

PRORAČUN PRELIVANJA KAMENOG PRAGA U REČNOM KORITU PRI MALIM VODAMA

Miodrag JOVANOVIĆ, Nikola ROSIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Ovaj rad je proizašao iz projekta kamenog praga u koritu Velike Morave kod Markovačkog mosta. Svrha praga je da osigura vodosnabdevanje TE „Morava” u periodu malih voda, zaustavi opštu eroziju korita i time ubrza njegovu stabilizaciju. Uticaj izrazito velike apsolutne rapavosti prelivne konture praga naročito dolazi do izražaja u periodu malih voda – pri malim dubinama prelivnog toka, a ogleda se u intenzivnoj turbulenciji i uvlačenju vazduha. U takvim uslovima, ne važi Manningova jednačina za linijske gubitke energije. Metoda Hartunga i Šerlajna, koja je primenjena u ovom radu, razmatra mešavinu vode i vazduha i shodno tome, omogućava procenu odgovarajuće vrednosti koeficijenta trenja. Primer praga na Moravi pokazuje da se linije nivoa, sračunate pomoću Manningove jednačine i po metodi Hartunga i Šerlajna, značajno razlikuju. To znači da se tanki prelivni tokovi na podlozi velike rapavosti ne smeju računati šablonski, već se moraju hidraulički analizirati posebno, kao lokalni fenomeni.

Ključne reči: kameni pragovi, apsolutna rapavost, aeracija otvorenih tokova

1. UVOD

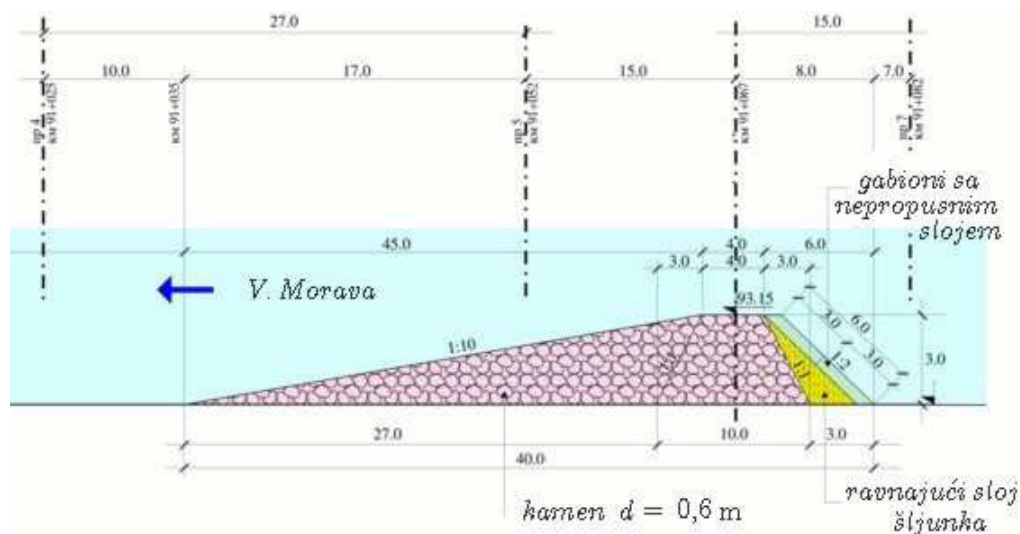
Prosecanje krivina u srednjem i donjem toku Velike Morave u prošlosti i prekomerna eksploatacija peska i šljunka u sadašnjosti, imaju za posledicu veliku opštu eroziju rečnog korita. Sniženje kota dna usled regresivne erozije iznosi u srednjem toku prosečno oko 3 m, što izaziva velike vodoprivredne probleme (nedostatak vode na vodozahvatima, sniženje nivoa podzemnih voda u priobalju itd.). Tipičan primer ovako nepovoljnog stanja je deonica kod Markovačkog mosta (km 90+900 – km 91+600, Slika 1).



Slika 1. Položaj projektovanog praga u koritu Velike Morave (km 91+067) i mesto njegove izgradnje, na početku radova [4].

U periodima malih voda, usled nedostatka vode na vodozahvatu, TE „Morava” u Svilajncu obustavlja rad i trpi ogromne finansijske gubitke. Nizak nivo u bunarima ovog energetskog postrojenja otežava rad sistema za zalivanje na pepelištu, što ozbiljno ugrožava životnu sredinu. Opšta i lokalna erozija korita potkopava stubove Markovačkog mosta. Izražena je i deformacija obala na razmatranoj deonici.

Projektovani prag u rečnom koritu, neposredno nizvodno od Markovačkog mosta (Slika 1), ima za cilj da obezbedi nesmetano snabdevanje vodom termo-elektrane i stabilizaciju rečnog korita [4]. Poprečni presek praga, sa jednom varijantom konstruktivnog rešenja, prikazan je na Slici 2.



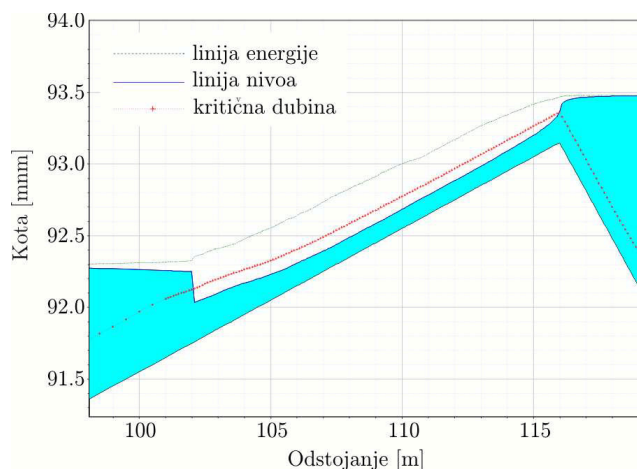
Slika 2. Poprečni presek praga na najdubljem delu korita; kota krune praga određena je iz uslova da se pri merodavnoj maloj vodi $Q=26 \text{ m}^3/\text{s}$, uzvodno na vodozahvatu TE „Morava” ostvari najmanja radna dubina od 0,75 m; dužina praga iznosi oko 80 m, širina u kruni, 4 m, a visina $1 \div 3$ m; prelivna kontura sastoji se od krupnog kamena srednjeg prečnika 0,6 m [4].

2. PROBLEM TANKOG PRELIVNOG MLAZA NA PODLOZI VELIKE APSOLUTNE RAPAVOSTI

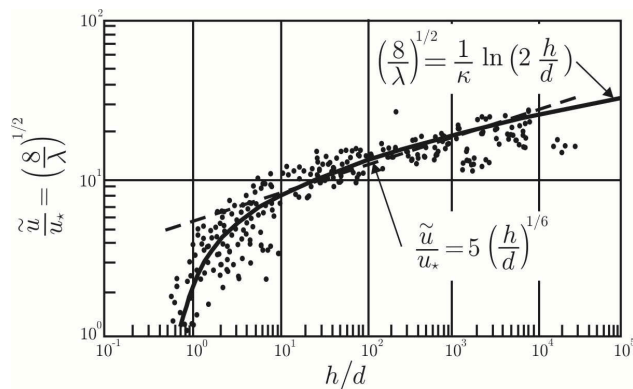
Proračun linija nivoa obavljen je „rutinski”, primenom linijskog modela ustaljenog nejednolikog tečenja (programski paket HEC-RAS). Na osnovu uzoraka nanosa, psamoloških i hidrauličkih analiza, kao i podataka prikupljenih obilaskom terena, usvojena je vrednost Maningovog koeficijenta otpora za datu deonicu od $0,030 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$. Procena je da se ova vrednost malo menja sa protokom/vodostajem. U zoni praga, gustina računskih profila je drastično povećana (razmak profila reda veličine 1 m). Pri protoku statistički određene ekstremno male vode, koja iznosi $Q=26 \text{ m}^3/\text{s}$, tečenje na pragu je u mešovitom režimu; na kruni praga javlja se kritična dubina, dok se na donjem delu kosine praga uspostavlja hidraulički skok, kao što prikazuje uzdužni profil na Slici 3.

Prelivanje praga u uslovima malih protoka detaljnije je analizirano iz sledećih razloga:

- (i) Pri malim vodama, javlja se problem tankog prelivnog mlaza na podlozi velike apsolutne rapavosti. Odnos dubine i apsolutne rapavosti je tada daleko ispod donje granice primenljivosti Maningove jednačine od 2,5 [6], na šta ukazuju i empirijski rezultati na Slici 4.
- (ii) Kod prelivnih tokova male dubine, velika rapavost utiče na povećanje intenziteta turbulencije i uvlačenje vazduha, tako da se javlja tečenje *mešovine* vode i vazduha, koje se ne može pouzdano opisati standardnim jednačinama za „čistu” vodu.
- (iii) Pojava hidrauličkog skoka na nizvodnoj kosini praga narušava stabilnost kamenog nabačaja, što je razlog za reviziju hidrauličkog proračuna i eventualno preispitivanje konstrukcije praga.



Slika 3. Tečenje preko praga pri ekstremno maloj vodi i vrednosti Manningovog koeficijenta $n = 0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$



Slika 4. Eksperimentalna zavisnost koeficijenta trenja (λ) od relativne rapavosti (h/d) za prirodne vodotoke [3,5]; težišna kriva u obliku logaritamske funkcije dobro opisuje rezultate merenja u čitavom opsegu relativnih rapavosti, a Manningova jednačina, sa koeficijentom $n = d^{1/6}/16$, samo u opsegu $10 \div 10^4$. To znači da Manningova jednačina nije pogodna za vrlo plitke tokove sa krupnim nanosom ($h < 10d$) i vrlo duboke tokove sa sitnim nanosom ($h > 10000d$).

Formiranje graničnog sloja i uvlačenje vazduha na prelivima praktičnih profila je široko istraživana tema, nezaobilazna u knjigama o hidrotehničkim građevinama [8,9]. Veliki je i broj radova koji se bave specifičnim problemima ovazdušenja (aeracije) otvorenih tokova, kao što je na primer problem stepenastih preliiva [1], ili problem efekata razmere u eksperimentalnim istraživanjima [10]. Međutim, u literaturi je malo rezultata koji se odnose na problem tankog prelivnog mlaza na strmoj podlozi od krupnog kamena, čiji je ekvivalentni (nominalni) prečnik u datom slučaju 0,6 m!

Pretragom radova koji su objavljivani na kongresima Međunarodnog društva za velike brane (ICOLD), pronađeni su radovi koji se odnose na preliivanje nasutih kamenih brana, a koji mogu biti od koristi u rešavanju konkretnog problema. U tom smislu, od interesa je rad nemačkih autora Hartunga (Hartung) i Šerlajna (Scheuerlein), koji je objavljen na kongresu u Montrealu još 1970. godine [2]. Ovaj rad je od praktičnog značaja, jer omogućava relativno jednostavan hidraulički proračun ovazdušenih prelivnih tokova na branama od kamena. Domen važnosti eksperimentalnih rezultata na kojima je zasnovana računaska metoda dodatno je razmatran u radu [6].

Metoda Hartunga i Šerlajna polazi od kombinacije izraza za logaritamski raspored brzine po dubini i za ustaljeno jednoliko tečenje [3]:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(12 \frac{h}{d}\right), \quad (1)$$

odnosno,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2,3}{\kappa \sqrt{8}} \log\left(12 \frac{h}{d}\right), \quad (2)$$

gde je h – dubina, d – prečnik kamena (ekvivalentni prečnik lopte čija je zapremina jednaka zapremini kamenog komada), λ – bezdimenzioni Darsi-Vajsbahovov koeficijent trenja i $\kappa = 0,4$ – fon Karmanova konstanta.

Autori koriguju izraz (2) na ovaj način:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 3,2 \log\left(\frac{12}{c} \cdot \frac{h}{d}\right), \quad (3)$$

gde je c – empirijski definisan korekcionni faktor dubine usled aeracije prelivnog mlaza:

$$c = \sigma(1,7 + 8,1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \alpha). \quad (4)$$

U ovom izrazu je: σ – parametar aeracije mlaza, α – ugao koji prelivna kosina zaklapa sa horizontalom, a Φ_2 – faktor „pakovanja” kamenih komada.

Faktor aeracije, koji predstavlja odnos gustine mešavine vode i vazduha (ρ_m) i gustine vode (ρ), može se sračunati pomoću izraza:

$$\sigma \equiv \frac{\rho_m}{\rho} = 1 - 1,3 \sin \alpha + 0,24 \frac{h}{d}. \quad (5)$$

Faktor „pakovanja” kamenih komada predstavlja odnos prosečne visine jednog elementa apsolutne rapavosti i prosečnog odstojanja između tih elementa. Prema navodima iz literature [6], u praksi se mogu koristiti sledeće vrednosti: $\Phi_2=0,625$ za kameni nabačaj, a $\Phi_2=1,125$ za ručno slagan (uklapan) kamen.

Srednja brzina po dubini *mešavine* vode i vazduha jednaka je:

$$\tilde{u}_m = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot u_* = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

pa je jedinični protok „čiste vode”:

$$q = \sigma \cdot \tilde{u}_m \cdot h, \quad (7)$$

gde je: $\sigma \cdot \tilde{u}_m$ – po dubini osrednjena brzina toka „čiste vode”, a h – njegova dubina.

Kritična brzina pokretanja kamenog komada je izvedena modifikacijom poznatog obrasca Izbaša (Isbash) [3]:

$$u_{c,m} = \frac{1,2}{\sqrt{\sigma}} \sqrt{2g \cdot \Delta \cdot d \cdot \cos \alpha}, \quad (8)$$

gde je: $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho = 1,65 \div 1,7$ – relativna gustina kamena.

Algoritam proračuna. Za dati jedinični protok \hat{q} i izabrane vrednosti $\alpha, d, \Delta, \Phi_2$, iz jednačina (3), (4), (5), (6) i (7), računaju se nepoznate h, c, σ, λ i q . Proračun se obavlja iterativno, sve dok se ne zadovolji uslov da je računski jedinični protok približno jednak zadatom protoku: $q \approx \hat{q}$. Ograničenja su da faktor aeracije mora biti manji od jedan ($\sigma < 1$) i da brzina \tilde{u}_m mora biti manja od kritične brzine $u_{c,m}$.

3. REZULTATI PRORAČUNA

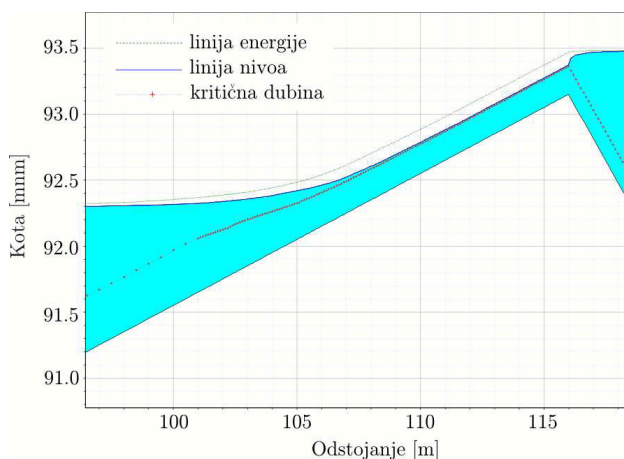
U datom slučaju su usvojene vrednosti: $d=0,6$ m, $\Delta=1,7$ i $\Phi_2=0,7$. Zadatom jediničnom protoku male vode $\hat{q}=0,32$ m³/(s m) odgovara *kritična dubina* $h_k=0,22$ m. Rezultati iterativnog proračuna dati su u Tabeli 1.

Tabela 1. Rezultati proračuna po metodi Hartunga i Šerlajna

h [m]	σ [-]	c [-]	λ [-]	\tilde{u}_m [m/s]	$u_{c,m}$ [m/s]	q [m ² /s]	Fr [-]
0,233	0,96	2,18	0,89	1,42	5,45	0,32	0,89

Može se izvući nekoliko interesantnih zaključaka. Koeficijent rapavosti ima izuzetno veliku vrednost: $\lambda=0,89$, koja je van opsega uobičajenih vrednosti na dijagramu $\lambda = \lambda(h/d)$ za otvorene tokove [3], što je posledica izuzetno male vrednosti h/d . Ekvivalentna vrednost Manningovog koeficijenta iznosila bi: $n \approx 0,08$ m^{-1/3} s. Povećana rapavost i ovazdušenje prelivnog toka čine da je preliivanje u mirnom režimu, na granici kritičnog tečenja. Hidraulički proračun, revidovan na osnovu rezultata iz Tabele 1, daje liniju nivoa na pragu prikazanu na Slici 5.

Iako za sada ne postoji mogućnost provere dobijenih rezultata, oni nedvosmisleno potvrđuju činjenicu da se prelivni tokovi na veoma rapavoj podlozi moraju tretirati kao lokalni fenomeni. Pri tome je uputno da se uticaj raznih neizvesnosti ispita analizom osetljivosti rezultata na vrednosti računskih parametara. U uslovima srednjih i velikih voda, odnos dubine i apsolutne rapavosti je daleko veći od 2,5, pa se tečenje preko praga ne mora posebno razmatrati kao lokalni fenomen.



Slika 5. Tečenje preko praga pri maloj vodi, vodeći računa o velikoj rapavosti i ovazdušenju prelivnog mlaza [7].

4. ZAKLJUČCI

1. Hidraulički proračuni ustaljenog i neustaljenog linijskog tečenja u prirodnim vodotocima danas se rutinski obavljaju primenom savremenih softverskih paketa. Tečenje preko kamenog praga u periodu malih voda predstavlja specifičnu hidrauličku pojavu, a „šablonski” obavljen proračun linije nivoa, ne tretirajući prag kao lokalni fenomen, može u uslovima malih voda dati pogrešan rezultat.
2. Prelivanje na izrazito rapavoj podlozi pri malom protoku ne može se računati primenom Manningove jednačine. Pri vrednostima odnosa dubine i apsolutne rapavosti koje su manje od 2,5, linijske gubitke energije treba računati koristeći bezdimenzioni koeficijent trenja (λ), koji obuhvata uticaj povećane turbulencije i aeracije toka.
3. Empirijska metoda Hartunga i Šerlajna omogućava da se relativno lako obuhvate pomenuti uticaji, na nivou tačnosti koji je prihvatljiv za inženjersku praksu.

LITERATURA

- [1] Chanson, H., Toombes, L. (2003) *Strong Interactions between Free-Surface Aeration and Turbulence in an Open Channel Flow*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, No. 5.
- [2] Hartung, F., Scheuerlein, H. (1970) *Design of Overflow Rockfill Dams*, Q. 36, R. 35, Dixième Congrès des Grands Barrages, Montréal.
- [3] Jovanović, M. (2008) *Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija*, drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje, Građevinski fakultet, Beograd.
- [4] Jovanović, M. i dr. (2007) *Projekat hitnih intervencija u koritu Velike Morave nizvodno od Markovačkog mosta radi poboljšanja snabdevanja vodom TE „Morava”*, Građevinski fakultet i Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi”, Beograd.
- [5] Julien, P. Y. (2002) *River Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Knauss, J. (1979) *Computation of Maximum Discharge at Overflow Rockfill Dams*, Q. 50, R. 9, Treizième Congrès des Grands Barrages, New Delhi.
- [7] Rosić, N. (2008) *Mere za stabilizaciju korita reke Velike Morave u zoni Markovačkog mosta*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Beograd.
- [8] Savić, Lj. (2003) *Uvod u hidrotehničke gradjevine*, Građevinski fakultet, Beograd.
- [9] Smith, D.C. (1995) *Hydraulic Structures*, University of Saskatchewan.
- [10] Wood, I.R., (1984) *Air Entrainment in High Speed Flows*, Symposium on Scale Effects in Modelling

CALCULATION OF STONE SILL OVERFLOWING DURING LOW DISCHARGES

by

Miodrag JOVANOVIĆ, Nikola ROSIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

This paper is inspired by a stone sill designed in the channel of the Velika Morava river (near Markovački bridge, Serbia), in order to ensure water supply of the Thermal Power Plant „Morava” during low flows, and to terminate erosion of the river bed, thus accelerating its stabilization. The impact of extremely high absolute roughness of the sill is particularly strong during low discharges and small water depths, and is manifested by intensive turbulence and air entrainment. Under such flow conditions, the Manning equation for energy loss calculation is not valid. The method by Hartung and Scheuerlein, applied in this case, considers the water-air mixture, and accordingly offers an

iterative procedure for estimation of the roughness coefficient value. The Morava river stone sill case study shows that the water surface longitudinal profiles, calculated by the Manning equation, and by the Hartung and Scheuerlein method, differ significantly. Therefore, small-depth flows over very rough surfaces are not be calculated in a routine way, but have to be considered as a separate local phenomena.

Key words: stone sills, absolute roughness, aeration of free-surface flows

Redigovano 30.05.2010.