dopune i objedine, kao i da se jasnije i za projektanta praktičara prihvatljivije formulišu. Rad obrađuje tri aspekta vezana za projektovanje ski odskoka: ugao odskoka mlaza, dužinu odskoka i dimenzije erozione jame. Cilj rada je: objedinjavanje znanja o navedenoj problematici, razvijanje izraza koji bi olakšali proračun i projektovanje odskoka, kao i utvrđivanje smernice za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Ključne reči: Brane, ski odskok, eroziona jama, skretni ugao mlaza, domet mlaza.

1. UVOD

Ski odskok (koji se u praksi još naziva i ski-skok, ili odskok) je od polovine dvadesetog veka postao standardni izlazni deo evakuacionih organa. Posebno je pogodan kod visokih brana, gde se na izlaznom delu javljaju velike brzine mlaza [8], [10], [11], [13].

Iako u savremenoj svetskoj literaturi postoji dosta radova na temu projektovanja ski odskoka [2], [3], [4], [13], [14], čini se da nedostaje koncizan prikaz određivanja najznačajnijih parametara. Naime, da bi ski odskok bio prihvatljiv kao objekat za povezivanje donje i gornje vode, neophodno je da eroziona jama (koja nastaje kao rezultat udara mlaza o dno korita nizvodno od brane) ne narušava stabilnost brane, bokova doline i okolnih objekata. Zato je već pri opredeljivanju za tip umirivača energije u idejnom projektu (ski odskok, ili umirujući bazen, na pr.) neophodno što tačnije proceniti položaj i dimenzije erozione jame i pokušati da se odgovarajućim oblikovanjem kašike odskoka, ili promenom položaja kašike postigne zadovoljavajući rad umirivača. Takođe, potrebno je opredeliti se za računski

proticaj za koji se određuje dubina (i ostale dimenije i položaj jame). Naravno, u fazi glavnog projekta, uvek je korisno (često i neophodno) predloženo rešenje ispitati i na fizičkom hidrauličkom modelu, s obzirom da se tu mogu uočiti mnoge pojave koje se nisu mogle predvideti postojećim iskustvom.

Da bi se procenio izgled jame potrebno je proceniti domet mlaza – položaj jame, a zatim dimenzije erozione jame: dubinu, širinu i dužinu, kao i nagibe kosina jame (sl.1).

Pri određivanju dometa mlaza neophodno je proceniti vrednost skretnog ugla mlaza pre upuštanja u atmosferu (sl.1 i 2) i uticaj otpora vazduha na strujanje (pri malim brzinama izlaznog mlaza otpor vazduha je zanemarljiv, dok pri brzinama od preko 20 m/s, uticaj ovazdušenja bitno skraćuje domet mlaza i približava erozionu jamu ka objektu). Skretni ugao mlaza zavisi od skretnog ugla kašike odskoka i nagiba uzvodnog-prilaznog kanala (brzotoka).

Dimenzije erozione jame zavise od niza veličina, od kojih se za najvažnije smatraju (sl.1): denivelacija gornje i donje vode, H , i jedinični proticaj, q , (proticaj po metru dužnom širine mlaza, pri ravanskom problemu).

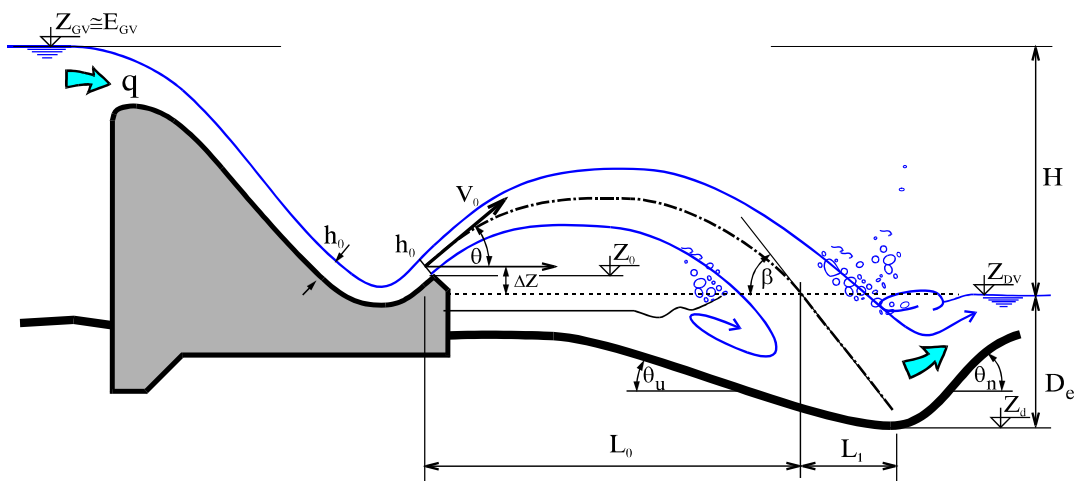
Cilj rada je da objedini postojeća znanja u vezi sa navedenim problemima procene položaja i dimenzija erozione jame, da pruži objedinjeni pristup kroz primenu i prilagođavanje postojećih, odnosno razvoj novih izraza za proračun istih. U ovom radu prvenstveno je obrađen slučaj evakuacije vode pomoću preлива sa brzotokom, koji može biti klasični brzotok, a može predstavljati nizvodno lice prelivne brane, dok osobenosti vezane za tunelske evakuatore ovde nisu posebno tretirane. Kod razmatranih objekata, posebno kod prelivne brane, značaj položaja i dimenzija erozione jame je posebno izražen s obzirom da može doći do potkopavanja same pregradne konstrukcije sa nesagledivim posledicama. (U tom slučaju se može

razmišljati konzervativnije – za računski proticaj može se uzeti 1000-godišnja ili bar 500-godišnja voda, može se usvojiti blaži nagib uzvodne kosine erozije jame, nepovoljnija formula za proračun dubine erozije i sl.)

Treba napomenuti da je pri projektovanju ski odskoka potrebno rešiti još neke probleme, kao što su procena uticaja mlaza na denivelaciju ispred i iza udara mlaza u nizvodno korito, procena hidrodinamičkih pritisaka na zidove kašike odskoka, kao i određivanje takozvanog proticaja gušenja (ili začepljenja, tzv. „choking flow“), pri kome mlaz nema dovoljno siline da odbaci masu vode (hidraulički odskok) iz kašike. Ipak, ovi problemi nisu kritični sa gledišta primenljivosti odskoka, pa im se u ovom radu neće posvetiti pažnja.

2. UGAO ODSKOKA MLAZA

Dužina dometa mlaza odskoka kroz atmosferu (vazduh) najčešće se procenjuje prema jednačini kosog hica [4],



Slika 1. Osnovni elementi ski odskoka

Kada se nađe u vodi nizvodnog korita, mlaz nastavlja kretanje po približno pravoj liniji pod ulaznim – upadnim uglom β u odnosu na vertikalu [4],[10]. Ugao β se računa kao (sl.1):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= -\frac{1}{K_a} \operatorname{tg} \theta + \frac{1}{K_a^2} \frac{gL_0}{V_0^2 \cos^2 \theta}, \quad \text{ili:} \\ \operatorname{tg} \beta &= \frac{1}{K_a} \sqrt{\operatorname{tg}^2 \theta + \frac{2g\Delta Z}{\cos^2 \theta \cdot V_0^2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

pa je dužina putanje mlaza kroz donju vodu do mesta udara u dno korita:

[9], [10], [12], [13], [14], tako što se računa putanja fluidnih delića koji poleću iz kašike odskoka u atmosferu brzinom dolaznog mlaza V_0 :

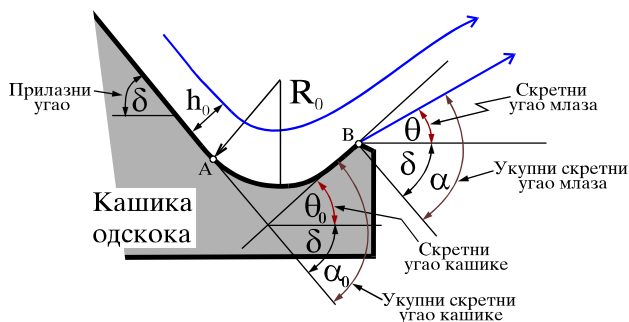
$$L_0 = K_a \frac{V_0^2 \cos \theta}{g} \left(\sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2g \Delta Z}{V_0^2}} \right) = K_a L_{0,T} \quad (1)$$

gde su, prema slici 1: L_0 = domet mlaza do udara u donju vodu, K_a = koeficijent aeracije, $L_{0,T}$ = teorijski domet mlaza, bez uticaja otpora vazduha, θ = skretni ugao mlaza – ugao odskoka, g = ubrzanje zemljine teže, ΔZ = denivelacija središnje tačke mlaza iznad temena odskoka i kote donje vode. Na slikama 1 i 2 takođe se mogu uočiti: L_1 = domet mlaza po udaru u donju vodu, D_e = dubina erozije jame (merana od nivoa donje vode), h_0 = dubina vode neposredno pre odskoka mlaza, R = poluprečnik kašike odskoka.

$$L_1 = (Z_{Dv} - Z_d) / \operatorname{tg} \beta = D_e / \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

U jednačini hica (jed.1) figuriše skretni ugao mlaza, θ , koji je manji od izlaznog skretnog ugla kašike odskoka, θ_0 (sl.2), s obzirom da, po inerciji, mlaz „odbija“ da se sasvim prilagodi geometriji konture koja menja pravac toka [2], [3], [4]. Razumno je očekivati da će stepen odstupanja mlaza od konture zavisiti od odnosa dubine mlaza i poluprečnika krivine kašike (od zakrivljenosti kašike), od nagiba korita brzotoka ispred kašike – prilaznog ugla, δ , kao i od vrednosti skretnog ugla kašike odskoka, θ_0 . Na slici su, pored napred opisanih

uglova, prikazani i ukupni skretni uglovi: mlaza, θ , i kašike odскока, θ_0 .



Slika 2. Skretni ugaо mlaza i skretni ugaо kašike

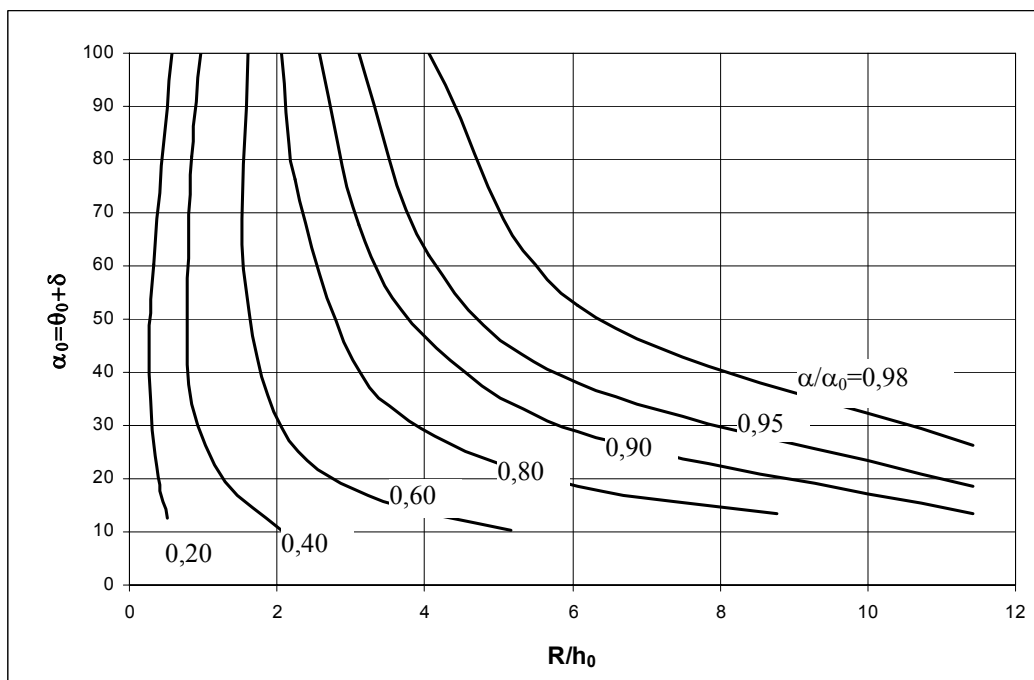
Uticaj navedenih činilaca je očigledan. Na primer, veća zakrivljenost izaziva veće odstupanje mlaza. Povećanjem nagiba brzotoka produžava se deonica

konture duž koje mlaz menja pravac (deonica A – V na slici 2), tako da mlaz može bolje da se prilagodi, pa je odstupanje manje. (Nije unapred jasno kako će se mlaz ponašati u zavisnosti od silovitosti toka, izražene preko Frudovog broja mlaza).

Heler [2] i Katsurija [4] daju izraze, odnosno dijagrame zavisnosti skretnog ugla mlaza od skretnog ugla kašike za objekte sa horizontalnim dovodom (tuneli, kanali sa ustavama i sl.). Prema istraživanju prve grupe autora, skretni ugaо donje ivice mlaza može se u tom slučaju opisati izrazom [2]:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_0}{70} \right)^{\frac{1}{6}} \left[1 + e^{-8 \left(\frac{h_0}{R} \right)^2} \right], \quad (4)$$

uz ograničenje: $0 \leq \frac{h_0}{R} \leq 1$ (s tim da se ugaо unosi u stepenima).



Slika 3. Zavisnost skretnog ugla mlaza od ugla kašike i zakrivljenosti odскока, prema [14]

Za slučaj skretanja mlaza sa proizvoljnim prilaznim uglom, δ (sl.2), Fišer i Hager[14], preporučuju dijagram Orlova (sl.3). Na osnovu ovog dijagrama, kao i podataka dobijenih prema [2] i [4], autori ovog rada predlažu približne izraze za procenu skretnog ugla

mlaza, pri ukupnim vrednostima skretnog ugla kašike, α_0 , većim od 45° , i za zakrivljenost kašike u opsegu od

$$0,15 \leq \frac{h_0}{R} \leq 0,40 :$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 - \frac{6 \left(\frac{h_0}{R} \right)^{4,2} \left(\frac{\alpha_0}{90} \right)^{-0,2}}{9 \left(\frac{h_0}{R} \right)^{3,5} + \left(\frac{\alpha_0}{90} \right)^{3,5}} \quad (5)$$

Ako se oblast primene suzi na uglove $70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$, i na opseg zakrivljenosti od $0,25 \leq \frac{h_0}{R} \leq 0,35$, što odgovara rasponu vrednosti ovih veličina za slučaj prelivnih brana, dobija se jednostavniji izraz:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1 - 1,1 \left(\frac{h_0}{R} \right)^{2,7} \left(\frac{\alpha_0}{90} \right)^{-1,3} \quad (6)$$

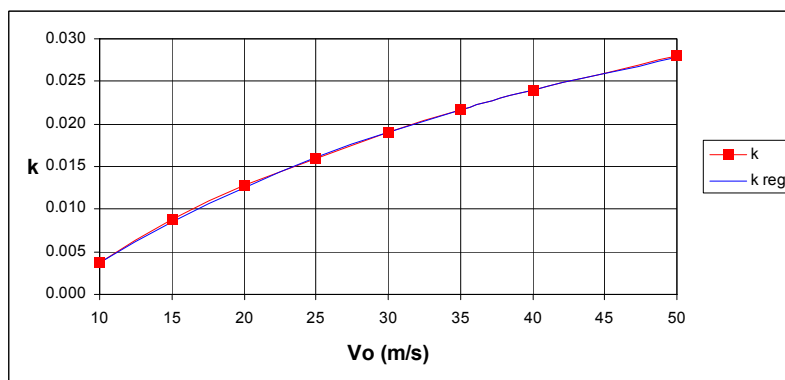
Prema slici 3, odnosno jednačinama 5 i 6, može se proceniti da će kod prelivnih brana, gde se (zavisno od nagiba nizvodnog lica) ostvaruju uglovi od $\delta \approx 45^\circ \div 55^\circ$, i za preporučene vrednosti zakrivljenosti od $0,2 \leq h_0/R \leq 0,35$, može očekivati promena ukupnog

skretnog ugla u rasponu od $0,92 \leq \alpha/\alpha_0 \leq 0,98$, odnosno promena skretnog ugla u rasponu od $0,80 \leq \theta/\theta_0 \leq 0,95$. Da bi se potvrdili dobijeni rezultati, korisno bi bilo uraditi dodatna istraživanja, na osnovu kojih bi se došlo do pouzdanijeg izraza za vrednost skretnog ugla u širem opsegu vrednosti h_0/R i θ/θ_0 . Ova istraživanja, na dobro osmišljenom hidrauličkom modelu, trebalo bi da utvrde i uticaj Frudovog broja izlaznog mlaza na razmatranu pojavu.

3. UTICAJ OVAZDUŠENJA NA DOMET MLAZA

Pri malim brzinama izlaznog mlaza otpor vazduha je zanemarljiv na dužinu dometa, dok pri brzinama od preko $V_0 \geq 20$ m/s, uticaj ovazdušenja skraćuje domet mlaza i na taj način „približava“ erozionu jamu ka objektu [1], [4], [10], [14].

Za procenu uticaja otpora vazduha trenutno je još uvek veoma aktuelna Kavakamijeva formula iz 1974 godine [1], [4], koja, pored brzine mlaza, V_0 , uzima kao bitnu veličinu i skretni ugao mlaza, θ (sl.1):



Slika 4. Kavakamijeva konstanta: k – originalna vrednost prema [4], k_{reg} – vrednost prema regresionom izrazu (8)

$$L_0 = \frac{1}{gk^2} \ln(1 + 2k \mu V_0 \cos \theta), \quad (7)$$

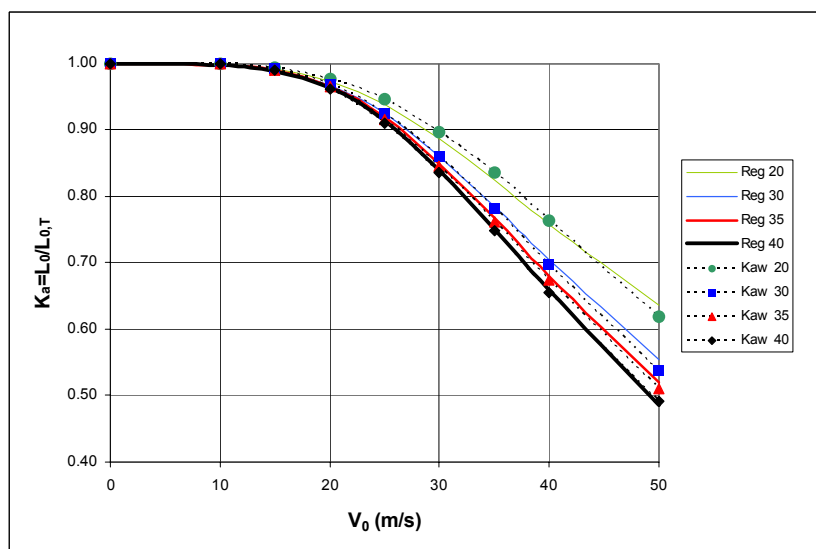
gde je: $\mu = \text{tg}^{-1}(k V_0 \sin \theta)$ i izražava se u radijanima, a parametar, k , se očitava sa Kavakamijevog dijagrama (sl.4), koji se može precizno aproksimirati izrazom:

$$k = 1 - \frac{0,977 \left(\frac{V_0}{30} \right)^{0,996} + 1,0036}{1,023 \left(\frac{V_0}{30} \right)^{1,0035} + 0,996} \quad (8)$$

Međutim, u praksi je pogodnije koristiti klasičnu jednačinu hica (jed.1), s obzirom da se preko nje lako određuju i drugi bitni parametri putanje mlaza, kao što je upadni ugao mlaza u donju vodu, β [4], [10]. Stoga su autori koeficijent ovazdušenja, K_a , u jednačini hica (jed.1) odredili prema Kavakamijevoj jednačini (jed.7), za različite vrednosti skretnog ugla mlaza, θ , i za različiti brzine mlaza, V_0 . Na slici 5 ova zavisnost je prikazana zajedno sa vrednostima koji se dobijaju regresionim izrazom:

$$\frac{L_0}{L_{0,T}} = 1 - \frac{\left(\frac{V_0}{30}\right)^{4,45}}{2,25\left(\frac{V_0}{30}\right)^{3,7} + 4} \left(\frac{\theta}{40}\right)^{0,5}, \quad (9)$$

gde je ugao, θ , u stepenima.



Slika 5. Zavisnost koeficijenta aeracije, K_a , od skretnog ugla, θ , i brzine mlaza, V_0 : “Kaw”- vrednosti dobijene po Kavakamiju, “Reg”- vrednosti dobijene izrazom (9)

Na slici 5 se zapaža da uticaj otpora vazduha na dužinu putanje mlaza postaje bitan za brzine veće od 20 m/s, dok se pri brzinama od 30÷40 m/s mlaz skraćuje 10÷35% od teorijske vrednosti. Ako se ovo skraćivanje „dopuni“ skraćanjem usled smanjenja skretnog ugla mlaza, u odnosu na vrednost skretnog ugla kašike, mesto udara mlaza (odnosno eroziona jama) će se dodatno približiti objektu.

U literaturi se mogu naći i drugi obrasci za procenu koeficijenta aeracije, kao što su obrasci Gunka [14]:

$$\frac{L_0}{L_{0,T}} = e^{-0,12(F_0 - F_r)}, \quad (10)$$

$$\frac{L_0}{L_{0,T}} = e^{-5 \times 10^{-5} F_0^4}, \quad (11)$$

gde je Frudov broj izlaznog mlaza: $F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{g h_0}}$, a

konstanta $F_r = 5,5 \div 7,0$.

Ovi izrazi ne daju realistične rezultate za veće vrednosti Frudovog broja, pa se moraju koristiti sa oprezom.

4. DIMENZIJE EROZIONE JAME

Proces stvaranja eroziona jame danas je dosta dobro proučen [11]. S druge strane, i pored dobrog poznavanja mehanizma nastanka jame i dalje je dosta nepouzđano određivanje dimenzija jame. Sa praktičnog gledišta najvažnije dimenzije eroziona jame su *dubina jame*, D_e , i *nagib uzvodne kosine*, a kada postoji opasnost od ugrožavanja stabilnosti bokova doline od zanačaja može biti i širina jame, odnosno nagib u poprečnom – bočnom pravcu (nije prikazano na slici).

U savremnoj praksi koristi se više pristupa za procenu dubine eroziona jame, mada u načelu postoje dva osnovna pravca:

1. Empirijski pristup, gde se na osnovu iskustvenih podataka sa objekata određuju zavisnosti koje povezuju bitne veličine, i odgovarajući empirijski koeficijenti,

2. Poluempirijski pristup, gde se na osnovu savremenih dostignuća u poznavanju pojave stvaranja jame pokušava da stvori matematički model procesa.

Stav autora je da se u ovom trenutku ne može uočiti prednost poluempirijskih metoda, pa se u praksi i dalje najčešće koriste jednostavni empirijski izrazi. U nastavku će biti prikazane najzastupljenije empirijske formule.

Dubina eroziona jame, D_e , zavisi od većeg broja veličina:

$$D_e = f(q, H, d_{50}, h, g, \beta, K_a, \dots), \quad (12)$$

gde su: q = jedinični proticaj, $H = Z_{GV} - Z_{DV}$ = bruto pad između gornje i donje vode (sl.1), d_{50} = prečnik srednjeg zrna materijala dna, h = dubina donje vode u neporemećenom stanju (pre erozije), g = ubrzanje zemljine teže, β = upadni ugao mlaza (sl.1), K_a = koeficijent aeracije.

Na osnovu opsežne analize sa više desetina brana i modela, Mejson i Arugaman [7] su predložili formulu tipa:

$$D_e = K \frac{q^X H^Y h^W}{g^V d_{50}^Z}. \quad (13)$$

Za optimalne vrednosti koeficijenata i eksponenata Mejson [6] predlaže: $K = 3,27$, $X = 0,60$, $Y = 0,15$, $W = 0,15$, $V = 0,30$, $Z = 0,10$. Ako je u nizvodnom koritu stena, u formuli (13) treba koristiti prečnik zrna od $d_{50} = 0,25$ m (mada je sam autor koristio i zrno znatno većeg prečnika, $d_{50} = 0,65$ m, kada je to bilo pogodno pri kalibraciji [5]).

Prema istim autorima, a takođe i prema većem broju ostalih referentnih istraživača [4], [9], [12], [13], [14], sasvim zadovoljavajuće rezultate daju i jednostavnije formule, pre svega formule Veronezea:

$$D_e = 1,9 q^{0,54} H^{0,225} \quad (14)$$

i Doudlija:

$$D_e = 0,652 q^{0,50} H^{0,50}. \quad (15)$$

Iz formula (13) ÷ (15) uočava se da su jedinični proticaj, q , i denivelacija, H , najznačajniji činioci za procenu dubine eroziona jame. Koleman [14] i Jildiz [15], smatraju da navedene formule daju dobre rezultate samo u slučaju kada mlaz udara u donju vodu pod približno pravim uglom ($\beta \approx 90^\circ$), dok za manje vrednosti

upadnog ugla predlažu modifikovanu Veronezeovu formulu u obliku:

$$D_e = 1,9 q^{0,54} H^{0,225} \sin \beta. \quad (16)$$

Ipak, dok vreme ne potvrdi ispravnost ovakvog stava, izgleda razumno držati se konzervativnijeg pristupa (formule 14 i 15).

Nije dovoljno predvideti dubinu eroziona jame. Potrebno je proceniti i ostale veličine koje određuju uticaj erozije na okolne objekte, pre svega na temelje same brane. U tom smislu najvažnija veličina je ugao nagiba uzvodne kosine jame, θ_u (sl.1), koji se najčešće izražava preko iskustvene formule Tarajmovića [6], [10]:

$$\theta_u = 10,5 + 0,30 \theta, \quad (17)$$

gde su svi uglovi u stepenima.

Pri primeni gornje formule treba biti oprezan, jer iskustva pokazuju da može dosta da preceni nagib jame, a time potceni dostizanje erozije do objekta [5]. U tom smislu smanjenje skretnog ugla mlaza (prema jed.5 ili 6, na pr.), u odnosu na ugao kašike odskoka (sl.2), svakako je na strani sigurnosti.

Procena širine jame i bočnog nagiba kosina jame je još manje proučena [5]. Mejson procenjuje da se kod relativno uzanih brzotoka može očekivati da širina jame bude 2÷3 puta veća od širine brzotoka. Fišer i Hager [14] predlažu modifikovani Gunkov obrazac za procenu bočnog širenja mlaza, na osnovu koga zaključuju da ugao bočnog širenja mlaza (u ravni tečenja), a na oba kraja brzotoka može biti oko $5 \div 10^\circ$.

Za procenu širine i dužine jame, Mejson predlaže i modifikovane formule Blejzdala i Andersona [6], [10], ali kako su originalno namenjene za ispušte sa koncentrisanim mlazom, ove formule ne daju dobru procenu pri proračunu brzotoka ili prelivnih brana sa širokim provodnikom (brzotokom) o kojima je ovde prevashodno reč [6], pa se neće ni opisivati.

Na kraju, potrebno je razmotriti i izbor računskog proticaja pri proceni dimenzija eroziona jame. Uobičajeno je da se pri dimenzionisanju objekata za umirenje energije, kao računski proticaj uzima proticaj manje verovatnoće prevazilaženja (manjeg „povratnog perioda“) nego pri dimenzionisanju preliva i brzotoka (ulaznog dela i provodnika evakuacionog organa). Mejson [6], predlaže da se pri proceni dimenzija

eroziona jame ski-odskoka računa sa proticajem verovatnoće prevazilaženja od $1/200 \div 1/1000$, s tim što se preporučuje proticaj verovatnoće prevazilaženja od $1/500$. Šlejz [11] ispravno zaključuje da pri razmatranju određenog poplavnog talasa, ne bi trebalo koristiti najveći proticaj (vrh talasa), već onaj proticaj koji ima dovoljno dugo trajanje da bi mogao da izazove maksimalnu eroziju. Nažalost, da bi se opisani postupak mogao ispravno sprovesti, neophodno je poznavati vreme koje je potrebno da bi se uspostavila, tzv. konačna erozija, za šta je potrebno imati terenska merenja sa konkretnog objekta, pa se ovakva analiza može sprovesti samo za objekte koji su u pogonu (i za koje postoje rezultati merenja eroziona jame). Pri projektovanju, se za sada može samo dati gruba procena, pa je čini se na strani sigurnosti uzeti maksimalni proticaj 200-godišnje, ili 500-godišnje velike vode, kao što predlaže Mejson.

5. ZAKLJUČAK

1. U radu su izloženi savremeni postupci za procenu položaja i dimenzija eroziona jame ski-odskoka kod prelivnih brana i preliva sa brzotokom, pri čemu su postupci za proračun skretnog ugla i dužine dometa mlaza dopunjeni i unapređeni (izrazi 5, 6 i 9, dijagram na sl.5).
2. Potrebno je uraditi dobro osmišljena ispitivanja na hidrauličkom modelu, kako bi se dobila tačnija zavisnost skretnog ugla mlaza u odnosu na skretni ugao kašike.
3. Potrebno je uraditi i prikupiti daleko veći broj merenja na postojećim objektima, kako bi se dobila tačnija zavisnost uticaja brzine mlaza (i drugih relevantnih činioca) na dužinu dometa mlaza u atmosferi, kao i pouzdaniji postupci za procenu nagiba eroziona jame.
4. Rezultati ispitivanja na fizičkom modelu mogu da daju veoma korisne podatke o strujanju u erozionoj jami, mada se ne može očekivati da se dobiju kvantitativno pouzdani podaci.

LITERATURA

[1] Attari, J., Arefi, F., & Golzari, F., (2002), *A review on physical models of scour holes below large dams in Iran*, Proceedings of the international workshop on rock scour due to high-velocity jets, Lausanne, Switzerland, 73-80.

- [2] Heller, V., Hager, W.H. and Minor, H.E., (2005), *Ski Jump Hydraulics*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No.5, 347-355.
- [3] Juon, R. and Hager, W.H., (2000), *Flip bucket without and with Deflectors*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No.11, 837-845.
- [4] Khatsuria, R.M., (2005), *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, Marcel Dekker, New York.
- [5] Mason, P.J. (2002), *Review of plunge pool rock scour downstream of Srisaïlam Dam*, Proceedings of the international workshop on rock scour due to high-velocity jets, Lausanne, Switzerland, 25-31.
- [6] Mason, P.J. (1993), *Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools*, Water Power&Dam Construction, September/October, 41-45.
- [7] Mason, P.J. (1985) and Arumugam, K., *Free Jet Scour Below Dams and Flip Bucketes*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No.2, 220-235.
- [8] Mason, P.J. (1982), *The choice of hydraulic energy dissipator for dam outlet works based on a survey of prototype usage*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, 72, 209-219.
- [9] Peterka, A.J., (1958), *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION, A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph No.25.
- [10] Savić, Lj., (2003), *UVOD U HIDROTEHNIČKE GRADEVINE*, Građevinski fakultet – Beograd.
- [11] Schleiss (2002), *Scour evaluation in space and time – the challenge of dam designers*, Proceedings of the international workshop on rock scour due to high-velocity jets, Lausanne, Switzerland, 3-22.
- [12] USBR, (1987), *Design Of Small Dams*, UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION, A Water Resources Technical Publication.
- [13] Vischer, D.L., Hager W.H., (1998), *Dam Hydraulics*, John Wiley & Sons.
- [14] Vischer, D.L., Hager W.H., (1994), *Energy Dissipators*, HYDRAULIC STRUCTURES DESIGN MANUAL, A.A.Balkema.
- [15] Yildiz, D., and Uzućek,E., (1994) *Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets*, International Water Power&Dam Construction, November, 50-56.

ASSESSMENT OF THE POSITION AND DIMENSIONS OF
THE SKI-JUMP SCOUR-HOLE

by

Ljubodrag SAVIĆ, Vladan KUZMANOVIĆ, Bojan MILOVANOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Summary

This paper is concerned with the ski-jump design, mainly for the large overflow dams. Although the vast scope of literature on this subject exists, there is still a need to compile, elaborate and upgrade available knowledge. The paper addresses three important aspects of the ski jump design: take-off angle, length of the jet trajectory, and the plunge pool dimensions. The aim is

to synthesize available knowledge, to present new formulas for a more convenient design, and to propose directions for the future research in this field.

Key words: Dams, ski jumps, plunge pool, jet deflection angle, trajectory length.

Redigovano 20.12.2006.