

Primljen / Received: 18.2.2020.

Ispravljen / Corrected: 11.6.2020.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2021.

Dostupno online / Available online: 10.10.2021.

Matematičko modeliranje tečenja i pronosa nanosa - primjer brane na rijeci Tisi

Autori:



Doc.dr.sc. **Matija Stipić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija
Fakultet tehničkih znanosti
matija@vojevodinaprojekt.rs



Izv.prof.dr.sc. **Ljubomir Budinski**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija
Fakultet tehničkih znanosti
ljubabu@gmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Julius Fabian**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu, Srbija
Građevinski fakultet u Subotici
julius1@stcable.net

Stručni rad

Matija Stipić, Ljubomir Budinski, Julius Fabian

Matematičko modeliranje tečenja i pronosa nanosa - primjer brane na rijeci Tisi

Velike brzine toka nizvodno od brane na rijeci Tisi kod Novog Bečaja (Srbija), uzrokovane velikom razlikom u vodostaju između uzvodnog i nizvodnog toka, dovode do erozije obale na desnoj strani neposredno nizvodno od pomoćnog preljeva, zbog čega je ugrožena i stabilnost brane. Imajući u obliku složenu interakciju parametara toka i pronosa nanosa na toj lokaciji, u radu se koristi pristup utemeljen na prostornom (3D) matematičkom modelu tečenja i pronosa nanosa koji je namijenjen za rješavanje takvih složenih procesa. Modelom je definirano optimalno rješenje koje udovoljava svim zahtjevima stabilnosti analiziranih građevina, pri čemu se uspoređuju rezultati dobiveni analizom postojećih uvjeta s rezultatom mjera koje se predlažu za rješavanje problema.

Ključne riječi:

riječna hidraulika, tečenje i pronos nanosa, matematičko modeliranje, mješavina nanosa

Professional Paper

Matija Stipić, Ljubomir Budinski, Julius Fabian

Mathematical modelling of flow and sediment transport – the Tisa dam case study

High flow velocities downstream of the Tisa Dam at Novi Bečej (Serbia), produced by the large difference between water levels in the upstream and downstream reaches, cause bank erosion by the right bank immediately downstream of the emergency spillway, threatening stability of the dam itself. Due to complex interaction between the parameters of flow and sediment transport at the given location, an approach involving a spatial (3D) mathematical model of flow and sediment transport, aimed at solving such complex processes, is investigated in this paper. An optimum solution meeting all requirements for the stability of structures in question has been reached by the model, through comparison of the results generated by the existing conditions with the result provided by the measures proposed to fix the problems.

Key words:

fluvial hydraulics, flow and sediment transport, mathematical modelling, sediment mixtures

1. Uvod

Kanalski sustav Dunav - Tisa - Dunav (DTD) koristi se za brojne namjene kao npr. za zaštitu od poplava, odvodnju, navodnjavanje, plovidbu, turizam te lov i ribolov. Taj se kanalski sustav prostire na površini od 12.700 kvadratnih kilometara između Dunava i Tise u Vojvodini, pokrajini Republike Srbije. Ukupna dužina sustava, s 51 hidrotehničkom građevinom i 180 mostova, iznosi 929,0 km. Brana na rijeci Tisi, izgrađena 1977. godine pored grada Novog Bečeja predstavlja najveću i jednu od najznačajnijih građevina u okviru sustava Dunav - Tisa - Dunav (slika 1.). Brana se nalazi na stacionaži 62+988 računajući od mjesta na kojem rijeka Tisa utječe u Dunav, 2,4 km nizvodno od Novog Bečeja.



Slika 1. Karta sustava DTD s lokacijom brane na Tisi kod Novog Bečeja

Osnovna funkcija te brane je zadržavanje vode u gornjem toku te gravitacijsko puštanje vode u sustav DTD. Brana ima i druge namjene pa tako služi i za održavanje uvjeta plovidbe te za vodni promet. Brana se sastoji od betonskog dijela, nasutog zemljanog dijela i prevodnice za brodove do 1000,0 t. Betonski dio brane sastoji se od sedam preljevni polja pojedinačne širine 24,5 m. Preljevna polja opremljena su segmentnim zapornicama s klapnama za fino reguliranje protoka vode. Kruna preljeva nalazi se na nadmorskoj visini od 68,0 m. Zemljani dio brane sastoji se od tri betonom obložena pomoćna preljeva pojedinačne širine 24,0 m. Kruna tih preljeva nalazi se na nadmorskoj visini od 76,5 m. Segmentne zapornice projektirane su za stogodišnje visoke vode, s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 80,35 m. Protok rijeke Tise varira od 80,0 m³/s do skoro 4000,0 m³/s. U zoni brane, razlika između uzvodnog i nizvodnog vodostaja varira od 0,0 m do 5,0 m tijekom 305 dana u godini, dok su u preostalom dijelu godine segmentne zapornice otvorene pa je razina vodostaja uzvodno i nizvodno od brane zanemariva. Problem koji se javlja na brani Tisa proizlazi iz velikih brzina vode nizvodno od brane, nakon ispuštanja vode preko klapni segmentnih zapornica, što dovodi

do velikih fluktuacija vodostaja u zoni desne obale, a to opet uzrokuje eroziju desne obale nizvodno od neposredne blizine i u neposrednoj blizini pomoćnog preljeva. Osim značajne erozije obale koja je - prema opažanjima osoblja brane - najintenzivnija pri niskim razinama donje vode brane, rezultirajuća strujna slika dovodi do značajne erozije riječne obale u analiziranoj zoni, pa tako riječna obala postaje nestabilna a to opet loše utječe na stabilnost brane. Dio erodiranog materijala lokalno se zadržava u obliku otoka u sredini pogođenog područja (koje se u nastavku naziva "erozijskim zaljevom"), dok preostali materijal struja toka pronosi nizvodno. Sve to dovodi do premještanja nanosa na ovoj lokaciji i do postupnog povlačenja desne obale zbog učestalog klizanja obale, što bi moglo doseći i potkopati temelje te u konačnici i uništiti obližnji geodetski reper. Općenito je problem uzrokovan erozijom korita u kombinaciji s klizanjem obale na desnoj strani, što dovodi do velikih brzina toka i do oscilacije vodostaja u nizvodnom dijelu.

Uradije detaljno opisanu primjenu prostornog (trodimenzionalnog) numeričkog modela tečenja u svrhu utvrđivanja uzroka problema te iznalaženja odgovarajućeg rješenja problema nestabilnosti riječne obale. Tok rijeke nizvodno od brane karakterizira bujični tok, složena strujna slika, te fizikalni procesi ovisni o protoku, a sve to u kombinaciji s pronosom suspendiranog i vučenog nanosa, dovodi se u vezu s erozijom korita i taloženjem nanosa koje varira u prostoru i vremenu. U tom se smislu ukazala potreba za primjenom prostornog (3D) matematičkog modela kako bi se procesi koji se odvijaju u ovoj zoni mogli što vjernije simulirati, te prikladno predvidjeti njihovi rezultati. Danas su u upotrebi brojne metode za numeričko modeliranje tečenja, pronosa nanosnog materijala, te za otkrivanje morfoloških promjena u riječnim tokovima. Međutim, mnogi od postojećih modela za analizu tečenja i pronosa nanosa ne obuhvaćaju u potpunosti sve procese koji se zbivaju u okviru pronosa nanosa. Umjesto modeliranja pronosa vučenog nanosa i suspendiranog nanosa, u nekim se ranijim modelima [1] čitav postupak pojednostavljuje te se provodi analiza pronosa ukupnog nanosa. U drugim se modelima ignorira pronos vučenog nanosa [2-4], promjene razina korita [3, 4] ili pronos suspendiranog nanosa [5-7]. U nekim modelima koji se danas koriste daje se nepotpun opis procesa izmjene nanosa [1, 4-7]. Dobro je poznato da metoda opisa kretanja pridnenog nanosa bitno utječe na pronos suspendiranog nanosa, jer se događa u skladu s mehanizmima izmjene nanosa. Osim toga, na polje tečenja utječu i promjene razine korita.

U modelima opisanima u [1, 2, 5, 6, 8], Exnerova se jednadžba koristi za izračunavanje promjene razine dna korita. Koncept slojeva vučenog nanosa razmatraju Van Rijn [9] i Minh Duc i dr. [10] u svrhu izračunavanja pronosa nanosa, a za definiranje promjene visine dna korita koristi se pristup ukupnog nanosa. Spasojević i Holly [11, 12] koriste metodu aktivnog sloja i aktivnog podsloja za izračunavanje promjene visine dna korita i pronosa vučenog nanosa. Olsen [13] koristi razlike u kontinuitetu čestica nanosa u koritu kako bi odredio visinu dna korita. I konačno, vrijedi napomenuti da se samo nekoliko današnjih modela tečenja i nanosa bavi mješavinama nanosa ili istraživanjem aspekata ponašanja mješavina nanosa. Kassem i

Chaudhry [7] prikazuju model za definiranje procesa na dnu ili pri dnu korita koji se temelji na Exnerovoj jednadžbi ali samo za vučeni nanos, pri čemu se primjenjuju postupci armiranja korita prema modelu IALLUVIAL [14]. Olsen [13] je izradio model za rješavanje jednadžbe trodimenzionalnog (3D) pronosa suspendiranog nanosa. On je kao rubni uvjet usvojio pridnenu koncentraciju nanosa. Za izračunavanje promjena u visini dna korita, korišten je raskorak u kontinuitetu nanosa u koritu podijeljenom na proračunske ćelije. Promjena granulometrijskog sastava čestica na dnu korita određena je primjenom metode proračuna (engl. budget method). Hung i dr. [15] izradili su model koji se temelji na metodologiji aktivnog sloja i aktivnog podsloja. U tom se modelu za analiziranje mješavina nanosa koristi matematička formulacija i numeričko rješenje iz modela MOBED2, što su inicijalno uveli i primijenili Spasojević i Holly [11, 12]. Praktična primjena matematičkog modela u analizi tečenja, pronosa nanosa i promjene razine dna korita opisana je u [17-21]. U ovom se radu koristi računalni program Delft3D [16] za rješavanje problematike strujne slike. Programom Delft3D-Flow rješavaju se Navier Stokesove jednadžbe za nestišljivi fluid, pri čemu se pretpostavlja plitak tok, a primjenjuju se Boussinesqove pretpostavke. Moduli za pronos nanosa i promjenu morfologije korita podržavaju proračun pronosa vučenog nanosa i suspendiranog nanosa za slučaj nekoherentnog nanosa, na bazi pristupa mješavine nanosa, aktivnog sloja i aktivnog podsloja.

je u zoni slapišta preljeva s kavernom nastalom podlokavanjem koja se nalazi 50,0 nizvodno od brane. U modelu su, dakle, korišteni podaci dobiveni mjerenjem, a ne podaci iz projekta. Iako u projektu stoji da se slapište preljeva nalazi na nadmorskoj visini od 65,00 m (slika 3.), mjerenjem je utvrđeno da je betonski sloj prekriven muljem u debljini od 0,50 m. Osim toga, uzdužno orijentirano izbočenje prostire se duž slapišta preljeva pa čak i dalje. Možda je to izbočenje ostatak zagata izvedenog tijekom gradnje brane koji naknadno nije uklonjen na odgovarajući način. Nakon prikupljanja podataka o batimetriji i visinskim kotama građevine, interpolacijom je dobiven konačni digitalni model korita rijeke u analiziranom području (slika 4.).



Slika 2. Batimetrijski prikaz lokacije brane na rijeci Tisi

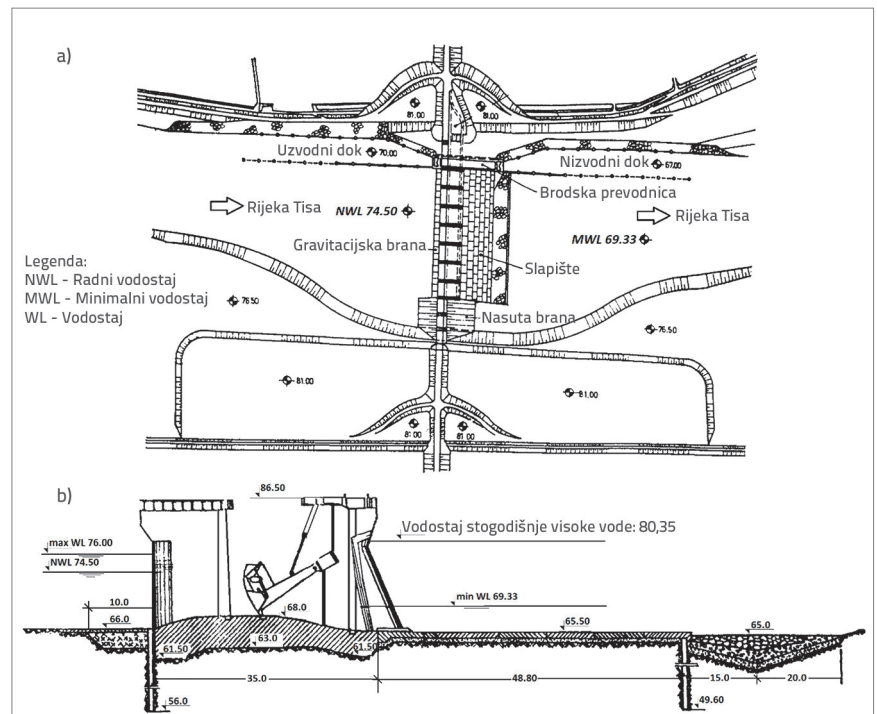
2. Pregled i analiza dostupnih podataka - scenariji odabrani za modeliranje

2.1. Analiza dostupnih podataka za numeričko modeliranje

Batimetrijski podaci korišteni u izradi prostornog numeričkog modela analizirane zone na desnoj obali rijeke prikazani su u obliku apsolutnih koordinata X, Y, Z točaka definiranih sonarnim snimanjem koje je provedeno 2010. i 2016. godine (slika 2.).

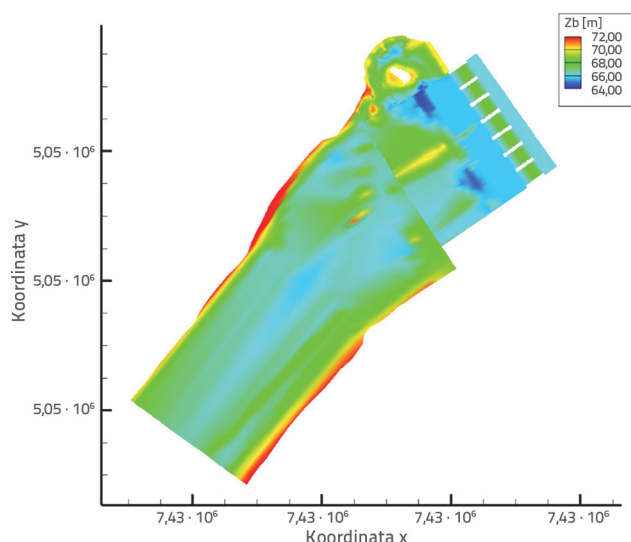
Na slici 2. vidimo da je sonarno hidrografsko snimanje provedeno samo za rizični dio obale (takozvani erozijski zaljev) u skladu sa zahtjevima modela Delft3D, dok je snimanje u nizvodnom toku rijeke provedeno u tri poprečna profila i dva uzdužna profila. Detaljna analiza rezultata pokazuje da je snimanje rizičnog područja na desnoj obali provedeno u skladu sa zahtjevima modela u pogledu kako kvalitete tako i rezolucije. Nadalje, tri dodatno snimljena poprečna profila upućuju na relativno ujednačenu batimetriju u nizvodnom dijelu rijeke, pri čemu je najniži poprečni profil snimljen 665,10 m nizvodno od tijela brane. Dodatno hidrografsko snimanje provedeno

Hidrotehnički, hidrološki i psamološki podaci potrebni za definiranje početnih i graničnih uvjeta modula tečenja i pronosa nanosa prikupljeni su dijelom iz dostupnih dokumenata, a



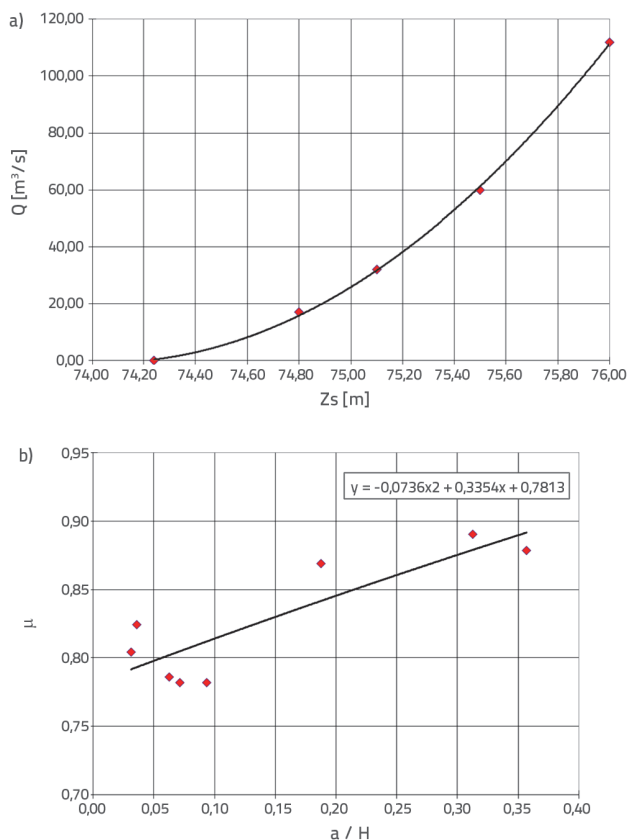
Slika 3. a) tlocrt; b) uzdužni profil brane

dijelom iz godišnjih izvještaja o prosječnim dnevnim protocima i razinama vode koje objavljuje Republička hidrometeorološka služba Srbije (RHSS).



Slika 4. Digitalni visinski prikaz riječnog korita

Za modul tečenja definirani su početni i rubni uvjeti u obliku relevantnih hidrograma i nivograma. Kako su u ovom slučaju uzvodni rubni uvjeti definirani samom branom (ili točnije regulacijom protoka preko klapni segmentnih zapornica i ispod segmentnih zapornica), krivulje protoka definirane su protokom, razinama gornje i donje vode brane, baždarenim koeficijentima protoka, položajima klapni i otvorom zapornica (slika 5.). Krivulje protoka jednake su za sva preljevna polja i u skladu su sa zahtjevima modela u smislu udovoljavanja rubnim uvjetima u uzvodnom toku. Psamološke karte dobivene analizom vodozahvatnog područja kanala Novi Bečej – Banatska Palanka (koje se nalazi neposredno uz gornju stranu brane) korištene su u modulu za simulaciju pronosa suspendiranog nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke. Ulazni podaci uključuju sljedeće značajne odnose: a) dijagram odnosa protoka i koncentracije suspendiranih krutih čestica u rijeci Tisi, b) granulometrijska krivulja suspendiranog nanosa, c) odnos između srednje veličine suspendiranih krutih čestica i protoka rijeke Tise, d) hidrometrijska mjerenja poprečnog profila neposredno uzvodno od brane provedena 1988. godine, i e) anvelope granulometrijskih krivulja. Dobiveni podaci o nanosima pružaju informacije o ukupnom suspendiranom nanosu u obliku koncentracija masa, o srednjoj veličini suspendiranih krutih čestica, te o srednjoj veličini čestica (d_{50}) vučenog nanosa. Kako je modul za pronos nanosa, sadržan u programu Delft3D, baziran na mješavinama nanosa, potrebne su mu karakteristične frakcije koje predstavljaju granulometriju vučenog nanosa i suspendiranog nanosa.



Slika 5. a) Odnos protoka (Q) i vodostaja (Z_s) za tok vode preko klapni zapornice, b) Koeficijent protoka (μ) ovisno o položaju segmentne zapornice (a-otvor zapornice, H-dubina u uzvodnom dijelu)

Za to se koristi anvelopa granulometrijskih krivulja koja se odnosi na lokaciju predmetne brane, a izrađena je na temelju uzoraka koji su izvađeni prije izvođenja brane. Zbog vremenske i prostorne neusklađenosti dostupnih podataka o nanosu, provedena je dodatna analiza kako bi se dobio bolji uvid u granulometrijski sastav nanosa na predmetnoj lokaciji. Uspoređivanjem anvelope granulometrijskih krivulja s odgovarajućim psamološkim mjerenjima koja su 1988. godine provedena uzvodno u neposrednoj blizini brane, reproducirane su granulometrijske krivulje suspendiranog i vučenog nanosa te su zatim prilagođene za proračune na bazi izmjerene srednje veličine čestica suspendiranog nanosa i srednje veličine čestica vučenog nanosa.

2.2. Scenarij odabran za modeliranje

Scenarij odabran za ovo istraživanje na temelju preliminarne analize dostupnih podataka:

Izrada trodimenzionalnog modela tečenja radi identifikacije kritičnog scenarija u smislu hidrauličkih parametara, tj. radi određivanja režima rada brane u kojem se dobiva najekstremnija

strujna slika. Prvo se model baždari pomoću analize osjetljivosti uz primjenu dostupnih podataka. Zatim se analiziraju različiti režimi rada brane i to na temelju broja aktivnih prelijeva, protoka preko klapni segmentnih zapornica ili ispod segmentnih zapornica, karakterističnih protoka i razina donje vode. Na kraju se za ugroženu desnu obalu usvaja najzahtjevniji scenarij u smislu uvjeta protoka.

Nakon implementacije modela tečenja, izrađuje se model pronosa nanosa koji je prikladan za analizu pronosa suspendiranog i vučenog nanosa te za analizu deformacija riječnog korita. Taj se model baždari na temelju dostupnih podataka te se ispituje za unaprijed definirani niz odabranih scenarija kritičnog protoka.

Na kraju se, na temelju preliminarnog ispitivanja scenarija kritičnog protoka i pronosa nanosa, određuje režim rada brane. Pritom se desna obala uzima kao područje najvišeg rizika. Tako definirani relevantni uvjeti uneseni u model proširuju se unošenjem uvjeta koji se dobivaju radovima na reguliranju rijeke, što vodi prema rješenju. Konačna solucija predstavlja optimalno rješenje koje se temelji na analizi problema sa svim njegovim kompleksnostima (tehnička provedivost, odnos troškova i koristi itd.).

3. Metodologija

U ovom je radu provedeno matematičko modeliranje tečenja i pronosa nanosa kako bi se odredili razlozi zbog kojih dolazi do erozije lijeve obale nizvodno od brane. Modeliranje je također pomoglo u izradi predloženih rješenja za prevladavanje ovog problema. Korišten je matematički model Delft3D koji omogućuje modeliranje tečenja i pronosa mješavina nanosa isto kao i modeliranje morfoloških promjena u koritima prirodnih vodotokova. Model Delft3D primijenjen je u slučaju brane na Tisi kako bi se provjerila osnovna hipoteza prema kojoj je erozijski zaljev na desnoj obali uzrokovan permanentnom erozijom riječnog korita zbog strujne slike generirane tokom iz obližnjeg prelijeva. Zbog toga je u istraživanjima naglasak stavljen na dva pitanja: a) određivanje osnovnih razloga koji su doveli do pojave erozije na desnoj obali ovisno o režimu rada brane, b) iznalaženje rješenja za eliminiranje opisane anomalije. Najprije je na bazi dostupnih podataka postavljen matematički model tečenja, pronosa mješavine nanosa, i deformacije riječnog korita. Nakon toga je model baždaren primjenom analize osjetljivosti. Nakon baždarkenja, model je primijenjen u raznim scenarijima protoka kako bi se ustanovilo na koji način i u kojoj mjeri razni režimi rada brane utječu na eroziju obale. Nakon toga je na temelju rezultata prethodne analize provjerena djelotvornost radova na reguliranju rijeke pomoću uspostavljenog modela, a radi sprječavanja daljnjeg širenja erozijskog zaljeva. Rezultat analize je rješenje u obliku regulacijskih radova koje se pokazalo optimalnim kako s tehničkog tako i s ekonomskog gledišta.

Osnovna značajka prezentirane analize zapravo je primjena matematičkog modeliranja u svrhu reproduciranja ranije postojećih uvjeta (pronos nanosa, morfološke promjene u

koritu rijeke) koji odgovaraju režimu rada brane, te modeliranje utjecaja i djelotvornosti regulacijskih radova. Imajući u obliku složenost analiziranog problema u smislu protoka, pronosa nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke na analiziranoj lokaciji zbog same prisutnosti brane, relevantni fizikalni procesi mogu se reproducirati samo primjenom modela i to bilo fizikalnog ili matematičkog. U ovom konkretnom slučaju odabrano je matematičko modeliranje zbog njegove robusnosti, djelotvornosti i točnosti. Kada se koristi kao pomoćno sredstvo, matematičko modeliranje pokazalo se izuzetno djelotvornim u reproduciranju raznih scenarija rada brane s regulacijskim radovima i bez njih, zbog čega se može reći da svakako pridonosi sprječavanju daljnjeg širenja erozijskog zaljeva.

3.1. Generiranje trodimenzionalnog modela

Prostorni se model generira na temelju dostupnih batimetrijskih podataka. Rad brane strogo je kontroliran u smislu reguliranog protoka na svakom prelijevnom polju (ispuštanje preko klapni segmentnih zapornica ili ispod segmentnih zapornica). Kako se brana nalazi na uzvodnom dijelu analiziranog vodotoka, ona zapravo i zadaje rubne uvjete u uzvodnom dijelu. Zato je profil smješten 25,0 m uzvodno od brane, s nadmorskom visinom korita od 66,0 m, usvojen kao uzvodna granica, s očitanjima vodostaja koji odgovaraju vrijednostima registriranim na segmentnim zapornicama, što omogućuje odgovarajuće ispuštanje vode preko prelijeva. Najudaljeniji analizirani nizvodni profil koji se nalazi 665,0 m nizvodno od brane usvojen je kao nizvodni rub, i to zbog dva razloga: dovoljno je udaljen od ugrožene desne obale, te se stoga očekuje da nizvodni rubni uvjet neće utjecati na uvjete na analiziranoj lokaciji. S druge strane, dostupni su morfološki podaci za korito rijeke u tom rubnom profilu.

Nakon zadavanja rubnih uvjeta, počinje implementacija proračunske mreže. To u prvom redu uključuje prekrivanje čitavog fizičkog područja odgovarajućom krivuljnom mrežom, a proračun se provodi u transformiranim ortogonalnim koordinatama. Zbog složene prirode ovog problema, koristi se takozvana metoda "dekompozicije područja" u okviru koje se razne zone modeliranog područja prekrivaju mrežama raznih rezolucija. To je prikladno dijelom zato jer se tako omogućuje naknadno lokalno povećanje rezolucije mreže, što dovodi do veće točnosti i stabilnosti modela, a dijelom zato što se tako povećava i djelotvornost proračuna, tj. grublja se mreža koristi u manje zahtjevnim zonama pa se tako skraćuje ukupno vrijeme potrebno za proračunavanje. U ovom su modelu korištene tri različite rezolucije mreže, a koriste se za tri različita segmenta modeliranog područja. Prvi segment odnosi se na samu branu, na betonom obloženo ravno područje nizvodno od brane (tj. na slapište), te na 100 m dugačak tok rijeke nizvodno od slapišta. Prvi segment obuhvaćen je proračunskom mrežom s 110 x 37 proračunskih točaka, pri čemu prosječna veličina polja mreže iznosi 8,0 m x 2,0 m. Drugi segment obuhvaća područje nizvodno od pomoćnog prelijeva, desno od slapišta. Ta je zona

prekrivena mrežom s 27 x 63 proračunske točke, pri čemu prosječna veličina polja mreže iznosi 5,0 x 2,0 m. Treći segment obuhvaća dio vodotoka do nizvodne granice modela, a prekriven je proračunskom mrežom od 30 x 27 proračunskih točaka pri čemu prosječna veličina polja mreže iznosi 20,0 x 10,0 m. Tako je dakle najnižvodnije područje modela, koje najmanje utječe na strujnu sliku, pokriveno s mrežom najniže rezolucije, a prvi i drugi segment pokriveni su mrežom daleko više rezolucije kako bi se kvalitetno tj. što preciznije reproducirali procesi tečenja i pronosa nanosa. Osim toga, kako se radi o trodimenzionalnom modelu za koji je potrebno vertikalno uslojavanje, definirano je i ukupno pet vertikalnih proračunskih slojeva koji se protežu po čitavom području modela. Zatim je provedeno inicijalno ispitivanje modela tečenja, modela pronosa nanosa, te modela deformacije riječnog korita i to za prije opisane relevantne scenarije.

3.2. Prezentacija i analiza rezultata za postojeće uvjete

3.2.1. Model toka

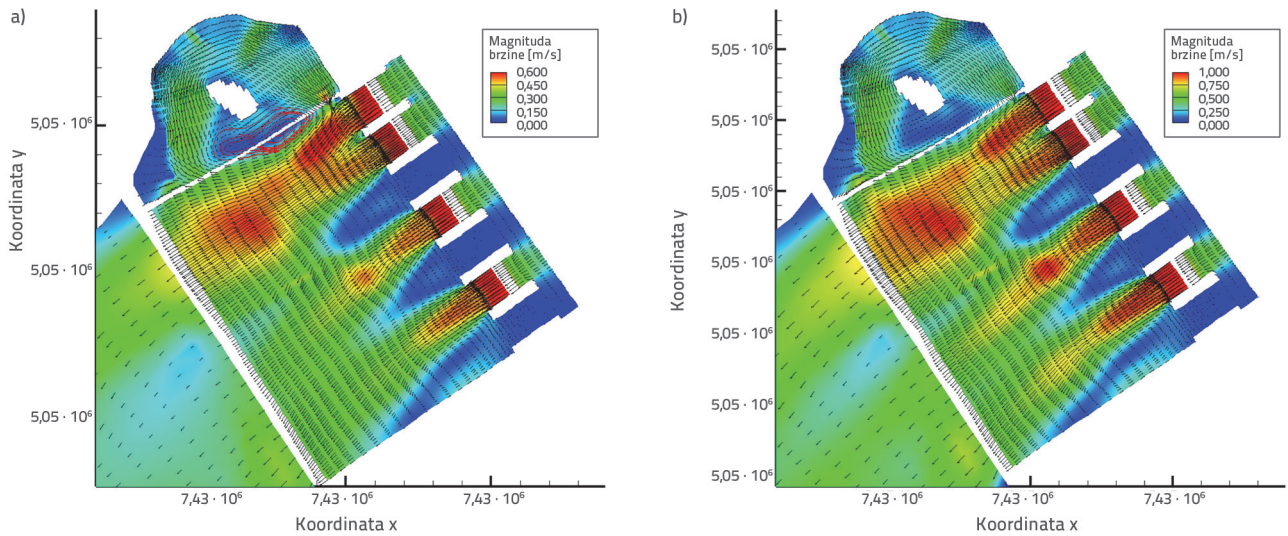
Implementacija postojećih uvjeta uključuje početno ispitivanje modela tečenja, modela pronosa nanosa te modela deformacije riječnog korita, a sve to kako bi se odredile odgovarajuće vrijednosti parametara, s naglaskom na vrijednost koeficijenta turbulentne difuzije i raspršivanja u sva tri smjera te na vrijednost koeficijenta trenja. Isto tako, zbog promjene režima rada brane potrebno je za postojeće uvjete odrediti broj aktivnih preljevni polja i odgovarajuće protoke u vezi sa scenarijima kritičnog protoka. To znači da je potrebno varirati broj preljevni polja koji su u funkciji, načine ispuštanja vode (preko klapni ili ispod zapornice) i odgovarajuće protoke u preljevnim poljima, kako bi se odredili najekstremniji uvjeti toka relevantni za proračun pronosa nanosa isto kao i za proračun morfoloških promjena u koritu rijeke.

Na temelju dostupnih hidroloških podataka, hidrauličkih podataka i terenskih opažanja, za karakterističnu razinu donje vode usvojena je desetogodišnja minimalna razina vode od 70,56 m nadmorske visine, što je preuzeto iz godišnjih izvještaja Republičke hidrometeorološke službe Srbije. Ta razina vode, tj. vodostaj odabran je za najintenzivnija klizanja obale koja su uočena pri vrlo niskim vrijednostima donje vode, koje odgovaraju najvećoj razlici između gornje i donje vode. Prema preliminarnim analizama, ova interpretacija je prihvatljiva, i to naročito zato što niska donja voda ne bi mogla izdržati mlazove koji potiču vrtložno strujanje, a dolaze iz aktivnih preljevni polja. Osim razine donje vode, još dva su parametra potrebna za definiranje modela tečenja, a to su broj preljevni polja koji su u funkciji i odgovarajući protoci. Osoblje koje upravlja branom na rijeci Tisi smatra da do velikih klizanja obale dolazi kada se koristi sedmo preljevno polje (tj. polje koje je najbliže desnoj obali) a voda se preljeva preko klapne segmentne zapornice, što je uostalom i usvojeno kao početni uvjet. Protoci su varirani u

rasponu koji odgovara razinama niske donje vode, tj. do 700,00 m³/s. Vrijednost svakog pojedinačnog protoka definirana je prilagođavanjem razine gornje vode, položaja segmentne zapornice, i odgovarajuće vrijednosti koeficijenta istjecanja. Također je variran i broj preljevni polja koja su u funkciji, i to paralelno s variranjem protoka (stope istjecanja) kako bi se utvrdili relevantni uvjeti koji generiraju tok s najvećim utjecajem na korito rijeke i na stabilnost riječne obale.

Stoga je najprije modelirano sedmo preljevno polje kada je bilo u funkciji, s minimalnim ispuštanjem od 26,82 m³/s preko klapne segmentne zapornice pri razini donje vode od 70,56 m nadmorske visine. U analizi osjetljivosti za početna ispitivanja modela dobiven je Manningov koeficijent od $n = 0,018 \text{ s/m}^{1/3}$, a vrijednost od $v_t = 0,65 \text{ m}^2/\text{s}$ usvojena je za horizontalnu turbulentnu viskoznost. Ti rezultati upućuju na intenzivan tok preko klapne segmentne zapornice i na rotacijski tok (s otokom u sredini) u erozijskom zaljevu. Slični su rezultati dobiveni i tijekom ispitivanja na fizikalnom modelu koja su provedena u Sektoru za hidrauliku Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi". Autori su imali priliku vidjeti samo vizualnu prezentaciju izmjerenih strujnih slika. Što se tiče implementiranog protoka od 26,82 m³/s, za analizirano područje je tipična prilično niska vrijednost srednje brzine (oko 0,001 m/s) sa znatnim povećanjem brzine (do 0,080 m/s) na nekoliko lokacija: između glavnog toka i rotacijskog toka, isto kao i na dvije lokacije između otoka i desne obale. Međutim, brzina je najveća na mjestu na kojem se rotacijskim tokom voda ispušta u glavni tok, gdje se bilježi protok od 0,28 m/s. U prvom segmentu, u točki u kojoj mlaz napušta preljev, brzina doseže i do 0,3 m/s. Nizvodno duž slapišta brzina toka se smanjuje na otprilike 0,15 m/s, dok u preostalom dijelu slapišta brzina iznosi otprilike 0,0001 m/s, što znači da se voda gotovo uopće ne kreće. Brzine su prilično ravnomjerne u trećem segmentu gdje iznose otprilike 0,03 m/s. Kako je rezultirajuća strujna slika potpuno u skladu s prethodnim opažanjima i dostupnim podacima, zadane vrijednosti parametara, tj. Manningov koeficijent i koeficijenti horizontalne turbulentne viskoznosti, u svim su slučajevima usvojene kao karakteristične vrijednosti.

U prikazanom je slučaju u funkciji bilo samo sedmo preljevno polje. Ispitani su i dodatni slučajevi kako bi se ustanovilo da li istovremeni rad više preljevni polja utječe na degradacijske procese u erozijskom zaljevu na desnoj obali. Pri niskom vodostaju donje vode, koji je definiran kao relevantan uvjet za eroziju obale, u normalnim uvjetima istovremeno funkcioniraju dva ili četiri preljevna polja koja su simetrično raspoređena kako bi se izbjegla koncentracija velikih brzina vodnog toka. Radi stjecanja boljeg uvida u utjecaj preljeva na proces podlokavanja, razmotrena su dva dodatna slučaja: paralelan rad dva preljevna polja (šestog i sedmog) te slučaj s četiri aktivna preljevna polja (drugo, četvrto, šesto i sedmo). Simulacijom brzina utvrđeno je da se strujna slika unutar erozijskog zaljeva ne mijenja u smislu prostornog rasporeda vektora brzine, tj. u oba slučaja je također uočen ranije utvrđen rotacijski tok oko otoka, sa sekundarnim vrtlogom između otoka i mlaza koji dolazi sa sedmog preljevnog polja. S druge strane, može se uočiti vidljiv porast magnituda brzine za



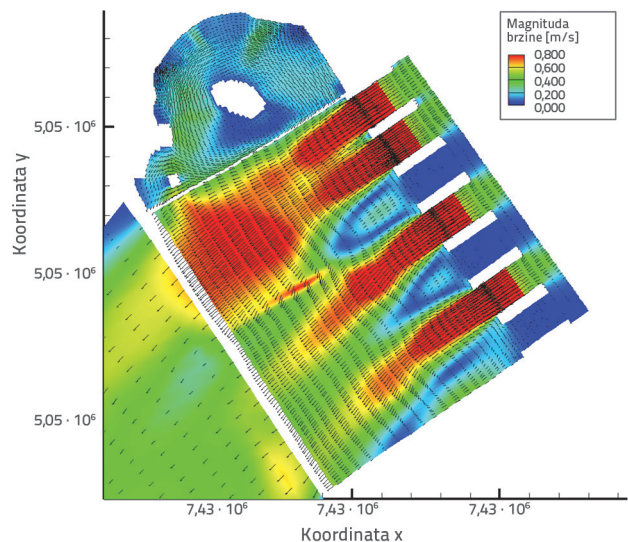
Slika 6. Strujna slika pri istjecanju preko klapni segmentnih zapornica, razina donje vode je na 70,56 m nadmorske visine: a) $Q = 60,0 \text{ m}^3/\text{s}$, b) $Q = 112,0 \text{ m}^3/\text{s}$

otprilike 5–10 % u čitavom području, u uspoređi s prethodnim stanjem. Općenito uzevši, aktivacija dodatnih preljevnih polja ne utječe bitno na strujnu sliku u erozijskom zaljevu u smislu prostorne raspodjele i intenziteta polja brzine. Stoga se može ustvrditi da je slučaj s četiri aktivna preljevna polja (drugo, četvrto, šesto i sedmo) kritičan i reprezentativan, zbog čega je dotični slučaj odabran za primjenu u daljnjim istraživanjima.

Utjecaj istjecanja vode na strujnu sliku u erozijskom zaljevu razmotren je nakon analize aktivnih preljevnih polja koja utječu na eroziju. U tom je smislu usvojen niz s tri protoka po preljevnom polju ($60,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $90,0 \text{ m}^3/\text{s}$ i $112,0 \text{ m}^3/\text{s}$) te su definirane strujne slike za sve protoke. Usvojene vrijednosti protoka odgovaraju niskim razinama donje vode jer se niska donja voda smatra kritičnim i relevantnim uvjetom za eroziju desne obale. Kako se razmatra protok preko klapni segmentnih zapornica, protok je u modelu Delft3D definiran usvajanjem vrijednosti uzvodnog vodostaja i koeficijenta istjecanja. Kao i u prethodnim slučajevima, u modelu je postignuto stacionarno stanje strujanja za otprilike šest sati, što je provjereno kontroliranjem promjene očitavanja vodostaja i brzine u vremenu za čitavo područje uključeno u proračun. Usporedba strujnih slika i intenziteta brzina prikazana je na slici 6. Radi jasnoće treba napomenuti da će svi vektori brzina u nastavku rada biti prikazani samo kao prosjeci po cijeloj dubini (iako model generira trodimenzionalne vektore brzina).

Rezultati pokazuju da je u čitavom području prostorni raspored vektora brzina ostao nepromijenjen, tj. da varijacije u istjecanju ne utječu na strujnice u smislu prostorne orijentacije vektora brzine na slapištu preljeva i u erozijskom zaljevu na desnoj obali. Rotacijski tok oko otoka i sekundarno vrtloženje između mlaza i otoka ostali su nepromijenjeni u smislu usmjerenja vektora i lokacija. Međutim, intenziteti vektora brzina povećali su se s povećanjem protoka, naročito na prije definiranim lokacijama. To znači da maksimalne brzine u erozijskom zaljevu iznose otprilike $0,32 \text{ m/s}$ pri protoku od $60,0 \text{ m}^3/\text{s}$, tj. $0,37 \text{ m/s}$ pri

protoku od $90,0 \text{ m}^3/\text{s}$, te $0,42 \text{ m/s}$ pri protoku od $112,0 \text{ m}^3/\text{s}$. S obzirom na batimetriju erozijskog zaljeva, može se zaključiti da je strujna slika prilično logična. Većina toka koncentrirana je duž najdubljeg srednjeg presjeka (gdje je i otpor najmanji), a plitki presjeci ostali su pasivni bez obzira na promjene u protoku. Ovom trendu znatno doprinosi sekundarno vrtloženje, čije su strujnice prikazane na slici 6.a. Općenito uzevši, prezentirana analiza varijacija protoka dokazuje da povećanje protoka od $60,0$ do $112,0 \text{ m}^3/\text{s}$ uopće ne utječe na prostornu raspodjelu vektora brzina, tj. da veći protoci ne utječu na osnovnu strujnu sliku u erozijskom zaljevu na desnoj obali. Ipak, veći protoci dovode do povećanja brzina duž primarnog toka i to za otprilike 10 % za svako povećanje od $30,0 \text{ m}^3/\text{s}$ po svakom preljevnom polju.



Slika 7. Strujna slika za slučaj protoka ispod segmentnih zapornica s protokom od $100,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a pri razini donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m

U okviru zadnjeg numeričkog eksperimenta koji se odnosi na postojeće uvjete (bez regulacijskih radova) obrađeno je ispuštanje vode ispod segmentnih zapornica. Kako je već tijekom prethodnih numeričkih eksperimenata utvrđen trend magnituda i prostorne raspodjele vektora brzina ovisno o broju aktivnih preljeva i o promjenama protoka istjecanja, u sljedećem je eksperimentu obrađeno ispuštanje vode ispod segmentnih zapornica za protok od 100,00 m³/s. Za sve ostale uvjete – kao što su broj i raspored aktivnih preljernih polja, početni i granični uvjeti, vodostaj donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m – usvojene su vrijednosti koje su već definirane tijekom prethodnih analiza. Rezultirajuća strujna slika za slučaj protoka ispod segmentnih zapornica prikazana je na slici 7. Usporedba ovog scenarija sa slučajem protoka preko klapni segmentnih zapornica pokazuje da u oba scenarija strujna slika upućuje na karakterističan rotacijski tok oko otoka koji se nalazi u sredini erozijskog zaljeva, te da je još uvijek prisutno sekundarno vrtloženje između mlaza koji dolazi sa sedmog preljeva. Izračunane magnitude vektora brzina pokazuju da maksimalna brzina duž primarni tok u erozijskom zaljevu sada iznosi 0,32 m/s. To je također logično imajući u obliku način istjecanja vode s preljeva i fizikalne procese koji se pritom odvijaju.

Općenito gledano, analizirani slučajevi pokazuju da je prostorni raspored vektora brzina u erozijskom zaljevu na desnoj obali (vidi strujne slike) prilično neosjetljiv na promjenu protoka istjecanja, na način ispuštanja vode kroz preljerna polja, te na aktivaciju dodatnih preljeva u situaciji kada je već aktivno sedmo preljerno polje. Osnovna strujna slika uporno ostaje ista, tj. za nju je karakterističan rotacijski tok oko otoka i sekundarno vrtloženje između otoka i mlaza koji dolazi iz sedmog preljernog polja. S druge strane, na magnituda brzina izravno utječu promjene u protoku, načinu ispuštanja vode kroz preljerna polja te broj aktivnih preljernih polja.

3.2.2. Modeliranje pronosa nanosa i deformacija u koritu rijeke

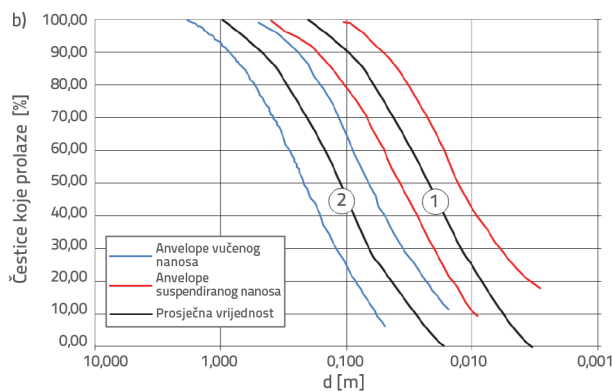
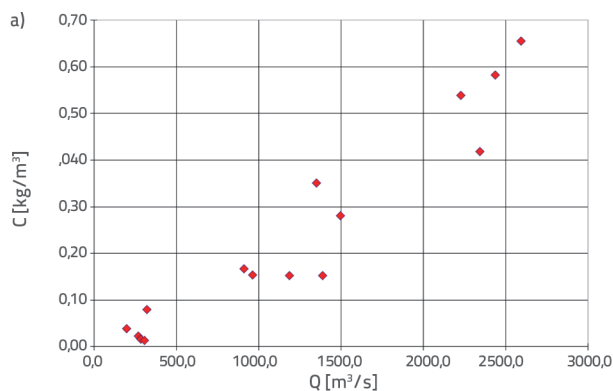
Drugi dio analize postojećeg stanja odnosi se na modeliranje pronosa nanosa (suspendiranog i vučenog nanosa) te na morfološke promjene u koritu rijeke, ovisno o već definiranim

strujnim slikama. Iako su proračuni pronosa nanosa provedeni za sve prethodno analizirane scenarije tečenja ovdje će se, radi jasnoće, ovo razmatranje ograničiti na samo dva kritična scenarija:

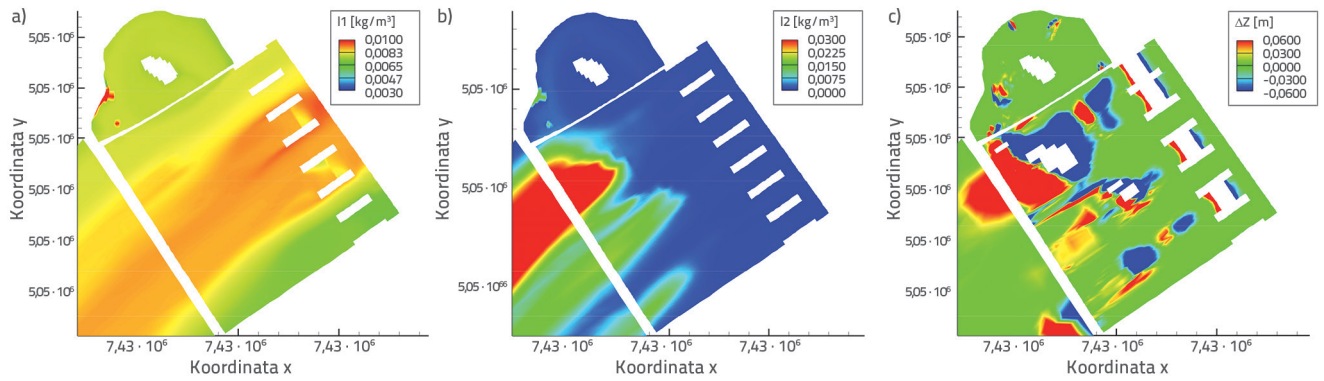
- tok preko klapni segmentnih zapornica za četiri aktivna preljerna polja s protokom od 112,00 m³/s, i
- tok ispod segmentnih zapornica za četiri aktivna preljerna polja s protokom od 100,00 m³/s.

Kao što je već navedeno, programski paket Delft3D sadrži modul koji služi za izračunavanje pronosa suspendiranog nanosa, vučenog nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke zbog pronosa mješavine nanosa. To znači da se u modelu nanos ne uzima u obzir kao prosječna veličina čestice d₅₀ – što je tipično za manje složene numeričke modele – već se analizira raspodjela veličina zrna, što je mnogo precizniji pokazatelj u postupku modeliranja pronosa nanosa. Taj je pristup detaljniji i mnogo realnije opisuje pronos nanosa i morfološke promjene u koritu rijeke. Dakle, nanos se u usvojenoj metodi analizira i modelira po frakcijama nanosa. Drugim riječima, za numerički model potrebno je utvrditi granulometrijski sastav i za vučeni i za suspendirani nanos. U modelu Delft3D, granulometrijski sastav nanosa unosi se u obliku proizvoljnog broja raspona frakcija, gdje se srednja veličina čestice izračunava za svaki definirani raspon frakcija kao geometrijska sredina gornje i donje granice raspona frakcija. Tri raspona frakcija usvojena su nakon analize granulometrijskog sastava za suspendirani i vučeni nanos: raspon frakcije I1 varira od 0,0003 do 0,017 mm, raspon frakcije I2 varira od 0,017 do 0,20 mm, dok raspon frakcije I3 varira od 0,2 do 1,00 mm. Važno je naglasiti da se frakcija I1 nalazi samo u suspendiranom obliku, frakcija I3 nalazi se samo u vučenom obliku, dok frakciju I2 nalazimo u oba oblika.

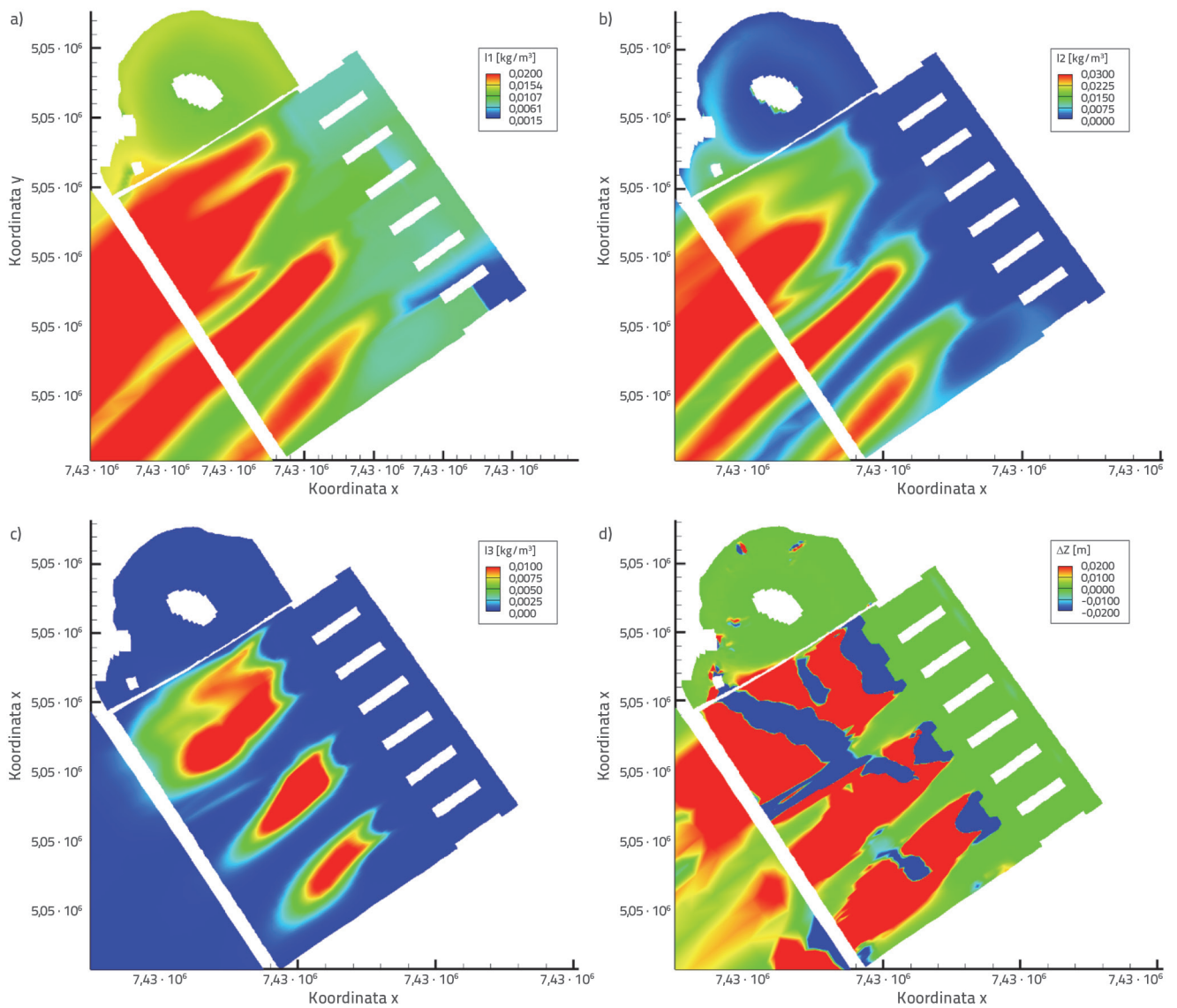
Kao i kod modeliranja tečenja, u modulu pronosa nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke trebaju se zadati početni i rubni uvjeti i to nakon definiranja raspona frakcija. Procijenjena prosječna vrijednost ukupne koncentracije suspendiranog nanosa za protok od 1000,0 m³/s ili manje iznosi 0,025 kg/m³ na bazi dijagrama odnosa koncentracije suspendiranog nanosa i protoka koji je usvojen za modeliranje nanosa. Kako ta vrijednost pokazuje ukupnu koncentraciju a u modelu se koriste rasponi mješavina nanosa, ukupna koncentracija suspendiranog



Slika 8. a) Odnos koncentracije mase suspendiranog nanosa i protoka, b) Granulometrijske krivulje za suspendirani nanos (1) i vučeni nanos (2)



Slika 9. Raspodjela koncentracija suspendiranog nanosa za frakcije: a) I1; b) I2; c) Raspodjela kumulativne erozije/taloženja za scenarij toka preko klapni segmentnih zapornica



Slika 10. Raspodjela koncentracija suspendiranog nanosa za frakcije: a) I1; b) I2; c) I3; d) Raspodjela kumulativne erozije/taloženja za scenarij istjecanja ispod segmentnih zapornica

nanosa treba se raspodijeliti na frakcije I1, I2 i I3. Na kraju su dobivene sljedeće koncentracije suspendiranog nanosa koje su definirane rasponima frakcija: I1 = 0,010 kg/m³, I2 = 0,015 kg/m³ i I3 = 0,0. Pretpostavljeno je da su te koncentracije definirane po rasponima frakcija već prisutne u suspendiranom nanosu, te su stoga obje vrijednosti korištene kao početni i rubni uvjeti za uzvodnu granicu modela.

S druge strane, mješavina vučenog nanosa definirana je u obliku odnosa pojedinačnih raspona frakcija kako slijedi: I1 = 0,0 %, I2 = 30 % i I3 = 70 %. Nakon što su definirani rubni uvjeti i odabrani scenariji kritičnog protoka, proveden je proračun pronosa suspendiranog nanosa i vučenog nanosa. Na kraju su za jednodnevno razdoblje modelirane morfološke promjene riječnog korita u obliku kumulativne erozije/taloženja. Na slikama 9. i 10. prikazana je rezultirajuća raspodjela raspona frakcija u trećem sloju zaljeva, tj. kumulativna erozija/taloženje za slučaj istjecanja vode preko klapne segmentnih zapornica i ispod segmentnih zapornica (frakcije I3 uopće nema u suspendiranom nanosu, pa je stoga izostavljena slika s prikazom raspodjele I3 frakcija).

Rezultati ostvareni u oba scenarija pokazuju da su morfološki procesi dosegli ujednačeno stanje, tj. da je postignuta ravnoteža u procesima pronosa nanosa u zadanom razdoblju modeliranja. Intenzivan tok u slapištu preljeva koji proizlazi iz istjecanja vode ispod segmentnih zapornica uzrokuje značajnu eroziju u tom području, što omogućuje prijelaz vučenog nanosa iz slapišta u suspendirani nanos. Dijagrami koncentracije i kumulativne erozije/taloženja, prikazani na slici 10., jasno pokazuju da su visoke koncentracije nanosa u slapištu uzrokovane isključivo pronosom vučenog nanosa zbog intenzivnog dotoka s preljeva, a taj nanos se zatim prenosi nizvodno u treći segment. Isto tako, djelomično je aktivirana i treća frakcija I3, što upućuje na vrlo intenzivan tok u tom području. Što se tiče erozijskog zaljeva na desnoj obali, pronos vučenog nanosa dovodi do povećanja koncentracije i do 0,014 kg/m³ za frakciju I1 tj. 0,005 kg/m³ za frakciju I2 u jednom dijelu segmenta, a vrijednost od 0,0001 kg/m³ karakteristična je za preostali dio segmenta. To znači da čak i kada veća količina nanosa dođe iz glavnog toka u erozijski zaljev, taj se nanos dalje pronosi u visokoj koncentraciji sve do izlaza iz tog područja. Treća frakcija I3 nije aktivirana u erozijskom zaljevu. Što se tiče procesa erozije/taloženja u erozijskom zaljevu, lokacije koje su definirane kao kritične u prethodnim scenarijima - s protokom preko klapne segmentnih zapornica - također su aktivne u slučaju toka ispod segmentnih zapornica, s tim da je u ovom slučaju intenzitet nešto niži.

Općenito uzevši, rezultati dobiveni pomoću programa Delft3D, tj. njegovog modula za pronos nanosa, pokazuju da je za analizirano područje postavljen odgovarajući model pronosa nanosa i morfoloških promjena. Može se reći da modul sveukupnog nanosa vjerno prikazuje prostorne i vremenske uvjete pronosa nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke. Stoga se može zaključiti da su oba modula u ovoj fazi prikladno baždarena te da mogu simulirati potencijalni utjecaj bilo kakvih regulacijskih građevina na hidraulične i morfološke uvjete te na uvjete pronosa nanosa u području koje se želi analizirati.

4. Rješenje koje uključuje regulacijske građevine

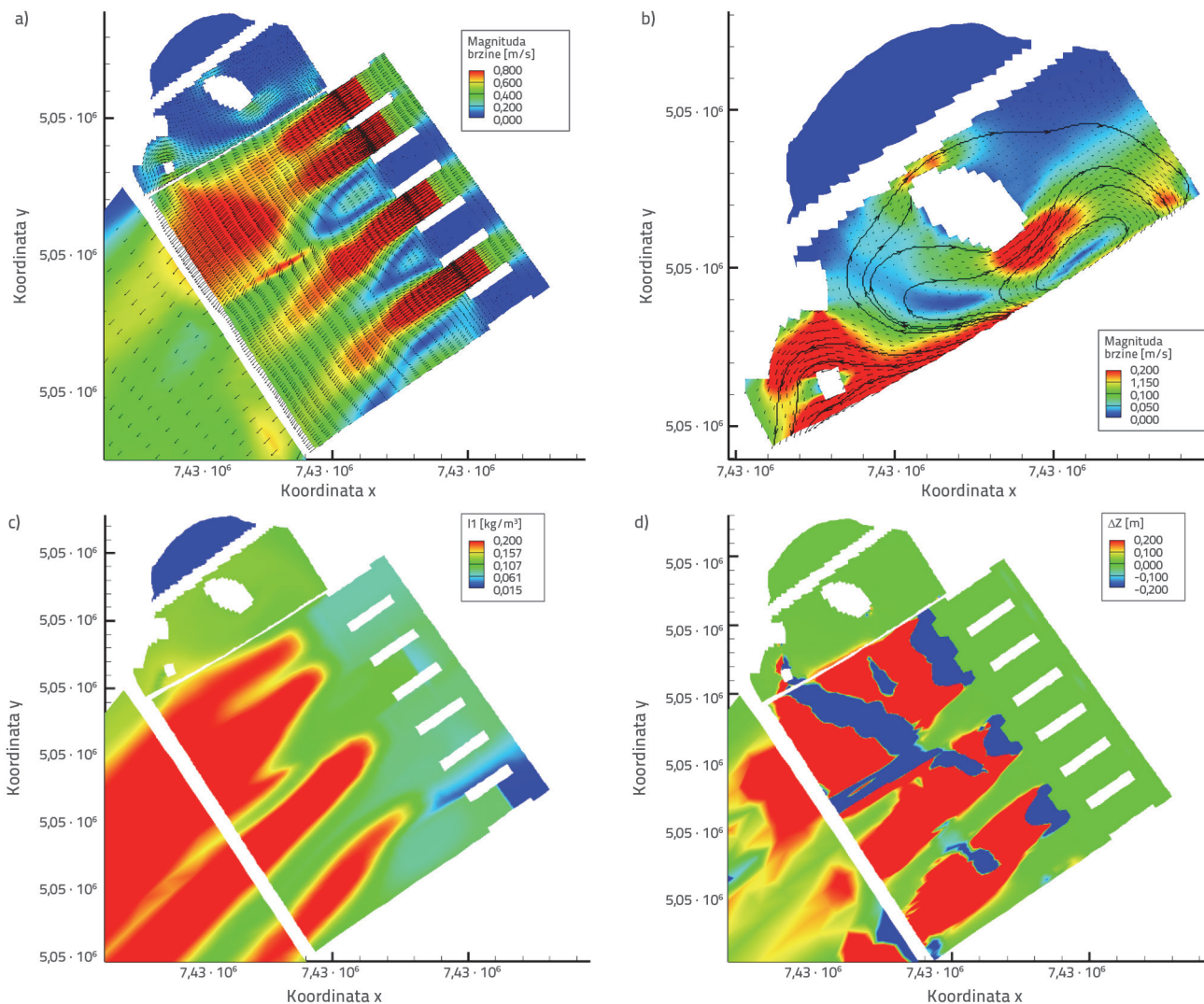
Osnovni kriterij za ocjenjivanje raznih potencijalnih rješenja koja uključuju regulacijske građevine jest stupanj njihove djelotvornosti, tj. potrebno je odrediti mogu li se primjenom nekog od tih rješenja djelotvorno eliminirati neželjeni utjecaji na tok rijeke nizvodno od sedmog preljeva koji ugrožava erozijski zaljev i desnu obalu. Isto tako, predloženim rješenjem treba se omogućiti smanjenje ili potpuna eliminacija trajnog erozivnog djelovanja na korito rijeke na dotičnoj lokaciji, te spriječiti pronos nanosa iz erozijskog zaljeva u glavni tok rijeke.

Moguća rješenja uključuju analizu djelotvornosti (1) uzdužne paralelne građevine (koja bi bila izvedena paralelno s tokom rijeke) na tok i morfološke uvjete na desnoj obali, a prema prijedlogu javnog vodoprivrednog poduzeća "Vode Vojvodine" i (2) regulacijsko pero na desnoj obali u nekoliko varijanti. Uzdužna paralelna građevina analizirana je za scenarij s istjecanjem ispod segmentnih zapornica s protokom od 100,0 m³/s pri razini donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m. Regulacijsko pero je također analizirano za istjecanje ispod segmentnih zapornica, i to za nekoliko protoka i razina donje vode: 100,0 m³/s za razinu donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m, 150,0 m³/s, a za razinu donje vode na nadmorskoj visini od 72,0 m, te 200,0 m³/s za razinu donje vode na nadmorskoj visini od 74,0 m.

4.1. Prva opcija - uzdužna paralelna građevina

Prva opcija koja je razmotrena kao moguća terenska intervencija u svrhu eliminiranja nepovoljnog utjecaja toka i pronosa nanosa koji ugrožava stabilnost desne obale, sastoji se u izgradnji uzdužne paralelne građevine (paralelno s glavnim tokom) između otoka i desne obale. Predložena dužina građevine iznosi 140,0 m, s razinom krune na nadmorskoj visini od 73,0 m. Rezultati numeričke simulacije prikazani su u obliku prosječnih srednjih brzina, prostorne raspodjele koncentracija suspendiranog nanosa i kumulativnih dijagrama erozije/taloženja, kao što je to prikazano na slici 11.

Kao što je već spomenuto, utjecaj uzdužne paralelne građevine razmatra se za scenarij s istjecanjem ispod segmentnih zapornica pri protoku od 100,0 m³/s te za razinu donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m. Prvo što valja napomenuti u vezi s prostornom raspodjelom toka jest gotovo potpuna eliminacija toka na obje strane otoka. Budući da je blokiran prethodno prisutan rotacijski tok oko otoka u erozijskom zaljevu, analizirani tok sada prolazi pored otoka i znatnije utječe na lijevu stranu otoka usmjerenu prema glavnom toku rijeke, te prema nizvodnom dijelu erozijskog zaljeva. Što se tiče pronosa nanosa i morfoloških promjena u koritu rijeke, model pokazuje da se nanos, koji je prvobitno djelovao kao suspendirani nanos u erozijskom zaljevu, sada na istom mjestu taloži. To bi moglo značiti da bilo kakva masa



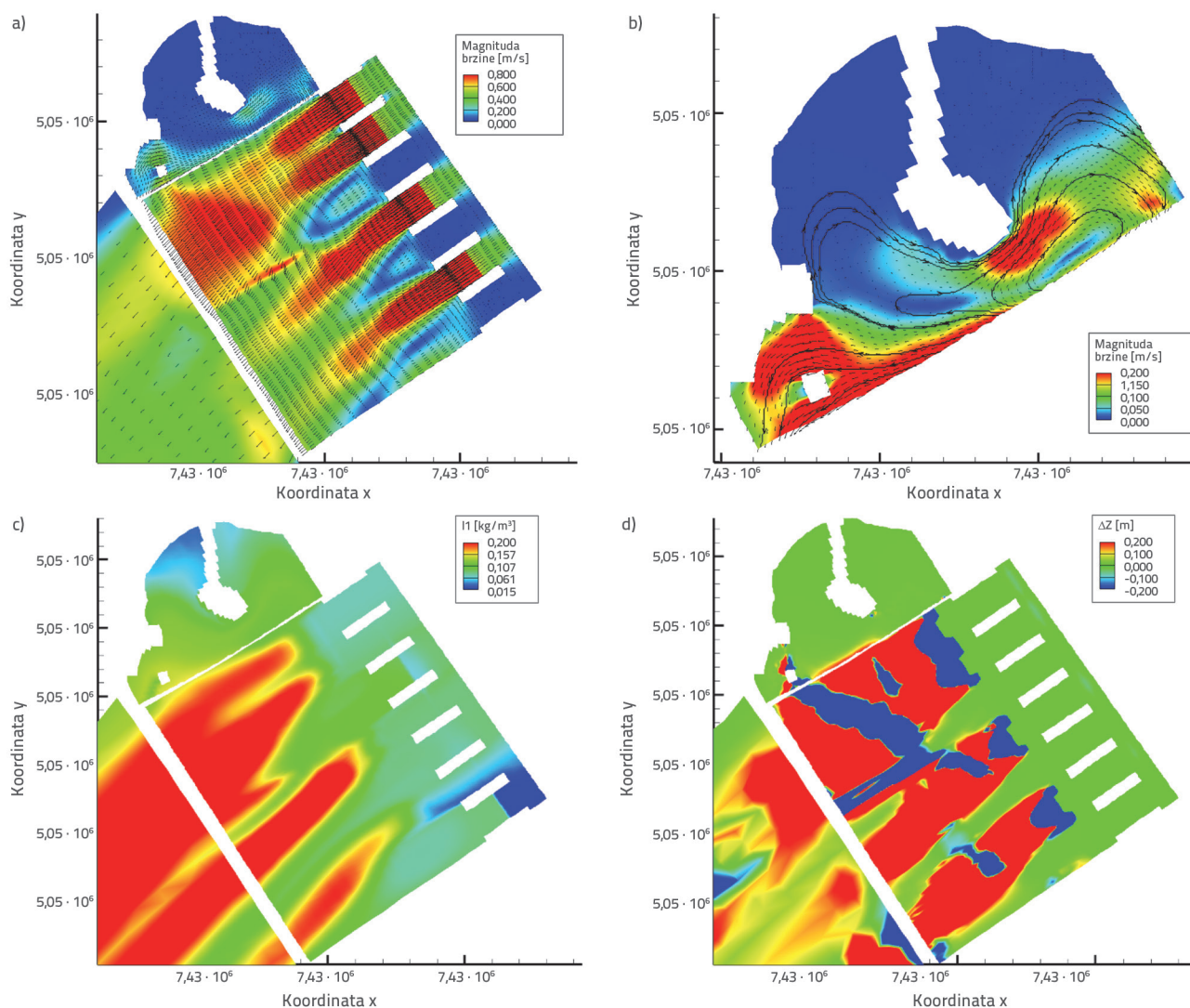
Slika 11. a) Rezultirajuća strujna slika; b) Detaljna strujna slika drugog segmenta; c) Koncentracija suspendiranog nanosa za frakciju I1; d) Kumulativna erozija/taloženje u slučaju izvođenja uzdužne paralelne građevine

tla, koja bi ušla u erozijski zaljev zbog potencijalnog klizanja obale uslijed varijacija purnog pritiska zbog oscilacija razina vode, zapravo ostala u erozijskom zaljevu te bi pospješila zapunjavanje kaverne nastale podlokavanjem. Što se tiče deformacija u koritu rijeke, nešto veća erozija/taloženje može se uočiti uz otok na strani prema glavnom toku i u nizvodnom dijelu erozijskog zaljeva u točki lokalnog strujanja. To podržava spomenuto opažanje da se tok, kako ne može zadržati raniji trend, sada prebacuje na lokacije s većim brzinama, što dovodi do značajnije erozije i jačeg taloženja u rasponu od -0,02 m do 0,02 m. Međutim, u preostalom dijelu erozijskog zaljeva uočava se potpun izostanak morfoloških promjena, a to je zapravo i bio primarni cilj predložene građevine. Osim toga, model pokazuje da izvođenje uzdužne paralelne građevine uopće ne ugrožava sigurnost nizvodnog dijela riječne obale i vodotoka.

4.2. Druga opcija - regulacijsko pero

4.2.1. Regulacijsko pero s krunom na nadmorskoj visini od 73,0 m te s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m

Druga opcija razmotrena u ovoj analizi je izgradnja regulacijskog pera koje bi bilo bitno manjih dimenzija od uzdužne paralelne građevine. Regulacijsko pero dužine 36,0 m, s krunom na nadmorskoj visini od 73,0 m, prva je podvarijanta s hidrauličkim karakteristikama koje su identične onima za uzdužnu paralelnu građevinu. Visina krune odabrana je na temelju preliminarne hidrološke analize razina donje vode. Odabrana razina krune jednaka je prosječnoj godišnjoj razini donje vode. Rezultati numeričke simulacije prikazani su na slici 12. u obliku prosječne srednje brzine, prostorne raspodjele koncentracije nanosa te



Slika 12. a) Rezultirajuća strujna slika; b) Detaljna strujna slika drugog segmenta; c) Raspodjela koncentracija suspendiranog nanosa u frakciji I1; d) Kumulativna erozija/taloženje za postavljeno pero s krunom na nadmorskoj visini od 73,0 m i s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 70,56 m

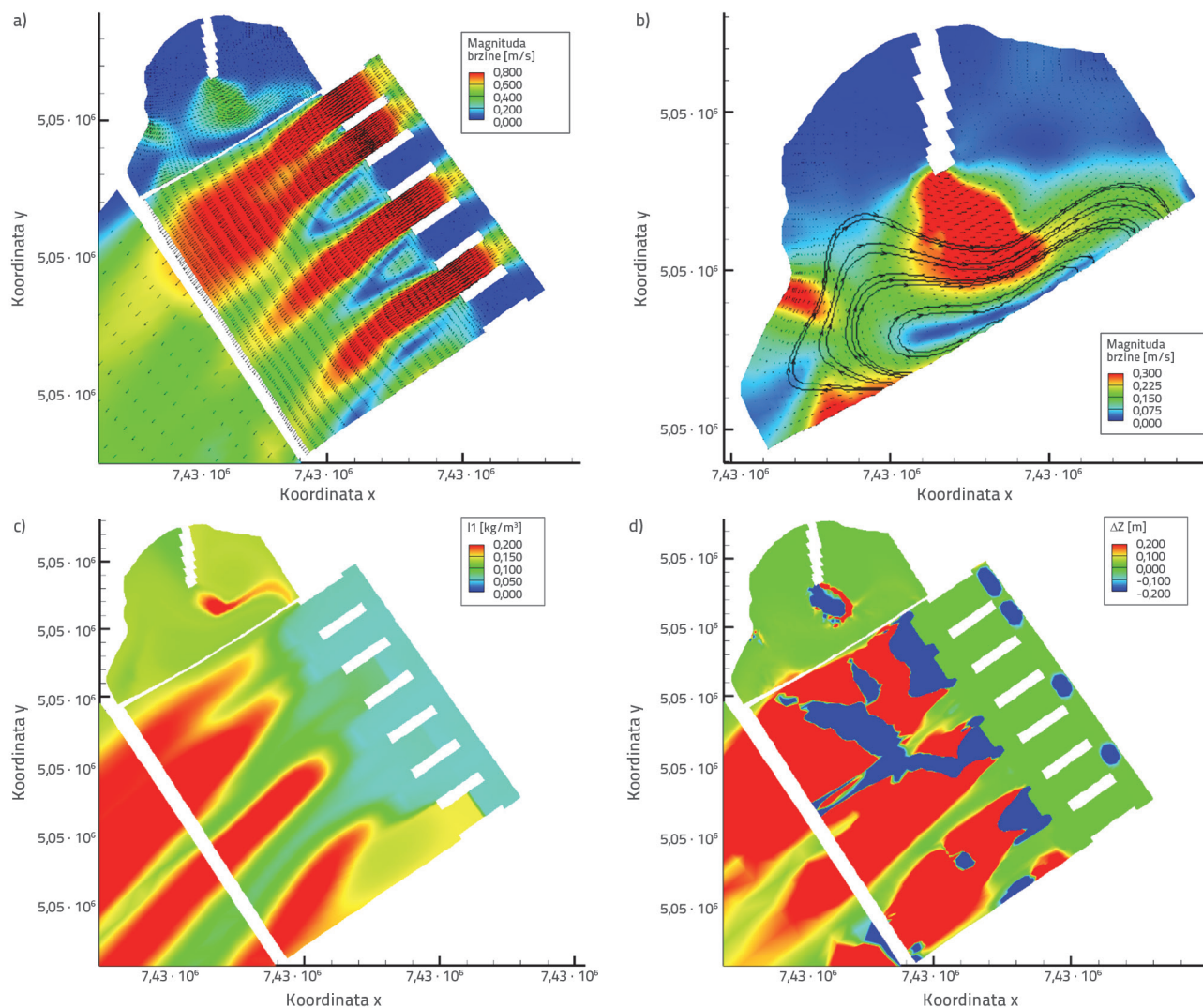
kumulativne erozije/taloženja. Na slici 12. može se vidjeti da je pero u potpunosti spojeno s otokom, pa je tako potpuno eliminiran tok između građevine i otoka, što nije bio slučaj u prethodnoj opciji.

Kao i kod prethodne opcije, iz strujne se slike može vidjeti da u zoni uz obalu, tj. uz bokove pera, uopće nema toka, što znači da je postignut isti učinak kao i s uzdužnom paralelnom građevinom. Strujna slika u preostalom dijelu erozijskog zaljeva slična je onoj iz prethodne opcije, tj. veće brzine reda veličine od otprilike 0,20 m/s bilježe se uz stranu otoka koja je usmjerena prema glavnom toku i u nizvodnom dijelu erozijskog zaljeva. Preostali dio modeliranog područja je nepromijenjen, što vrijedi kako za pronos nanosa tako i za morfološke promjene u koritu rijeke. Prva frakcija I1 postupno se taloži oko regulacijskog pera što upućuje na "nepomičnu" vodu u toj zoni, a kod druge I2 i treće

I3 frakcije bilježi slika koja je jednaka onoj u opciji s uzdužnom paralelnom građevinom. To se odnosi i na kumulativnu eroziju/taloženje, tj. ti su procesi lokalizirani na identičnim mjestima kao i u prethodnoj opciji, što je izravna posljedica izmijenjene strujne slike na toj lokaciji.

4.2.2. Regulacijsko pero s krunom na nadmorskoj visini od 73,0 m te s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 72,0 m

Druga podvarijanta odnosi se na regulacijsko pero s krunom na istoj nadmorskoj visini od 73,0 m, ali s promjenom nadmorske visine donje vode koja sada iznosi 72,0 m, te s povećanjem protoka na 150,0 m³/s po preljevnom polju. Time se postiže poboljšana strujna slika, pri čemu je kruna pera iznad razine



Slika 13. a) Rezultirajuća strujna slika; b) Detaljna strujna slika drugog segmenta; c) Koncentracija suspendiranog nanosa u frakciji I1; d) Kumulativna erozija/taloženje za postavljeno pero s krunom na nadmorskoj visini od 73,0 m i s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 72,0 m

vode, a otok s maksimalnom nadmorskom visinom od 71,50 m potpuno je potopljen. Rezultati numeričkih simulacija prikazani su na slici 13. u obliku prosječnih srednjih brzina, prostorne raspodjele koncentracija nanosa, te kumulativne erozije/taloženja.

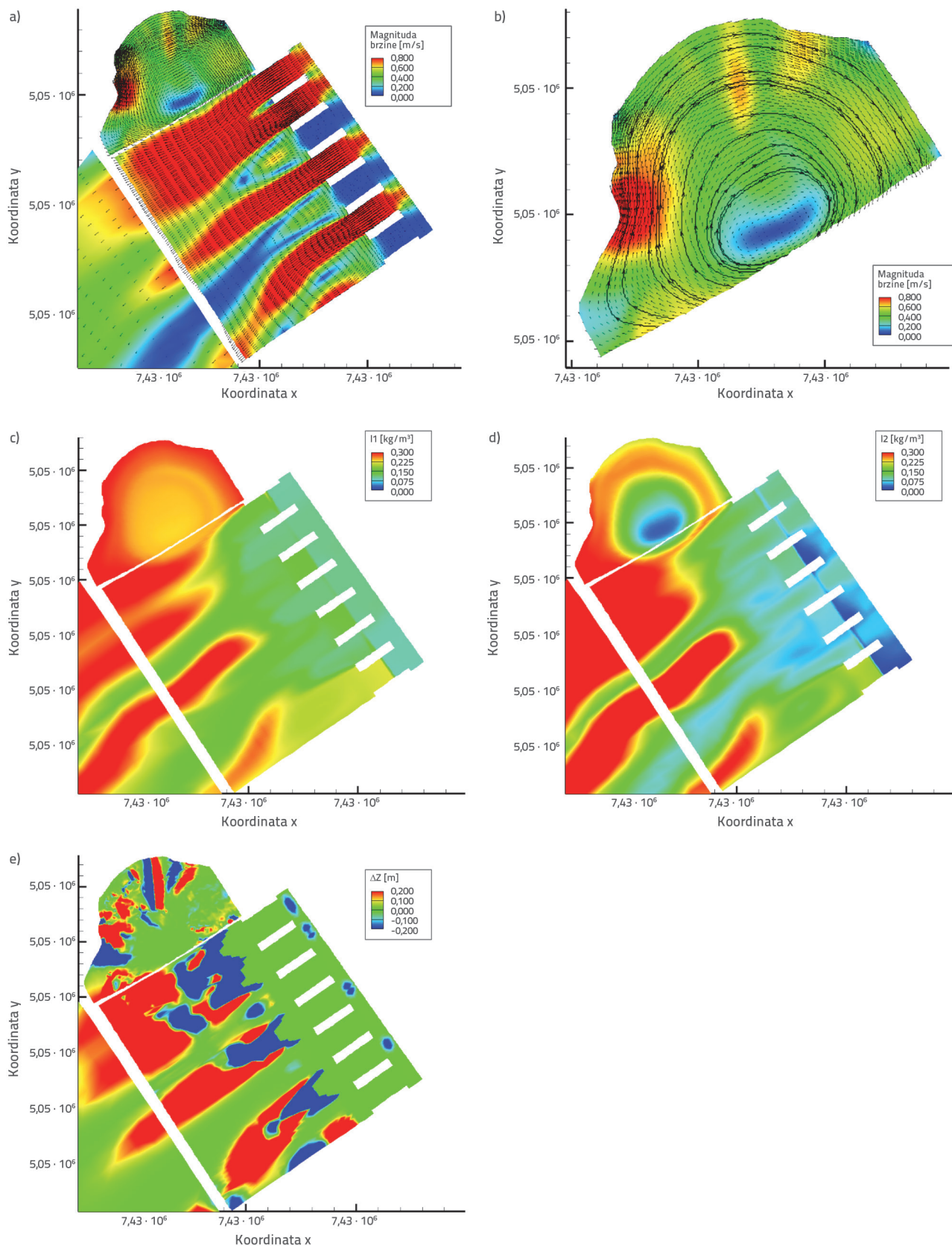
Iz strujne slike može se vidjeti da je otok prekriven vodom. Tok je pretjeran u zoni preko potopljenog otoka, s brzinama koje dosežu i do 0,30 m/s. Općenito uzevši, prekrivanje otoka vodom dovelo je do ubrzanja i jačanja sekundarnog vrtloženja koje se inicijalno formiralo između otoka i glavnog toka. Zbog takvih uvjeta, kao i zbog intenzivnog glavnog toka iz sedmog prelijevnog polja, ova se lokacija može smatrati zonom većeg rizika.

Nova strujna slika upućuje na pronos nanosa i promjenu morfologije u riječnom koritu, što dovodi do značajne erozije otoka. Zbog novonastalih uvjeta koji razbijaju prijašnji sklad između toka i morfoloških procesa, dolazi do jačanja erozije kod

frakcija I1 i I2, nakon čega se erodirani nanos pronosi u glavni tok. To praktički znači da ti hidraulički uvjeti dovode do erozije otoka, a takvo će stanje trajati sve dok se na toj lokaciji ne postigne nova ravnoteža/sklad u hidrauličkom/morfološkom smislu. U preostalom dijelu modeliranog područja, uvjeti su dodatno intenzivirani porastom protoka, ali bez značajnih promjena u prostornoj raspodjeli.

4.2.3. Regulacijsko pero s krunom na nadmorskoj visini od 71,0 m te s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 74,0 m

U trećoj se podvarijanti istražuje slučaj potpunog potapanja otoka i pera. Razina krune pera smanjena je do nadmorske visine od 71,0 m. U skladu s tim uvjetima, određeno je da razina donje vode bude na nadmorskoj visini od 74,0 m, a



Slika 14. a) Rezultirajuća strujna slika; b) Detaljna strujna slika drugog segmenta; c) Koncentracija suspendiranog nanosa u frakciji I1; d) Koncentracija suspendiranog nanosa u frakciji I2; e) kumulativna erozija/taloženje za postavljeno pero s krunom na nadmorskoj visini od 71,0 m i s razinom donje vode na nadmorskoj visini od 74,0 m

protok je povećan na 200,0 m³/s po prelivnom polju. Protok se u podvarijantama povećava kako bi se povećale brzine toka i ubrzali procesi pronosa nanosa, što bi opet trebalo upozoriti na moguće kritične lokacije u erozijskom zaljevu. Što se tiče protoka i razina vode, analizirane su kombinacije malog protoka s niskim razinama donje vode te velikog protoka s visokim razinama donje vode. Primijenjen je režim funkcioniranja brane. U teoretskom smislu, to su zapravo najekstremniji scenariji. Kombinacije niskih razina donje vode i visokih vrijednosti protoka nisu analizirane jer se u praksi takvo stanje teško može očekivati. U skladu s projektnim zadatkom, u ovom nizu numeričkih eksperimenata analizirani su slučajevi s visokim ukupnim vrijednostima protoka od 800,0 m³/s. Rezultati su prikazani na slici 14. u obliku prosječnih srednjih brzina, prostorne raspodjele koncentracija nanosa i kumulativne erozije/taloženja.

Rezultirajuća strujna slika, s potopljenim perom i otokom, upućuje na strujnu sliku sličnu onoj s nižim razinama vode bez pera ali sa središtem vrtloženja pomaknutim bliže glavnom toku, tj. prema mlazu koji dolazi iz sedmog prelivnog polja. Vodni tok ulazi u erozijski zaljev s nizvodnog kraja, uzrokuje veliki vrtlog, te napušta erozijski zaljev na uzvodnom kraju. Iako je strujna slika slična onoj bez pera u smislu prostorne orijentacije vektora brzina, veći protok kroz prelivna polja uzrokuje znatno povećanje brzina. Maksimalne brzine od približno 0,80 m/s registrirane su uz obalu rijeke na nizvodnom kraju erozijskog zaljeva. Nešto niža ali ipak velika brzina od približno 0,70 m/s zabilježena je na lokaciji gdje tok siječe pero isto kao i deset metara nizvodno. U preostalom dijelu erozijskog zaljeva, brzine iznose otprilike 0,40 m/s. Na temelju prezentirane strujne slike može se zaključiti da na razinama donje vode na kojima su pero i otok potpuno potopljeni zapravo raste intenzitet toka u erozijskom zaljevu, jer ništa više ne ograničava tok iznad krune pera. Lokalna brzina toka preko pera je visoka, što znači da visina pera bitno utječe na strujnu sliku u erozijskom zaljevu.

Što se tiče nanosa, viša koncentracija prvih dviju frakcija može se uočiti u erozijskom zaljevu, a treće frakcije u nanosu nema. Viša koncentracija prve frakcije I1 može se uočiti duž obale, što upućuje na donos nanosa iz glavnog toka te na donos materijala s dna zbog intenzivne erozije. U ovom području, prosječna koncentracija iznosi otprilike 0,030 kg/m³, a u preostalom području koncentracija stabilizirala na 0,022 kg/m³. Značajna erozija obale upućuje na prostornu raspodjelu druge frakcije I2, za koju se također bilježi zona veće koncentracije od približno 0,025 kg/m³ duž obale, dok je koncentracija bitno niža (oko 0,0075 kg/m³) u preostalom dijelu erozijskog zaljeva. Zona povećane koncentracije odgovara dijagramu kumulativne erozije/taloženja, što upozorava na povećanu deformaciju u koritu rijeke uz samu obalu, a ona u prosjeku iznosi otprilike 0,30 m. To neizbježno upozorava na povećani rizik glede stabilnosti obale, i to ne samo pri niskim razinama donje vode i malim protocima, već i pri visokim razinama donje vode te pri relativno velikim protocima.

5. Rasprava

Analiza postojećih strujnih slika na lokaciji brane pokazuje da prostorna orijentacija vektora brzina u erozijskom zaljevu nije osjetljiva niti na protok niti na način na koji se voda ispušta kroz prelivna polja (preko klapne segmentnih zapornica ili ispod segmentnih zapornica). Međutim, intenzitet toka osjetljiv je na protok i na način ispuštanja vode, s tim da aktiviranje dodatnih prelivnih polja nakon što je sedmo prelivno polje već aktivirano ne utječe znatno na intenzitet rezultirajućih vektora brzine. Što se tiče proračunavanja deformacije korita rijeke, određeno je nekoliko kritičnih točaka glede erozije/taloženja duž obale i duž glavnog toka, što upućuje na nestabilnost kako korita rijeke tako i obale na toj lokaciji. Primjer postavljanja uzdužne paralelne građevine pokazuje da se predloženim rješenjem mogu eliminirati nepovoljni utjecaji na strujnu sliku na desnoj obali, što znači da ta građevina doprinosi stabilnosti riječnog korita i obale u erozijskom zaljevu. S druge strane, s obzirom na velik obujam uzdužne paralelne građevine, čija ukupna dužina iznosi 140,0 m, očito je da su se trebale analizirati i alternativna rješenja kako bi se pronašlo financijski prihvatljivije rješenje. Druga predložena građevina je regulacijsko pero postavljeno poprečno na desnu obalu koji bi bio spojen kako s obalom tako i s otokom. U usporedbi s uzdužnom paralelnom građevinom, primarna prednost pera, čija ukupna dužina iznosi 36,0 m, manji je obujam i položaj. Općenito uzevši, ta građevina pruža pogodnosti u pogledu strujne slike, pronosa nanosa i deformacije riječnog korita koje su jednake onima koje pruža uzdužna paralelna građevina. Kako je pero povezano i s obalom i s otokom, ovim rješenjem dobivamo građevinu kojom se eliminira protok i morfološki procesi u erozijskom zaljevu. Osim toga, izvedba građevine omogućuje prirodno zapunjavanje zone oko pera, a tako se i smanjuje protok, tj. povećava se stabilnost ne samo obale već i korita na analiziranoj lokaciji. Na temelju provedenih analiza može se zaključiti da je ovakav tip građevine djelotvorniji od uzdužne paralelne građevine i to kako s tehničkog tako i s ekonomskog gledišta.

6. Zaključak

Pokazalo se da je trodimenzionalni numerički model protoka i pronosa nanosa izuzetno prikladno sredstvo za utvrđivanje razloga zbog kojih dolazi do erozije riječne obale, što dovodi do sporog ali kontinuiranog i sve bržeg povećanja erozijskog zaljeva nizvodno od brane na Tisi. Osim toga, model je pomogao u odabiru najprikladnijeg rješenja i to predviđanjem hidrauličkih djelovanja uzdužne paralelne građevine i regulacijskog pera na već postojeći erozijski zaljev. Konačno je odabrano pero kao rješenje ovog problema i to zbog prikladnih hidrauličkih utjecaja i povoljne cijene.

Zahvala

Autori iskazuju svoju zahvalnost vodoprivrednom poduzeću Vode Vojvodine na dostavljenim podacima i na podršci u objavljivanju ovog rada.

LITERATURA

- [1] Thomas, W.A., McAnally, W.H., Jr.: User's manual for the generalized computer program system open-channel flow and sedimentation-TABS-2, main text, Instruction Rep. HL-85-1, USACE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1985.
- [2] Usseglio-Polatera, J.M., Cunge, J.A.: Modelling of pollutant and suspended-sediment transport with Argos Modelling System, Proc., Int. Conf. on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbors, Univ. of Birmingham, Birmingham, U.K., 1985.
- [3] Duan, J.G., Nanda, S.K.: Two-dimensional depth-averaged model simulation of suspended sediment concentration distribution in a groyne field." *Journal of Hydrology* 327 (2006) 3-4, pp. 426-437.
- [4] Thonon, I., Jong, K., Perk, M., Middelkoop, H.: Modelling floodplain sedimentation using particle tracking, *Hydrological Processes*, 21 (2007) 11, pp. 1402-1412.
- [5] Jia, Y., Wang, S.Y.: Numerical model for channel flow and morphological change studies, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (1999) 9, pp. 924-933.
- [6] Nagata, N., Hosoda, T., Muramoto, Y.: Numerical analysis of river channel processes with bank erosion, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (2000) 4, pp. 243-252.
- [7] Kassem, A., Chaudhry, M.H.: Effect of bed armoring on bed topography of channel bends, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (2005) 12, pp. 1136-1140.
- [8] Keh-Chia, Y., Chih-Tsung, H.: Depth-averaged modelling for channel degradation and aggradation study, National Science Council of the Republic of China, Taipei City, Taiwan, 2005.
- [9] van Rijn, L.C.: Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, Delft Hydraulics Communication No. 382, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands, 1987.
- [10] Minh Duc, B., Wenka, T., Rodi, W.: Depth-average numerical modelling of flow and sediment transport in the Elbe River, Proc., 3rd Int. Conf. on Hydrosience and Engineering, Brandenburg Univ. of Technology at Cottbus, Cottbus/Berlin, Germany, 1998.
- [11] Spasojević, M., Holly, F.M., Jr.: 2-D bed evolution in natural watercourses - new simulation approach, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 116 (1990) 4, pp. 425-443.
- [12] Spasojević, M., Holly, F.M., Jr.: MOBED2 - Numerical simulation of two-dimensional mobile-bed processes, Iowa Institute of Hydraulic Research Technical Rep. No. 344, Univ. of Iowa, Iowa City, IA, 1990.
- [13] Olsen, N.R.B.: Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs." *Journal of Hydraulic Research* 37 (1999) 1, pp. 3-16.
- [14] Karim, M.F., Holly, F.M., Kennedy, J.F.: Bed armouring procedures in ALLUVIAL and application to Missouri River, IHR Rep. No. 269, Univ. of Iowa, Iowa City, IA, 1983.
- [15] Hung, M.C., Hsieh, T.Y., Wu, C.H., Yang, J.C.: Two dimensional nonequilibrium noncohesive and cohesive sediment transport model, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135 (2009) 5, pp. 369-382.
- [16] 3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D Version 3.15, Deltares systems, The Netherlands (August 30, 2018).
- [17] Orseau, S., Huybrechts, N., Tassi, P., Pham Van Bang, D., Klein, K.: Two-dimensional modelling of fine sediment transport with mixed sediment and consolidation: Application to the Gironde Estuary, France, *International Journal of Sediment Research*, in press, (2020)
- [18] Budinski, Lj., Spasojević, M.: 2D Modelling of Flow and Sediment Interaction: Sediment Mixtures, *JOURNAL OF WATERWAY, PORT, COASTAL, AND OCEAN ENGINEERING*, 140 (2014) 2, pp. 199-209.
- [19] Xuan Tua, L., Quoc Thanha, V., Reynsa, J., Pham Vane, S., Tran Anhe, D., Duc Dang, T., Roelvinka, D.: Sediment transport and morphodynamical modelling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta, *Continental Shelf Research*, 186 (2019), pp. 64-76.
- [20] Quoc Thanh, V., Reyns, J., Wackerman, C., Eidam, F.E., Roelvink, D.: Modelling suspended sediment dynamics on the subaqueous delta of the Mekong River, *Continental Shelf Research*, 147 (2017), pp. 213-230.
- [21] Bussi, G., Dadson, J.S., Prudhomme, C., Whitehead, G.P.: Modelling the future impacts of climate and land-use change on suspended sediment transport in the River Thames (UK), *Journal of Hydrology*, 542 (2016), pp.357-372.