

SKI ODSKOK SA HORIZONTALNIM SKRETANJEM MLAZA

Petar PRAŠTALO

Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko–građevinsko–geodetski fakultet
Budo ZINDOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

REZIME

Ski odskok je “standardno rješenje“, kada je u pitanju evakuacija velikih voda kod visokih brana. Pomoću ski odskoka omogućeno je da se gubi određeni dio energije, prije nego mlaz udari u donju vodu. Da bi se omogućila veća aeracija mlaza i efikasnije rasipanje energije, kao rješenje se preporučuje ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza. Pored povoljnih geoloških prilika neophodnih za primjenu ovog rješenja za preporuku je svakako provjera rasporeda dinamičkih pritisaka duž kašike kao i dometa mlaza ski odskoka. Sve ove karakteristike neophodno je provjeriti na hidrauličkom modelu. U ovom radu se daje prikaz primjene ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza na brani HE Zavoj kod Pirota, za koja su sprovedena hidraulička modelska ispitivanja.

Ključne riječi: Ski odskok, hidrauličko modelska ispitivanja, domet mlaza, raspored pritisaka.

1. UVOD

Hidrotehničke građevine omogućavaju gazdovanje vodama – zahvatanje, sprovođenje, korišćenje, kao i sprječavanje njihovog štetnog dejstva (Savić, 2009). Da bih se voda kontrolisano sprovela, odnosno ispustila iz akumulacije, a da pri tome ne ugrozi branu, okolne objekte i područje nizvodno od brane, koriste se različiti tipovi evakuacionih objekata. Nakon kontrolisanog ispuštanja vode kroz evakuacione organe, da bi se voda dodatno umirila, koriste se različiti umirujući objekti, kao nastavak izlaznog dijela evakuacionih objekata.

Ski odskok je često korišćen oblik izlaznog dijela evakuatora kod visokih brana, ako su za to povoljni topografski i geološki uslovi terena. Pod “standardnim“ ski skokom podrazumijeva se zakrivljeni nastavak brzotoka – kašike (u vertikalnom pravcu) koja

omogućava odbacivanje mlaza u vidu kosog hica. Za razliku od “standardnog“, ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza, ima dodatnu zakrivljenost kašike u poprečnom presjeku, što omogućava skretanje mlaza u horizontalnom pravcu.

Ski odskok je prvi put uspješno izveden u Francuskoj na brani *Dordogne* 1930. godine (Juon and Hager 2000). *Rohe* i *Peterka* su prvi uradili model ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza 1959. godine. Ovo istraživanje je omogućilo da se utvrde uslovi strujanja u takvom ski odskoku, kao i dalja razmatranja za primjenu u praksi.

Za potrebe ovog rada na raspolaganju su dostupna hidraulička modelska ispitivanja na brani HE Zavoj kod Pirota, koja su urađena 1982. godine, u Institutu za vodoprivredu “Jaroslav Černi“ u Beogradu. Modelska ispitivanja imala su za cilj utvrđivanje rasporeda pritisaka duž kašike kao i dometa mlaza.

Na osnovu velikog broja urađenih eksperimenata sa standardnim odskokom, došlo se do funkcionalnih zavisnosti o rasporedu i vrijednostima pritisaka duž kašike. Ove eksperimentalne zavisnosti poređene su sa rezultatima modelskih ispitivanja na brani HE Zavoj, odnosno, sa novim zavisnostima koje su predložili autori na bazi ovih ispitivanja.

Pored rasporeda pritisaka duž kašike ski odskoka od interesa je i domet mlaza, čija je vrijednost procijenjena na osnovu modelskih ispitivanja, i upoređena sa izrazom za “standardni“ odskok. U nastavku rada prikazuju se rezultati istraživanja, diskusija rezultata kao i zaključak na osnovu sprovedenog istraživanja.

2. KARAKTERISTIKE SKI ODSKOKA

Ski odskok sa horizontalnim skretanjem putanje mlaza ima primjenu kada mlaz doseže do druge obale korita

vodotoka i na taj način ugrožava njenu stabilnost (npr., u slučajevima uskih i krivudavih riječnih kanjona). Skretanje putanje mlaza omogućava formiranje erozione jame u samom riječnom koritu, a ujedno i bolje rasipanje energije, zbog efikasnijeg uvlačenja vazduha u mlaz prije njegovog udara u donju vodu (Khatsuria, 2005). Skretanje mlaza treba da se omogući raspored pritisaka u kašici pri kome se izbjegava pojava kavitacije, (što je svakako neophodno provjeriti modelskim ispitivanjima) (Khatsuria, 2005).

Na slici 1 prikazani su primjeri kašike ski odskoka, sa horizontalnim skretanjem mlaza kao i “standardni” ski odskok.



Slika 1. Ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza – Vnda Nova Dam in Portugal (lijevo) i “standardni” ski odskok – brana Bočac u Republici Srpskoj (desno)

Ponekad se kao rješenje kod “standardnog” ski odskoka (samo pri manjim padovima, odnosno brzinama) na samom izlazu iz kašike postavljaju “zubci” za razbijanje mlaza, da se pospeši aeracija (veći stepen aeracije, može dovesti do veće disipacije energije uslijed većeg sabijanja vazduha pri udaru mlaza o površinu vode) (Savić, 2009). Aeracija mlaza se može pojačati postepenim širenjem kašike. Preporuka je da se bočni zidovi ski odskoka izvedu pod nagibom i na taj način omogući dodatna aeracija mlaza (Khatsuria, 2005).

Domet mlaza “standardnog” ski odskoka može da se procjeni na osnovu poznatog izraza za kosi hitac (Savić, 2009):

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

Pri čemu su korišćene sledeće oznake L_0 – domet mlaza do udara u donju vodu, K_a – koeficijent aeracije, V_0 – srednja brzina, θ – skretni ugao mlaza, ΔZ – denivelacija središnje tačke mlaza iznad tjemena odskoka i kote donje vode, g – gravitaciono ubrzanje.

U slučaju ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza ne postoji eksplicitni izraz za proračun dometa mlaza već se procjena daje na osnovu modelskih ispitivanja. Pored veličina iz jednačina (1) domet mlaza zavisi od geometrijskih karakteristika kašike i od količine uvučenog vazduha. Ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza, ima manji domet u odnosu na “standardni” odskok, ali ima veće horizontalno širenje mlaza. Na slici 2, prikazan je domet mlaza kod ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza prilikom hidrauličkih modelskih ispitivanja (Beichley, 1971).



Slika 2. Domet i širenje mlaza ski odskoka na modelskom ispitivanju (Beichley, 1971)

3. RASPORED PRITISAKA U KAŠICI

Prilikom hidrauličko modelskih ispitivanja na ski odskoku veoma je značajno mjerenje vrijednosti statičkog i dinamičkog pritiska. Prvi koji se bavio proučavanjem i rasporedom pritisaka u kašici odskoka je *Balloffet* još 1961. godine (Khatsuria, 2005). Krivina kašike izaziva centrifugalno ubrzanje, pa se pored hidrostatičkog pritiska, javlja i dodatni dinamički pritisak na dno kašike. Pritisak je najveći u najnižoj tački kašike i može da se procjeni pomoću sledećeg izraza (Khatsuria, 2005):

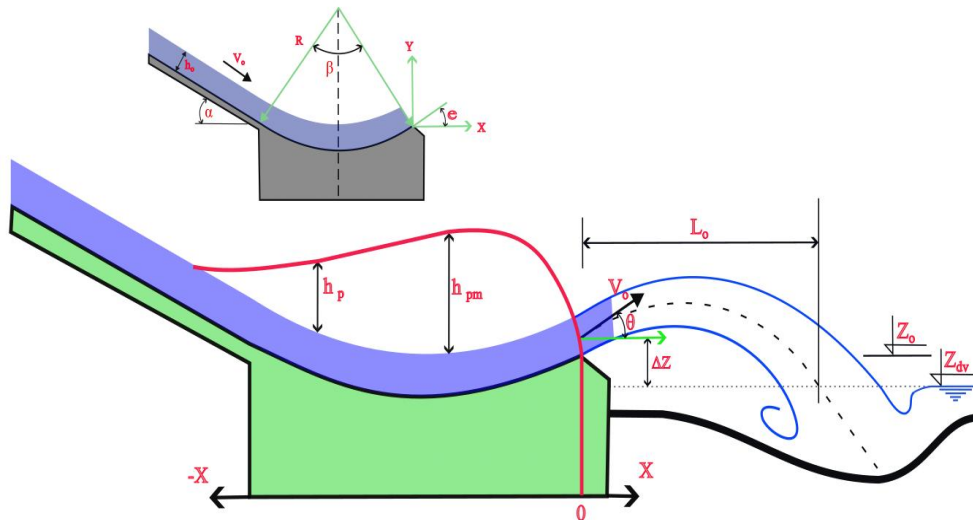
$$P = h_o + \frac{h_o V_o^2}{gR} \quad (2)$$

gdje su korišćene sledeće oznake P – ukupni pritisak po jedinici težine, h_o – dubina ispred kašike, V_o – dolazna brzina, g – gravitaciono ubrzanje i R – radijus kašike.

Balloffet (1961) je analizirao tečenje, na “standardnom“ ski odskoku (gdje su V i R konstantni) pa je došao do zavisnosti za maksimalni pritisak (Khatsuria, 2005):

$$P_{\max} = h_o + V_o^2 / 2g(1 - ((R - h_o) / R)^2) \quad (3)$$

Kod ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza raspored pritisaka nije simetričan, kao i položaj “tačke“ sa pojavom maksimalnog pritiska. Vrijednost i raspored dinamičkog pritiska zavisi od geometrije kašike i hidrauličkih uslova. Na slici 3 se prikazuje raspored dinamičkog pritiska duž kašike odskoka.



Slika 3. Raspored statičkih i dinamičkih pritisaka duž kašike, i domet mlaza (Khani et al., 2017)

Vrijednost bezdimenzionalnog dinamičkog pritiska u nekoj tački kašike može da se izrazi kao (Yamini et al., 2020):

$$H_p = \frac{(h_p - h_o)}{(h_{pm} - h_o)} \quad (4)$$

gdje je h_p – visina dinamičkog pritiska u razmatranoj tački, h_{pm} – maksimalna visina dinamičkog pritiska i h_o – dolazna dubina vode (hidrostatički pritisak). Bezdimenzionalni dinamički pritisak se može izraziti u funkciji bezdimenzionalnog rastojanja, X_p , pomoću sledeće jednačine:

$$X_p = x / (R \sin \beta) \quad (5)$$

Rastojanje, x , se mjeri od vrha kašike, pri čemu je R – radijus kašike, a β – centralni ugao, oznake su date prema slici 3.

Postoji veliki broj eksperimentalnih izraza za raspored pritisaka duž kašike na osnovu sprovedenih istraživanja koje predlažu različiti autori (Juon and

Hager 2000), (Yamini et al., 2020), (Heller et al., 2005). Za raspored pritisaka duž kašike u ovom radu korišćena su tri eksperimentalna izraza u bezdimenzionalnom obliku u funkciji rastojanja, a oblik jednačina prikazan je u nastavku.

Raspored dinamičkog pritiska eksperimentalnim ispitivanjima utvrdili su *Join* i *Hager* (2000), i ponudili sledeći izraz (Juon and Hager 2000):

$$H_p = [-2.0X_p \exp(1 + 2.0X_p)]^{2/3} \quad (6)$$

Heller i saradnici (2005), došli su do nešto drugačijeg izraza (Heller et al., 2005):

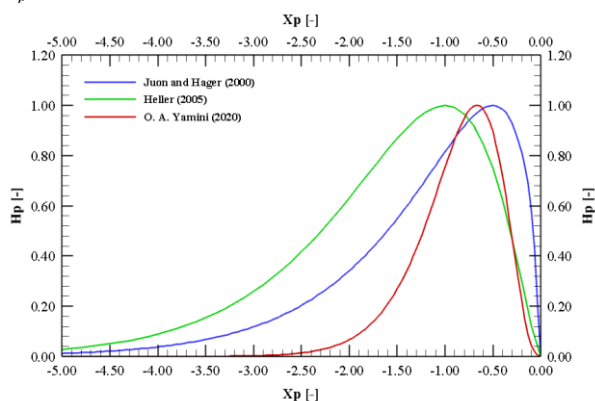
$$H_p = [-X_p \exp(1 + X_p)]^{1.5} \quad (7)$$

Na osnovu istraživanja *Yamina* i saradnika (2020), na modelu brane *Upper Gorvand* u Iranu, na dva modela ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza, ponudili su sledeći izraz za raspored pritisaka (Yamini et al., 2020):

$$H_p = [-1.5X_p \exp(1 + 1.5X_p)]^3 \quad (8)$$

Na osnovu prethodnih jednačina, na sledećoj slici dat je bezdimenzionalni oblik rasporeda dinamičkog pritiska duž kašike.

Prethodno prikazane jednačine slične su po obliku. Jedna od bitnih razlika jeste rastojanje na kom se javlja maksimalna vrijednost dinamičkog pritiska. Kod izraza *Joun* i *Hager* (2000) maksimalna vrijednost dinamičkog pritiska javlja se za $X_p = -0.50$, dok je prema izrazu *Heller*-a (2005), ta vrijednost za $X_p = -1.00$.

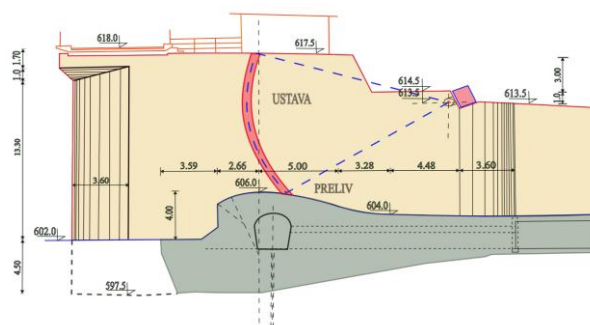


Slika 4. Raspored bezdimenzionalnog dinamičkog pritiska duž kašike ski odskoka

Prema novijima istraživanjima, prema izrazu *Yamini* i saradnici (2020), maksimalna vrijednost dinamičkog pritiska je između prethodno prikazanih vrijednosti i javlja se za $X_p = -0.70$. *Yamini* i saradnici (2020), definisali su zavisnost za ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza po osi kašike odskoka, nezavisno od vrijednosti Frudovog broja, ali je važan uticaj geometrije kašike, odnosno izraz je predviđen za velike radijuse (*Yamini et al.*, 2020). *Heller* i saradnici (2005), formirali su zavisnost nezavisno od vrijednosti Frudovog broja, odnosno zavisnost je određena pri malim vrijednostima Frudovog broja ($3 < Fr < 10$) i za male dolazne dubine duž kašike. Razlika u dobijenim jednačinama može biti i posljedica asimetričnog strujanja, kao i geometrijske karakteristike ski odskoka (*Yamini et al.*, 2020). Nekoliko autora predlaže nešto složenije izraze za raspored dinamičkog pritiska u funkciji Frudovog broja, dolazne dubine, radijusa kašike, centralnog ugla i nagiba brzotoka (*Khani et al.*, 2017). Zbog svoje složenosti nisu razmatrani u ovom radu.

4. HIDRAULIČKA MODELSKA ISPITIVANJA

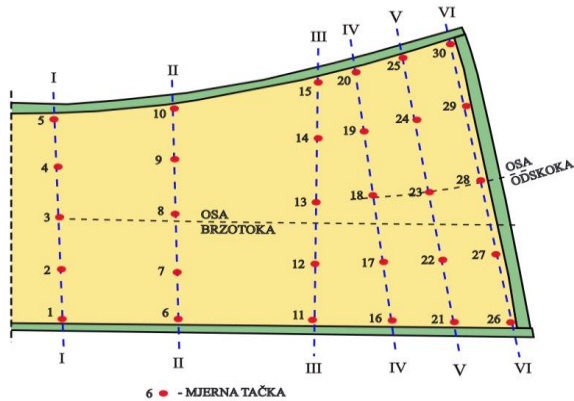
Kao primjer hidrotehničkog objekta sa izvedenim ski odskokom sa horizontalnim skretanjem mlaza izabrana je brana HE Zavoj kod Pirota, Republika Srbija. Brana je sagrađena od zemljanog materijala, sa ukupnom visinom od oko cca 70 m, i krunom brane na koti 617.5 mn.m. Za evakuaciju velikih voda predviđen je površinski preliv sa segmentnim ustavama sa tri prelivna polja širine 9.0 m. Preliv praktičnog profila je smješten na lijevom boku brane, sa kotom na kruni od 606.0 mn.m. Nakon preliva voda brzotokom pravougaonog poprečnog presjeka prosječne širine 25.0 m, dolazi do kašike ski odskoka, i dalje se ispišta u korito rijeke Visočice. Na slici 5 dat je podužni presjek kroz preliv i segmentnu ustavu brane Zavoj.



Slika 5. Podužni presjek kroz preliv i segmentne ustave brane HE Zavoj (Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", 1982)

Modelska ispitivanja iz 1982. godine obuhvatila su preliv, brzotok i ski odskok, a vršio ih je Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" u Beogradu. U razmjeri 1:40, u Frudovoj sličnosti, modeliran je dio brane sa prelivom, brzotokom, ski odskokom, kao i dio akumulacije. Svrha modelskih ispitivanja bila je da se provjeri kapacitet projektovanog preliva, brzotoka i ski odskoka i da se predlože mjere za poboljšanje uslova tečenja.

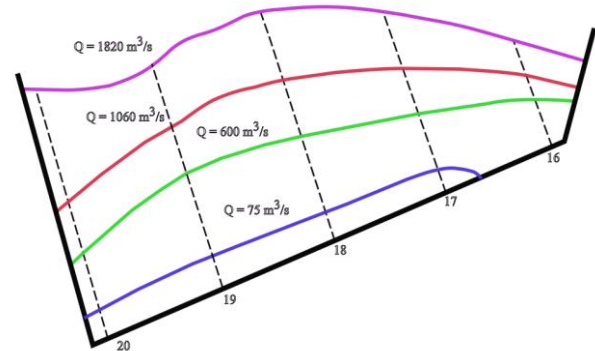
Za potrebe ovog rada od interesa su bila modelska ispitivanja pritiska duž kašike, i dometa mlaza ski odskoka. Pritisci duž preliva, odnosno u kašici odskoka, mjereni su pomoću pjezometara, u 30 mjernih tačaka.



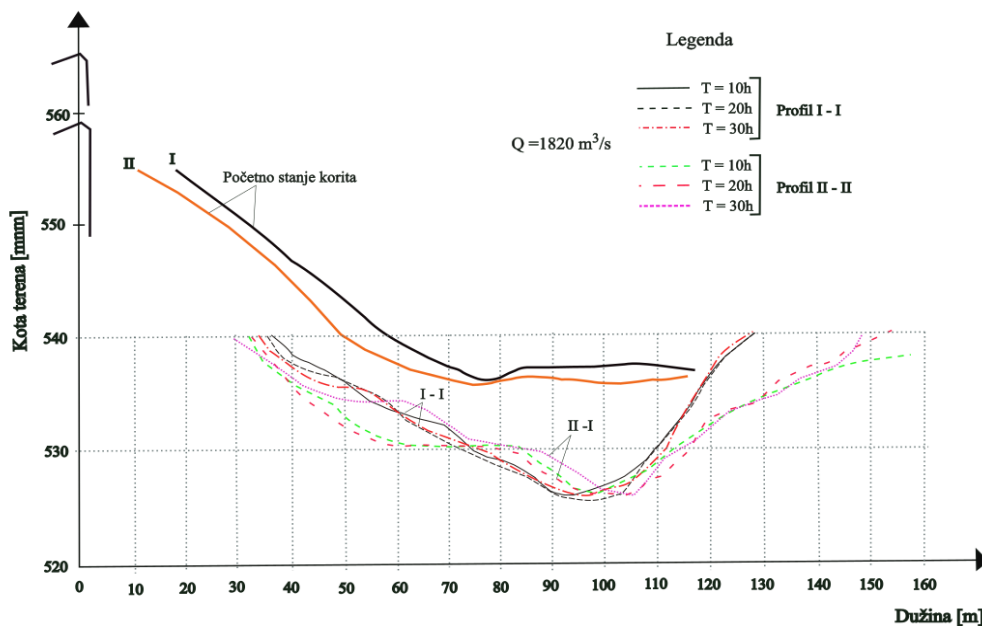
Slika 6. Raspored mjernih tačaka u kašici ski odskoka (Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi“, 1982)

Izmjereni pritisci u svim tačkama imaju pozitivnu vrijednost pri svim razmatranim protocima. Maksimalna vrijednost pritiska javlja se u samoj osovini kašike i uz lijevi zid, dok je desni zid za manje vrijednosti protoka praktično suh. Raspored pritisaka u poprečnom presjeku kašike dat je na sledećoj slici za karakteristične protoke.

Rezultati mjerenja pritiska u tačkama duž kašike iskorišćeni su za poređenje sa prethodno prikazanim jednačinama (jednačine od 5 do 7). Takođe, modelskim ispitivanjima određen je i domet mlaza za računski protok od $1820 \text{ m}^3/\text{s}$, i to za dva slučaja stanja korita u rijeci Visočici, nizvodno od odskoka (slika 8).



Slika 7. Raspored pritisaka u poprečnom presjeku (presjek IV – IV) ski odskoka (Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi“, 1982)



Slika 8. Eroziorna jama tokom modelskih ispitivanja (Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi“, 1982)

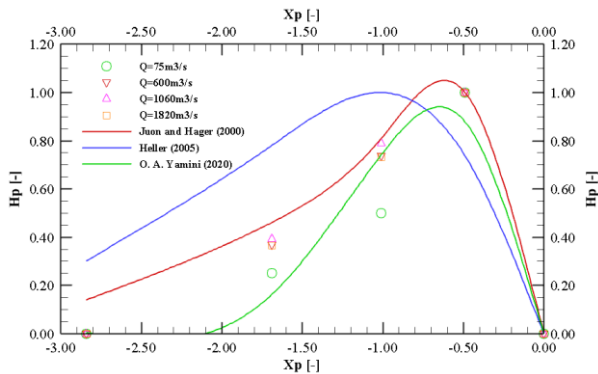
5. PRIKAZ REZULTATA

Mjerenje pritiska u tačkama duž kašike ski odskoka na modelu brane HE Zavoj poređena su sa vrijednostima

koje se dobijaju na osnovu jednačina (6) – (8). Prilikom mjerenja na modelu korišćeni su sledeće vrijednosti protoka 75, 600, 1060 i $1820 \text{ m}^3/\text{s}$, gdje su pritisci mjereni po sredini kašike i uz same zidove kašike.

Najveći pritisci javljaju se po osovini toka, odnosno po sredini same kašike, duž koje je bilo na raspolaganju ukupno pet mjernih tačaka.

Na sledećoj slici se prikazuju rezultati mjerenja dinamičkog pritiska po osi kašike u bezdimenzionalnom obliku, zajedno sa eksperimentalnim krivima prema jednačinama (6) – (8).



Slika 9. Rezultati mjerenja pritiska po osi kašike odskoka sa eksperimentalnim krivima duž kašike odskoka

Empirijske jednačine (6) – (8) imaju sličan oblik, a osnovna razlika je u vrijednostima pojedinih parametara tako da je na osnovu modelskih ispitivanja formirana zavisnost koja daje bolje slaganje u odnosu na prethodno prikazane jednačine. U ovom radu analizirana su dva oblika jednačina sa tri i četiri parametra, a njihov opšti oblik je:

Funkcionalna kriva 1:

$$H_p = [-aX_p \exp(1+bX_p)]^c \quad (9)$$

Funkcionalna kriva 2:

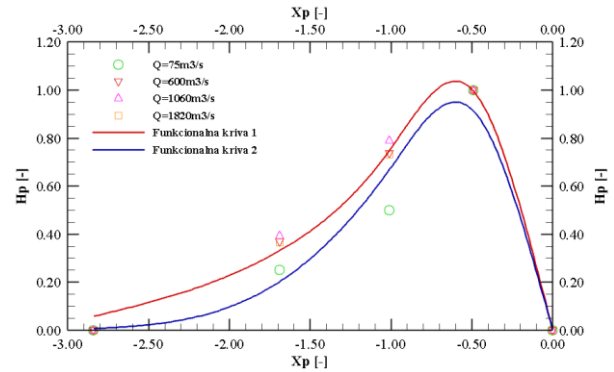
$$H_p = [-aX_p \exp(1+bX_p) - d]^c \quad (10)$$

gdje su a , b , c i d parametri koji se određuju kalibracijom, tako da se funkcionalna kriva prilagodi što bolje mjernim tačkama. Kalibrisane vrijednosti ovih parametara data su u sledećoj tabeli:

Tabela 1. Vrijednost parametara za funkcionalne krive

Naziv krive	Parametri			
	a	b	c	d
Funkcionalna kriva 1	1.923	1.927	1.028	-
Funkcionalna kriva 2	1.751	1.734	1.654	0.050

Oblik formiranih funkcionalnih krivih sa mjernim tačkama prikazan je na sledećoj slici.



Slika 10. Mjerne tačke sa formiranim funkcionalnim krivama 1 i 2

Kao mjera slaganja izmjerenih vrijednosti pritiska sa eksperimentalnim krivima korišćeno je srednje kvadratno odstupanje, na osnovu sledećeg izraza:

$$R^2 = \frac{\sum (H_{p,mjereni} - H_{p,kriva})^2}{n} \quad (11)$$

gdje korišćene oznake imaju sledeća značenja: $H_{p,mjereni}$ – bezdimenzionalna visina pritiska izmjerena na hidrauličkom modelu, $H_{p,kriva}$ – bezdimenzionalna visina pritiska na osnovu eksperimentalnih krivih (jednačine od 6 do 10), n – broj mjernih tačaka (broj podataka, ukupno 5).

U tabeli 2, daju se rezultati srednjeg kvadratnog odstupanja za eksperimentalne krive (jednačine 6 – 8), kao i formirane funkcionalne krive 1 i 2 na osnovu vrijednosti računskog protoka od $Q=1820 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 2. Rezultati srednjeg kvadratnog odstupanja za računski protok od $Q=1820 \text{ m}^3/\text{s}$

Naziv		R^2
Eksperimentalne krive	Juon i Hager (2000)	0.0069
	Heller (2005)	0.0810
	O. A. Zamini (2020)	0.0112
Funkcionalne krive	Funkcionalna kriva 1	0.0010
	Funkcionalna kriva 2	0.0077

Pored rezultata analize rasporeda dinamičkih pritisaka, od interesa je svakako i domet mlaza ski odskoka.

Domet mlaza je određen na osnovu modelskih ispitivanja, odnosno njegova vrijednost je procijenjena za računski protok, i iznosi oko cca. 70.0 m. Vrijednost koje se dobijaju pomoću jednačina za domet mlaza kod "standardnog" odskoka iznosi cca. 85.0 metara. Vrijednost dometa mlaza koja se dobija na osnovu jednačine za standardni skok veća je u odnosu na vrijednost dobijenu modelskim ispitivanjima. Razlog za to je pre svega geometrija kašike ski odskoka.

6. DISKUSIJA REZULTATA

Ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza je evakuacioni objekat koji se primjenjuje u slučajevima kada nije moguće primijeniti "standardni" ski odskok. Topografski uslovi terena definišu uslove izbora rješenja. Primjena ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza treba da bude praćena modelskim ispitivanjima.

Prikazani rezultati odnosili su se na mjerenja pritiska prilikom modelskih ispitivanja na brani HE Zavoj, duž kašike ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza. Prikazani rezultati odnosili su se na raspored pritiska koje su poređeni sa eksperimentalnim krivima kao i funkcionalnih krivi koje su formirane na osnovu modelskih ispitivanja. Kao mjera slaganja mjernih tačaka sa eksperimentalnim krivima i formiranim krivima jeste srednje kvadratno odstupanje.

Prikazani raspored mjernih tačaka u bezdimenzionalnom obliku prilikom mjerenja pritisak najbolje odgovara izrazu kojeg su predložili *Juon i Hager* (2000), jer ima najmanju vrijednost srednjeg kvadratnog odstupanja. Ostala dva izraza predložena od strane *Heller-a* (2005) i *O. A. Yamini* saradnici (2020), imaju veća odstupanja u odnosu na mjerne tačke, odnosno imaju veće srednje kvadratno odstupanje. Troparametarska kriva 1, predložena u ovom radu, daje bolji raspored pritisaka u bezdimenzionalnom obliku, a pri tome ima i najmanje srednje kvadratno odstupanje. Predložena kriva 2, ima nešto veće srednje kvadratno odstupanje u odnosu na krivu 1. Predložene zavisnosti su nastale na osnovu rezultata modelskog ispitivanja za ski odskok sa horizontalnim skretanjem mlaza po osovini kašike. Svakako da ove krive treba provjeriti na većem broju modela.

Procijenjene vrijednosti dometa mlaza ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza su manja u odnosu na vrijednosti za "standardni" ski odskok. Skretanje mlaza omogućava dodatnu aeraciju mlaza a ujedno i manji domet mlaza. Domet mlaza svakako zavisi od uslova strujanja u kašici odskoka, odnosno same njene geometrije, pa prema tome i nema opšteg izraza koji može da se preporuči za proračun dometa. Stoga bi svako novo rješenje trebalo provjeriti/potvrditi modelskim ispitivanjima.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu istraživane su osnovne karakteristike ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza. I ako u praksi nema mnogo objekata sa ovim tipom evakuacionih organa, za potrebe ovog rada bila su dostupna hidraulička modelska ispitivanja brane HE Zavoj kod Pirota. Od interesa su bili rezultati mjerenja pritiska i dometa mlaza. Na osnovu sprovedene analize, utvrđeno je sledeće:

1. Primjena ski odskoka sa horizontalnim skretanjem mlaza opravdana je u slučajevima kada je potrebno da se mlaz skrene u horizontalnom pravcu,
2. Sa horizontalnim skretanjem mlaza omogućena je dodatna aeracija mlaza prije nego što mlaz udari u nizvodno korito,
3. Raspored dinamičkih pritisaka zavisi od geometrijskih karakteristika kašike,
4. Izraz iz literature za procjenu rasporeda dinamičkih pritisaka duž kašike pokazuju dobro slaganje sa mjernim vrijednostima, od kojih najbolje slaganje daju izraz kojeg su predložili *Juon i Hager* (2000),
5. Izraz za procjenu rasporeda dinamičkih pritisaka koje su preporučili autori ovog rada (kriva 1 sa tri parametra), pokazuje bolje slaganje u odnosu na postojeće izraze iz literature,
6. Domet mlaza kod ski odskoka sa horizontalnim skretanjem je manji u odnosu na vrijednosti koje se dobijaju na osnovu izraza za domet mlaza "standardnog" skoka.

ZAHVALNOST

Autori rada se zahvaljuju kolegi Aleksandru Cvetkoviću iz Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi" AD Beograd, na ustupljenim podacima za istraživanje.

LITERATURA

- [1] Beichley G.I. (1971), "Hydraulic Design of Stilling Basin for Pipe or Channel Outlets." *U S Bur Reclam, Res Rep* 24.
- [2] Heller, Valentin, Willi H. Hager, and Hans-Erwin Minor (2005), "Ski Jump Hydraulics." *Journal of Hydraulic Engineering* 131 (5): 347–55. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339429\(2005\)13](https://doi.org/10.1061/(asce)07339429(2005)13).
- [3] Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (1982), "HE Zavoj, Izvještaj o hidrauličkim modelskih ispitivanjima preliva brzotoka i odskoka", Beograd
- [4] Juon, Roman, and Willi H. Hager (2000), "Flip Bucket without and with Deflectors." *Journal of Hydraulic Engineering* 126 (11): 837–45. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339429\(2000\)12](https://doi.org/10.1061/(asce)07339429(2000)12).
- [5] Khani, Salar, Mehdi Azhdary, and Mohammad Nikookar (2017), "Pressure Fluctuations Investigation on the Curve of Flip Buckets Using Analytical and Numerical Methods" 03 (December): 165–71.
- [6] Khatsuria R. M. (2005), "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators" Department of Civil and Environmental Engineering
- [7] Savić Ljubodrag (2009), "Uvod u hidrotehnicke gradevine", Građevinski fakultet Beograd
- [8] Yamini, Omid Aminoroayaie, Mohammad Reza Kavianpour, and Azin Movahedi (2020), "Performance of Hydrodynamics Flow on Flip Buckets Spillway for Flood Control in Large Dam Reservoirs," *J. Human, Earth, Futur.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–47, 2020, doi: 10.28991/hef-2020-01-01-05

SKI-JUMPS WITH BEND IN HORIZONTAL PLANE

by

Petar PRAŠTALO

University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy
Budo ZINDOVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ
University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

Summary

Ski jumps are standard overflow structures for high dams. They are intended to induce energy loss of a jet before it impinges the tail water. To further increase the jet aeration and energy losses, one option is to use ski jump with bend in horizontal plane. Requirement for this kind of overflow structure is adequate geological condition at the impingement point at the tail water. Hydraulic models should be used to verify the applicability in terms of extreme pressures on the bucket

and the deflection length. This paper presents the results of the hydraulic model of the spillway of HE Zavoj near Pirot. Results show that current empirical equations for estimating extreme pressures and deflection length can be improved. Further research is required to provide good estimates from engineering practice.

Key words: ski-jump, hydraulic model deflection length, pressure distribution.