

## NUMERIČKO MODELIRANJE BURNOG TEČENJA U KRIVINI ZATVORENOG PROVODNIKA

Milena LUČIĆ

Energoprojekt-Hidroinženjering

Ljubodrag SAVIĆ, Radomir KAPOR  
Građevinski fakultet u Beogradu

Nikola MLADENOVIĆ

Mašinski fakultet u Beogradu

### REZIME

Numeričko modeliranje burnog tečenja u krivini provodnika kružnog poprečnog preseka predstavlja nastavak ispitivanja koja su urađena na fizičkom modelu. Osnovni cilj primene numeričkog modela je da se proširi opseg ispitivanja, odnosno da se ispituju drugačije karakteristike krivine, kao i uslovi tečenja u provodniku, koji zbog ograničenosti kapaciteta laboratorije, nisu mogli da se ispituju na fizičkom modelu. Numerički model je formiranom u okviru programskog paketa Fluent (Ansys-Fluid Dynamic) i njegovom primenom su provereni opšti zaključci do kojih se došlo tokom modelskih ispitivanja, kao i primenljivost predloženih empirijskih izraza iz literature za nastanak određenog tipa tečenja u provodniku.

**Ključne reči:** buran tok, horizontalna krivina, zatvoreni provodnik, numerički model

### 1. UVOD

U zatvorenom provodniku sa horizontalnom krivinom pri burnom toku nastaje složeno strujanje, čije su karakteristike ispitane na hidrauličkom modelu i analizirane u radovima [3], [4] i [5]. Za proširenje opsega ispitivanja, odnosno za ispitivanje drugačijih karakteristika krivine i uslova tečenja u provodniku, koji zbog ograničenosti kapaciteta laboratorijske instalacije nisu mogli da se ispituju na hidrauličkom modelu, korišćen je numerički model. Ispitivanja na njemu se nadovezuju na ispitivanja na fizičkom modelu, koja su prikazana u literaturi [5].

Prvo su upoređeni rezultati numeričkih proračuna sa izvršenim opitima na fizičkom modelu, a zatim je ispitan i širi opseg zakrivljenosti, veći prečnici provodnika i „silovitiji“ uslovi tečenja. Proverena je primenljivost predloženih izraza iz literature [5] za nastanak određenog tipa tečenja u provodniku i za ove slučajeve i izvedeni su zaključci.

### 2. ISPITIVANJA NA FIZIČKOM MODELU I ZAKLJUČCI SPROVEDENE ANALIZE

Hidraulički model za ispitivanje burnog tečenja u krivini provodnika kružnog poprečnog preseka je napravljen u laboratoriji Instituta za Hidrotehniku i vodno-ekološko inženjerstvo, koja je deo Građevinskog fakulteta u Beogradu. Na njemu je analiziran oblik strujne slike koja se ostvaruje u provodniku pri određenim uslovima, pa je usvojena klasifikacija na četiri osnovna tipa tečenja [3], [4], [5]:

- 1) *Tečenje bez okretanja mlaza*, kod koga dolazi do povećanja nivoa vode duž konkavne strane krivine, ali on ne doseže do vrha provodnika.
- 2) *Prelazno tečenje*, kod koga maksimalna dubina na konkavnoj strani doseže do vrha provodnika, ali samo mali deo mlaza prelazi na suprotnu stranu.
- 3) *Helikoidno tečenje*, u slučaju da se mlaz sa konkavne strane krivine potpuno okrene po obimu provodnika i spoji sa tokom na konveksnoj strani.
- 4) *Zagušenje toka*, kod koga je pri okretanju mlaza po obimu provodnika ceo poprečni presek ispunjen mešavinom vode i vazduha, ne ostavljajući prostor za strujanje vazduha kroz njegov središnji deo.

Modelskim ispitivanjima je obuhvaćeno 14 različitih dispozicija provodnika, koje su određene kombinacijom zakrivljenosti i skretnog ugla [3], [5]. Ispitane su tri zakrivljenosti krivine ( $D/R = 1/2, 1/3, 1/4$ ) i četiri skretna ugla ( $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  i  $60^\circ$ ). Analiza je proširena i na veće skretne uglove ( $75^\circ$  i  $90^\circ$ ), ali samo za zakrivljenost  $D/R = 1/3$ .

Cilj modelskih ispitivanja je bio da se odrede uslovi pri kojima nastaje tečenje određenog tipa. Pod uslovima se ovde podrazumevaju i geometrijske karakteristike krivine (zakrivljenost i skretni ugao), kao i uslovi tečenja neposredno uzvodno od krivine (relativna dubina,  $h_0/D$ , i Frudov broj,  $Fr_0 = v_0/\sqrt{g A_0/B_0}$ ).

Ovako definisan Frudov broj je, formalno gledano, kvadratni koren iz Frudovog broja.

Na osnovu rezultata modelskih ispitivanja, definisani su empirijski izrazi, kojima se u zavisnosti od gore navedenih veličina definišu granice nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka [3] i [5].

### 3. NUMERIČKI MODEL

Numerički model se zasniva na rešavanju parcijalnih diferencijalnih jednačina prostornog strujanja vode i vazduha, kojima se opisuje razmatrano tečenje u provodniku. Primenjen je komercijalni programski paket Fluent (Ansys-Fluid Dynamic), koji koristi metodu konačnih zapremina za rešavanje ovih jednačina.

#### 3.1. Karakteristike numeričkog modela

S obzirom da pri analiziranom tečenju kroz provodnik struje i voda i vazduh, numerička simulacija je takođe urađena za dvofazno tečenje. Korišćen je VOF (Volume of Fluid) model, koji se preporučuje za modeliranje složenih strujanja kod otvorenih tokova. Računska oblast se sastoji od ćelija (kontrolnih zapremina), od kojih je svaka ispunjena nekom od faza, ili kombinacijom faza, kao što je slučaj u zoni slobodne površine vode.

Turbulencija je modelirana Rejnoldsovim naponskim modelom (RSM – Reynolds Stress Model), koji podrazumeva rešavanje 7 dodatnih jednačina. Usvojene su preporučene vrednosti parametara kojima se modelira turbulencija [1].

Za prostornu diskretizaciju promenljivih i određivanje zapreminskih udela vode i vazduha u mešavini u računskom domenu, korišćena je QUICK numerička

shema, koja je drugog reda tačnosti i predstavlja kombinaciju razlika drugog reda unazad i centralnih razlika, sa zadatim težinskim faktorom [1]. Usvojena je apsolutna hrapavost provodnika od  $k = 0,0015$  mm.

#### 3.2. Granični i početni uslovi

S obzirom da se modelira burno tečenje, zadaje se nivo slobodne površine vode i maseni protok vode i vazduha, na uzvodnom kraju provodnika. Na nizvodnom kraju provodnika je zadato slobodno isticanje. Nepoznate veličine na nizvodnom kraju se određuju ekstrapolacijom odgovarajućih veličina iz unutrašnjeg dela domena.

Modelira se ustaljeno tečenje. Proračun se vrši iterativno, pa pretpostavljena strujna slika u provodniku na početku proračuna predstavlja prvu iteraciju, odnosno početno stanje. Kada razlike između odgovarajućih veličina u uzastopnim iteracijama postanu dovoljno male, smatra se da je postignuta konvergencija, pa aktuelna strujna slika u provodniku predstavlja rešenje zadanog problema.

Pri promeni graničnih uslova na istoj dispoziciji provodnika, krajnja strujna slika na simulaciji sa najbližim graničnim uslovima je korišćena kao početno stanje za novu, sa ciljem da se dobije rešenje sa što manjim brojem iteracija.

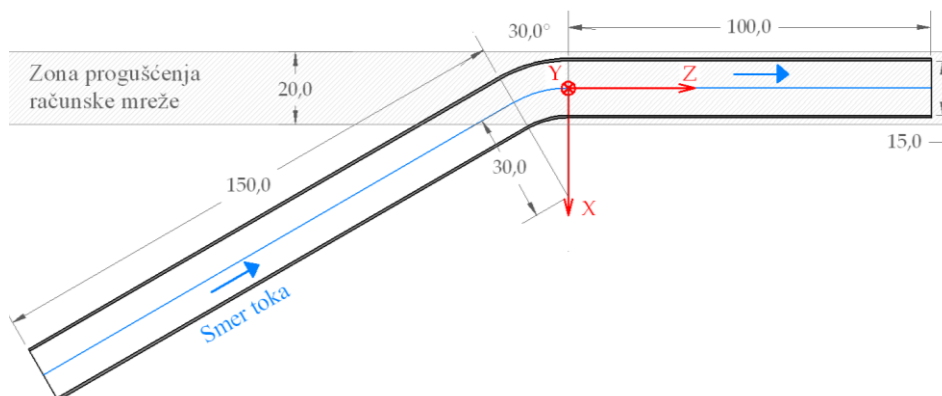
### 4. POREĐENJE REZULTATA NUMERIČKIH SIMULACIJA SA TEČENJEM NA FIZIČKOM MODELU

Formiranjem numeričkog modela istih geometrijskih karakteristika, kao za fizički model koji je ispitan u laboratoriji, omogućeno je njihovo poređenje. Prečnik provodnika iznosi,  $D = 15$  cm, a ostale karakteristične veličine su prikazane na Slici 1. Da bi se olakšalo praćenje rezultata numeričkih proračuna, na istoj slici je prikazana i orijentacija koordinatnog sistema za analiziranu dispoziciju provodnika.

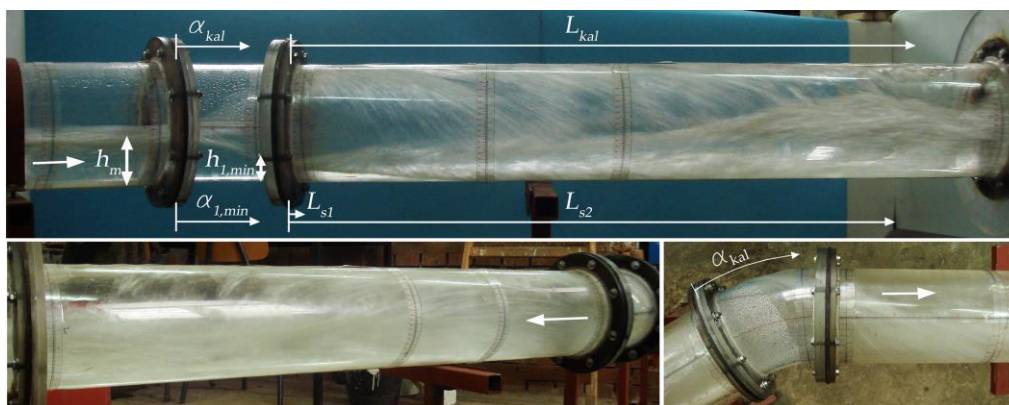
Poređenje rezultata numeričke simulacije sa merenjima na fizičkom modelu je prikazano na dispoziciji provodnika sa zakrivljenošću  $D/R = 1/2$  i skretnim uglom od  $30^\circ$ . Na numeričkom modelu su zadati isti uslovi tečenja (dubina i protok vode na uzvodnom kraju provodnika) kao na fizičkom modelu. Na osnovu pretpostavke da je srednja brzina vazduha jednaka srednjoj brzini vode, određen je maseni protok vazduha na uzvodnom kraju provodnika.

Numerički model se sastoji od 217.500 proračunskih ćelija. Mreža je progušćena u zoni krivine i nizvodno od nje (Slika 1), kao i u zoni graničnog sloja uz čvrstu granicu, jer se na tim mestima očekuju najznačajnije promene vrednosti računskih veličina.

Na slici 2 su prikazane fotografije fizičkog modela sa oznakama veličina koje su merene, a u Tabeli 1 vrednosti izmerenih veličina.



Slika 1. Orijentacija koordinatnog sistema na numeričkom modelu, sa skretnim uglom od  $\alpha = 30^\circ$  i zakrivljenošću  $D/R = 1/2$



Slika 2. Helikoidno tečenje na modelu  $D/R = 1/2$  i  $\alpha = 30^\circ$

Tabela 1. Karakteristične veličine merene na fizičkom modelu

Tip tečenja	$Q_w$	$h_m$	$\alpha_{kal}$	$\alpha_{1,min}$	$h_{1,min}$	$L_{s1}$	$L_{s2}$	$L_{kal}$
	l/s	cm	°	°	cm	cm	cm	cm
Helikoidno	16,64	6,0	27	29	3,0	2	80	85

$Q_w$  – protok vode kroz provodnik,

$h_m$  – dubina mešavine neposredno uzvodno od krivine,

$\alpha_{kal}$  – ugao od početka krivine do mesta na kome mlaz dotiče teme provodnika,

$\alpha_{1,min}$  – ugao od početka krivine do mesta pojave prvog minimuma (konveksna strana),

$h_{1,min}$  – prvi minimum (minimalna dubina na konveksnoj strani),

$L_{s1}$  – rastojanje od kraja krivine do mesta na kome se okrenuti tok spaja sa tokom na konveksnoj strani krivine,

$L_{s2}$  – rastojanje od kraja krivine do nizvodnog kraja spajanja okrenutog mlaza sa tokom na suprotnoj strani provodnika,

$L_{kal}$  – rastojanje od kraja krivine do mesta na kome se završava tečenje mlaza po temenu provodnika.

U Tabeli 2 su prikazane karakteristične veličine dobijene primenom numeričkog modela, a u nastavku i odgovarajuće grafičke predstave tečenja u provodniku

na numeričkom modelu, uz komentar i poređenje rezultata sa opitom na fizičkom modelu.

Tabela 2. Karakteristične veličine dobijene primenom numeričkog modela

Tip tečenja	$Q_w$	$h_m^{50\%}$	$\alpha_{kal}^{50\%}$	$l_{1,min}^{50\%}$	$h_{1,min}^{50\%}$	$L_{s1}$	$L_{s2}$	$L_{kal}$
	l/s	cm	°	cm	cm	cm	cm	cm
Helikoidno	16,64	5,8	30	5	1,5	5	85	100

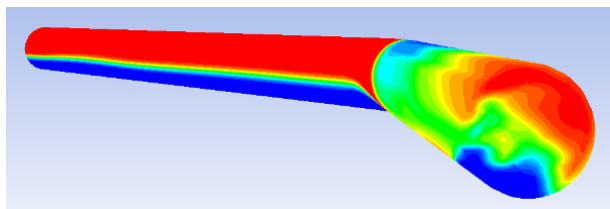
$h_m^{50\%}$  – dubina mešavine neposredno uzvodno od krivine za koncentraciju vazduha u mešavini od 50%,

$\alpha_{kal}^{50\%}$  – ugao od početka krivine do mesta na kome mlaz sa koncentracijom vazduha u mešavini od 50% dotiče teme provodnika,

$l_{1,min}^{50\%}$  – rastojanje od kraja krivine do mesta na kome mlaz sa koncentracijom vazduha u mešavini od 50% formira prvi minimum,

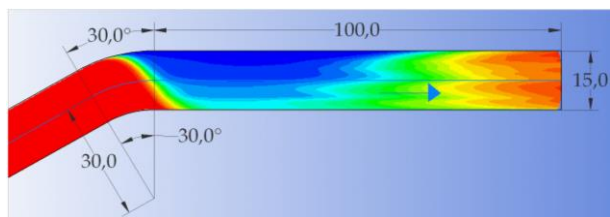
$h_{1,min}^{50\%}$  – prvi minimum za koncentraciju vazduha u mešavini od 50% (minimalna dubina na konveksnoj strani).

### Prikaz rezultata numeričkog proračuna i poređenje sa odgovarajućim opitom na fizičkom modelu



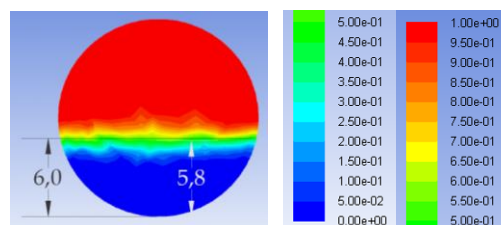
Koncentracije vazduha u mešavini

**Komentar:** Mlaz se potpuno okrenuo po obimu provodnika. Prvi minimum se formira na konveksnoj strani, a „razmotavanje“ mlaza se dešava tek na nizvodnom kraju provodnika.



Koncentracije vazduha u mešavini u najvišim propračunskim ćelijama (na kaloti provodnika)

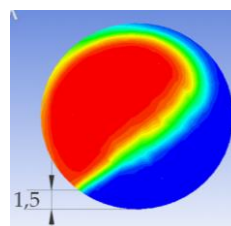
**Komentar:** Mlaz sa učešćem vazduha od 50% dotiče teme provodnika pri uglu od 30°, što se slaže sa merenjima. Strujna slika u zona okretanja mlaza po obimu provodnika odgovara tečenju na fizičkom modelu. Na fizičkom modelu je izmereno da mlaz klizi po temenu cevi na dužini od 85 cm, što je nešto kraće u odnosu na rezultate numeričke simulacije, gde mlaz klizi do samog kraja cevi.



Koncentracija vazduha u mešavini u poprečnom preseku provodnika neposredno uzvodno od krivine

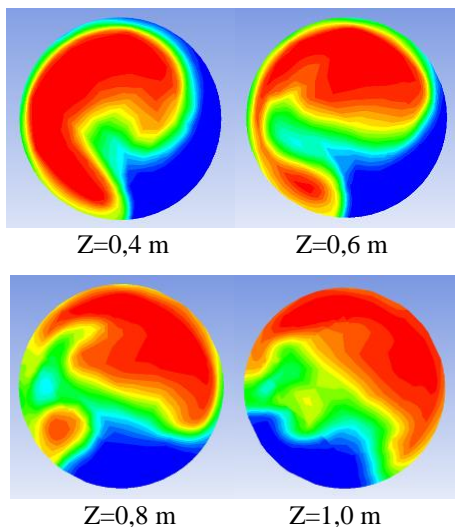
**Komentar:** Dubina mešavine za koncentraciju vazduha od 60% odgovara merenjima na fizičkom modelu. Za koncentraciju vazduha od 50%, dubina mešavine iznosi 5,8 cm.

Napomena: Legenda na kojoj su prikazane koncentracije vazduha u mešavini za svaku korišćenu boju važi i za sve slične dijagrame, pa se neće ponovo prikazivati.



Koncentracija vazduha u mešavini u poprečnom preseku provodnika nizvodno od krivine ( $Z=0,05$  m)

**Komentar:** Minimalna dubina iznosi 1,5 cm (za koncentraciju vazduha u mešavini od 50%), što je manje nego što je izmereno na fizičkom modelu. Na fizičkom modelu se minimum javlja pri uglu od 29° od početka krivine, dok je na numeričkom nešto nizvodnije. Na ovom mestu se okrenuti tok spaja sa mlazom na suprotnoj strani provodnika, što se dobro slaže sa fizičkim modelom.



Koncentracija vazduha u mešavini u poprečnim preseccima provodnika nizvodno od krivine

**Komentar:** Na poprečnim preseccima provodnika nizvodno od krivine se vidi kako se mlaz potpuno okrenuo po njegovom obimu, ostavljajući prostor u središnjem delu za slobodno strujanje vazduha ( $Z=0,4$  m i  $Z=0,6$  m). U poslednja dva preseka ( $Z=0,8$  m i  $Z=1,0$  m), mlaz se „razmotava“, pa vazduh struji kroz gornji deo provodnika, čime se uspostavlja klasično tečenje sa slobodnom površinom.

Na osnovu prikazane analize rezultata numeričke simulacije i poređenja sa opitom na fizičkom modelu, može se reći da se rezultati modela sasvim dobro slažu. Prisutna su odstupanja po pitanju veličine i lokacije prvog minimuma, ali ona nisu značajna.

## 5. PROŠIRENJE OPSEGA ISPITIVANJA NA NUMERIČKOM MODELU

S obzirom na dobro slaganje rezultata numeričkog i fizičkog modela, na numeričkom modelu su analizirane i dispozicije provodnika (manja zakrivljenost, veći prečnici) i uslovi tečenja (veći Frudovi brojevi) koji nisu ispitani na fizičkom modelu, kako bi se proverili zaključci iz literature [5] i proširio opseg istraživanja.

### 5.1. Uticaj prečnika provodnika

Na fizičkom modelu je, zbog ograničenosti kapaciteta laboratorije, ispitivan relativno mali prečnik provodnika (15 cm), na osnovu koga su definisani izrazi za nastanak

helikoidnog tečenja i zagušenja toka [5]. Pri tečenju u provodniku većih dimenzija, očekuje se i veće uvlačenje vazduha u tok i značajnije „bubrenje“ mlaza. Da bi se proverila primenljivost predloženih izraza za ovakve slučajeve, na numeričkom modelu su ispitani i veći prečnici provodnika.

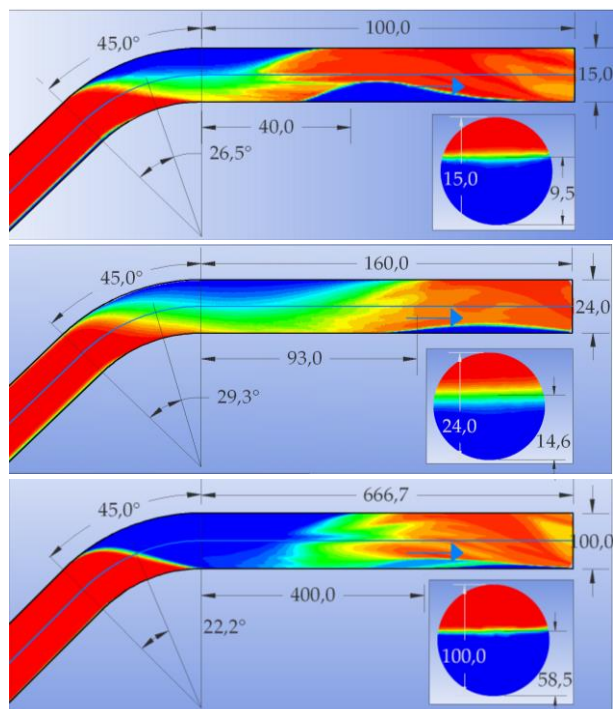
Pored provodnika sa prečnikom od  $D_1 = 15$  cm, ispitani su i prečnici:  $D_2 = 24$  cm (jer je provodnik tih dimenzija analiziran u literaturi [2]), kao i  $D_3 = 100$  cm. Uticaj daljeg povećanja prečnika na tečenje u provodniku nije analiziran, jer bi zahtevao formiranje numeričkog modela sa izuzetno velikim brojem ćelija, što nije bilo moguće sa raspoloživom računarskom opremom.

Svi numerički modeli su napravljeni za dispoziciju provodnika sa skretnim uglom od  $45^\circ$  i zakrivljenošću  $D/R = 1/3$ . Pravolinijska deonica uzvodno od krivine je dužine  $10 D$ , a nizvodna  $20 D/3$ . Model sa prečnikom  $D_1 = 15$  cm se sastoji od 1.330.700 ćelija, sa prečnikom  $D_2 = 24$  cm od 1.990.000, dok model sa najvećim prečnikom,  $D_3 = 100$  cm, ima 2.700.000 ćelija. Prema tome, model sa najvećim prečnikom ima najgrublju mrežu diskretizacije, ali na raspoloživim računarima, nije bilo moguće njeno dalje progušćenje.

Na svim modelima su zadati isti uzvodni granični uslovi (relativna dubina vode,  $h_{1,uz}/D_1 = h_{2,uz}/D_2 = h_{3,uz}/D_3$ , i Frudov broj,  $Fr_{1,uz} = Fr_{2,uz} = Fr_{3,uz}$ ). Upoređeni su poprečni preseccima provodnika neposredno uzvodno od krivine i strujna slika duž provodnika. Da bi se lakše uočile sličnosti i razlike između rezultata tri razmatrana modela, vizuelno su svedeni na istu vrednost prečnika, ali su dužine ispravno kotirane.

Na Slici 3 se vidi da je na svim razmatranim modelima uspostavljeno helikoidno tečenje, mada su prisutne razlike, kako u poprečnim preseccima neposredno uzvodno od krivine, tako i u najvišim proračunskim ćelijama domena (na kaloti provodnika).

Model sa najvećim prečnikom provodnika ima najgrublju mrežu prostorne diskretizacije, pa mešanje vode i vazduha nije izraženo. Na modelu sa najmanjim prečnikom je suprotna situacija. Model je relativno malih dimenzija, pa iako je broj proračunskih ćelija relativno veliki, mešanje vode i vazduha nije izraženo. Model prečnika 24 cm je relativno veliki, pa fizički dolazi do mešanja vode i vazduha, a pošto je i broj proračunskih ćelija takođe relativno veliki, na ovom modelu dolazi do najintenzivnijeg mešanja.



Slika 3. Koncentracije vazduha u mešavini u najvišim proračunskim ćelijama i u poprečnim preseccima provodnika neposredno uzvodno od krivine

Na osnovu prikazanog je očigledno da vrednost prečnika provodnika bitno utiče na količinu uvučenog vazduha u tok, a relativno malo na formiranje strujne slike u provodniku. Iako su prisutne određene razlike između rezultata tri modela, one ne dovode u pitanje zaključke analize ispitivanja na fizičkom modelu [5], vezane za nastanak helikoidnog strujanja, kao i primenljivost predloženih izraza.

### 5.2 Provera predloženih izraza za veće Frudove brojeve

S obzirom da zbog ograničenosti kapaciteta laboratorije nije bilo moguće ispitati širi opseg Frudovih brojeva, to je urađeno na numeričkom modelu. Ispitivanja su urađena na modelu prečnika 15 cm, sa skretnim uglom krivine od 45° i zakrivljenošću  $D/R=1/3$ . Ovaj model se sastoji od 280.000 ćelija. Proračuni su obuhvatili opseg Frudovih brojeva neposredno uzvodno od krivine,  $Fr_0 = v_0 / \sqrt{g A_0 / B_0}$ , od 4,6 do 11,03.

Urađeno je ukupno 6 proračuna. Uslovi tečenja za tri proračuna su zadati tako da se u svakoj zoni karakterističnog tipa tečenja (tečenje bez okretanja mlaza, helikoidno tečenje, zagušenje toka) nađe po jedan proračun. Pored toga, ispitani su i slučajevi pri

kojima se ostvaruju velike relativne dubine uzvodno od krivine, ali i veliki Frudovi brojevi, pa se nalaze duboko u zoni zagušenja toka. Zbog ograničenosti kapaciteta laboratorije ovakve uslove nije bilo moguće ostvariti na fizičkom modelu.

Rezultati proračuna su prikazani na istom dijagramu na kome su predstavljeni i opiti sa fizičkog modela, kao i granice nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka koje su određene na osnovu opštih izraza iz literature [5].

$$C_H^{45,1/3} = Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{1,40} \tag{1}$$

$$C_Z^{45,1/3} = \frac{1}{0,92} Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{2,41} \tag{2}$$

Svaki od četiri usvojena tipa tečenja je prikazan drugačijim oznakama, ali su rezultati proračuna prikazani krupnijim simbolima.

Na sledećem dijagramu (Slika 4) se vidi da su se rezultati svih proračuna našli u odgovarajućim oblastima. Prva tri (a), b) i c)) potvrđuju primenljivost predloženih izraza za granice nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka pri većim vrednostima Frudovog broja, dok se druga tri (d), e) i f)) nalaze duboko u zoni zagušenja toka.

### 5.3 Provera predloženih izraza za manju zakrivljenost

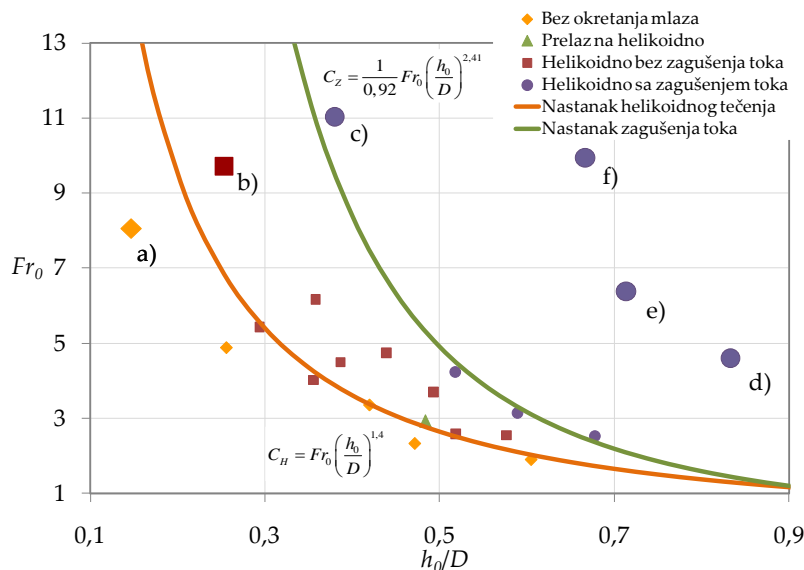
Na numeričkom modelu je ispitani i provodnik sa manjom zakrivljenošću, kako bi se proverila primenljivost predloženih izraza za nastanak helikoidnog tečenja i zagušenja toka i za širi spektar karakteristika krivine.

Ispitani skretni ugao krivine iznosi 45°, a zakrivljenost  $D/R = 1/10$ . Model se sastoji od 300.000 ćelija.

Granice nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka su takođe određene na osnovu opštih izraza iz literature [5], koji su za usvojene karakteristike krivine dati u obliku:

$$C_H^{45,1/10} = \frac{1}{1,70} Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{1,75} \tag{3}$$

$$C_Z^{45,1/10} = \frac{1}{1,49} Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{2,40} \tag{4}$$



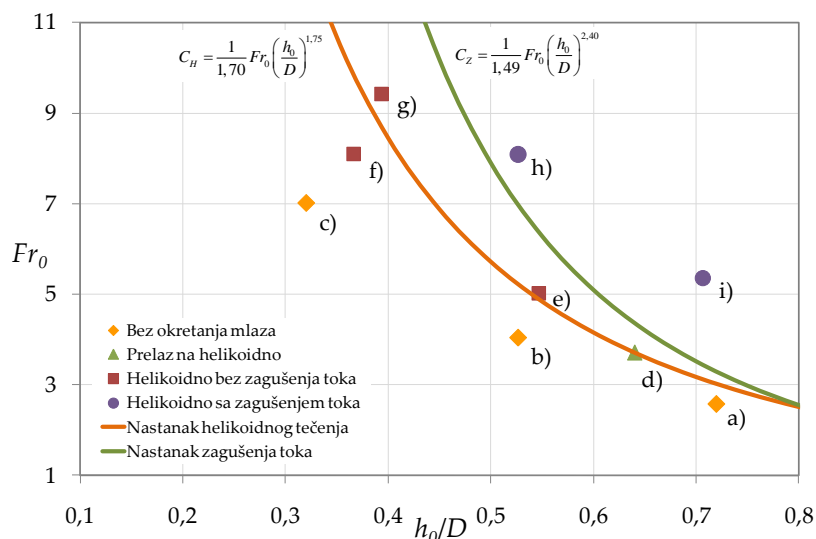
Slika 4. Poređenje rezultata proračuna sa predloženim granicama nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka, jed. (1) i (2) ( $D/R = 1/3$ ,  $\alpha = 45^\circ$ )

Na modelu je urađeno devet proračuna, čiji su rezultati upoređeni sa definisanim granicama nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka (jed. (3) i (4)), na osnovu čega su doneti zaključci.

Na slici 5 se vidi da se rezultati proračuna uglavnom nalaze u odgovarajućim oblastima definisanim granicama nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka. Izuzetak je slučaj f) koji se našao ispod granice

nastanka helikoidnog tečenja, odnosno u oblasti gde se očekuje pojava tečenja bez okretanja mlaza. Kada bi se ovaj rezultat uzeo u obzir, granicu nastanka helikoidnog tečenja trebalo bi pomeriti malo na niže, ali samo u zoni manjih relativnih dubina.

Definisana granica nastanka zagušenja toka odgovara izvršenim numeričkim simulacijama.



Slika 5. Poređenje rezultata proračuna sa granicama nastanka helikoidnog tečenja i zagušenja toka, jed. (3) i (4) ( $D/R = 1/10$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ).

## 6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U radu je prikazano da se adekvatnim numeričkim modelom u okviru programskog paketa Fluent (Ansys - Fluid Dynamic) može uspešno modelirati burno tečenje u zatvorenom provodniku sa horizontalnom krivinom. Kao rezultat numeričkih simulacija, dobija se verodostojna slika tečenja vode i vazduha.

Primenom numeričkog modela je potvrđena primenljivost izraza iz literature [5] za nastanak helikoidnog tečenja i zagušenja toka i na provodnike većih prečnika, manje zakrivljenosti, ali i pri „silovitijim“ uslovima tečenja od ispitanih na fizičkom modelu.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta TR 37009 „Merenje i modeliranje fizičkih, hemijskih, bioloških i

morfo-dinamičkih parametara reka i vodnih akumulacija“ i projekta TR 35043.

## LITERATURA

- [1] ANSYS *Fluent Theory Guide*. (2013)
- [2] Gisonni, C., Hager, W., H., (2000), Bend Flow in Bottom Outlets, materijal sa interneta
- [3] Kolarević, M., (2015), *Burno tečenje u krivinama evakuacionih objekata*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet
- [4] Kolarević, M., Savić, Lj., Kapor, R., Mladenović, N. (2013), *Burno tečenje u krivini provodnika kružnog poprečnog preseka*, Vodoprivreda br. 261-263, str. 123-137
- [5] Lučić, M., Savić, Lj., Kapor, R., Mladenović, N. (2015), *Burno tečenje u horizontalnoj krivini zatvorenog provodnika*, 17. Savetovanje SDHI i SDH, Vršac, Srbija

## NUMERICAL MODELING OF SUPERCRITICAL FLOW IN CLOSED CONDUIT BEND

by

Milena LUČIĆ  
 Energoprojekt-Hidroinženjering  
 Ljubodrag SAVIĆ, Radomir KAPOR  
 Građevinski fakultet u Beogradu  
 Nikola MLADENOVIĆ  
 Mašinski fakultet u Beogradu

## Summary

Numerical modeling of supercritical flow in closed conduit bend is a continuation of the scale model experiments. The main goal of application of numerical model is to extend the range of investigation and to simulate conditions that could not be examined on scale model due to the limited capacity of the laboratory installation. Using the results of the numerical modeling, general conclusions and suggested empirical

relationships (based on the scale model experiments) for the onset of a certain type of flow in the conduit, are checked. Numerical model is prepared using software package Fluent (Ansys-Fluid Dynamic).

Keywords: supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, numerical model

Redigovano 18.11.2015.