

NUMERIČKA SIMULACIJA STRUJNOG POLJA U BLIZINI VODOZAHVATA

Budo ZINDOVIĆ, Miodrag JOVANOVIĆ, Radomir KAPOR
Dušan PRODANOVIĆ, Dejana ĐORĐEVIĆ
Građevinski fakultet u Univerzitetu u Beogradu

REZIME

Rad govori o mogućnostima analize strujnog polja u okolini ulaznih građevina pomoću modela ravanskog i prostornog tečenja. Pokazano je da se numeričkim modelima mogu efikasno odrediti hidrauličke i psamološke karakteristike rečnog toka. Posebna pažnja posvećena je određivanju uticaja praga uzvodno od ulaza, koji služi kao mera za smanjenje uvlačenja nanosa. Na primeru vodozahvata "Makiš" na reci Savi, ilustrovano je uspešno rešavanje problema određivanja posledica izazvanih povećanjem njegovog kapaciteta.

Ključne reči: numerički model, vodozahvat, otvoreni tokovi

1. UVOD

Vodozahvati su objekti kojima se voda kontrolisano zahvata iz vodotoka i uvodi u dovod za korisnika. Osnovni zahtevi koje ovakvi objekti moraju ispuniti su: obezbeđenje potrebne količine vode i sprečavanje uvlačenja plivajućih objekata i nanosa u dovod. Inspirisan problemom iz prakse, vodozahvat postrojenja "Makiš" na reci Savi u Beogradu, izabran je kao primer na kojem bi se ilustrovale mogućnosti numeričkih modela u hidraulici otvorenih tokova.

1.1 Opis problema

Pre skoro dve decenije pušteno je u rad postrojenje za proizvodnju pitke vode "Makiš". U prvoj fazi izgrađeno postrojenje "Makiš 1" koje omogućava zahvatanje vode od 2 do 3 m³/s. Izgradnjom drugog dela postrojenja, ukupni protok na postojećem vodozahvatu povećao bi se na 5 do 6 m³/s.

Osnovna analiza sprovedena je na fizičkom modelu pri ispitivanjima obavljenih 1986. godine tokom projekto-

vanja sistema [5,6]. Na modelu (Slika 1a), ispitivana je mogućnost zasipanja objekta rečnim nanosom i nagomilavanja plivajućih predmeta na ulazu u vodozahvat. Ispitivanjem deformacije korita, razmatrane su i mere za smanjenje zasipanja. Jedno od rešenja koje je pokazalo dobre rezultate je postavljanje kosog praga uzvodno od ulaza (Slika 1b). Zanimljivo je pomenuti da je ova mera bila predmet istraživanja još krajem '50-tih i početkom '60-tih godina prošlog veka [1,2].

Izgradnjom druge faze inicirana je potreba za dopunskim analizama jer je između dve faze izgradnje sistema prošlo oko dvadeset godina. Nova ispitivanja su neophodna zbog prelaska na novi način rada (povećanje kapaciteta), kao i izmena koje su se odigrale u međuvremenu (promene korita reke Save usled izmene hidroloških, hidrauličkih i psamoloških uslova) na razmatranoj deonici vodotoka. Budući da izgradnja novog fizičkog modela ne bi bila ekonomski opravdana, analiza je obavljena primenom numeričkih simulacionih modela ravanskog i prostornog tečenja. Cilj analize je pružanje odgovora na sledeća pitanja:

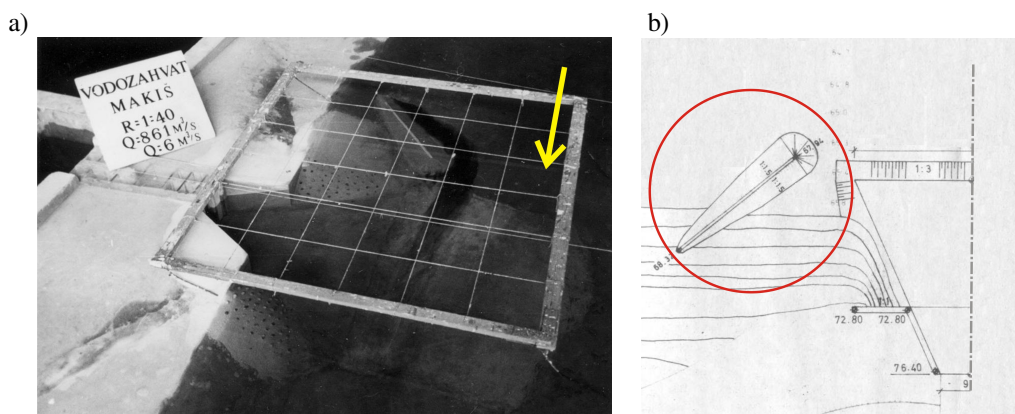
1. Kakvi su efekti postojećeg praga na strujno polje i na kretanje nanosa?
2. Da li izmena geometrije praga može uticati na poboljšanje strujne slike?
3. Da li je opravdano bagerovanje korita uzvodno od praga i u kom obimu?

U nastavku se opisuje način rešavanja datog problema i daju se odgovori na prethodno postavljena pitanja.

2. NUMERIČKO MODELIRANJE STRUJNOG POLJA

2.1 Matematički opis strujanja u vodotocima

U opštem slučaju, za proračun strujanja fluida koriste se *Reynolds*-ove jednačine koje čine jednačina održanja mase i tri jednačine održanja količine kretanja osrednjene



Slika 1. Projekat vodozahvata "Makiš" iz 1986. godine: a) detalj ulazne građevine na fizičkom modelu [5,6], b) projektovani položaj praga

po vremenu (radi preglednosti, formule su napisane u tenzorskoj notaciji):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} k \right) \quad (2)$$

(i, j = 1, 2, 3).

U jednačinama (1) i (2) korišćene su sledeće oznake: (x_1, x_2, x_3, t) - prostorne koordinate i vreme, (u_1, u_2, u_3) - komponente brzine u (x_1, x_2, x_3) pravcu, p - pritisak.

Za modeliranje turbulencije primenjen je "k-e" model turbulencije, gde je veličina k - kinetička energija turbulencije, a e - brzina njenog rasipanja (disipacije). Veza ovih parametra se definiše preko koeficijenta turbulentne viskoznosti:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon^2} \quad (3)$$

gde je C_μ - empirijska konstanta. Veličine k i e se određuju rešavanjem transportnih jednačina:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

U jednačini (4) veličina P_k predstavlja proizvodnju (produkciju) kinetičke energije turbulencije:

$$P_k = \frac{\nu_T}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

a $C_m = 0.09$, $C_{1e} = 1.44$, $C_{2e} = 1.92$, $s_k = 1.0$ i $s_e = 1.3$ su empirijske konstante.

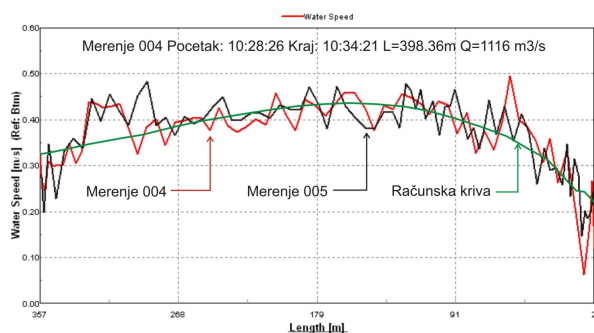
Zanemarenjem vertikalne komponente ubrzanja fluidnih delića i osrednjavanjem po dubini, prethodno navedene jednačine se uprošćavaju i dobija se model strujanja u horizontalnoj ravni [7,8]. U radu je primenjen model zasnovan na metodi konačnih elemenata implementiran u programskom paketu "RMA2". Modelisanje turbulencije je sa konstantnom viskoznošću po elementu [3] i, za uspešnu primenu, neophodno je obaviti postupak kalibracije modela po ovom parametru.

Očekivano je da u samoj okolini ulaza u zahvat nije opravdano zanemarenje vertikalne komponente ubrzanja fluida i da modelom ravanskog tečenja nije moguće pravilno rekonstruisati strujno polje u ovoj oblasti. U ovom (i sličnim slučajevima) neophodno je pristupiti rešavanju kompletnog sistema jednačina (1) - (6). Ovaj postupak je komplikovan i zahtevan u pogledu utroška vremena i računarskih resursa. Zato je potrebno primeniti što jednostavniju metodu rešavanja a da se pri tome ostvari zahtevana tačnost. U ovom radu je, za rešavanje kompletnih jednačina, primenjen model "SSIM2", baziran na metodi konačnih zapremina [10].

2.2 Kalibracija modela

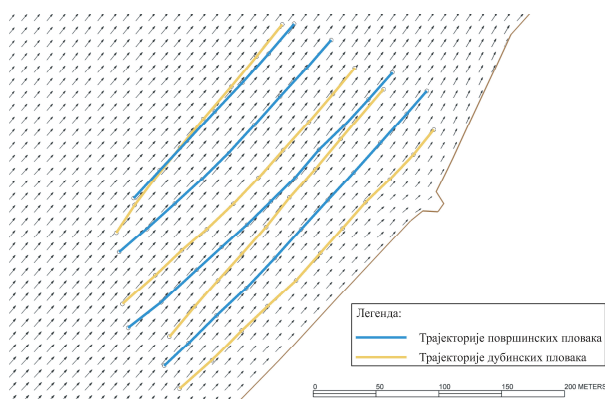
Vrednosti parametara modela određuju se u procesu kalibracije poređenjem izračunatih i izmerenih kota nivoa i rasporeda brzina. Parametri koji se variraju

zavise od primenjenog modela. U modelu ravanskog tečenja zadaju se Manningov koeficijent i turbulentna viskoznost, a u prostornom Manningov koeficijent i vrednosti graničnih uslova u uzvodnim profilima za jednačine (4) i (5). Na Slici 2 prikazani su rezultati nakon kalibracije modela ravanskog tečenja.



Slika 2. Poređenje izmerenog i izračunatog rasporeda brzina za profil 15 m uzvodno od vodozahvata a utvrđene optimalne vrednosti parametara modela iznose: $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ i $E = 800 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Budući da je neophodno proveriti vrednosti izabranih parametara, ovaj postupak je obavljen poređenjem izmerenih i izračunatih trajektorija plovaka. Na Slici 3 prikazano je dobro slaganje izmerenih putanja i računskog polja brzina u horizontalnoj ravni. Može se primetiti da je ostvareno bolje slaganje sa trajektorijama bliže vodozahvatu.



Slika 3. Poređenje trajektorija površinskih i dubinskih plovaka sa računskim poljem brzina.

Osim merenja vezanog za parametre strujnog polja, detaljno su izmerene i karakteristike suspendovanog i vučenog nanosa. Istražnim radovima, koja je obavio Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", utvrđeno je da se radi o veoma sitnom peščanom materijalu. Zrna

suspendovanog nanosa imaju srednji prečnik $d_{50} = 0,01 \div 0,02 \text{ mm}$, dok je u slučaju vučenog nanosa njegova vrednost $d_{50} = 0,03 \text{ mm}$. Materijal istaložen u crpilištu ima srednju krupnoću od oko $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$.

U periodu merenja, masena koncentracija suspendovanog nanosa, osrednjena po dubini, iznosila je oko $12 \mu\text{g/L}$.

2.3 Parametri stabilnosti rečnog korita

Poznato je da se rečni nanos može kretati u vidu suspenzije ("suspendovani nanos"), ili skokovito, klizanjem i kotrljanjem po dnu ("vučeni nanos"). Ova podela je uslovnog karaktera, jer u zavisnosti od turbulencije toka, isti materijal može imati status suspendovanog ili vučenog nanosa.

Za stabilnost korita u zoni vodozahvata bitne su obe vrste nanosa, ali na zasipanje vodozahvata više utiče suspendovani nanos, jer ga u reci ima neuporedivo više od vučenog.

Stabilnost rečnog korita može se {kvalitativno} analizirati na osnovu prostornog rasporeda vrednosti niza indikatora, a na osnovu poznatog prostornog rasporeda brzine i dubine, pri određenom protoku u reci.

U psamološkim analizama često se koriste i parametri pronosa nanosa. Jedan od takvih je parametar Velikanova, koji predstavlja neku vrstu Frudovog broja za suspendovani nanos:

$$f = U^3 / (g h W), \quad (7)$$

U prethodnoj jednačini koršćene su sledeće oznake: f - broj Velikanova, U - brzina osrednjena po dubini, h - dubina i W - brzina tonjenja zrna nanosa. Vrednost ovog bezdimenzionog broja je proporcionalna pronosu suspendovanog nanosa.

Za relativno poređenje pronosa ukupnog (vučenog i suspendovanog nanosa) u raznim hidrauličkim uslovima, mogu se koristiti sračunata polja brzina i odabrana formula za pronos ukupnog nanosa, u kojoj je brzina stepenovana nekim brojem. Na primer, u empirijskom obrascu Engelunda i Hansena, pronos ukupnog nanosa je proporcionalan brzini na peti stepen [8]. To znači da se u relativnom smislu određeni zaključci mogu izvesti na osnovu parametra $q = U^5$. U ovom radu, parametar U^5 zove se „parametar Engelund-Hansena” (EH).

Koji će se parametar i kriterijum koristiti, zavisi od slučaja, jer nema generalnog pravila. Kvalitativne

analize mogu samo ukazati na trendove i relativne odnose sračunatih veličina pri određenim hidrološko-hidrauličkim uslovima.

3. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

Na Slici 4 prikazana je računaska oblast na kojoj je prikazana i mreža konačnih elemenata korišćena za potrebe modela ravanskog tečenja. Gustina mreže je povećana u zoni vodozahvata i, budući da nije poznat privilegovani pravac tečenja, korišćena je trougaona mreža.



Slika 3. Mreža konačnih elemenata za posmatranu deonicu reke Save je sastavljena od 28335 čvorova grupisanih u 10964 elementa. Modelom ravanskog tečenja je obuhvaćena deonica od 2200 m. Na slici je naznačena i oblast koja je obuhvaćena modelom prostornog tečenja.

Proračuni su sprovedeni za nivo vode $Z = 70,93$ mm i protok Save $Q = 1590$ m³/s, što predstavlja vrednosti u periodu kada su obavljena terenska merenja. Ovaj protok je u domenu srednjih voda i je usvojen kao merodavan za sprovedenu analizu.

Na Slici 5 prikazani su dijagrami rasporeda odnosa parametara EH i Velikanova za slučaj korita bez praga i slučaj korita sa postojećim pragom. Uočava se da je u nedostatku praga pronos ukupnog nanosa na ulazu u vodozahvat $1,3 \div 1,5$ (oblast obojena narandžastom i crvenom bojom), a pronos suspendovanog nanosa od $1,6 \div 2,0$ (oblast obojena narandžastom i crvenom bojom) puta puta veći od pronosa kada postoji prag. Ovo nesumnjivo opravdava postojanje praga, a njegovo pozitivno dejstvo je potvrđeno i modelskim ispitivanjima [5,6].

Na Slici 6 dat je prikaz rasporeda psamoloških parametara za prag postojeće dužine pre i posle izvršenog čišćenja priobalnog dela u zoni vodozahvata. Vrednosti odnosa veće od jedan, koje su prisutne u zoni ulaza u vodozahvat i uzvodno od praga, ukazuju na veći pronos nanosa za slučaj zasutog korita. Ova činjenica je fizički zasnovana jer u ovim zonama nema prostora za taloženje novih količina nanosa. Sa dijagrama može se još zaključiti i da je neophodno bagerovanje uzvodno od praga u pojasu od barem 100 m.

Dosadašnji rezultati su opravdali postojanje praga i čišćenje zone uzvodno od njega. Neophodno je i proveriti da li povećanje dužine praga ima povoljan uticaj na promenu hidrauličkih i psamoloških parametara. Može se pretpostaviti da će produženje praga imati pozitivno dejstvo zbog povećanja retenzionog prostora za istaložavanje nanosa. Na dijagramima na Slici 7 uočavaju se zone u kojima su vrednosti psamoloških parametara veće od jedinice. Te oblasti ukazuju da se na ovim mestima smanjuje pronos nanosa povećanjem dužine praga, ali su one ograničene na njegovu užu okolinu. Kao što je napomenuto u tački 2.1, modelom ravanskog tečenja nije moguće dobiti definitivni odgovor da li treba produžiti prag zato što je oko praga značajno vertikalno ubrzanje fluidnih delića. Pošto su ovoj zoni narušene pretpostavke o ravanskom strujanju, neophodno je primeniti model prostornog tečenja.

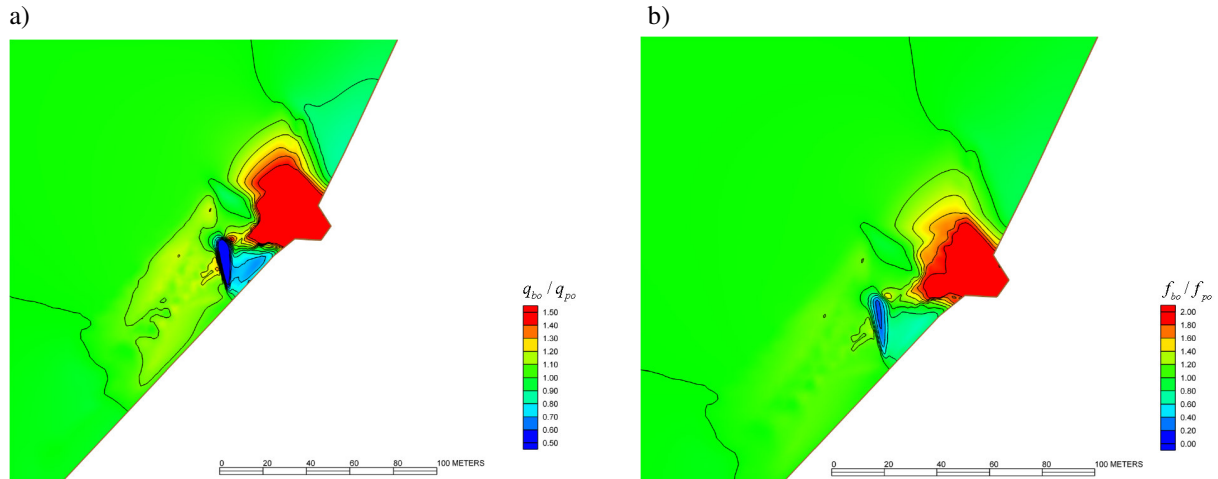
Na Slici 8 prikazane su strujnice za slučaj praga postojeće dužine kao i za produžen prag pri kapacitetu $Q_{vz} = 5$ m³/s. Strujnice prolaze kroz ulaz vodozahvata. Zelenom bojom su označene strujnice pri vrhu otvora, plavom strujnice na sredini, a crvenom strujnice pri dnu. Poređenjem ove dve strujne slike uočava se da je strujanje za slučaj sa produženim pragom pravilnije. To se ogleda u manjoj zakrivljenosti strujnica i nešto ravnomernijem rasporedu strujnica po širini ulaza u vodozahvat.

4. ZAKLJUČCI

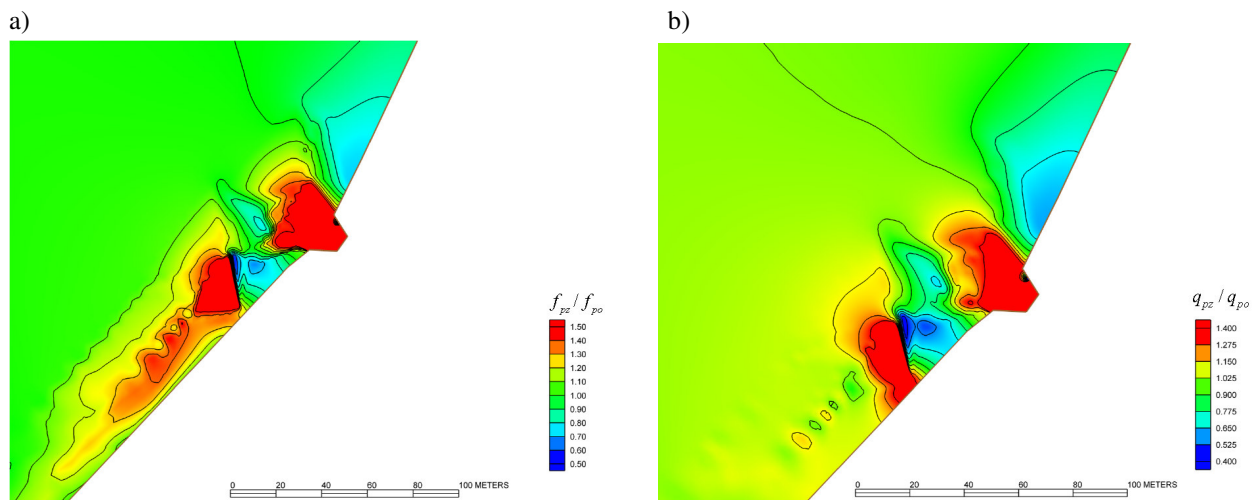
Matematičko modeliranje fizičkih procesa omogućava detaljnu analizu hidrodinamičkih i psamoloških veličina, što je izuzetno značajno za hidrotehničku praksu. Kalibrisani i verifikovani numerički modeli mogu se koristiti za relativno pouzdano predviđanje strujnog polja i na ovaj način uspešno dopunjavati postojeće znanje stečeno ispitivanjima na fizičkim modelima. U slučaju vodozahvata "Makiš", za kalibraciju

matematičkog modela korišćeni su, pored rezultata merenja i podaci prikupljeni tokom višegodišnje eksploatacije. Primer ovog vodozahvata pokazuje mogućnosti primene numeričkih modela različite

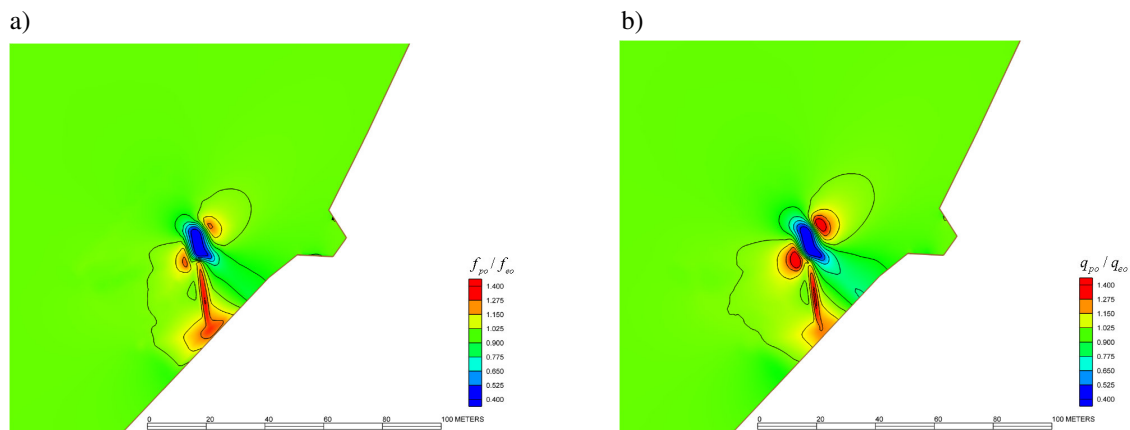
složenosti, pri čemu se za duže deonice mogu efikasno koristiti ravanski modeli, dok se za oblasti u blizini objekata (gde ne važi hidrostatička raspodela pritiska) moraju koristiti modeli prostornog strujanja.



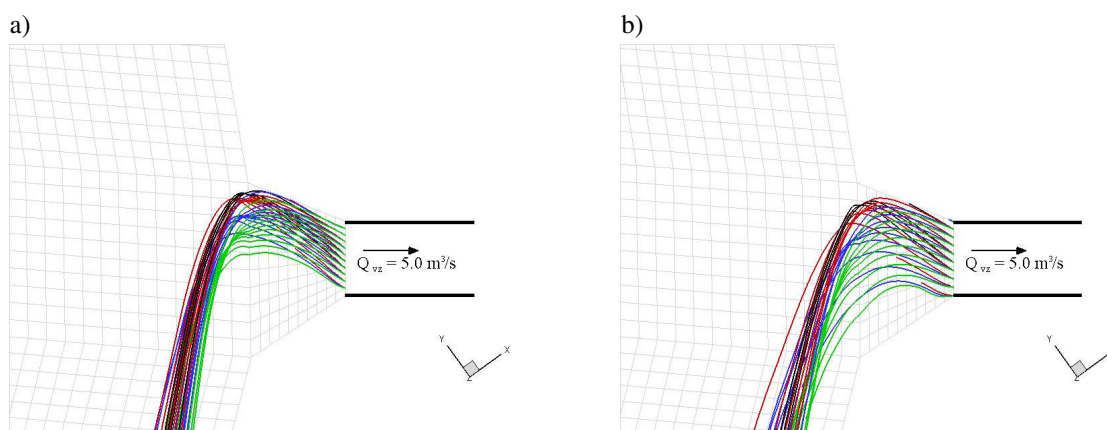
Slika 5. Ispitivanje uticaja postojanja praga na strujno polje pri $Q_{vz} = 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$: a) raspored odnosa parametra EH za varijantu bez praga (q_{bo}) i sa pragom postojeće dužine (q_{po}), b) raspored odnosa parametra Velikanova za varijantu bez praga (f_{bo}) i sa pragom postojeće dužine (f_{po}). Uočava se da je po oba ispitana parametra oblast oko ulaza i uzvodno od praga obojena crvenom bojom, što znači da su vrednosti oba parametra a samim tim i pronosi ukupnog i suspendovanog nanosa veći u slučaju nepostojanja praga.



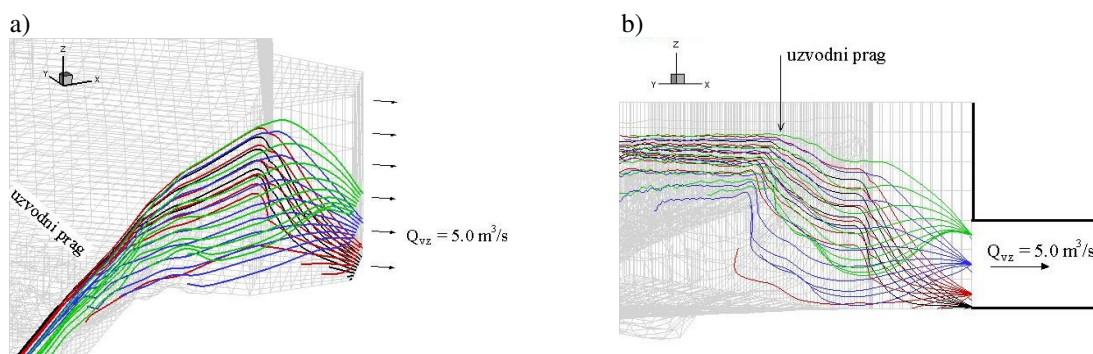
Slika 6. Ispitivanje uticaja čišćenja u zoni zahvatne građevine pri $Q_{vz} = 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$: a) raspored vrednosti parametra EH za zasuto korito (q_{pz}) i očišćeno korito (q_{po}) za prag postojeće dužine, b) raspored vrednosti parametra Velikanova za zasuto korito (f_{pz}) i očišćeno korito (f_{po}) za prag postojeće dužine. U oblastima obojene crvenom i narandžastom bojom dolazi do smanjenja pronosa nanosa u slučaju izvršenog čišćenja. Osim bagerovanja u okolini ulaza, primećuje se da je neophodno očistiti i priobalje uzvodno od praga u dužini od oko 100 m.



Slika 7. Određivanje uticaja produženja praga pri kapacitetu vodozahvata $Q_{vz} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$: a) raspored parametra EH za očišćeno korito sa postojećim pragom (q_{po}) i sa produženim pragom (q_{eo}), b) raspored parametra Velikanova za očišćeno korito sa postojećim pragom (f_{po}) i sa produženim pragom (f_{eo}). Na prikazanom dijagramu se uočava da je zona uticaja praga ograničena na neposrednu okolinu praga, što ukazuje na činjenicu da model ravanskog tečenja ne može dati definitivni odgovor na pitanje da li je produženje praga dobra mera.



Slika 8. Ispitivanje uticaja produženja praga pomoću modela prostornog tečenja pri kapacitetu zahvata od $Q_{vz} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ (pogled odozgo): a) strujnice za očišćeno korito sa postojećim pragom, b) strujnice za očišćeno korito sa produženim pragom. Uočava se da se u slučaju produženja praga ostvaruje pravilnija strujna slika u zoni ulazne građevine.



Slika 9. Strujnice za usvojenu varijantu sa produženim pragom pri $Q_{vz} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$: a) aksonometrijski prikaz, b) pogled sa strane.

LITERATURA

- [1] Vojnović, M.: *Prise d'eau sans barrages*, VII Congress IAHR, Lisabon, 1957.
- [2] Vojnović, M.: *Modifications des courants d'eau causées par des prises d'eau sans barrages*, IX Congress IAHR, Dubrovnik, 1961.
- [3] Donnel, B.P., et al.: *RMA2 WES Version 4.5 Users Guide*, US Army Corps of Engineers, WexTech Systems, Valhalla, New York, 2003.
- [4] Hajdin, G.: *Mehanika fluida – Osnove*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [5] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: *Vodozahvat „Makiš“ – Hidraulička modelska ispitivanja*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1986.
- [6] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: *Vodozahvat „Makiš“ – Dopunska hidraulička modelska ispitivanja*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1986.
- [7] Jovanović, M.: *Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [8] Jovanović, M.: *Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija*, 2. izdanje, Građevinski fakultet, Beograd, 2008.
- [9] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B.: *Hidraulička studija funkcionisanja vodozahvata „Makiš“*, Izveštaj br. 43643, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [10] Olsen, N. R.: *A three-dimensional numerical model for sediment movements in eater intakes with multi-block option*, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2004.

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW FIELD IN THE VICINITY OF AN INTAKE STRUCTURE

by

Budo ZINDOVIĆ, Miodrag JOVANOVIĆ, Radomir KAPOR,
Dušan PRODANOVIĆ, Dejana ĐORĐEVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

This paper deals with the analysis of the flow field in the vicinity of an intake structure. It is shown that flow and psamological characteristics can be determined successfully by 2D and 3D numerical models. Determining the influence of measures for reducing sediment deposition inside the structure was considered as most important. One such measure, a bar located

upstream of the intake mouth, proved to be the most difficult task for 2D model. For illustration, results are presented related to the water supply intake "Makiš" on the Sava River.

Key words: numerical model, intake structure, free surface flows

Redigovano 15.11.2010.