

NUMERIČKA SIMULACIJA KONCENTRISANOG ISPUŠTANJA IZBAGEROVANOG NANOSA U MATICU REKE

Miodrag JOVANOVIĆ
Radomir KAPOR
Dušan PRODANOVIĆ
Budo ZINDOVIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Ovaj rad govori o mogućnostima predviđanja hidrauličkih posledica koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog materijala u maticu reke pomoću numeričkog modela ravanskog tečenja. Pokazuje se da se numeričkim simulacijama može efikasno reprodukovati strujno polje, raspored koncentracije i raspored zasipanja u rečnom koritu. Posebno je razmotren problem kalibracije modela. Kao primer, prikazani su rezultati koji se odnose na koncentrisano ispuštanje nanosa izbagerovanog iz Čukaričkog zaliva u maticu reke Save.

Ključne reči: modeli ravanskog tečenja, metoda konačnih elemenata, deformacija rečnog korita, bagerovanje

1. UVOD

Ovaj rad inspirisan je konkretnim problemom iz prakse. Kao što je poznato, pregrađivanjem Čukaričkog rukavca 1967. godine, formirano je Savsko jezero površine 86 ha, sa Čukaričkim zalivom na nizvodnom kraju Ade Ciganlije. Ovaj zaliv se koristi u sportsko-rekreativne i komercijalne svrhe i većim delom pripada zoni neposredne zaštite izvorišta beogradskog vodovoda.

Čukarički zaliv se zasipa nanosom iz reke Save, što je naročito izraženo na ulazu u Zaliv, gde su formirani sprudovi, kao i materijalom koji dospeva Topčiderskom rekam i muljem iz gradskog kanalizacionog sistema. Projektom čišćenja i produbljenja Zaliva za potrebe buduće marine [17], predviđeno je da se 83430 m³ izbagerovanog nanosa ispusti u korito reke Save. Postavljen je zadatak da se odredi pogodno mesto za ispuštanje ovog materijala, vodeći računa o stabilnosti rečnog korita, gabaritu plovnog puta i uticaju na životnu sredinu. Napominje se da je reč o

ekološki neškodljivom materijalu, koji se, po oceni merodavnih stručnjaka, sme ispustiti u rečno korito.

U nastavku se opisuje kako je rešavan ovaj zadatak i kako su analizom deformacije korita, određeni najpogodniji hidrološki uslovi za ispuštanje nanosa.

2. NUMERIČKI MODEL

2.1 Model za proračun hidrodinamičkih veličina

Za modeliranje strujne slike na razmatranom sektoru reke Save, primenjen je matematički model ravanskog (2D) tečenja, koga čine jednačina održanja mase i dve jednačine održanja količine kretanja [2,3,7,13,16,18]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + h u \frac{\partial u}{\partial x} + h v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + g h \left[\frac{\partial z_D}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g n^2 u}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + h u \frac{\partial v}{\partial x} + h v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g h \left[\frac{\partial z_D}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g n^2 v}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} = 0, \quad (3)$$

gde su: nezavisne promenljive – prostorne koordinate i vreme (x, y, t), zavisne promenljive – dubina i po dubini osrednjene komponente brzine (h, u, v), z_D – kota dna, E – tenzor turbulentne viskoznosti, n – koeficijent rapavosti po Maningu, ρ – gustina vode i g – gravitaciono ubrzanje.

Poslednji članovi u jednačinama (2) i (3) predstavljaju komponente lokalnog tangencijalnog napona po koordinatnim pravcima, τ_{ox} i τ_{oy} . Ovi naponi se mogu izraziti u jedinicama brzine (m/s) i tada nose ime „smičuće brzine“:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{ox}}{\rho}}; \quad v_* = \sqrt{\frac{\tau_{oy}}{\rho}}. \quad (4)$$

Intenziteti vektora brzine toka U i smičuće brzine U_* su:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}; \quad U_* = \sqrt{u_*^2 + v_*^2}. \quad (5)$$

Vrednosti parametara modela - rapavosti (n) i tubulentne viskoznosti (E), određuju se kalibracijom modela. Ako se pretpostavi izotropnost turbulencije, koeficijenti turbulentne viskoznosti imaju istu vrednost u svim koordinatnim pravcima, pa ovaj parametar postaje skalarna veličina.

Rešenje sistema parcijalnih diferencijalnih jednačina (1) – (3) definiše strujno polje u horizontalnoj ravni, u nizu tačaka računске mreže koja „pokriva“ razmatranu oblast. Rešavanje iziskuje zadavanje početnih uslova (dubina i brzina) po celoj računskog oblasti, kao i uslova na granicama ove oblasti – protoka na uzvodnoj granici i odgovarajuće kote nivoa na nizvodnoj granici.

Numerički model ravanskog strujanja zasniva se na nekoj od metoda konačnih zapremina ili konačnih elemenata [5, 7]. U ovom radu je korišćena metoda konačnih elemenata, implementirana u komercijalnom softverskom paketu RMA2 [3]. Koriste se trougaoni i četvorougaooni elementi sa kvadratnim interpolacionim funkcijama za brzine, odnosno linearnim funkcijama za dubine [7, 13].

2.2 Parametri stabilnosti rečnog korita

Kriterijum pokretanja materijala na dnu i njegovog kretanja u režimu vučenog nanosa zasnovan je na poređenju vrednosti stvarnog tangencijalnog napona i

„kritičnog tangencijalnog napona“, koji se u bezdimenzionom obliku izražava pomoću Šildsovog broja:

$$\Theta = \frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{U_*^2}{g \cdot \Delta \cdot d} \quad (6)$$

gde je d – prečnik zrna, ρ_s – apsolutna, a $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ – relativna gustina nanosa.

Do pokretanja zrna na dnu dolazi kada je ispunjen uslov:

$$\Theta/\Theta_c > 1, \quad (7)$$

gde je: $\Theta_c = 0.047$ – vrednost kritičnog Šildsovog broja.

Kao indikator taloženja čestica suspendovanog nanosa može se koristiti odnos smičuće brzine (U_*) i brzine tonjenja čestice (W), a početak taloženja se može definisati uslovom [14]:

$$U_*/W < 1. \quad (8)$$

Brzina tonjenja zavisi od mineralnog sastava i krupnoće čestica suspendovanog nanosa. U nedostatku izmerenih vrednosti ove brzine, za njeno određivanje se mogu koristiti nomogrami ili empirijski obrasci [14].

Analiza stabilnosti korita reke Save u toku ispuštanja izbagerovanog materijala kvalitativno je analizirana na osnovu prostornog rasporeda vrednosti veličina koje figurišu u izrazima (7) i (8). Ovaj raspored ukazuje na oblasti potencijalnog zasipanja ili potencijalne erozije. Kvantitativna analiza promena u rečnom koritu podrazumeva proračun pronosa nanosa i deformacije korita, o čemu se govori u nastavku.

2.3 Model transporta nanosa i deformacije korita

U velikim aluvijalnim rekama sa mirnim režimom tečenja, hidraulički procesi se odvijaju znatno brže od procesa koji menjaju morfologiju rečnog korita. Zbog toga je uobičajeno da se proračun strujnog polja razdvaja od proračuna transporta nanosa i deformacije korita. To znači da se proračun deformacije korita obavlja za poznat raspored dubine i brzine, po modelu kvazi-ustaljenih stanja. Pri tome se pretpostavlja da je nanos lako pokretan (nevezan) peščani materijal.

Proračun deformacije korita se odvija sve dok se ne proceni da su sračunate promene kota dna dovoljno velike da utiču na dubine i brzine, kada je neophodno da se

strujno polje „osveži” – ponovo sračuna sa izmenjenom batimetrijom. Nakon hidrauličkog proračuna, ponovo sledi proračun deformacije korita. Na taj način se hidraulički i psamološko-morfološki proračuni naizmenično smenjuju, do kraja nekog unapred definisanog računskog perioda.

Režim suspendovanog nanosa u datim hidrauličkim uslovima definiše se vremenskim i prostornim rasporedom koncentracije C [kg/m^3], koji se određuje rešavanjem konvekciono-difuzione jednačine [4, 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S, \quad (9)$$

u kojoj su (pored ranije definisanih oznaka), D_x , D_y – koeficijenti efektivne difuzije (mešanja) za nanos [m^2/s].

Izvorni član u jednačini (3) definisan je na sledeći način:

$$S = \alpha_1 (C - C_{eq}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s})], \quad (10)$$

gde je: α_1 – empirijska konstanta, C – stvarna koncentracija u datim hidrauličkim uslovima, a C_{eq} – koncentracija nanosa u „ravnotežnim uslovima”, kada nema deformacije korita. Izraz (10) pokazuje da se pomoću izvornog člana definiše „višak” ili „manjak” koncentracije koji prouzrokuje zasipanje ili eroziju korita.

Koncentracija u ravnotežnim uslovima C_{eq} odgovara transportnom kapacitetu vodotoka za suspendovani nanos pri datoj brzini toka. Za proračun transportnog kapaciteta postoji više empirijskih formula. Ovde je korišćena poznata formula Akersa i Uajta [1, 14].

Numeričko rešavanje paraboličke jednačine (9) zasniva se na Krank-Nikolsonovoj shemi težinske diskretizacije izvoda po vremenu [2, 5, 13, 16]. Sračunata promena mase nanosa u vremenskom intervalu Δt se, uzimajući u obzir poroznost, „pretvara” u odgovarajuću promenu zapremine, a promena zapremine po elementu, u promenu kota dna u čvorovima tog elementa.

3. REZULTATI PRIMENE NUMERIČKOG MODELA

Na Slici 1 prikazana je računaska oblast koja obuhvata nizvodni kraj Ade Ciganlije sa celim Čukaričkim zalivom, kao i deonicu Save od ulaza u Zaliv do mosta u

Brankovoj ulici, sa Zimovnikom na levoj obali. Na istoj slici je prikazana i odgovarajuća računaska mreža, čija je gustina prilagođena gradijentima terena i hidrauličkog polja, kao i onim delovima računskog domena koji su od posebnog interesa.

3.1 Ulazni podaci

Analiza hidrauličkih posledica koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa obavljena je za male, srednje i velike vode Save, pod pretpostavkom ustaljenog režima tečenja (Tabela 1).

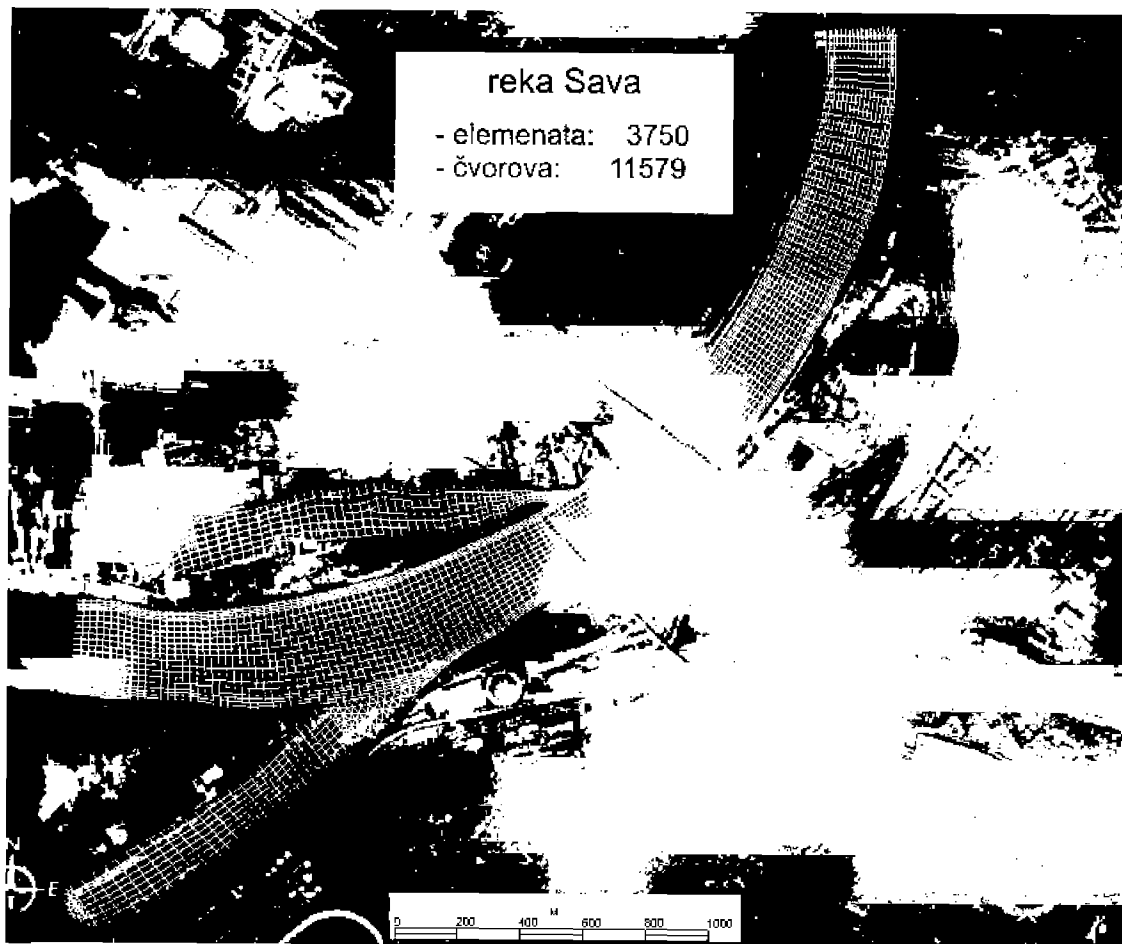
Protoci Save usvojeni su sa krive zastupljenosti u profilu Srenska Mitrovica; odgovarajući očekivani protoci Dunava u profilu Pančevo, kao i kote nivoa Save u nizvodnom graničnom profilu (km 0+900), određeni su na osnovu korelacionih zavisnosti [9, 11, 12].

Tabela 1 Granični uslovi

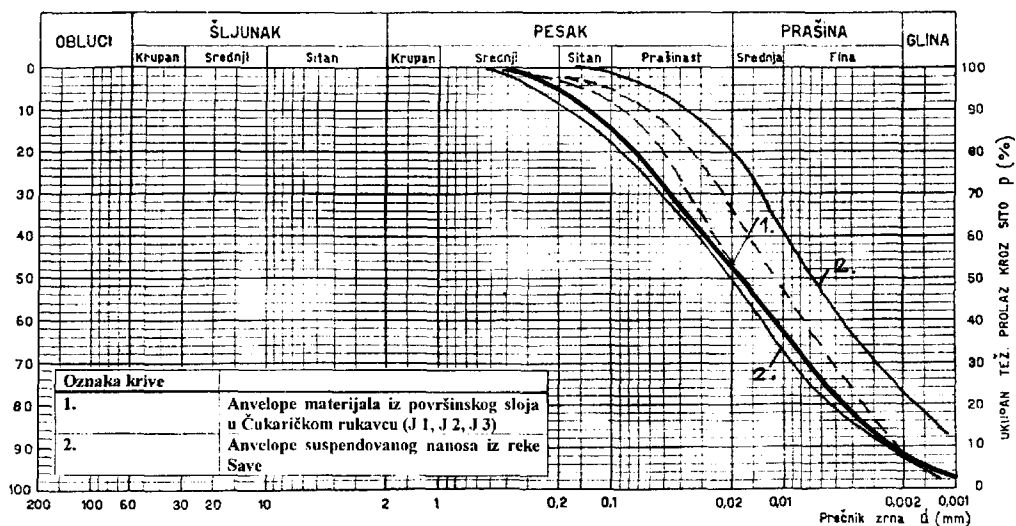
	reka Sava			reka Dunav
Merodavni protok	p [%]	Q [m ³ /s]	Z [mnm]	Q [m ³ /s]
Mala voda	90	500	70.00	2300
Srednja voda	50	1350	71.15	4800
Velika voda	25	2150	72.00	7000

Granulometrijski sastav materijala sa dna Čukaričkog zaliva pokazuje da je reč o vrlo sitnom materijalu u kategoriji prašine i prašinastog peska. Krupnoće zrna iznose 0.001–0.4 mm. Anvelope granulometrijskog sastava materijala iz Zaliva i suspendovanog nanosa reke Save prikazane su na Slici 2.

Unutar datih anvelopa usvojena je merodavna granulometrijska kriva tako da se u opsegu najsitnijih zrna poklapa sa anvelopom materijala iz Zaliva, a u opsegu krupnih zrna, približava anvelopi nanosa iz Save. Procena je da takva kriva najbolje odražava granulometrijski sastav čvrste faze u mešavini koja će se ispuštati u korito Save tokom bagerovanja Čukaričkog zaliva.



Slika 1. Razmatrana oblast u kojoj je najvažniji Čukarički zaliv (dužine 1300 m, širine 120-160 m i površine vodenog ogledala 16 ha), kao i odgovarajuća računsa mreža



Slika 2. Granulometrijska kriva i podela nanosa na frakcije [12, 17]

U sledećem koraku, izabrana granulometrijska kriva je zamenjena histogramom, sa četiri usvojene frakcije (Slika 2). Dominantna je najsitnija frakcija, zastupljenosti 60% i srednje krupnoće 0.008 mm, koja je u kategoriji tranzitnog nanosa, što znači da neće uticati na deformaciju korita. Donja granica veličine zrna koja dopušta proračun pronosa je 0.05 mm, pa je ta krupnoća reprezentativna za drugu frakciju zastupljenosti 20%. Preostale frakcije, zastupljenosti 10%, imaju krupnoće 0.1 i 0.2 mm. U Tabeli 2 dati su podaci o fizičkim svojstvima pojedinih frakcija

Tabela 2. Karakteristike nanosa i ulazni tovari

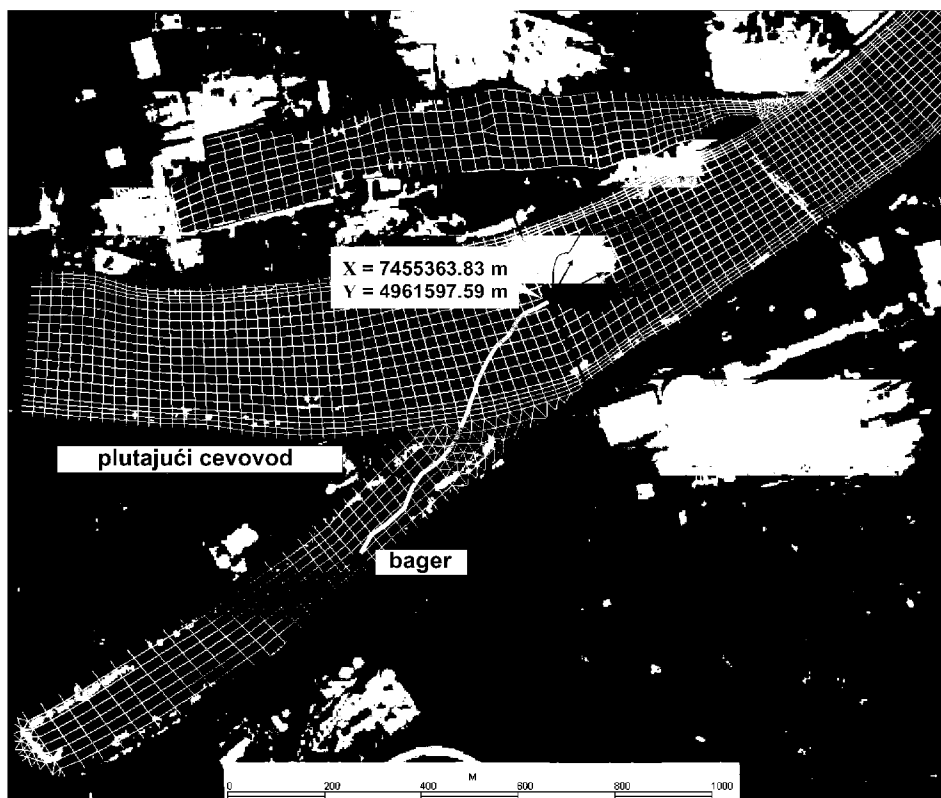
Frakcija	d [mm]	Δp [%]	Θ_c [-]	W [cm/s]	Q_s [kg/s]
1	0.008	60	–	0.003	147
2	0.05	20	0.225	0.120	85
3	0.10	10	0.113	0.473	42
4	0.20	10	0.056	1.751	42
Σ :		100			420

Na osnovu časovnog kapaciteta tipičnog bagera, ukupne količine materijala koga treba izbagerovati (83430 m^3) i koncentracije nanosa u mešavini koja se transportuje

cevovodom (15%), procenjeno je da bi najveći maseni dotok izbagerovanog materijala u maticu reke iznosio $Q_s=420 \text{ kg/s}$. Podela ovog tovara po frakcijama prikazana je u Tabeli 2. Pod pretpostavkom neprekidnog rada, data količina bi se mogla iskopati i transportovati za 456 sati (19 dana). Ovo trajanje je usvojeno za dužinu svih numeričkih simulacija.

3.2. Izbor mesta ispuštanja

Projektom uređenja Čukaričkog zaliva [17], predviđeno je bagerovanje pomoću bagera refulera, sa hidrauličkim transportom materijala do mesta odlaganja. Kako dužina cevovoda bitno utiče kroz snagu potiskivanja na cenu radova, jasno je da ovu dužinu treba što više skratiti. S druge strane, mesto ispuštanja ne sme biti u neposrednoj blizini ulaza u Čukaricki zaliv i Zimovnik, da bi se sprečilo njihovo dodatno zasipanje. Imajući u vidu ova ograničenja, izabran je profil na stacionaži km 3+500, koji je neposredno nizvodno od Čukarickog zaliva, a dovoljno uzvodno od Zimovnika (Slika 3). U tom profilu postoji, čak i u uslovima malih voda, dovoljna dubina (9 m) i širina (330 m) za obavljanje predviđenih radova.



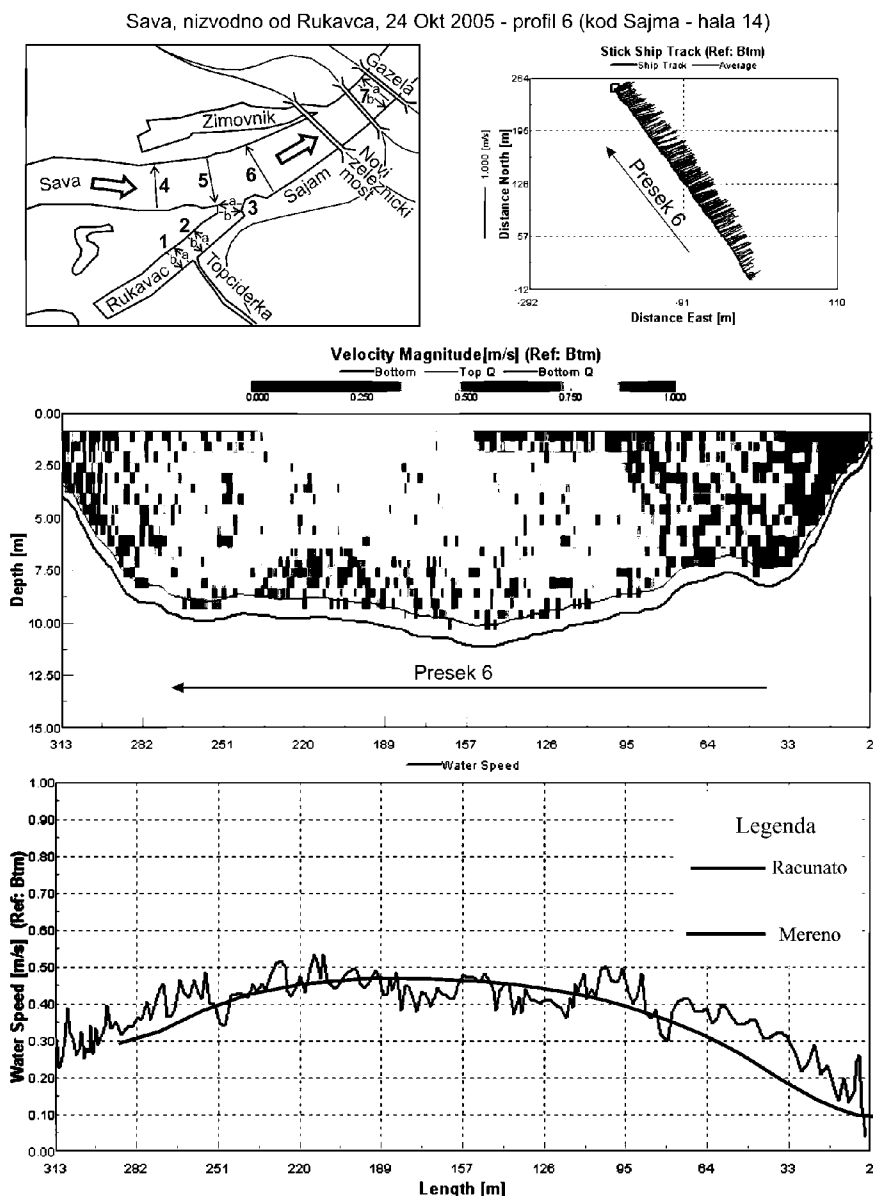
Slika 3. Mesto ispuštanja nanosa izbagerovanog iz Čukaričkog zaliva

3.3 Kalibracija numeričkog modela

Poznato je da se vrednosti Manningovog koeficijenta kalibrišu pomoću snimljenih linija nivoa, najčešće primenom modela linijskog tečenja. U tom slučaju Manningov koeficijent ima karakter globalnog parametara svih otpora na razmatranoj deonici. To znači da je za obuhvatanje uticaja turbulencije kod linijskog tečenja dovoljan samo jedan parametar. Model ravanskog tečenja zahteva dva parametra – Manningov koeficijent rapavosti i koeficijent turbulentne viskoznosti. Oba parametra su

lokalnog karaktera. Prvi odražava uticaje turbulencije po dubini toka, a drugi, po dužini i širini toka (u horizontalnoj strujnoj ravni).

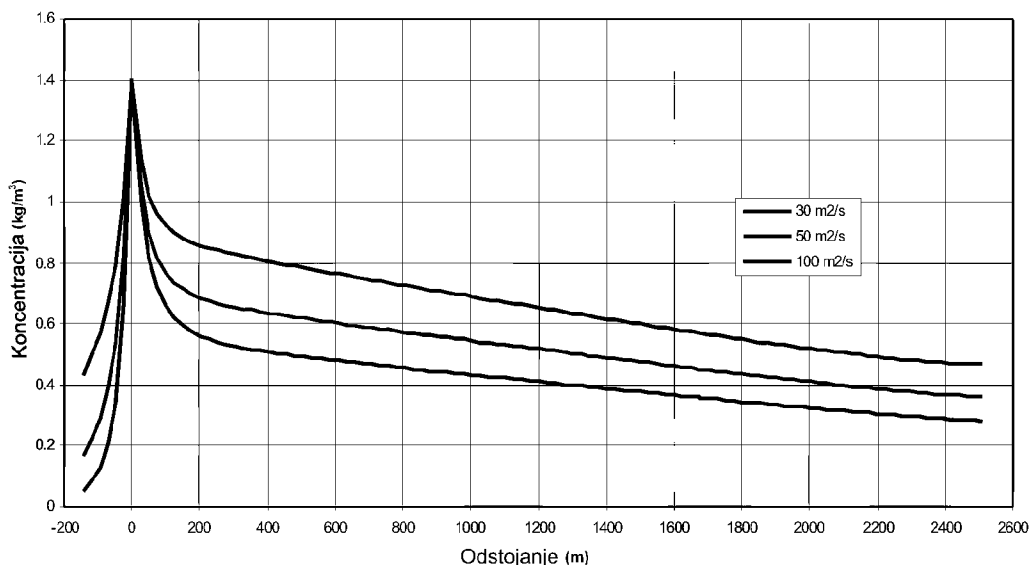
Kalibracija hidrodinamičke komponente računskog modela obavlja se tako što se vrednosti navedenih parametara podešavaju dok se u datom poprečnom preseku ne poklope izmerena i računski kota nivoa i ne usklade rasporedi izmerenih i sračunatih brzina. Na Slici 4 prikazan je jedan primer kalibracije modela.



Slika 4. Izmereno polje brzine pomoću ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) i rezultat kalibracije numeričkog modela. U konkretnom slučaju, optimalne vrednosti parametara su: $n = 0.027 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ i $E = 750 \text{ Pa s}$ [12]

Kalibracija komponente numeričkog modela za proračun deformacije korita je u našim uslovima teško izvodljiva, jer se obično ne raspolaže podacima merenja – rasporedima koncentracije i promenama batimetrije u pogodnim vremenskih preseccima. Najčešće nisu definisane korelacije protoka vode i pronosa nanosa. Zato je teško odrediti početne i granične uslove, kao i vrednosti koeficijenata efektivne difuzije.

U konkretnom slučaju, početni i granični uslovi su definisani transportnim kapacitetom za zrna usvojenih krupnoća. Vrednosti difuzionih koeficijenata su pretpostavljene, na osnovu podataka iz literature [6, 15]. Kako se ti podaci odnose na linijsko tečenje u "dalekom polju" gde je ostvareno potpuno mešanje po poprečnom preseku, izvršena je analiza osetljivosti rezultata od pretpostavljenih vrednosti parametara. Dijagram na Slici 5 pokazuje rezultat ove analize.



Slika 5. Ispitivanje osetljivosti rezultata od vrednosti koeficijenta efektivne difuzije. Proračuni su obavljani za protok srednje vode ($1350 \text{ m}^3/\text{s}$) i najsitnije zrno (0.05 mm), a za pretpostavljene vrednosti koeficijenta efektivne difuzije u pravcu glavnog toka: 30 , 50 i $100 \text{ m}^2/\text{s}$. Na prikazanom uzdužnom profilu koncentracije, nulto odstojanje označava mesto ispuštanja nanosa, znak minus označava uzvodni, a znak plus, nizvodni smer. Na samom mestu ispuštanja, koncentracija ne zavisi od vrednosti ovog koeficijenta. Uzvodno i nizvodno, koncentracija generalno raste sa vrednošću koeficijenta difuzije. Ocena je da najveća relativna greška u proračunu koncentracije na ispitivanoj deonici dužine 2400 m može iznositi oko $\pm 20\%$, a da je nizvodno, ta greška manja.

3.4 Kvalitativna analiza stabilnosti rečnog korita

Na Slikama 6 i 7 prikazani su rezultati proračuna koji omogućavaju kvalitativnu procenu stabilnosti korita Save, kada se nanos ispušta u periodu srednjih voda.

Rasporedi vrednosti indikatora Θ/Θ_c (Slika 6) pokazuju da postoji mogućnost kretanja svih frakcija po dnu korita, duž maticе. Najkrupnija zrna (0.2 mm) ne mogu se pokrenuti samo u zonama ulaza u Čukarički zaliv i Zimovnik, gde su dubine i brzine toka nedovoljne pri datom protoku.

Iz rasporeda vrednosti indikatora U_*/W (Slika 7) može se zapaziti da su sa stanovišta taloženja suspendovanog

nanosa, opet kritične oblasti Čukaričkog zaliva i Zimovnika ($U_*/W < 0.4$). U režimu malih i srednjih voda, oba zaliva deluju kao prirodne taložnice. S druge strane, brzine toka u koritu reke Save dovoljno su velike da ne može doći do istaložavanja čestica suspendovanog nanosa.

3.5 Kvantitativna analiza deformacije rečnog korita

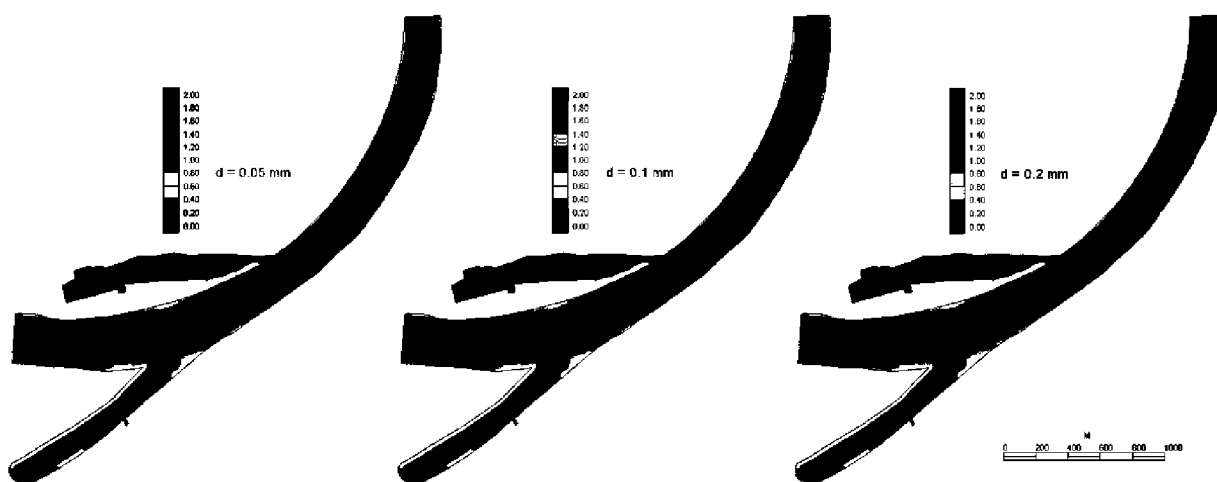
Uporedni prikaz rasporeda koncentracije posle 456 sati neprekidnog ispuštanja nanosa u korito Save, kao i odgovarajuće deformacije korita, dat je na Slikama 8 i 9. Prikazani rezultati omogućavaju kvantitativnu procenu posledica ispuštanja materijala za usvojene frakcije, u određenim hidrološkim uslovima.

Rasporedi koncentracije pokazuju da manjim protocima Save odgovaraju veće koncentracije, što je posledica slabijeg razblaženja (Slika 8). Sa povećanjem protoka, smanjuju se gradijenti koncentracije. Pri manjim protocima, linije jednakih koncentracija imaju pravilan oblik. Sa porastom protoka, nepravilnost ovih linija postaje sve izraženija, što je posledica većih brzina po matici, a manjih, pri obalama.

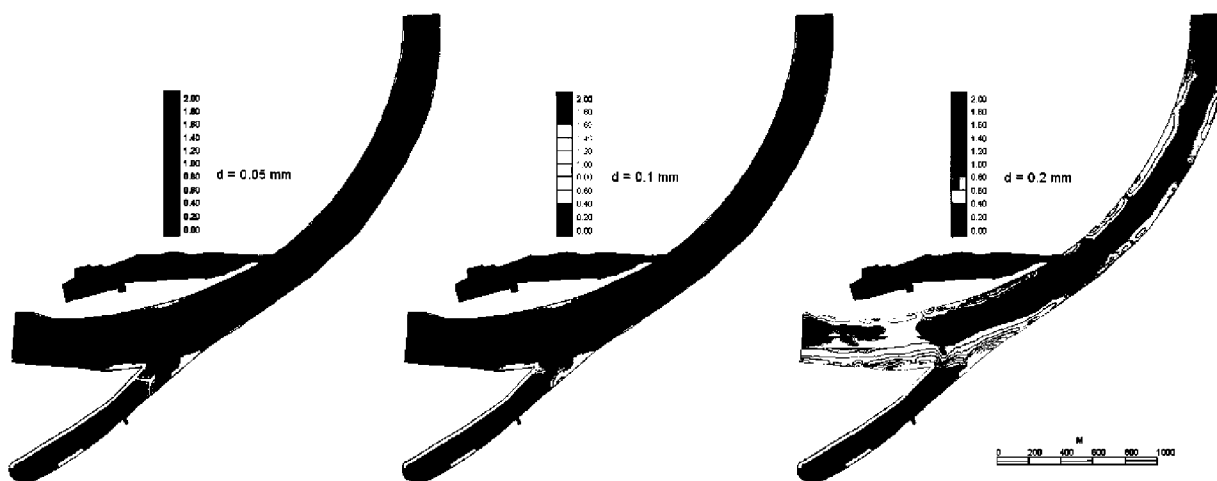
Najveća koncentracija u tački ispuštanja iznosi pri maloj vodi 0.24 kg/m^3 , pri srednjoj vodi, 0.15 kg/m^3 , a pri velikoj vodi, samo 0.10 kg/m^3 . Koncentracije u

Čukaričkom zalivu i Zimovniku su 5 do 10 puta manje od onih na mestu ispuštanja.

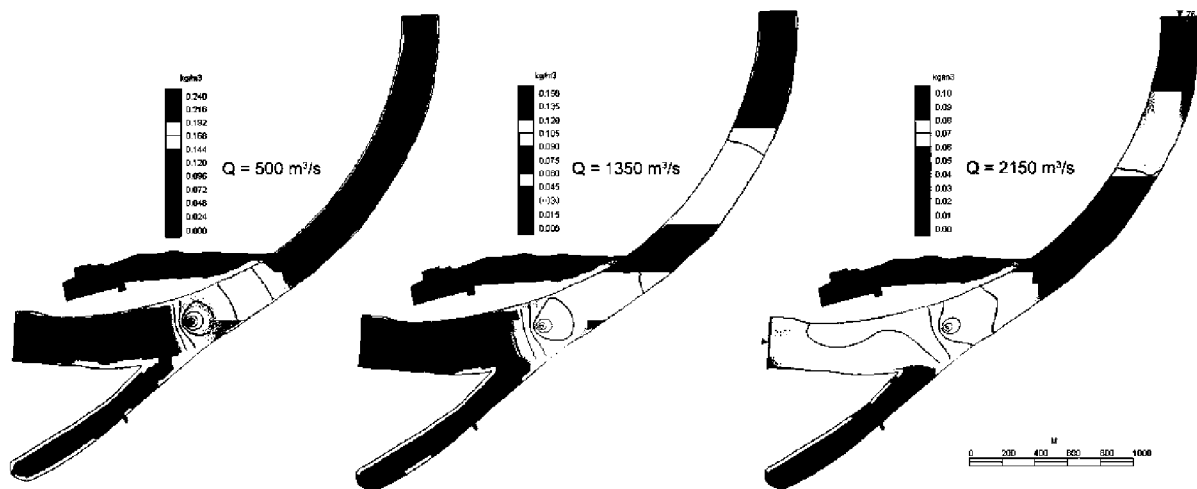
Uporedni prikaz deformacije korita usled ispuštanja izbagerovanog materijala pokazuje da je visina zasipanja obrnuto proporcionalna protoku — manjem protoku odgovara veće zasipanje i obrnuto (Slika 9). Po širini korita, zasipanje nizvodno od mesta ispuštanja ima ravnomerni karakter pri malim vodama. Sa porastom protoka, neravnomernost postaje sve izraženija zbog tendencije zasipanja korita pri obalama.



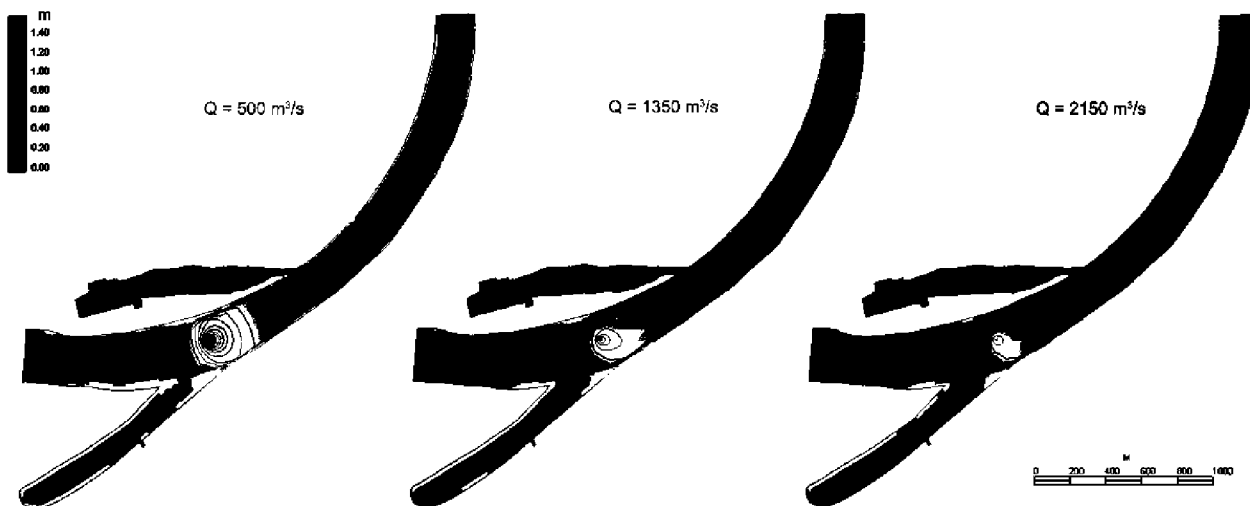
Slika 6. Raspored vrednosti parametra Θ/Θ_c u zavisnosti od krupnoće zrna, pri protoku srednje vode ($1350 \text{ m}^3/\text{s}$)



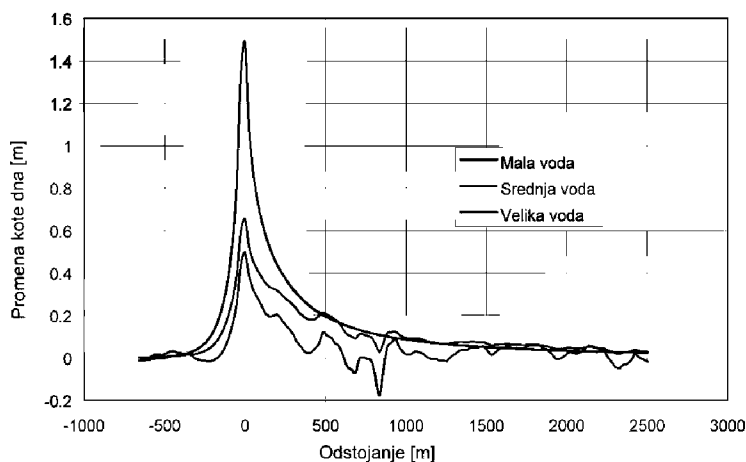
Slika 7. Raspored parametra U_*/W u zavisnosti od krupnoće zrna, pri protoku srednje vode ($1350 \text{ m}^3/\text{s}$)



Slika 8. Raspored koncentracije u zavisnosti od protoka Save



Slika 9. Deformacija korita u zavisnosti od protoka Save



Slika 10. Uzdužni profil deformacije korita po matici, u zavisnosti od protoka reke Save. Može se primetiti da već 500 m nizvodno od mesta ispuštanja, visina zasipanja postaje manja od 0.2 m (što je u granicama greške merenja dubine), pa se promene kote dna izazvane koncentrisanim ispuštanjem izbagerovanog nanosa u korito reke, mogu zanemariti.

Najveća neravnomernost zasipanja je pri velikim vodama, ali su tada visine zasipanja najmanje.

Duž vodotoka, nizvodno od mesta ispuštanja, uočava se da se gradijenti i visine zasipanja smanjuju sa porastom protoka. To znači da je pri manjim protocima kraća oblast poremećaja, a da se pri većim protocima, zona zasipanja produžava, uz smanjenje visine zasipanja.

U tački ispuštanja visine zasipanja iznose: 1.50 m pri malim vodama, 0.70 m pri srednjim vodama i 0.50 m pri velikim vodama. Deformacija korita se naglo smanjuje nizvodno od mesta ispuštanja, kao što pokazuje dijagram na Slici 10.

4. ZAKLJUČAK

Numeričke simulacije fizičkih procesa omogućavaju detaljnu analizu promena hidrodinamičkih veličina i morfologije rečnog korita, što je od velikog značaja za hidrotehničku praksu. Kalibrisani numerički modeli mogu se koristiti za relativno pouzdano predviđanje strujnog polja i deformacije rečnog korita. Opisani primer koji se odnosi na procenu hidrauličkih posledica ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke, veoma dobro ilustruje velike mogućnosti numeričkih modela ravanskog tečenja. Šira primena ovih modela u praksi, svakako bi povećala pouzdanost i kvalitet projekata, a time uticala i na smanjenje troškova njihove realizacije.

LITERATURA

- [1] Ackers, P., White, W.R., *Sediment Transport: New Approach and Analysis*, Journal of Hydraulic Division ASCE, HY11, 1973.
- [2] Anderson, D. A., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Co., New York, 1984.
- [3] Donnell, B. P., et al., *RMA2 WES Version 4.5, Users Guide*, US Army Corps of Engineers, WexTech Systems, Valhalla, New York, 2003.
- [4] Donnell, B. P., et al., *SED2D WES Version 4.5, Users Guide*, US Army Corps of Engineers, WexTech Systems, Valhalla, New York, 2003.
- [5] Ferziger, J.H., Perić, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, 1996.
- [6] Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., Brooks, N.H., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, 1979.
- [7] Hervouet, J-M., *Hydrodynamique des écoulements à surface libre – modélisation numérique avec la méthode des éléments finis*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 2003.
- [8] Holly, F. M., Preismann, A., *Accurate calculation of Transport in Two Dimensions*, Journal of Hydraulic Division ASCE, Vol. 103, No. 11, 1977.
- [9] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Čemi“, *Proračun uspornih nivoa vode u akumulaciji HE Đerdap I*, Beograd, 2002.
- [10] Jansen, P. Ph., et al., *Principles of river engineering*, Pitman, 1979.
- [11] 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.
- [12] Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Zindović, B., *Studija uticaja ispuštanja materijala izbagerovanog iz Čukaričkog zaliva u korito reke Save*, Izveštaj br. 43337, Građevinski fakultet, Beograd, 2006.
- [13] Jovanović, M., *Osnove numeričkog modeliranja ravninskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [14] Jovanović, M., *Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija*, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [15] Lau, L.Y., Krishnappan, B.G., *Modeling Transverse Mixing in Natural Streams*, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, HY2, 1981.
- [16] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co., Washington, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [17] Preduzeće za projektovanje, inženjering i konsalting u hidrotehnici i građevinarstvu „Ehting“, *Idejni projekat čišćenja dna i obala Čukaričkog rukavca do projektovanih gabarita marine Ada Ciganlija i plovnog puta do reke Save*, Beograd, 2006.
- [18] Roache, P. J., *Computational Fluid Dynamics*, Hermosa Publishers, Albuquerque, New Mexico, 1982.
- [19] Rubin, H., Atkinson, J., *Environmental Fluid Mechanics*, Marcel Dekker, New York, 2001.

NUMERICAL SIMULATION OF CONCENTRATED RELEASE
OF DREDGED SEDIMENTS INTO THE RIVER

by

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

Summary

This paper deals with prediction of hydraulic consequences of concentrated release of dredged sediments into the river using a two-dimensional numerical model. It is shown that flow, concentration, and siltation fields can be efficiently simulated by the numerical model. A special concern is given to the problem of the numerical model calibration. For

illustration, results pertaining to the concentrated release of sediment dredged from the Čukarica Bay into the Sava River, are presented.

Key words: two-dimensional numerical model, finite-element method, river bed deformation, dredging

Redigovano 21.05.2007.