

OBLIKOVANJE ULAZA U ZALIV PRIMENOM MODELA RAVANSKOG I PROSTORNOG TEČENJA

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

REZIME

Najveći problem zaliva je zasipanje - prirodan proces koji se ne može izbeći. Visoki troškovi održavanja zaliva (bagerovanja mulja i čišćenja obala) nameću potrebu primene mera za smanjenje uvlačenja nanosa u zaliv. Budući da je uzrok zasipanja mešanje rečne vode opterećene nanosom i vode zaliva, smanjenjem količine vode koja dospeva u zaliv može se smanjiti zasipanje. Ovaj problem se može rešiti određivanjem najpovoljnijeg oblika ulaza u zaliv. U ovom radu je prikazano oblikovanje ulaza pomoću modela ravanskog i prostornog tečenja. Kao primer, prikazani su rezultati koji se odnose na oblikovanje ulaza u Čukarički zaliv.

Ključne reči: model ravanskog tečenja, model prostornog tečenja, metod konačnih elemenata, oblikovanje ulaza u zaliv

1. UVOD

Ovaj rad je inspirisan konkretnim problemom iz prakse. Kao što je poznato, pregrađivanjem Čukaričkog rukavca, formirano je Savsko jezero, dok je nizvodni kraj nekadašnjeg rukavca, Čukarički zaliv, ostao otvoren prema reci Savi. Ovaj zaliv se zasipa nanosom iz reke Save, što je naročito izraženo u zoni ulaza, gde su formirani sprudovi. Postavljen je zadatak da se odredi optimalan oblik ulaza sa stanovišta uvlačenja nanosa i smanjenja zasipanja, vodeći računa o projektu novog mosta i plovnom gabaritu za buduću marinu.

2. NUMERIČKI MODEL

2.1 Model za proračun hidrodinamičkih veličina

Za potrebe oblikovanja ulaza u Čukarički zaliv su primenjeni modeli ravanskog i prostornog tečenja. Jednačine matematičkog modela ravanskog tečenja su prikazane u

[6] i [8]. Model prostornog tečenja je upotrebljen da bi se proverili rezultati dobijeni modelom ravanskog tečenja. Prostorno neustaljeno tečenje se opisuje Rejnoldsovim jednačinama koje čine jednačina održanja mase i održanja količine kretanja u tri koordinatna pravca [1], [2], [8]:

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

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

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

U prethodnim jednačinama su korišćene 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.

U proračunu je primenjen "k-ε" model turbulencije, gde je veličina k - kinetička energija turbulencije, a ϵ - brzina njenog rasipanja (disipacije). Veza ovih parametara se definiše preko koeficijenta turbulentne viskoznosti:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k}{\epsilon^2}$$

gde je C_m - empirijska konstanta.

Veličine k i ϵ se određuju rešavanjem transportnih jednačina:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

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

$$P_k = \frac{v_T}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

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

2.2 Ulazni podaci

Da bi sistem jednačina (1) - (5) bio rešiv, potrebno je zadati vrednosti zavisnih promenljivih na granicama i odrediti vrednosti parametara modela.

Grafični uslovi. Kod modela ravanskog tečenja je potrebno zadati vrednosti zavisnih promenljivih na granicama računске oblasti. Na uzvodnoj je zadat protok od $1350 \text{ m}^3/\text{s}$, a na nizvodnoj kota nivoa 70.15 m n.m. Kod modela prostornog tečenja se osim uzvodnog i nizvodnog graničnog uslova zadaju i uslovi na čvrstoj granici i na slobodnoj površini vode. Komponente brzine upravne na čvrstu granicu i slobodnu površinu vode su jednake nuli (uslov „sa klizanjem“). Definisane granične uslova za jednačine "k-ε" modela je složenije. Na osnovu poznate brzine se prvo sračuna srednja vrednost koeficijenta turbulentne viskoznosti [10]:

$$v_T = 0.11 u_* h,$$

a zatim korišćenjem izraza:

$$k = \frac{u_*}{\sqrt{C_\mu}}$$

sračuna vrednost kinetičke energije turbulencije na dnu. Uz pretpostavke da je vrednost "k" na slobodnoj površini jednaka polovini vrednosti sa dna i da se menja linearno po dubini toka [10], moguće je sračunati raspored kinetičke energije turbulencije u ulaznom i izlaznom profilu. Kinetička energija turbulencije na slobodnoj površini je jednaka nuli, dok se za brzinu rasipanja kinetičke energije zadaje nulta vrednost njenog prvog izvoda.

2.3 Parametri stabilnosti korita

U zavisnosti od trenutnih hidrauličkih uslova u vodotoku, nanos se može kretati u vidu suspenzije ("suspendovani" ili "lebdeći" nanos), ili skokovito, klizanjem i kotrljanjem po dnu ("vučeni nanos"). Ova podela je uslovnog karaktera, jer se u zavisnosti od intenziteta turbulencije, isti materijal može u jednom periodu kretati u vidu suspendovanog, a u drugom periodu u vidu vučenog nanosa. Kako je zastupljenost vučenog nanosa u velikim aluvijalnim vodotocima najviše 10% od ukupne količine nanosa, predmet psamoloških analiza je, uglavnom, suspendovani nanos. Ključna je procena stabilnosti suspenzije, od čega

zavisi mogućnost istaložavanja čestica suspendovanog nanosa i formiranje sprudova. Ova procena je naročito važna za zonu ulaza u zaliv, kada pri svim hidrološkim uslovima postoji tendencija unošenja nanosa iz matice reke i njegovog istaložavanja.

Kao indikator potencijalnog taloženja suspendovanog nanosa, koristi se odnos U_*/W , gde je U_* smičuća brzina toka definisana na sledeći način:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = n\sqrt{g} \frac{U}{h^{1/6}},$$

a W je brzina tonjenja zrna, koja zavisi od krupnoće čestice i njenog mineralnog sastava, odnosno gustine.

Analizom granulometrijskog sastava nanosa [7], usvojeni su merodavni prečnici zrna. Za usvojene prečnike zrna, određene su brzine tonjenja (Tabela 1).

Tabela 1. Brzine tonjenja za merodavne prečnike zrna

d [mm]	W [cm/s]
0.05	0.12
0.01	0.47
0.02	1.75

Generalno, istaložavanje suspendovanog nanosa može se očekivati ako je [9]:

$$U_*/W < 1. \quad (6)$$

Stabilnost rečnog korita se može *kvalitativno* analizirati na osnovu prostornog rasporeda vrednosti indikatora U_*/W , imajući u vidu kriterijum (6). Raspored vrednosti U_*/W ukazuje na oblasti potencijalnog zasipanja, ili potencijalne erozije. Jasno je da se navedeni raspored može odrediti samo za poznato strujno polje, odnosno za prethodno sračunat prostorni raspored brzine i dubine pri određenom protoku u reci.

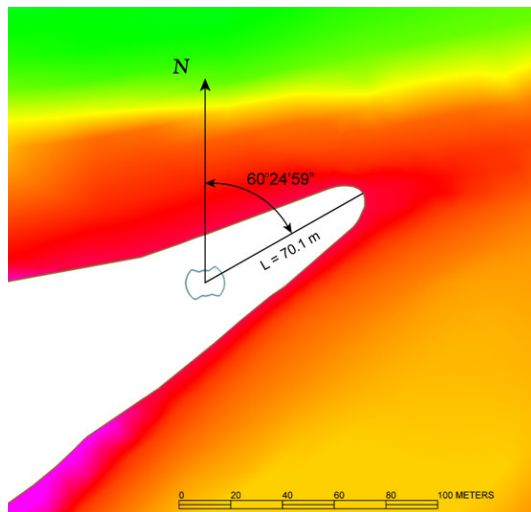
3. RAČUNSKE VARIJANTE

Osnovni kriterijum za oblikovanje ulaza u Čukarički zaliv je smanjenje unošenja nanosa iz reke Save, a time i smanjenje zasipanja ovog dela Zaliva. Imajući u vidu da zbog prirodne tendencije zasipanja desne obale ulaza Čukaričkog zaliva, nije racionalno uklanjanje postojećeg spruda, linija obale je prilagođena tom sprudu [5]. Oblik leve obale ulaza tj. nizvodnog kraja Ade Ciganlije je analiziran, vodeći računa o osnovnom kriterijumu smanjenja uvlačenja nanosa. Generalno, smanjenje širine ulaza ispunjava taj zahtev, što je moguće izvesti samo produženjem nizvodnog kraja Ade ili njegovim produženjem, pri čemu se nizvodni kraj pomera ka sredini korita Save. Ovo rešenje je inspirisano

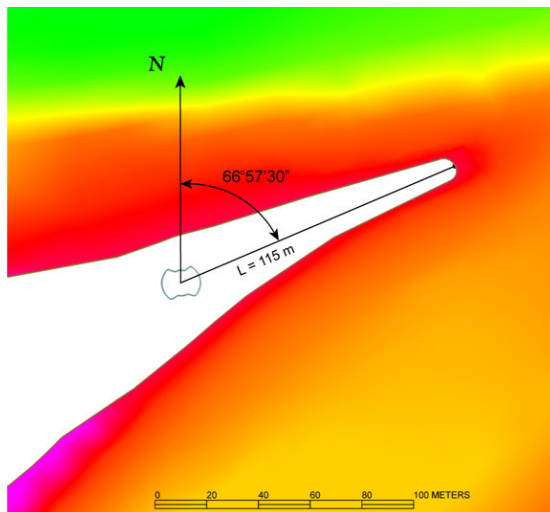
oblikom usmeravajuće građevine na ulazu u bazen Luke "Beograd", koji je određen pomoću fizičkog modela [3]. Takođe su uzete u obzir i preporuke iz literature [4]. Oblik leve obale je određen za merodavan protok od $1350 \text{ m}^3/\text{s}$,

što odgovara protoku srednje vode reke Save za posmatranu deonicu. Na Slici 1 su prikazani ispitani oblici nizvodnog kraja Ade Ciganlije.

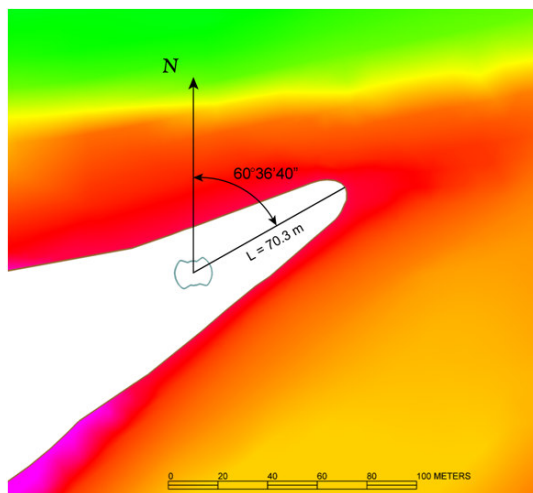
a) „Prav-kraći“



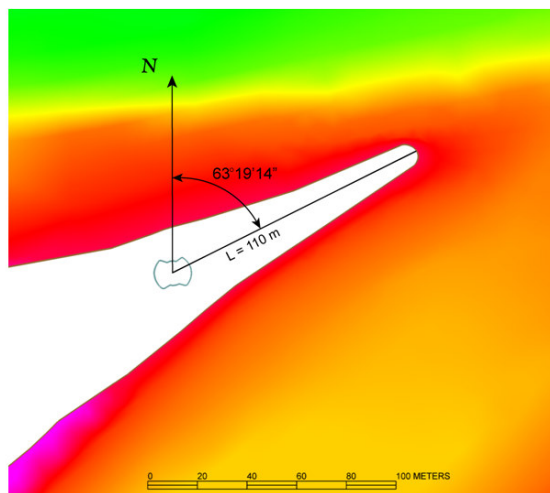
b) „Prav-duži“



c) „Kosi-kraći“



d) „Kosi-duži“



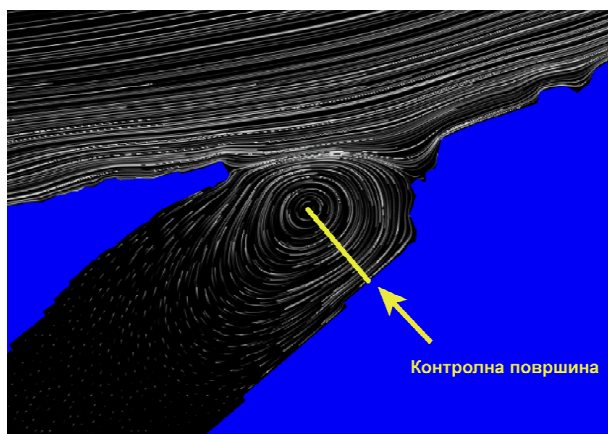
Slika 1. Ispitani oblici geometrije ulaza u Zaliv. Nazivi varijanti su izabrani tako da asociraju na pravac ("Prav" i "Kosi") i dužinu ("Kraći" i "Duži") nizvodnog kraja Ade Ciganlije

4. ANALIZA REZULTATA

4.1 Rezultati hidrodinamičkih proračuna

Za određivanje optimalnog oblika ulaza, korišćeni su rezultati dobijeni primenom modela ravanskog i prostornog tečenja. Karakteristika svakog zaliva je formiranje

recirkulacione (vrtložne) zone na ulazu. Oblik i dimenzije ulaza bitno utiču na veličinu ove zone i na količinu nanosa koju vrtlog uvlači u zaliv. Ova količina je proporcionalna protoku vode u vrtložnoj zoni kroz kontrolni presek prikazan na Slici 2.



Slika 2. Vrtložna zona formirana na ulazu u Zaliv pri proticaju srednje vode sa položajem kontrolnog preseka

Sa stanovišta uvlačenja nanosa, poželjno je da je ulaz što uži. S druge strane, pri suženju ulaza moraju se imati u vidu zahtevi plovidbe, s obzirom da je u Zalivu predviđena izgradnja marine. U Tabeli 2 su navedene vrednosti protoka vrtloga za varijante oblikovanja ulaza.

Tabela 2. Proticaj vrtloga na ulazu u Zaliv

Varijanta oblika ulaza	„Prav- -kraći“	„Prav- -duži“	„Kosi- -kraći“	„Kosi- -duži“
Q [m ³ /s]	3.65	3.14	3.44	3.30

Opravanost primene modela ravanskog tečenja, proverena je numeričkim modelom prostornog tečenja. U Tabeli 3 su dati izračunati intenziteti brzina u zoni ulaza. Može se primetiti da je intenzitet komponente brzine u pravcu vertikale (w) dva do četiri reda veličine manji od intenziteta komponenti u horizontalnoj ravni (u , v), što dokazuje da je primena modela ravanskog tečenja bila opravdana.

Tabela 3. Opseg brzina u zoni ulaza u Zaliv

	u [m/s]	v [m/s]	w [m/s]
reka Sava	10^{-1}	$10^{-2} \div 10^{-1}$	$10^{-5} \div 10^{-3}$
Čukarički zaliv	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$10^{-5} \div 10^{-4}$

Uočava se da kod kraćeg špica promena ugla osovine u odnosu na prirodno stanje ne utiče bitno na prirodu sekundarnog strujanja. Nasuprot tome, sa povećanjem

dužne špica, karakter sekundarnog strujanja zavisi od usvojenog azimuta. Tako kosi duži špic jednako remeti strujnu sliku kao i špicevi manje dužine. Međutim, prav duži špic eliminiše pojavu vrtložnog strujanja u poprečnim presecima u zoni spoja Zaliva i reke Save, čime se stvaraju povoljni uslovi za značajnije smanjenje zasipanja Čukaričkog zaliva.

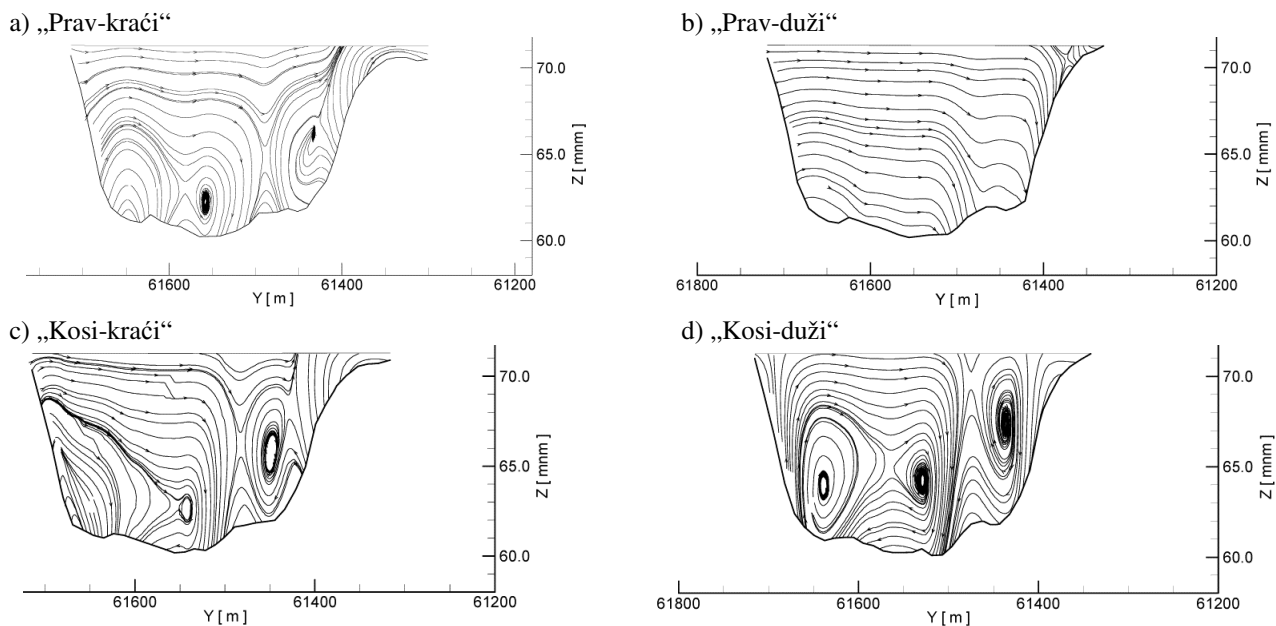
4.2 Analiza parametara stabilnosti

Uticao oblika ulaza na zasipanje Zaliva se može sagledati upoređivanjem parametara stabilnosti korita za varijante oblikovanja ulaza. Na Slici 4 je prikazan raspored vrednosti U_s/W za različite geometrije ulaza za zno prečnika 0.05 mm.

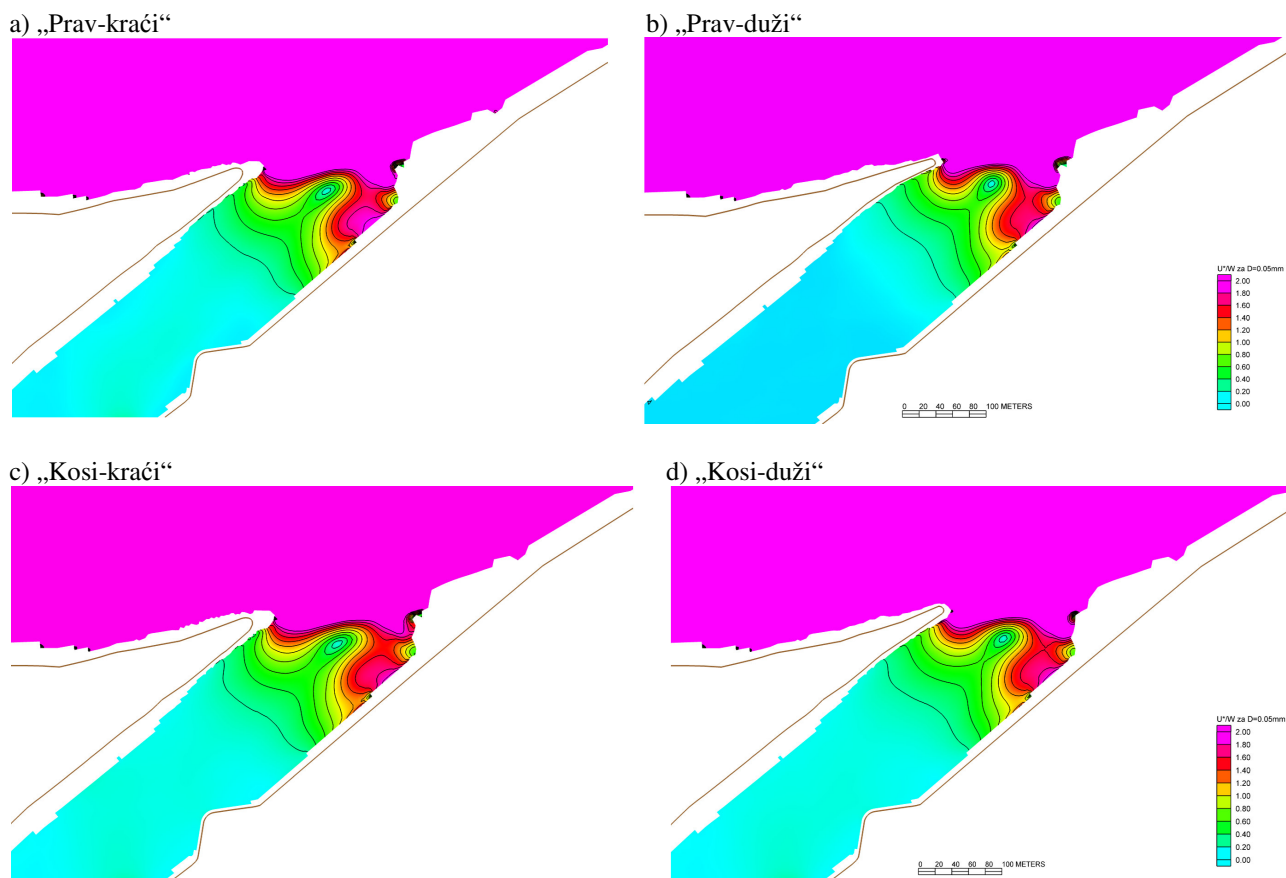
Na prostoru koji obuhvata vrtlog, razlikuju se zone kretanja (zona ljubiaste boje) i istaloavanja nanosa (zona plave i zelene boje). To znači da vrtlog prebacuje nanos iz jedne zone u drugu. Ukoliko je zona kretanja nanosa više uvučena ka unutrašnjosti zaliva, to znači da vrtlog ima više "snage" da unese nanos dublje u Zaliv. Da bi se proces zasipanja smanjio, zona taloženja nanosa mora biti što više povučena ka matici reke Save. Zbog veće površine kontakta reke i Zaliva, varijante sa manjim produženjem nizvodnog kraja Ade su nepovoljnije. Usmerenje produženog dela Ade ka matici reke dovodi do veće poremećaja strujnog polja u zoni ulaza, što je nepovoljnije sa stanovišta uvlačenja nanosa u Zaliv.

5. ZAKLJUČCI

Određivanje strujne slike na ulazu i uvlačenje nanosa iz reke u zaliv je veoma složen problem koji zahteva primenu numeričkih modela ravanskog i prostornog tečenja. Kada je dubina zaliva znatno manja od dubine rečnog korita, strujanje na ulazu u zaliv nema izraženi prostorni karakter, pa se može primeniti model ravanskog tečenja. Ovim modelom se može sa dovoljnom tačnošću opisati vrtložni tok na ulazu u zaliv, od čijeg intenziteta zavisi stepen zasipanja ulaza. Sužavanjem ulaza smanjuje se protok u vrtlogu i uvlačenje nanosa iz reke u zaliv. U slučaju Čukaričkog zaliva, suženje ulaza se može postići produženjem nizvodnog kraja Ade u pravcu postojeće obale ili usmerenjem ka matici reke. Rezultati numeričkih simulacija pokazuju da se bolji efekti postižu produženjem u pravcu postojeće obale.



Slika 3. Vrtlozi u poprečnom preseku u matici reke Save za različite oblike ulaza u Zaliv



Slika 4. Raspored vrednosti U^*/W za ispitane varijante

LITERATURA

- [1] Ferziger, J. H., Perić, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, 1996.
- [2] Hajdin, G.: *Mehanika fluida – Osnove*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [3] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: *Izveštaj o modelskom ispitivanju ulaza u beogradsko pristanište*, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 1959.
- [4] Jansen, P. Ph., et al.: *Principles of river engineering*, Pitman, 1979.
- [5] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B.: *Hidraulička studija Čukaričkog zaliva i njegovog spoja sa rekom Savom*, Izveštaj br. 43336, Građevinski fakultet, Beograd, 2005.
- [6] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Đorđević, D., Zindović, B.: *Studija uticaja mosta na donjem špicu Ade Ciganlije na strujno polje i morfologiju korita reke Save na ulazu u Čukarički zaliv u Beogradu*, Izveštaj br. 43661, Građevinski fakultet, Beograd, 2006.
- [7] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B.: *Numerička simulacija koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke*, 14. Savetovanje SDHI, 2006.
- [8] Jovanović, M.: *Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [9] Jovanović, M.: *Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [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.

APPLICATION OF 2D AND 3D MODELLING IN BAY ENTRANCE DESIGN

by

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

Summary

Bays suffer from siltation, which is a natural process that cannot be avoided. The main cause of this process is mixing of the river-water containing suspended sediment and the river-bay water. High costs of maintenance - dredging and disposal of contaminated sludge can be reduced. By reducing the amount of river-water and bay-water mixing, siltation can be significantly scaled down, and thus costs of

maintenance. This paper deals with the problem of defining an optimal shape of bay entrance using 2D and 3D numerical model. For illustration, results pertaining to the design of entrance of Čukarica Bay are presented.

Key words: 2D numerical model, 3D numerical model, finite-element method, designing bay entrance

Redigovano 14.05.2007.