

HIDRAULIČKI OTPORI IZAZVANI SISTEMIMA NAPERA

Dr Miodrag JOVANOVIĆ, dipl. građ. inž.
mjovanov@grf.bg.ac.rs

REZIME

Hidraulički otpori koje izazivaju naperi svojim prisustvom u rečnom koritu eksperimentalno su ispitivani i rezultati su objavljeni u literaturi [1, 2]. Razvijen je i odgovarajući 1D računski model u kome su ugrađeni rezultati eksperimenata. U ovom radu se prikazuju rezultati provere pouzdanosti predloženog 1D modela. U tu svrhu su pomoću softvera Telemac3D obavljene numeričke simulacije kako laboratorijskog eksperimenta, tako i strujanja na hipotetičkom „kanalu prototipu”, čije su dimenzije 100 puta uvećane u odnosu na dimenzije laboratorijskog kanala. Zaključeno je da se predloženi 1D model može preporučiti za korišćenje u praksi, pod uslovom da se sračunate denivelacije uvećaju za 20-30 %.

Ključne reči: naperi, hidraulički otpori, uspor toka, simulacija 3D strujanja, metoda konačnih elemenata.

UVOD

Istraživanje opstrujavanja napera u uslovima nepokretnog i pokretnog dna je decenijama prisutno u svetskoj i domaćoj literaturi, na primer [4, 6, 7, 8, 9] itd. Međutim, tek (relativno) nedavno su objavljeni rezultati eksperimentalnog izučavanja hidrauličkih otpora i usporavanja toka pri raznim konfiguracijama sistema napera [1, 2]. Iz ovih istraživanja proizašao je predlog računskog 1D modela koji potencijalno može biti od velike koristi projektantima u praksi.

Imajući u vidu da je ovaj model zasnovan na rezultatima laboratorijskih merenja na koje neizbežno utiču efekti razmere, cilj ovog rada je bio da se ispita pouzdanost predloženog 1D modela u uslovima kakvi se mogu očekivati na vodotocima u prirodi.

ISTRAŽIVANJA IZ LITERATURE [1, 2]

Laboratorijski eksperimenti. Merenja su obavljena u laboratoriji Univerziteta Saskačewan (Saskatchewan) u

Kanadi, u kanalu dužine 10 m, širine 0,8 m, sa nagibom dna 0,001 [1]. Protok je meren elektromagnetnim uređajem, a nivoi, mernom iglom, sa tačnošću 1 %. Za regulaciju dubine (u ustaljenom režimu) korišćena je ustava na nizvodnom kraju kanala. Profili brzina su mereni mikrokriplom sa tačnošću od 1,5 %. Modeli napera izradjeni su u vidu plastičnih ploča raznih dimenzija. Ploče su povezane sa uređajem za merenje sile otpora (slika 1). Procena je da tačnost merenja pomoću ovog uređaja iznosi ± 2 %. Za osrednjavanje sile otpora bilo je potrebno da svako merenje neprekidno traje bar 300 s.

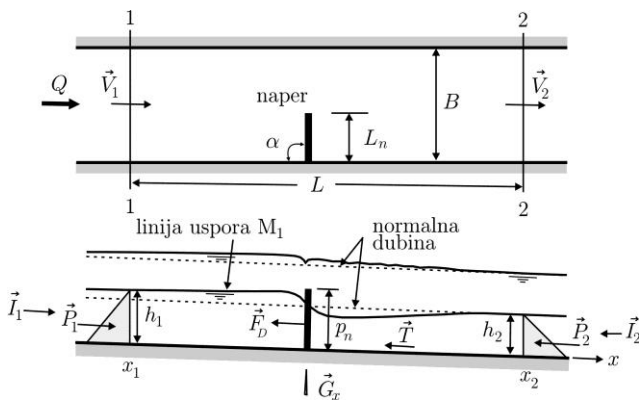


Slika 1. Laboratorijska instalacija [1]; gore: kanal sa modelom usamljenog napera; dole: ploča (model napera) sa 3 konzolna nosača od aluminijuma i mernim trakama

U slučaju nepotopljenog opstrujavanja ploča postavljena upravno na zid kanala, merenjem je obuhvaćen opseg Frudovog broja $Fr = 0,25 - 0,55$,

stepena suženja u kanalu $L_n/B=0,12-0,50$ i potopljenosti $h_1/L_n=0,12-1,62$, gde je L_n – dužina ploče–napera, B – širina kanala, a h_1 – dubina usporenog toka, merena 0,5 m uzvodno od napera. Eksperimentalno utvrđene zavisnosti sile otpora od bezdimenzionih geometrijskih i hidrauličkih parametara sastavni su deo predloženog računskog modela koji se opisuje u nastavku.

Računski 1D model. Ovaj model je zasnovan na dve pretpostavke [1]: (i) strujanje je linijsko (1D), ustaljeno i jednoliko, u mirnom režimu i (ii) korito je prizmatično i pravolinijsko, bez izraženih sekundarnih strujanja. Navedene pretpostavke uslovljene su potrebom da eksperimentalni rad bude što lakši i kontrolabilniji, a računski model, što jednostavniji za primenu u praksi. Polazi se od jednačine bilansa sila koje deluju na fluid unutar nepokretne kontrolne zapremine u čijem se središtu nalazi naper (slika 2).



Slika 2. Shematski prikaz usamljenog napera u koritu pravougaonog poprečnog preseka; gore: izgled u osnovi; dole: uzdužni profil sa linijama nivoa pri (ne)potopljenom opstrujavanju i silama u pravcu toka koje deluju na fluid unutar nepokretne kontrolne zapremine između preseka 1 i 2

Ravnoteža sila u pravcu toka (x) definisana je izrazom:

$$P_1 - P_2 - F_D - T + G_x = I_2 - I_1 \quad (1)$$

gde su: P_1, P_2 – sile pritiska, F_D – sila kojom kontura deluje na fluid (u slučaju prizmatičnog korita jednaka je reakciji sile kojom tok deluje na naper), T – sila trenja, G_x – komponenta težine vode u x pravcu, $I_1 = \rho \cdot Q \cdot V_1$ i

$I_2 = \rho \cdot Q \cdot V_2$ – inercijalne sile, ρ – gustina vode, Q – protok, V_1 i V_2 – srednje profilske brzine.

Poznato je da je u uslovima jednolikog tečenja sila trenja uravnotežena sa komponentom težine fluida u pravcu toka: $T = G_x$. Može se smatrati da ova premisa važi i u slučaju lokalno blago poremećenog (nejednolikog) toka u mirnom režimu.

U slučaju pravougaonog poprečnog preseka korita, iz (1) sledi:

$$F_D = P_1 - P_2 - I_2 + I_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot B \cdot h_1^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot B \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 - \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (2)$$

gde je: B – širina korita, h_1 – dubina uspora uzvodno od napera, a h_2 – dubina nizvodno od napera, jednaka normalnoj dubini.

Sila otpora kojom naper deluje na tok jednaka je u opštem slučaju:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot A_n \cdot V_n^2 \quad (3)$$

gde je: C_D – koeficijent sile otpora, V_n – prosečna brzina onog dela toka koji „udara” naper, A_n – projekcija konture napera na vertikalnu ravan.

U slučaju neprelivenog napera: $A_n = L_n \cdot h_1$, a u slučaju da je naper preliven: $A_n = L_n \cdot p_n$ (slika 2). U opštem slučaju je: $V_n = \theta \cdot V_1$, gde je: V_1 – srednja profilska brzina neporemećenog toka uzvodno od napera, a faktor $\theta = 1-1,2$.

Kombinujući jednačine (2) i (3), uz jednačinu kontinuiteta, može se izvesti izraz [1]:

$$2Fr_1(h_1/h_2)^3 - [2Fr_1 - C_D \cdot A_r \cdot \theta_2 \cdot Fr_1 + 1](h_1/h_2)^2 + 1 = 0 \quad (4)$$

gde je: $Fr_1 = V_1^2 / (gh_1)$ – Frudov broj, a $A_r = A_n / (h_1 B)$ – stepen suženja („blokiranja”) proticajnog profila.

Za zadate vrednosti protoka, nagiba dna, širine i rapavosti korita (na osnovu kojih se može sračunati normalna dubina h_2), kao i poznate vrednosti koeficijenta C_D , nelinearna jednačina (4) se iterativno rešava po nepoznatoj dubini h_1 . Ova dubina određuje veličinu uspora izazvanog prisustvom usamljenog napera u rečnom koritu.

Vrednosti koeficijenta C_D su eksperimentalno utvrđene, polazeći od opšte zavisnosti:

$$C_D = f(\text{Re}_1, \text{Fr}_1, A_r, p_n / L_n, h_1 / p_n, \alpha) \quad (5)$$

gde je: $\text{Re}_1 = V_1 \cdot h_1 / \nu$ – Reynoldsov broj (ν – koeficijent viskoznosti), $\text{Fr}_1 = V_1^2 / (g h_1)$ – Frudov broj, α – ugao napera u odnosu na osovину toka (slika 2), p_n / L_n – faktor izduženosti napera i h_1 / p_n – faktor potopljenosti napera.

Uticaj viskoznosti je od sporednog značaja, pa se Reynoldsov broj može izostaviti. Ako se razmatra strujanje oko nepotopljenog napera, otpada parametar p_n / L_n , stepen suženja proticajnog profila postaje: $A_r - L_n / B$, dok se, umesto odnosa h_1 / p_n , u izraz (5) može uvrstiti odnos h_1 / L_n . Na osnovu ispitivanja koja su detaljno opisana u literaturi [1], izvedene su sledeće empirijske zavisnosti za koeficijent otpora usamljenog upravog napera, u strujnom polju, koje, dovoljno daleko uzvodno i nizvodno od napera, ima jednolik karakter:

- nepotopljen naper:

$$C_D = 2,02(1 - L_n / B)^{-3,83} (h_1 / L_n)^{0,40}$$

- potopljen naper:

$$C_D = 1,62(1 - A_r)^{-2,40} (p_n / L_n)^{-0,32} (h_1 / p_n)^{-0,19} \quad (6)$$

pomoću jednačine (2) sračuna se sila otpora (F_D), a zatim iz jednačine (3), nepoznata vrednost koeficijenta otpora (C_D).

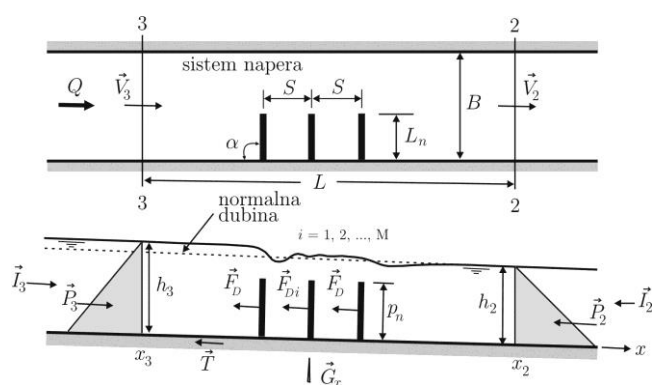
Primititi da u empirijskim izrazima (6) vrednost koeficijenta C_D zavisi od dubine h_1 , što znači da se pri iterativnom rešavanju jednačine (4) po h_1 , vrednost koeficijenta C_D mora korigovati u svakom računskom koraku.

Razmatranje uticaja usamljenog napera na usporenje rečnog toka može se ekstrapolovati na sistem napera. Generalno, može se očekivati da će sistem napera, pri istoj geometriji korita i istom protoku, izazvati veći uspor od usamljenog napera, jer suženje glavnog strujnog polja i poremećaj toka zahvata dužu deonicu. To znači da će uzvodna dubina h_3 na Slici 3 biti veća od odgovarajuće dubine h_1 na Slici 2, dok su nizvodne (normalne) dubine h_2 jednake u oba slučaja.

Polazna pretpostavka je da za sistem geometrijski jednakih napera važi princip aditivnosti sile F_D [2], tako da za kontrolnu zapreminu između profila „3” i „2” na Slici 3 važi jednačina ravnoteže sila:

$$P_3 - P_2 - \sum_{i=1}^{i=M} F_{Di} - T + G_x + I_3 - I_2 = 0 \quad (7)$$

gde su: $P_3 = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot h_3^2 \cdot B$ i $P_2 = \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot h_2^2 \cdot B$ – sile pritiska u koritu pravougaonog poprečnog preseka, $I_3 = \rho \cdot B \cdot h_3 \cdot V_3^2$; $I_2 = \rho \cdot B \cdot h_2 \cdot V_2^2$ – inercijalne sile, a $\sum_{i=1, M} F_{Di} = F_{D1} + \dots + F_{Di} + \dots + F_{DM}$ – ukupna sila otpora sistema od M napera.



Slika 3. Shematski prikaz sistema napera u koritu pravougaonog poprečnog preseka; gore: izgled u osnovi; dole: uzdužni profil sa silama koje deluju na fluid unutar kontrolne zapremine između preseka 3 i 2

Ako se sila otpora svakog napera (F_{Di}) iz sistema normira u odnosu na silu otpora odgovarajućeg usamljenog napera (F_D), dobija se relativna sila otpora:

$$\eta_i = F_{Di} / F_D \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

pa je shodno tome, ukupna relativna sila otpora jednaka:

$$\eta_t = \sum_{i=1, M} F_{Di} / F_D = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M \quad (9)$$

To znači da se u jednačini (7) ukupni otpor može prikazati u obliku:

$$\sum_{i=1, M} F_{Di} = F_D(\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_i + \dots + \eta_M) = F_D \cdot \eta_i = \frac{1}{2} \rho \cdot \eta_i \cdot C_D \cdot A_n (\theta \cdot V_1)^2 \quad (10)$$

gde je: η_i – empirijski parametar, a C_D – koeficijent otpora usamljenog napera, prethodno definisan jednačinom (6).

Kombinacijom jednačine bilansa sila za sistem napera (7) i jednačine za usamljeni naper (1), pretpostavljajući da je zbog jednolikog tečenja $G_x - T \approx 0$ i imajući u vidu da je iz jednačine kontinuiteta: $V_3 = V_1(h_1 / h_3)$, može se izvesti ovakav izraz [2]:

$$(h_3 / h_1)^3 - [2Fr_1 + 1 + C_D A_r \theta^2 (1 - \eta_i) Fr_1] (h_3 / h_1) + 2Fr_1 = 0 \quad (11)$$

Jednacina (11) se rešava po (h_3 / h_1) , što je u skladu sa definicijom ukupne realtivne sile otpora kao odnosa ukupne sile otpora sistema napera i sile otpora fiktivnog usamljenog napera. Rešavanje podrazumeva određivanje dubine uspora usled usamljenog napera h_1 iz jednačine (4), kao i odgovarajuće vrednosti koeficijenta C_D iz jednačine (6).

Kada je u pitanju jedan naper: $\eta_i = 1$, jednačina (11) daje $h_3 = h_1$ što znači da se (11) svodi na (4). To potvrđuje da jednačina (11) predstavlja ekstrapolaciju jednačine (4) na više napera, definišući stanje toka sa sistemom napera *relativno* u odnosu na stanje sa jednim naperom.

Vrednosti parametra η_i je utvrđena eksperimentalno:

$$\eta_i = f(S / L_n, h_2 / p_n, M) \quad (12)$$

gde je, pred ranije definisanih oznaka, S – razmak napera, a M – broj napera u sistemu.

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja sa brojem napera $M = 2-7$, ustanovljena je ovakva zavisnost [2]:

- nepotopljeni naperi:
 $\eta_i = (S / L_n)^{0,09}$

- potopljeni naperi:
 $\eta_i = 0,78 \cdot M^{0,38} (h_2 / p_n)^{0,28} (S / L_n)^{0,11} \quad (13)$

Može se primetiti da kod potopljenih napera, više faktora (broj, razmak i stepen potopljenosti) utiče na ukupnu silu otpora. Kod nepotopljenih napera, broj napera (M) nema uticaja, već je samo njihov relativni razmak (S / L_n) od značaja.

Poredjenjem denivelacija sračunatih pomoću (11) i izmerenih na fizičkom modelu, ustanovljeno je da računске denivelacije treba povećati za 19–23 % da bi rezultati proračuna i merenja bili u saglasnosti [2].

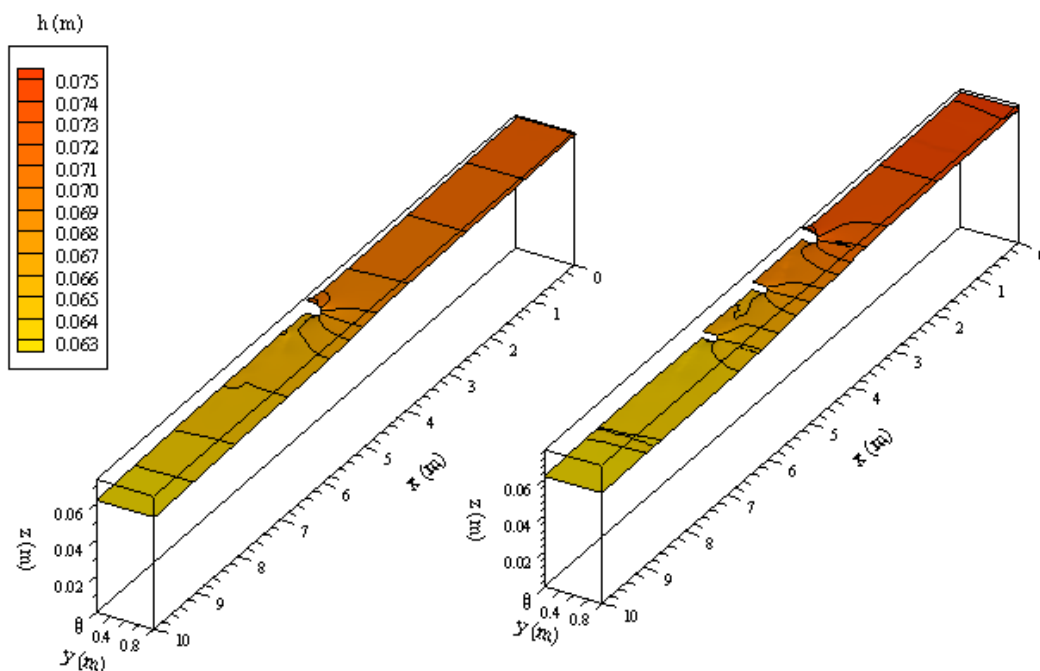
PROVERA POMOĆU 3D MODELA

Smisao provere pomoću numeričkog 3D modela je u tome što on omogućava proračun sila pritiska i inercijalnih sila *integracijom po poprečnim presecima stvarnog rasporeda dubine, pritiska i brzine*, a ne pomoću osrednjenih vrednosti, kao u predloženom 1D modelu. Pored toga, primena 3D modela omogućava da se pouzdano sračunaju vrednosti komponente sile težine fluida unutar kontrolne zapremine i sile trenja, kako bi se proverila opravdanost njihovog zanemarenja u 1D modelu. Svi proračuni obavljani su pomoću softverskog sistema Telemac3D, zasnovanog na metodi konačnih elemenata [3, 10, 11].

NUMERIČKA SIMULACIJA LABORATORIJSKOG EKSPERIMENTA

Ustaljeno nepotopljeno opstrujavanje usamljenog upravnog napera, kao i sistema od tri upravna napera, računato je pomoću 3D modela za protok od 0,021 m³/s (slika 4). Izabrani su naperi dužine $L_n = 0,2$ m ($L_n / B = 0,25$), sa razmakom napera u sistemu: $S = 1,2$ m ($S / L_n = 6$). Pretpostavljajući da je rapavost dna kanala $n = 0,012$ m^{-1/3}s, primenom 1D modela dobijena je normalna dubina $h_2 = 0,062$ m ($Fr = 0,27$).

Sračunate visine uspora za usamljen naper: $h_1 = 0,072$ m, a za sistem napera: $h_3 = 0,074$ m, daju denivelacije (u odnosu na nizvodnu, normalnu dubinu):

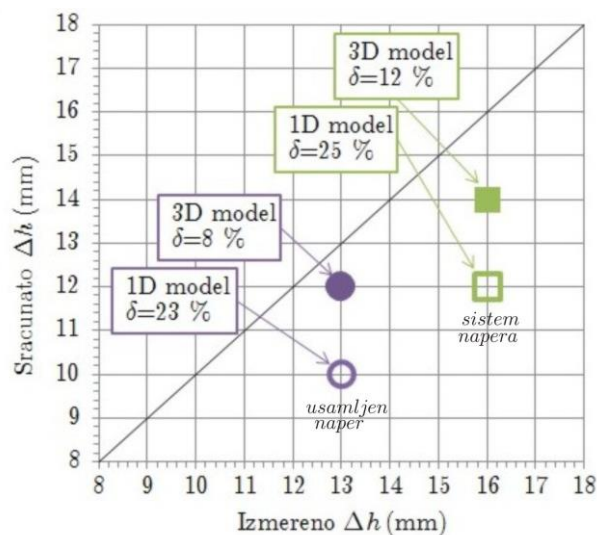


Slika 4. Numerička simulacija laboratorijskog eksperimenta [1, 2] pomoću 3D modela; u slučaju usamljenog napera, računaska mreža se sastojala od 11420 elemenata dužine 2,5–5 cm (čvorova 5991), a u slučaju sistema napera, od 15041. elementa (čvorova 7861). Rezultati su dobijeni na 5 nivoa po dubini. Svaki simulacioni period je iznosio 3600 s, sa računskim korakom od 2 s

$\Delta h = 0,010$ m za usamljen naper, odnosno 0,012 m za sistem napera. Poređenje izmerenih i sračunatih denivelacija dato je na Slici 5. Može se konstatovati da 3D model daje denivelacije koje su bliže izmerenim denivelacijama. Međutim, ovo treba prihvatiti sa rezervom, jer se radi o veoma malim dubinama, gde razlike od 1 mm značajno utiču na krajnji zaključak. Pri tome treba imati u vidu i činjenicu da je za dubinu reda veličine 10 cm, greška merenja ± 1 mm. Slaganje računskih i izmerenih sila otpora (F_D) prikazano je u tabeli 1, iz koje se vidi da 3D model daje nešto tačnije vrednosti. Sile otpora su računane na osnovu rezultata hidrauličkih proračuna, primenom izraza (2), odnosno (7).

Tabela 1. Odstupanja računskih od izmerenih vrednosti sile otpora.

1D model		3D model	
1 naper	3 napera	1 naper	3 napera
19,0 %	19,5 %	14,6 %	15,0 %



Slika 5. Poređenje izmerenih i sračunatih denivelacija; veličina δ predstavlja relativno odstupanje računске vrednosti od izmerene vrednosti. Razlike rezultata 1D i 3D modela su u proseku 15%

Iako prikazani rezultati generalno potvrđuju zaključak autora 1D modela da on daje usporene nivoe koji su za 23 % niži od izmerenih nivoa [2], oslanjanje samo na simulaciju laboratorijskog eksperiment nije dovoljno za ocenu kvaliteta predložnog modela. Osnovni razlog je neizvesnost vrednosti koeficijenta otpora C_D , koje su utvrđene na fizičkom modelu relativno malih dimenzija, gde, usled efekata razmere, struktura turbulentnog toka nije ista kao u prirodi. Pored toga, tu su i neizvesnosti koje su posledica uprošćenja unetih u računski model pretpostavkama da je tečenje linijsko i jednoliko, a raspored pritiska, hidrostatički. Iz navedenih razloga je odlučeno da se provera 1D modela obavi pomoću numeričkih eksprimenata na zamišljenom „kanalu-prototipu”, u geometrijskim i hidrauličkim uslovima kakvi se mogu očekivati u prirodi.

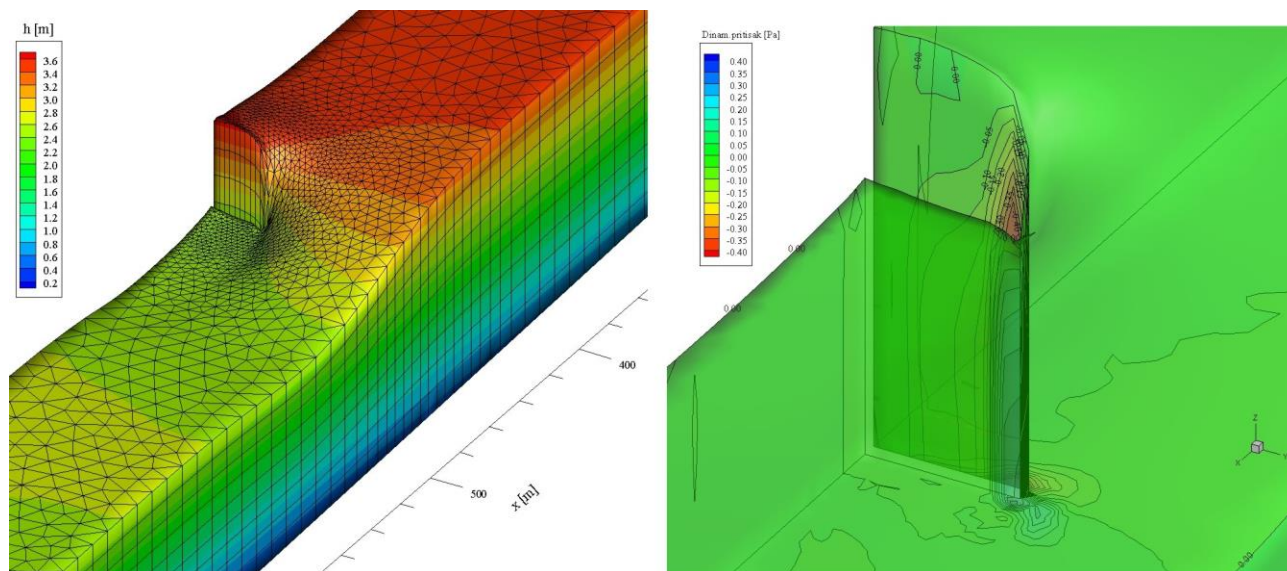
NUMERIČKE SIMULACIJE 3D STRUJANJA U PRIRODNIM USLOVIMA

Zamišljeni „kanal-prototip” je uvećan 100 puta u odnosu na laboratorijski kanal (razmera $L_* = 100$), tako da mu je dužina 1000 m, a širina 80 m. Nagib dna je 0,001. Usvojena je rapavost $n_p = 0,020 \text{ m}^{-1/3}$ ($n_p \approx n_m \cdot L_*^{1/6}$). Razmatrana su dva slučaja: (i) kanal sa usamljenim upravnim naperom i (ii) kanal sa sistemom

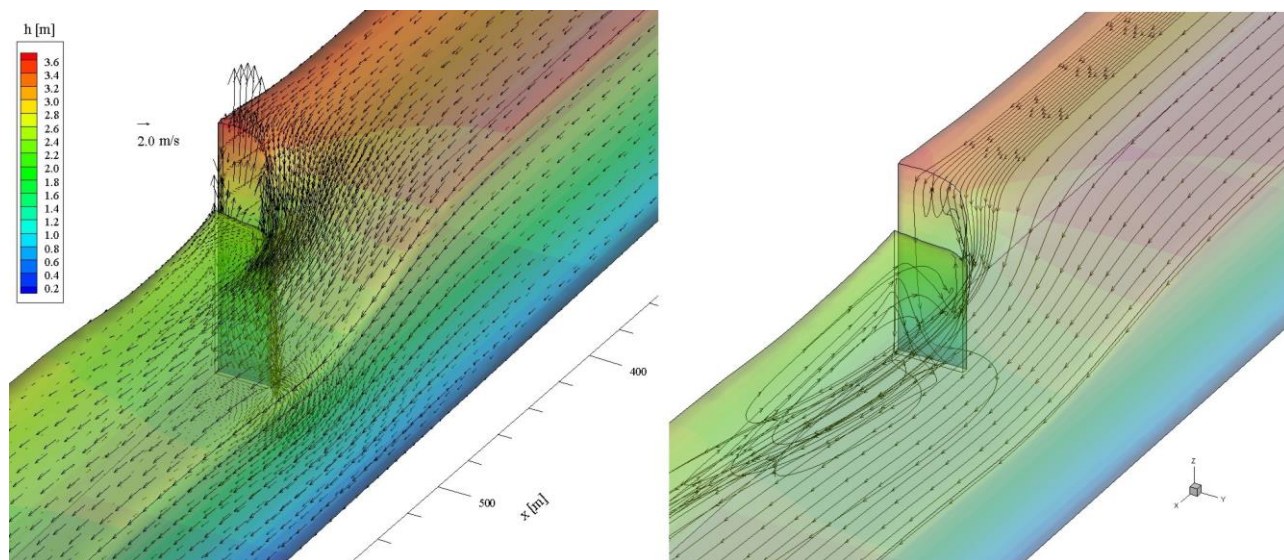
od 3 upravna napera. U oba slučaja su naperi iste dužine: $L_n = 20 \text{ m}$ ($L_n / B = 0,25$). U sistemu napera, usvojen je razmak: $S = 120 \text{ m}$ ($S / L_n = 6$). Razmatran je samo slučaj nepotopljenog opstrujavanja napera pri protocima: 100, 200, 300, 500, 1000 i 2000 $\text{m}^{-1/3}/\text{s}$. Ovi protoci su korišćeni kao uzvodni granični uslov, a odgovarajuće normalne dubine, kao nizvodni granični uslov. Svaka numerička 3D simulacija obuhvatila je period od 1 h = 3600 s u kome je uspostavljen ustaljen režim strujanja. Duž toka je korišćen najjednostavniji model turbulencije na bazi vrtložne viskoznosti, a po dubini, model na bazi dužine mešanja [10, 11].

Usamljeni naper. Simulacije strujanja oko usamljenog napera imale su za cilj proveru empirijske funkcije koeficijenta C_D , kao ključnog parametra 1D modela. Proračun je obavljen za protok $500 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$. Na Slici 6 prikazan je raspored dubine i pritiska oko napera, a na Slici 7, odgovarajući raspored brzina i strujnica.

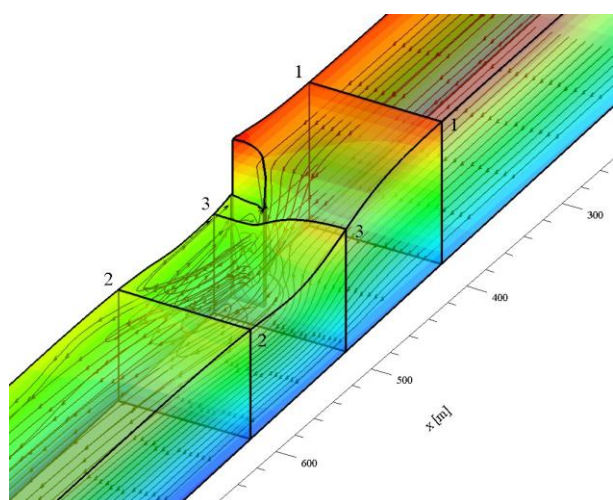
Integrisanjem brzina i pritiska po graničnim preseccima kontrolnih zapremina prikazanim na Slici 8a, sračunate su vrednosti sila pritiska i inercijalnih sila. Pri tome je uzet u obzir stvarni raspored dubine po poprečnim preseccima (slika 8b). Sračunata je i komponenta težine fluida, kao i sila trenja, na osnovu rasporeda smičuće brzine (slika 9).



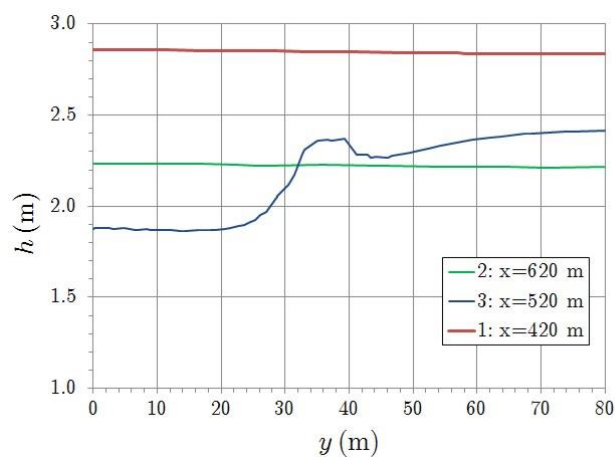
Slika 6. Rezultati proračuna prostornog (3D) strujanja oko usamljenog napera; levo: raspored dubine sa preklopljenom računskom mrežom (3912 elemenata, čvorova 2093, 10 nivoa po dubini); desno: raspored pritiska pokazuje da je odstupanje od hidrostatičkog rasporeda prisutno samo u užoj zoni oko napera



Slika 7. Prostorno strujanje oko usamljenog napera; levo: raspored brzine; desno: strujnice



Slika 8a. Kontrolne zapremine

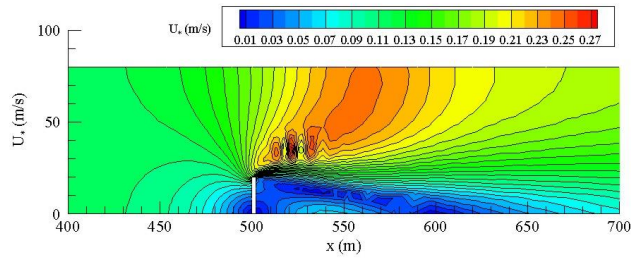


Slika 8b Raspored dubine u poprečnim preseccima

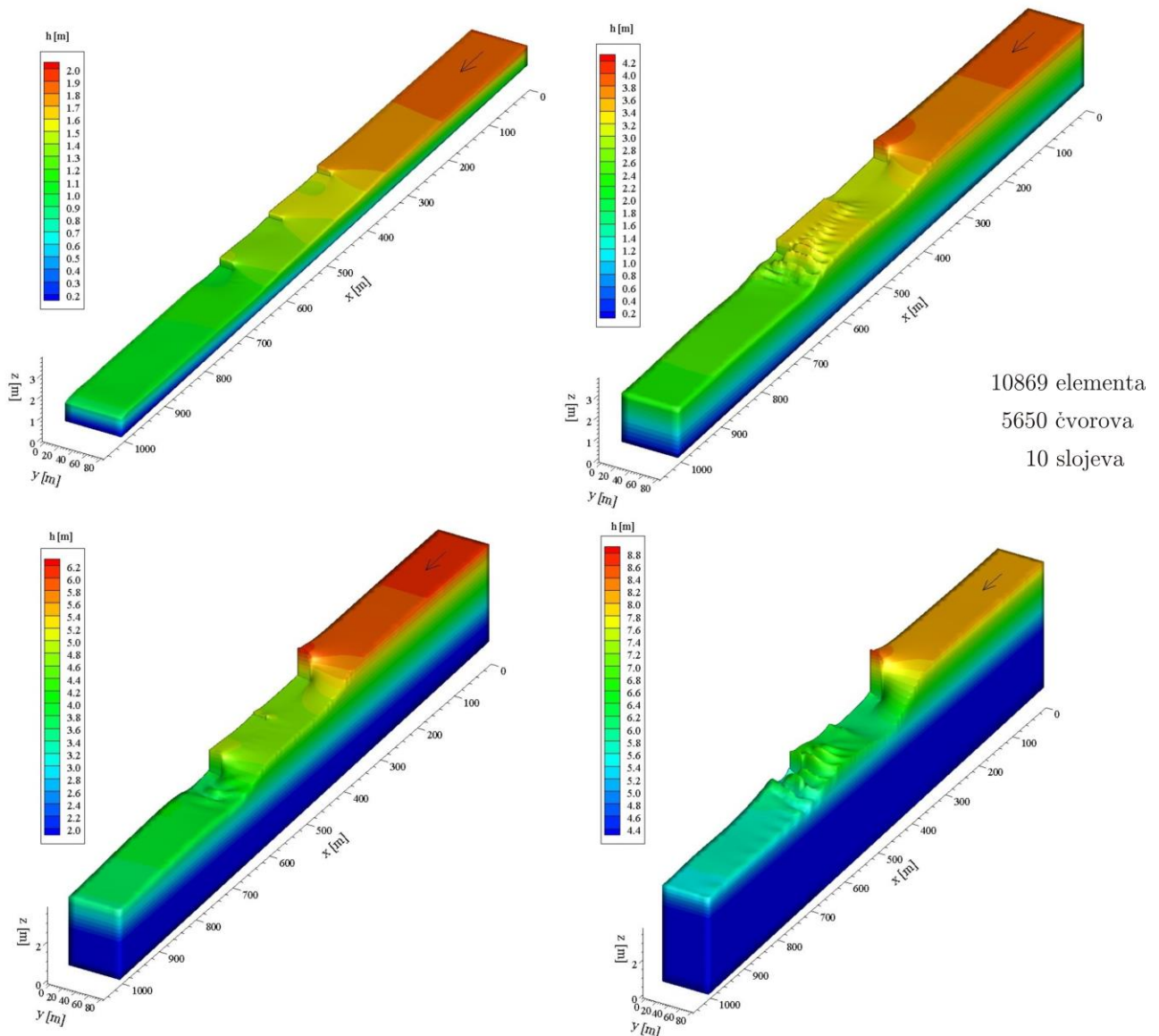
Zatim je iz jednačine (2) određena vrednost intenziteta sile otpora F_D , a iz (3), vrednost koeficijenta otpora $C_D = 3,8$. Prema empirijskom izrazu koji je „ugrađen” u 1D model, ta vrednost iznosi: 2,7, što daje relativno odstupanje od 29%. Razlog za ovako značajno odstupanje treba tražiti, pre svega, u činjenici da je intenzitet turbulencije u prirodnim uslovima značajno veći negu u laboratorijskom kanalu; vrednost Reynoldso-

vog broja na fizičkom modelu je oko 2400, a u „kanalu-prototipu”, 6200 (2,6 puta veća), što upućuje na zaključak da se u prirodnim uslovima mogu čekivati značajno veći otpori od onih koje prognozira predloženi 1D model.

Sistem napera. Proračuni sa sistemom napera su poslužili za proveru veličine uspora. Na Slici 10 prikazane površine nivoa vode u zavisnosti od protoka.

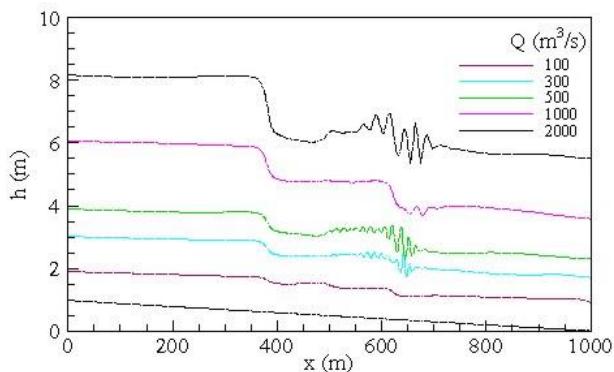


Slika 9. Raspored smičuće brzine oko usamljenog napera



Slika 10. Računske površine nivoa u slučaju sistema od 3 napera; s leva u desno i odogo na dole: $Q=100, 500, 1000$ i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

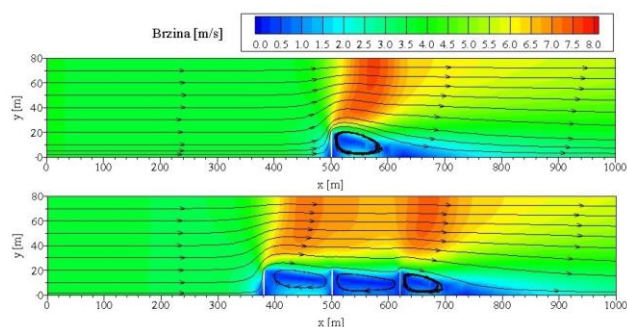
Na Slici 11, prikazani su karakteristični uzdužni profili nivoa po sredini kanala ($y=40$ m).



Slika 11. Linije nivoa

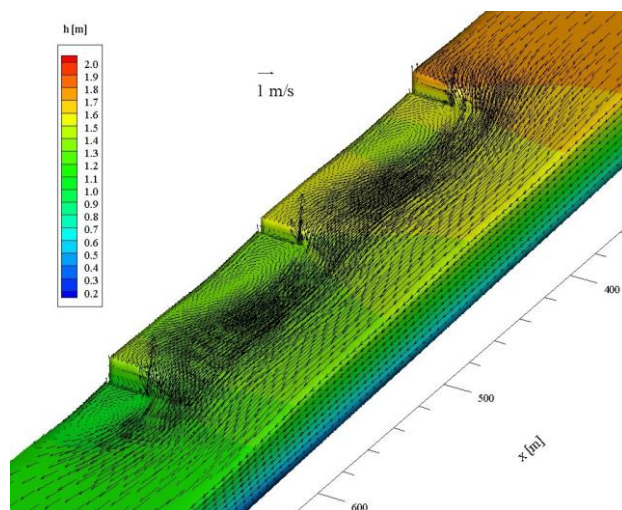
Može se primetiti da je pri relativno malom protoku od $100 \text{ m}^3/\text{s}$ površina vode samo blago poremećena oko napera, po čemu je slična onoj na fizičkom modelu; sa porastom protoka, poremećaji na površini postaju sve veći, jer uticaj suženja korita biva sve izraženiji. Pri protoku od $500 \text{ m}^3/\text{s}$, na nizvodnom kraju naperskog sistema javljaju se površinski stojeći talasi, dok pri ekstremno velikim protocima (1000 i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$), depresija iza uzvodnog napera u sistemu postaje sve izraženija, a nizvodni naperi deluju kao celina, sa smanjenjem strujanja u međunaperskim poljima.

Uticaj sistema napera na strujanje može se veoma dobro uočiti poredjenjem sa usamljenim naperom u istim geometrijskim i hidrauličkim uslovima (slika 12). Može se primetiti da usamljeni naper hidraulički deluje kao kratko, lokalno suženje, a sistem napera, kao dugačko suženje u kome vladaju povećane brzine toka.



Slika 12. Ravanski (2D) prikaz strujnica i rasporeda intenziteta brzine oko usamljenog napera i sistema napera pri protoku od $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

Struktura turbulentnog toka oko niza napera može se analizirati prikazom polja brzine (slika 13) i rasporedom strujnica (slika 14).

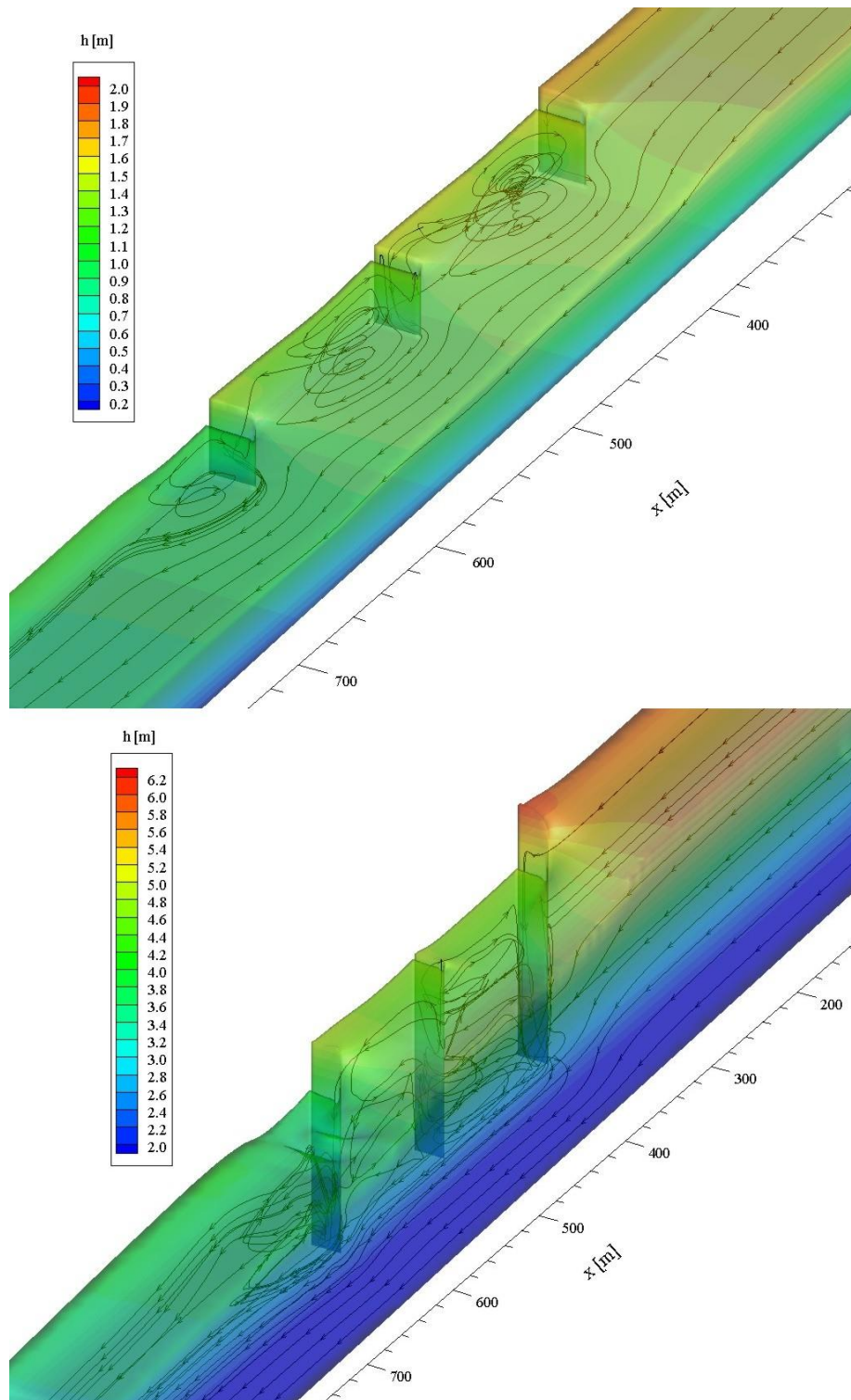


Slika 13. Polje brzine pri protoku od $100 \text{ m}^3/\text{s}$

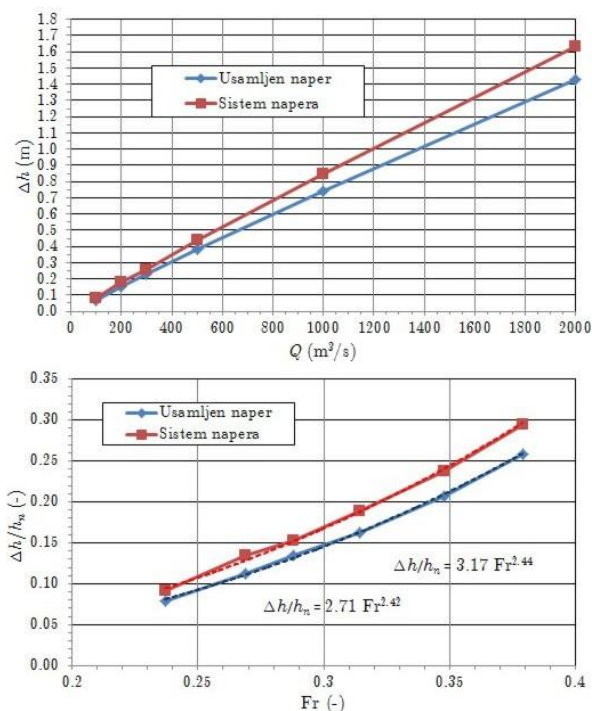
Može se primetiti da je pri malim protocima i brzinama toka ($100 \text{ m}^3/\text{s}$), u međunaperskim poljima dominantan primarni vrtlog sa vertikalnom osovinom (tipično recirkulaciono strujanje), dok je pri velikim protocima i brzinama (1000 i $2000 \text{ m}^3/\text{s}$), turbulentna struktura toka veoma složena, sa mnoštvom superponirajućih vrtloga sa vertikalnim i horizontalnim osovinama (slika 14).

Preporuka. Upoređenjem rezultata koji su dobijeni za „kanal-prototip” pomoću 1D modela i 3D modela konstantovano je da 1D model daje denivelacije koje su za 20–30% manje od onih koje daje 3D model. Imajući ovo u vidu, predloženi 1D model se može koristiti u praksi za brzu procenu denivelacije, uz odgovarajuću korekciju rezultata.

Tako je za nepotopljeno opstrujavanje napera, pomoću 1D modela najpre definisana računaska zavisnost denivelacije od protoka, a zatim je ova zavisnost uopštena kao zavisnost relativne denivelacije (u odnosu na normalnu dubinu) u funkciji Fr broja (slika 15). Pri tome, važno je ponoviti da kod neprelivnih napera, denivelacija i sila otpora ne zavise od broja napera u sistemu, već isključivo od dužine i razmaka napera (odnosa S/L_n).



Slika 14. Strujnice i dubine pri protocima 100 i 1000 m³/s



Slika 15. Računske zavisnosti za brzu procenu denivelacije.

PRIMENA 1D MODELA

Upotrebljivost predloženog 1D modela se ogleda u mogućnosti brzog variranja projektnog rešenja, što se ilustruje jednim primerom.

Neka se sistem od 3 upravna napera, dužine $L_n = 25$ m, nalazi u rečnom koritu shematizovanog pravougaonog

Tabela 2. Računska dubina uspora uzvodno od sistema napera.

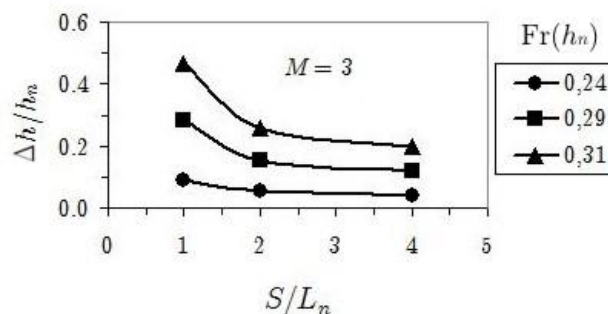
Q	$h_2 = h_n$	h_2 / p_n	h_1	h_1 / L_n	h_3	$\Delta h = h_3 - h_2$	V_1	Fr_1	C_D	F_D	$\sum F_D$
[m ³ /s]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m/s]	[-]	[-]	[kN]	[kN]
100	0,88	0,29	0,96	0,04	0,96	0,09	1,304	0,181	2,302	47	50
300	1,71	0,57	1,96	0,08	1,97	0,26	1,917	0,191	3,062	275	293
500	2,33	0,78	2,75	0,11	2,77	0,44	2,275	0,192	3,507	623	664

ZAKLJUČCI

1. Realativno jednostavan 1D računski model koji je predložen u literaturi [1, 2] pogodan je za procenu veličine uspora uzvodno od sistema napera u fazi projektovanja, kada je potrebno izabrati hidraulički najpovoljniju konfiguraciju napera za dati projektni protok, ili, kada je, za već izgrađeni sistem napera,

poprečnog preseka širine $B = 80$ m ($L_n / B = 0,3$), uzdužnog nagiba 0,001 i konstantne rapavosti $n = 0,020$ m^{-1/3}s. Razmak napera je $S = 50$ m ($S / L_n = 2$). Ispitati uticaj protoka na veličinu uspora i silu otpora. Rezultati proračuna dati su u tabeli 2.

Ako se ulazni podaci iz ovog primera iskoriste da bi se ispitao uticaj i drugih parametara na veličinu uspora, pa se pri istom stepenu suženja korita ($L_n / B = 0,3$), varira razmak napera $S = 25, 50, 100$ m ($S / L_n = 1,2,4$), dobijaju se rezultati prikazani na Slici 16. Na sličan način se vrlo brzo može ispitati i uticaj dužine napera (odnosno, stepena suženja korita L_n / B) na veličinu uspora.



Slika 16. Uticaj razmaka nepotopljenih napera na relativnu denivelaciju ($\Delta h / h_n$); broj napera nije bitan, pri istom stepenu suženja korita, denivelacija raste sa protokom (Fr brojem), a smanjuje se sa povećanjem razmaka napera (S / L_n).

potrebno proceniti njegov uticaj na usporavanje toka, što je važno u analizi evakuacije velikih voda.

2. Veličinu uspora koja se dobija primenom predloženog 1D modela treba uvećati za 20–30 %.

3. Kod nepotopljenog opstrujavanja sistema napera, uzvodno usporavanje toka presudno zavisi od stepena suženja korita. Pri datom suženju korita,

veličina uspora raste sa protokom, a smanjuje se sa povećanjem razmaka napera, dok broj napera u sistemu nije od velikog uticaja.

4. Korišćenje prostornog 3D modela je relativno zahtevno, ali omogućava ne samo pouzdanu procenu usporavanja toka uzvodno od sistema napera, već i simulaciju strujanja u međunaperskim poljima, što otvara mogućnost proračuna brzine zasipanja ovih polja. Za predviđanje složenih strujanja i morfoloških promena u koritu sa građevinama, primena 2D i 3D modela treba da bude deo svakodnevne inženjerske prakse.

LITERATURA

- [1] Azinfar, H., Kells, J., (2009), Flow resistance due to a single spur dike in an open channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No 6, pp. 755-763
- [2] Azinfar, H., Kells, J., (2011), Drag force and associated backwater effect due to an open channel spur dike field, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No 2, pp. 248-256
- [3] Hervouet, J-M., (2007), *Hydrodynamics of Free Surface Flows – modelling with the finite element method*, Wiley, Chichester, England
- [4] Ishii, C., Asada, H, Kishi, T., (1983), Shape of Separation Region Behind a Groyne of Non-Overflow Type in Rivers, *Proceedings of the XX. IAHR Congress, Vol. II, Moscow*
- [5] Jansen, P.Ph., et al., (1979), *Principles of River Engineering*, Pitman
- [6] Jovanović, M., (2012), Numerička hidraulika u projektovanju regulacionih građevina – naperi sa krilima, 16. Savetovanje SDHI i SDH, Donji Milanovac, str. 701-716
- [7] Mayerle, R., Toro, F.M., Wang, S.S.Y., (1995), Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes, *Journal of hydraulic research*, Vol. 33, No 2, pp. 243-255
- [8] Ouillon, S., Dartus, D. (1997), Three-Dimensional Computation of Flow Around Groyne, *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 123, No 11, pp. 962-970
- [9] Safarzadeh, A., et al., (2010), Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne, *River flow 2010 – Dittrich, Koll, Aberle, Geisenhainer (eds), Bundesanstalt für Wasserbau*
- [10] Telemac Modelling System V6.2, (2014), *Telemac2D and Telemac3D documentation*.
- [11] Jovanović, M. (2013) Numerička simulacija prostornog strujanja na prelivima, *VODOPRIVREDA 0350-0519*, 45 (2013) 264-266

FLOW RESISTANCE INDUCED BY SYSTEMS OF GROYNES

by

dr Miodrag Jovanović, dipl. civ. eng.
mjovanov@grf.bg.ac.rs

Summary

Flow resistance induced by presence of groynes in the river channel was experimentally investigated, and the results were published in literature [1, 2]. An appropriate 1D computational model was developed, which incorporates the experimental results. This paper presents the results of validation of the proposed 1D model. For this purpose, the Telemac3D software was used to perform numerical simulations not only of the laboratory experiment, but also

of flows in a hypothetical „prototype canal”, with size 100 times larger than the size of the laboratory canal. It was concluded that the proposed 1D model can be recommended for use in practice, provided that the calculated backwater elevations are increased by 20–30 %.

Keywords: groynes, flow resistance, backwater effects, 3D flow simulation, finite-element method.

Redigovano 27.11.2015.