

## HIDRAULIČKA MODELSKA ISPITIVANJA STEPENASTOG PRELIVA NA DVA MODELA RAZLIČITIH RAZMERA

Dragiša ŽUGIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
Doc. Radomir KAPOR, dipl. građ. inž.<sup>2</sup>, rkapor@hikom.grf.bg.ac.yu  
Vladimir POP TRAJKOVIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
Novica PETROVIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
Milan RULA, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd

<sup>2</sup> Građevinski fakultet, Beograd,

### REZIME

U radu se prikazuju hidraulička modelska ispitivanja stepenastog preliva brane "Bogovina", koja će biti izgrađena u okolini Bora. U toku ispitivanja korišćeni su hidraulički model celine i parcijalni hidraulički model. Na modelu celine, u razmeri za dužine 1:45, predstavljeni su deo akumulacije, brana sa prelivom i slapištem i nizvodni deo rečne doline. Na parcijalnom modelu, u razmeri za dužine 1:12, predstavljen je samo deo prelivne ivice, koji je manji od širine jednog prelivnog polja. Ispitivanja na modelu celine merodavna su za određivanje propusne moći preliva, a ispitivanja na parcijalnom modelu za određivanje disipacije energije na stepenastom brzotoku preliva.

**Ključne reči:** stepenasti preliv, stepenasti brzotok, disipacija energije, visoke brane

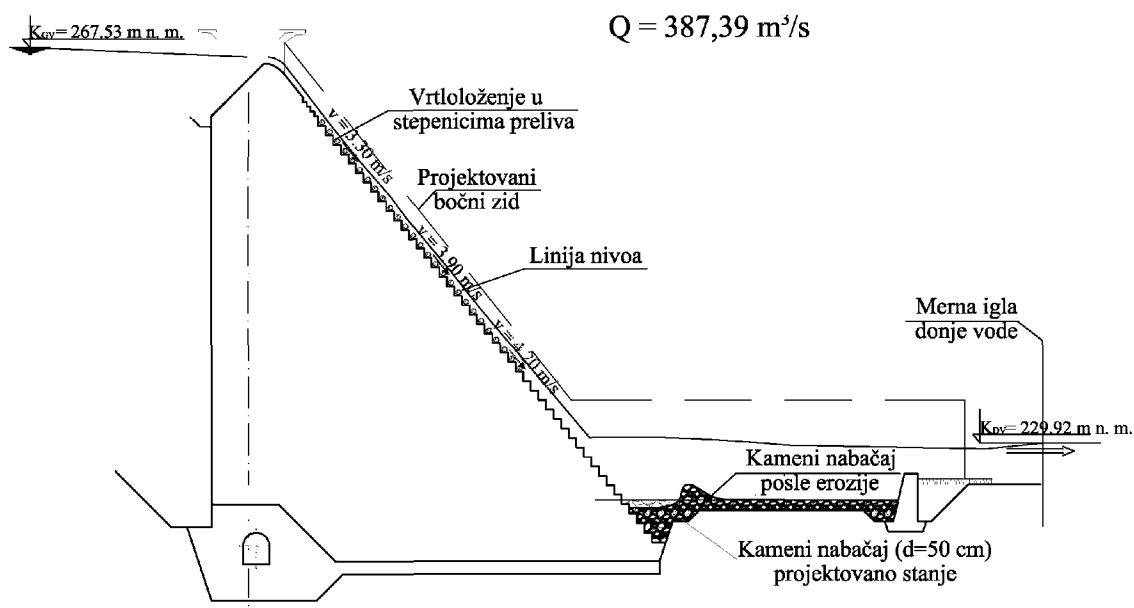
### 1 UVOD

Brane građene od valjanog betona imaju stepenaste strane. Zbog toga je prirodno da se i prelive na takvim branama grade sa stepenicama. Tako se ista tehnologija gradnje može primeniti za prelivni i neprelivni deo brane. Prilikom prelivanja preko preliva stepenasta površina "oduzima" mehaničku energiju toka vode i smanjuje mehaničku energiju koju treba "uništiti" u slapištu. Sa druge strane lako je izgraditi preliv sa dugom prelivnom ivicom i malim jediničnim proticajem. To su razlozi zbog kojih je stepenasti preliv

hidraulički povoljnije rešenje za evakuacije velikih voda, od preliva sa klasičnim – glatkim brzotokom.

Na Crnom Timoku, na pregradnom mestu Cukloj, uzvodno od ušća reke Arnate, planira se izgradnja betonske gravitacione brane "Bogovina", od valjanog betona [1]. Brana građevinske visine 54 m i dužine u kruni od 396 m, formiraće akumulaciju kote normalnog uspora na 266 m n. m., ukupne zapremine  $47 \times 10^6 \text{ m}^3$  i korisne zapremine  $44 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Akumulisana voda koristiće se za dugoročno snabdevanje vodom Istočne Srbije.

Za evakuaciju velikih voda na brani projektovan je preliv čeonog tipa (Kriger – Officer), sa uzvodnom zakošenom stranom, nagiba 1:1 (slika 1.). Preliv se nalazi u centralnom delu brane, ukupne dužine prelivne ivice 115 m. Prelivni deo brane uključuje 8 stubova, širine 2 m (za most preko preliva), pa je aktivna dužina prelivne ivice 99 m. Preliv je projektovan za proticaj od  $Q_{P=0.01\%} = 372 \text{ m}^3/\text{s}$ , bez ustava. Brzotok je izgrađen stepenasto, sa nagibom 1:0.8. Predviđena su 4 stepenika visine  $s = 0.45 \text{ m}$  i širine  $l = 0.36 \text{ m}$  i 45 stepenika visine  $s = 0.9 \text{ m}$  i širine  $l = 0.72 \text{ m}$ . Nizvodno od brzotoka je slapište sa bučnicom i pragom, iste širine kao i preliv. Dno slapišta je niže za 2 m od dna reke i pokriveno je kamenim nabačajem debljine 1 m (blokovi  $d = 0.5 \text{ m}$ ). Na nizvodnom kraju slapišta je betonski prag, čija je kruna 2.5 m iznad dna slapišta i 0.5 m iznad rečnog korita. Kao i preliv, i slapište je dimenzionisano za evakuaciju transformisanog poplavnog talasa deset-hiljadugodišnje vode.



Slika 1. Poprečni presek kroz stepenasti preliv brane.

## 2. HIDRAULIČKA MODELSKA ISPITIVANJA

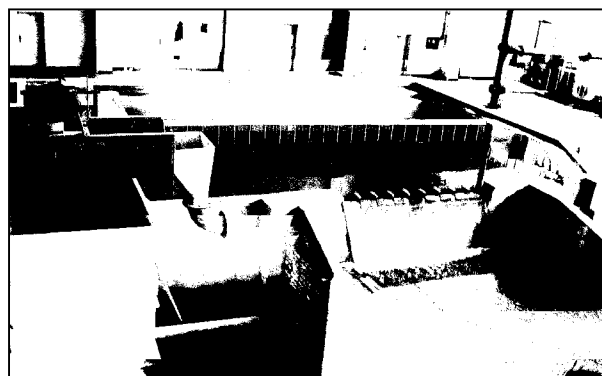
### 2.1 Uslovi hidrauličke sličnosti i izbor razmera modela

Da bi strujanja sa slobodnom površinom vode, na objektu i na hidrauličkom modelu, bila hidraulički slična potrebno je da su odnosi inercijalnih sila i sila težine jednaki. To znači da Froudeovi brojevi na objektu i modelu moraju biti jednaki. Pri tečenju vode preko stepenastog brzotoka dolazi i do mešanja vode i vazduha. Količina vazduha koji se nalazi u vodi značajno utiče na strujnu sliku (rasporede brzina), a time i na pretvaranje mehaničke energije u toplotu, odnosno na "gubitak energije" na brzotoku stepenastog preliva.

Mešanje vode i vazduha, odnosno uvlačenje vazduha u vodu, zavisi od brzine i rasporeda brzina vode, ali i od viskoznosti vode, stišljivosti vazduha i površinskog napona na razdelnoj površini između vode i vazduha. Sličnost mešanja vode i vazduha, na objektu i na modelu, nije moguće postići uz istovremeno zadovoljavanje Froudeove sličnosti. Ipak, izborom krupnije razmere mogu se smanjiti negativni efekti nepostojanja sličnosti za mešanje vode i vazduha na podnošljivu meru. Zbog toga je odlučeno da se grade hidraulički model celine i parcijalni hidraulički model preliva.

### 2.1.1 Hidraulički model celine

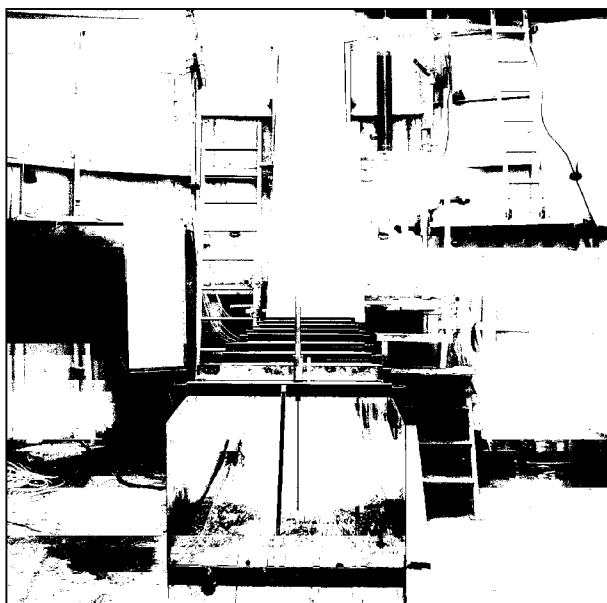
U Hidrauličkoj laboratoriji Zavoda za hidrauliku, Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi", izgrađen je hidraulički model celine (slika 2). Razmatrane su razmere za dužine 1:40, 1:45 i 1:50. Na osnovu raspoloživih pumpnih kapaciteta i dugogodišnjeg iskustva Hidrauličke laboratorije izabrana je razmera za dužine 1:45. Na modelu su predstavljeni: deo akumulacije od oko 350 m, uzvodno od brane, prelivna brana, slapište i nizvodna deonica do oko 150 m nizvodno od brane. Uzvodni i nizvodni granični uslovi na modelu ostvareni su na uobičajeni način.



Slika 2. Model celine

### 2.1.1 Parcijalni hidraulički model

Prema podacima iz literature [2] i [3] parcijalni hidraulički modeli za stepenaste prelive obično se rade sa razmerom za dužine od 1:10 do 1:12. Uz uobičajene jedinične proticaje  $q$ , ove razmere daju prihvatljivu sličnost za mešanje vode i vazduha, na objektu i modelu. Na parcijalnim modelima preliva, gde se "vadi" nekoliko dužnih metara iz prelivne ivice, problem predstavljaju i uticaji bočnih zidova koji ne postoje na objektu. Veće rastojanje između zidova zahteva veći proticaj, a ako je rastojanje isuviše malo granični slojevi na vertikalnim zidovima previše će uticati na strujanje. U tom slučaju neće biti sličnosti između strujanja na parcijalnom hidrauličkom modelu i strujanja na objektu. Vodeći računa o opisanim zavisnostima izabrana je razmera za dužine na parcijalnom hidrauličkom modelu 1:12, uz prelivnu ivicu (širinu modela) od 60 cm (slika 3.). Ovoj prelivnoj ivici odgovara 7.2 m prelivne ivice na objektu. Kako je širina prelivnih polja između razdelnih stubova 11 m, na parcijalnom modelu nisu predstavljeni razdelni stubovi.



Slika 3. Parcijalni hidraulički model model

## 2.2 Rezultati hidrauličkih modelskih ispitivanja

Zahvaljujući izgradnji dva hidraulička modela (celine i parcijalnog) u toku ispitivanja svaki model je korišćen samo u delu u kome ima prednosti. Tako je kapacitet preliva određen na modelu celine, a efikasnost stepenastog brzotoka na disipaciji mehaničke energije vode proverena je na parcijalnom modelu.

### 2.2.1 Propusna moć preliva

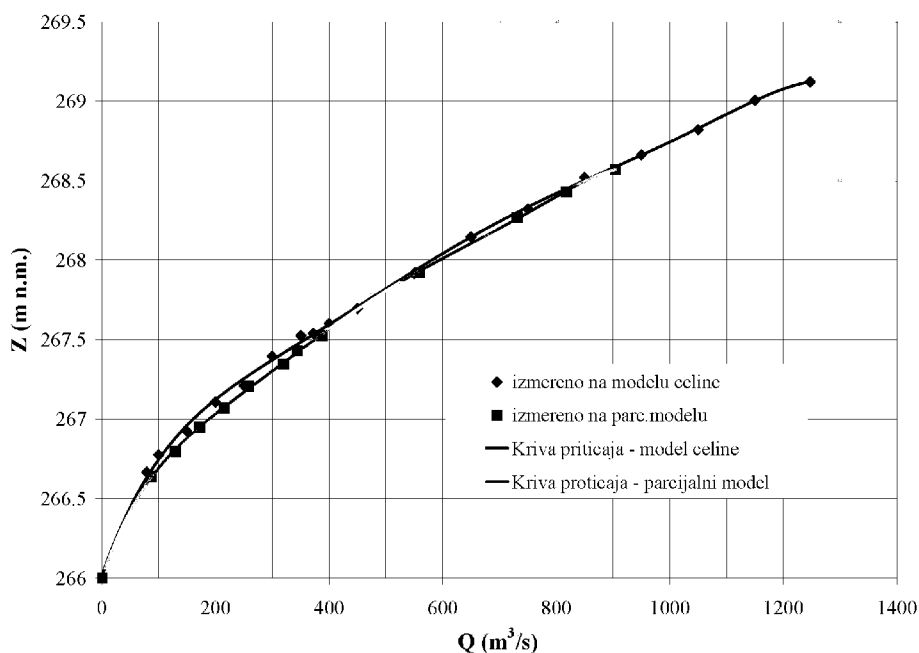
Na slici 4. prikazana je izmerena propusna moć preliva na modelu celine (crna kriva), kao i izmerena propusna moć preliva na brzotoku (zelena kriva), koja je preračunata za ukupnu dužinu prelivne ivice. Za propusnu moć preliva na objektu je merodavna prva kriva, a druga kriva pokazuje da su i na parcijalnom modelu, za iste kote nivoa vode u akumulaciji ostvareni slični, ali nešto veći proticaji.

Prema ispitivanjima na modelu celine, za proticaj za koji je projektovan preliv  $Q_P = 372 \text{ m}^3/\text{s}$ , koeficijent prelivanja je  $m = 0.445$ . Za proticaje koji su veći od projektovanog koeficijenti prelivanja rastu. Tako za  $Q_{MPF} = 1247 \text{ m}^3/\text{s}$  odgovarajući koeficijent prelivanja je  $m = 0.515$ . Povećanje vrednosti koeficijenta prelivanja je posledica pojave podpritisa na konturi preliva. Obzirom da poplavni talas traje oko 7 sati i da potpitisici nisu značajni ne postoji opasnost od kavitacije i erozije betonskog preliva.

Uzrok različite propusne moći preliva, na dva hidraulička modela, je u različitim uslovima priticanja vode iz akumulacije ka prelivu. Model celine verno prikazuje prelivnu ivicu sa svim razdelnim stubovima i zidovima za uvođenje vode na krajnjim prelivnim poljima. Na parcijalnom modelu širina preliva je manja od širine jednog prelivnog polja, zbog čega je bilo potrebno da se u akumulaciji na modelu postave uvodni zidovi (slika 5.). Oni su pomogli da se na parcijalnom modelu, koji pretpostavlja dvodimenzionalno strujanje (u vertikalnoj ravni), ostvari skoro ravansko tečenje. Ipak može se zaključiti da su uvodni zidovi "previše" popravili uslove strujanja ka prelivu na parcijalnom modelu i tako doprineli većoj propusnoj moći preliva. Kako je za propusnu moć preliva merodavan model celine, uvodni zidovi nisu menjani, jer je važnije da se ostvari dvodimenzionalnost strujanja na parcijalnom modelu nego da se dobije bolje slaganje propusne moći preliva, na dva hidraulička modela.

### 2.2.1 Tečenje na stepenastom brzotoku

Za efikasnost stepenastog brzotoka i slapišta, koje mu odgovara, najvažnije je da se što više mehaničke energije toka pretvori u toplotnu energiju. U tom procesu disipacije energije važnu ulogu ima vazduh koga voda zahvata i koji je istovremeno indikator strujanja na brzotoku. Hidraulička ispitivanja na modelu celine pokazala su da na tom modelu ne dolazi do mešanja vode i vazduha (slika 2.) i pri najvećim



Slika 4. Izmerena propusna moć preliva na modelu celine i parcijalnom modelu.



Slika 5. Uvodni zidovi u akumulaciji, na parcijalnom hidrauličkom modelu.

proticajima. Tokom ispitivanja na parcijalnom hidrauličkom modelu vazduh se na jednom delu brzotoka uvek mešao sa vodom (slika 3.). Može se zaključiti da se na modelu celine zbog uticaja viskoznosti i površinskog napona (efekti razmere) na stepenastom brzotoku ne ostvaruje sličnost sa tečenjem u prirodi. Zato su za tečenje na stepenastom delu brzotoka merodavna ispitivanja na parcijalnom hidrauličkom modelu.

Prema literaturu, tečenje na stepenastom brzotoku može biti skokovito, ili klizeće [4]. U toku ispitivanja na parcijalnom hidrauličkom modelu, samo za proticaj od svega 20 m<sup>3</sup>/s je ustanovljeno skokovito tečenje. Pri svim većim proticajima tečenje je bilo klizeće. Zbog pomenutih efekata razmere (viskoznosti i površinskih napona), tečenje na hidrauličkom modelu celine je pri svim proticajima bilo klizeće. Da bi se definisali hidraulički uslovi duž stepenastog brzotoka na parcijalnom modelu je merena slobodna površina vode mernom iglom. Zbog mešanja vode i vazduha i intenzivne turbulencije određivan je "srednji" položaj slobodne površine vode. Ovakva merenja uopšte se nisu mogla obaviti na modelu celine.

I pri malom proticaju preko preliva, od 86.1 m<sup>3</sup>/s, zbog velikih izbočina koje predstavljaju stepenici na brzotoku, granični sloj je toliko deo da izlazi na slobodnu površinu i voda se meša sa vazduhom. Zbog vazduha mlaz vode na brzotoku povećava debljinu, a u udubljenjima stepenika stvaraju se recirkulacioni tokovi. Sve ovo ima za posledicu disipaciju mehaničke energije, koja raste sa povećanjem proticaja. Ipak, od nekog proticaja debljina sloja vode iznad stepenika toliko naraste da recirkulacioni tok ne uspeva da izađe na površinu mlaza. Posledica je manja disipacija mehaničke energije na tom delu brzotoka, uz nestanak vazduha u vodi. Ovaj nedostatak vazduha u vodi je

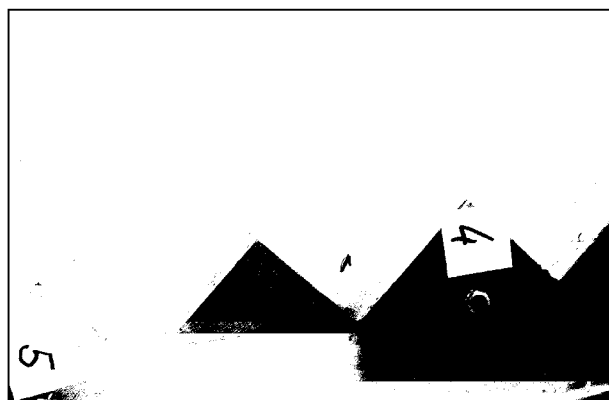
indikator manje disipacije mehaničke energije. Vrlo je važno da se ovakvo tečenje ne javi na većem delu stepenastog brzotoka. Na slici 6. prikazan je klizeći tok duž stepenastog brzotoka pri proticaju  $Q = 387 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na stepeniku koji ima oznaku "4" recirkulaciona zona ne uspeva da "izađe" na površinu mlaza.

Na slici 7. granica od koje granični sloj uspeva da izađe na površinu mlaza spušta se sa povećanjem proticaja, pa je za proticaj  $Q = 904 \text{ m}^3/\text{s}$  položaj granice značajno niži od položaja za proticaj  $Q = 215 \text{ m}^3/\text{s}$ . Povećavanje debljine mlaza na brzotoku smanjuje disipaciju mehaničke energije.

Da bi se odredila efikasnost disipacije mehaničke energije na stepenastom brzotoku merene su brzine vode na početku, sredini i nizvodnom kraju brzotoka. Rezultati merenja brzina prikazani su na slici 8.

Za merenje brzina mešavine vode i vazduha korišćeno je laboratorijsko hidrometrijsko krilo. Odnos dubine toka i prečnika elise je dozvoljavao da se meri samo u jednoj tački po dubini. Pošto je hidrometrijsko krilo tarirano u drugačijim hidrauličkim uslovima (mira voda u kanalu i hidrometrijsko krilo koje se kreće) izmerene brzine treba prihvatiti samo kao pokazatelj stvarnih brzina tečenja mešavine vode i vazduha. Najvažnije su brzine na kraju stepenastog brzotoka, jer one pokazuju kakva je efikasnost celog brzotoka i

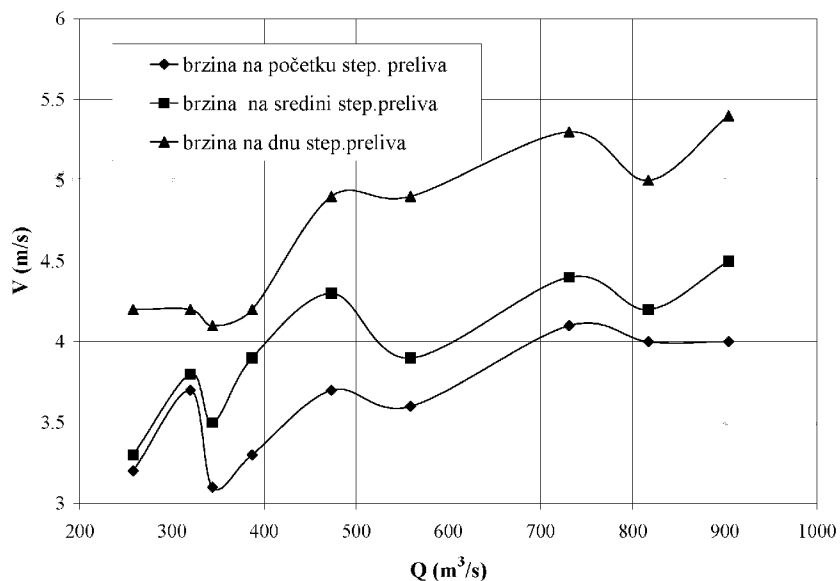
kojom brzinom mešavina vode i vazduha stiže u slapište. Sve do proticaja koji je sličan proticaju na koji je projektovan preliv  $Q_p = 372 \text{ m}^3/\text{s}$ , brzina strujanja je oko 4.2 m/s. Od tog proticaja pa do proticaja od oko 500  $\text{m}^3/\text{s}$  brzina strujanja se povećava na oko 4.9 m/s. Daljim povećanjem proticaja brzine strujanja rastu, uz fluktuacije, da bi za najveći proticaj, koji je ispitan na parcijalnom hidrauličkom modelu, od 904  $\text{m}^3/\text{s}$  porasle na 5.4 m/s. Treba primetiti da je za najveći ispitani proticaj nagib tangente značajno porastao, što ukazuje na smanjivanje efikasnosti stepenastog brzotoka.



Slika 6. Klizeći tok duž stepenastog brzotoka pri proticaju  $Q = 387 \text{ m}^3/\text{s}$ .



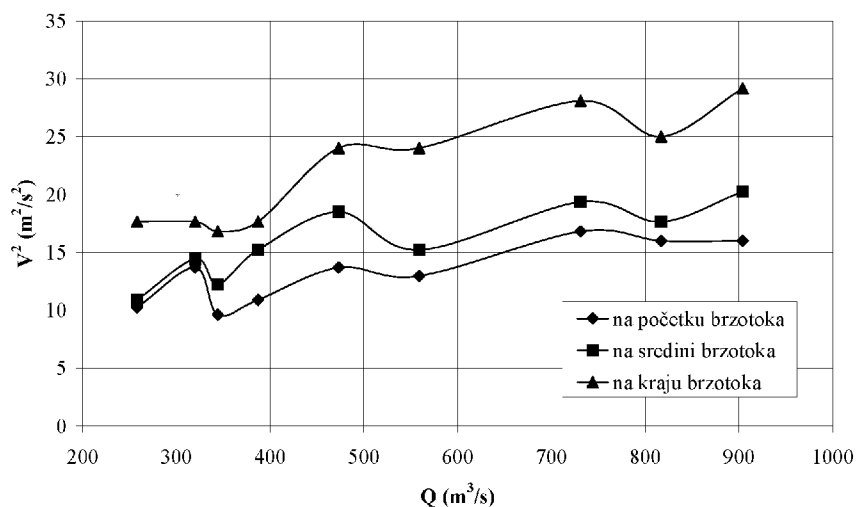
Slika 7. Pojava graničnog sloja na površini za proticaje  $Q = 215 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $Q = 904 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 8. Zavisnost brzine strujanja na brzotoku od proticaja.

Efikasnost stepenastog brzotoka, u transformisanju mehaničke energije u toplotu, može se prikazati i analizom promena kvadrata brzine strujanja  $V^2$ , jer su sa ovom veličinom proporcionalni fiktivna inercijalna sila i kinetička energija. Promene vrednosti kvadrata brzine strujanja, u zavisnosti od proticaja, date su na slici 9. Odnos kvadrata brzine za najveći ispitani proticaj na parcijalnom hidrauličkom modelu od 904 m³/s i proticaj  $Q_p = 372 \text{ m}^3/\text{s}$  je  $29 \text{ m}^2/\text{s}^2 / 18 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 1.61$ . Može se zaključiti da se za proticaj koji je veći od projektovanog za 2.4 puta inercijalna sila i kinetička energija povećaju za oko 1.6 puta.

U toku hidrauličkih ispitivanja stepen mešanja vode i vazduha nije meren. Ipak, izmerene vrednosti brzine strujanja mešavine vode i vazduha mogu pomoći da se on proceni. Ako se brzina strujanja pomnoži sa izmerenom površinom poprečnog preseka dobija se proticaj mešavine vode i vazduha, koji je dvostruko veći od proticaja vode. Iz toga se može zaključiti da se u mešavini na stepenastom brzotoku nalaze podjednake količine vode i vazduha



Slika 9. Zavisnost kvadrata brzine strujanja na brzotoku od proticaja.

### 3. ZAKLJUČCI

Za strujanje na stepenastom prelivu, pored inercijalnih i sila težine, važene su i viskozne sile i sile površinskog napona. Uslovi sličnosti, za takvo strujanje, ne mogu se postići na jednom hidrauličkom modelu. Dva modela sa različitim razmerama predstavljaju kompromis, kojim je moguće ispitati strujanje na stepenastom prelivu. Na hidrauličkom modelu celine utvrđuje se propusna moć preliva, a na parcijalnom modelu se proverava disipacija energije koja se ostvaruje na stepenastom brzotoku.

Dimenzionisanje stepenastog preliva zasniva na empirijskim formulama, za koje se često ne zna pod kojim su uslovima dobijene. Zbog toga je neophodno da se karakteristike evakuacionih objekata potvrde hidrauličkim modelskim ispitivanjima.

### LITERATURA

- [1] Kapor, R., Žugić, D., Pop Trajković, V., Petrović, N. (2006), *Brana "Bogovina", Glavni projekat, Deo A: Hidraulički model, Sveska 20: Elaborat o hidrauličkim modelskim ispitivanjima*, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Zavod za hidrauliku, Beograd.
- [2] Chanson, H., (1994), *Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways*, Journal of Hydraulic Reserch, Vol. 32, No. 3.
- [3] Chanson, H., (1996), *Prediction of the transition nappe/skimming flow on stepped channel*, Journal of Hydraulic Reserch, Vol. 34, No. 3.
- [4] Savić, Lj. M., (2003), *Uvod u hidrotehničke građevine*, Građevinski fakultet, Beograd.

## I INVESTIGATION OF A STEPPED SPILLWAY BY TWO MODELS OF DIFFERENT SCALES

by

Dragiša ŽUGIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
 Doc. Radomir KAPOR, dipl. građ. inž.<sup>2</sup>, rkapor@hikom.grf.bg.ac.yu  
 Vladimir POP TRAJKOVIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
 Novica PETROVIĆ, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>  
 Milan RULA, dipl. građ. inž.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd

<sup>2</sup> Građevinski fakultet, Beograd,

### Summary

This paper deals with hydraulic model investigations of the stepped spillway of the "Bogovina" dam, which is to be built near the town Bor (in Serbia). Two models were used: one for the entire dam, and the other for only a part of the spillway. The model of the entire dam, built to scale 1:45, contains a part of the reservoir, the dam with the spillway and the stilling basin, and the a part of the downstream valley. The partial model, built to scale 1:12, reproduces only a part of the spillway crest,

shorter than the width of a single spillway module. The investigations on the model of the entire dam are relevant for the determination of the overall spillway capacity, whereas the investigations on the partial model are aimed at the evaluation of the energy dissipation on the stepped spillway.

Key words: stepped spillway, stepped channel, energy disipation, high dams

Redigovano 18.05.2007.