

MATEMATIČKO MODELIRANJE STRUJANJA VODE I TRANSPORTA NANOSA U ZONI KANALA BARAČKA OD DUNAVA DO CRPNIH STANICA BEZDAN 1 I 2

Ljubomir BUDINSKI, Matija STIPIĆ
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Đula FABIAN
Građevinski fakultet Subotica, Univerzitet u Novom Sadu

REZIME

Glavni vodozahvat osnovne kanalske mreže (OKM) sistema Dunav-Tisa-Dunav (DTD) u Bačkoj čine vodozahvatne ustave i crpne stanice Bezdani 1 i 2 sa prilaznim kanalom Baračka. Jedan od osnovnih problema u vodosnabdevanju bačkog dela sistema kada se razmatra vodozahvat kod Bezdana ogleda se prvenstveno u nemogućnosti postojećeg sistema (ustave i crpne stanice) da zadovolji trenutne potrebe u vodi, i to u prvom redu u oblasti poljoprivrede i izgradnje novih sistema za navodnjavanje. Sa jedne strane, gravitaciono upuštanje u sistem preko ustave funkcioniše samo pri uslovno rečeno visokim vodostajima Dunava, tj. kada su potrebe u vodi najmanje. Sa druge strane, kako se ipak značajne potrebe u vodi javljaju pri niskim vodostajima Dunava, tada ustava kao takva nije u stanju da pokrije zahtevane potrebe, zbog čega je neophodno prepumpavanje vode primenom postojećih crpnih stanica. Međutim, imajući u vidu da je hidrosistem DTD završen pre oko pola veka i da su se klimatske, hidrološke i druge prilike znatno promenile u odnosu na period kada je HS DTD projektovan – pri čemu se prvenstveno misli na vodostaje Dunava kod Bezdana, gde su sadašnje male vode u odnosu na male vode iz sredine prošlog veka kada su vodozahvati projektovani, opale (smanjile se) preko 1,5m – postaje očigledno da ni crpna stanica Bezdani 2 nije u stanju da obezbedi potrebne količine vode (dok je crpna stanica Bezdani 1 van funkcije od momenta izgradnje). Kako bi se izvršila revitalizacija postojećeg crpnog sistema Bezdani sa aspekta obezbeđenja potrebnih količina vode za bački deo sistema DTD u malovodnim periodima Dunava, na predmetnoj lokaciji vodozahvata sprovedena je analiza postojećeg stanja sistema primenom trodimenzionalnog (3D) matematičkog modela strujanja i transporta nanosa, čime su identifikovane kritične lokacije i

shodno tome predložene su adekvatne mere za osposobljavanje sistema da zadovolji potrebe u vodi.

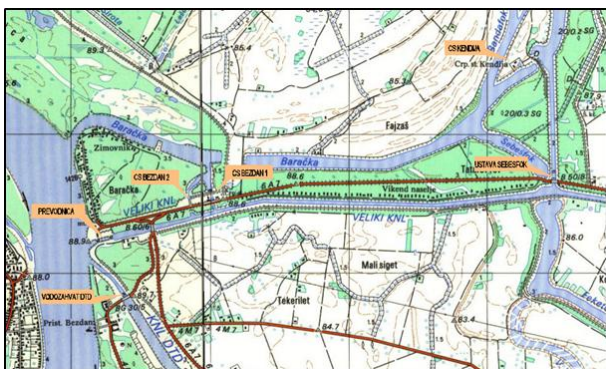
Cljučne reči: optimizacija vodozahvata, analiza strujanja i nanosa, 3D matematički model

1. UVOD

Glavni vodozahvat osnovne kanalske mreže (OKM) sistema Dunav-Tisa-Dunav (DTD) u Bačkoj lociran je na deonici Dunava kod Bezdana, približno od rkm 1424 do rkm 1427 (Slika 1). Sa svojom osnovnom namenom vodosnabdevanja OKM, ulivni deo vodozahvata čini napojni kanal dužine 390 m projektovan na maksimalni kapacitet od 60,0 m³/s i vodozahvatna ustava (Slika 1). Imajući u vidu da se vodozahvatnom ustavom bački sistem napaja isključivo gravitaciono, na oko 600 m od prevodnice na kanalu Vrbas-Bezdani 1952.g. izgrađena je crpna stanica Bezdani 1, a 1957.god. odmah pored nje i crpna stanica Bezdani 2, sa osnovnim ciljem kontinuiranog dovođenja vode u bački sistem. Spoj sa živim Dunavom nalazi se 700 m uzvodno od prevodnice Bezdani i izveden je preko Baračkog kanala koji predstavlja stari rukavac Dunava.

Obe crpne stanice se snabdevaju vodom iz Dunava preko Baračke. Dužina dovodnog kanala Baračka od Dunava do crpnih stanica je oko 1600 m. Na južnoj obali Baračke izgrađeni su objekti za odmor, a u zimskom periodu Baračka služi i kao zimovnik za brodove. Crpna stanica Bezdani 1 je služila za snabdevanje vodom kanala Vrbas-Bezdani i imala kapacitet od 6 m³/s, ali je sada van funkcije, dok je i crpna stanica Bezdani 2 kasnije izgrađena u svrhu snabdevanja vodom kanala Vrbas-Bezdani. Dvosmerna je i ima tri agregata kapaciteta od po 4 m³/s. Crpka ne može da radi ukoliko su vodostaji Dunava kod Bezdana ispod kote 80,40 mnm. Pri višim vodostajima Dunava

kanal Vrbas-Bezdan se snabdeva gravitaciono preko ustave Šebešfok na Bajskom kanalu, proticajem do $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri nižim vodostajima Dunava ustava Šebešfok se zatvara i pušta se u rad crpna stanica Bezdan 2 sa maksimalnim proticajem $3 \times 4 = 12 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 1. Lokacija vodozahvata, crpnih stanica Bezdan 1 i Bezdan 2 i kanala Baračka

Osnovni problem u vodosnabdevanju bačkog sistema kada se razmatra lokacija vodozahvata kod Bezdana je nemogućnost postojećeg sistema (ustave i crpne stanice) da zadovolji trenutne potrebe u vodi. Intenzivnim razvojem poljoprivrede, što se manifestuje u vidu značajnog povećanja obradivih površina sa potrebom za navodnjavanjem povećavaju se i potrebe za vodom koje postojeći vodozahvat Bezdan nije u stanju da zadovolji. Problem obezbeđenja vode je višestruk. Sa jedne strane, gravitaciono upuštanje u sistem funkcioniše samo pri visokim vodostajima Dunava, tj. kada su potrebe u vodi najmanje. Maksimalni kapacitet od $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ostvaruje se pri koti $82,78 \text{ mnm}$, dok se pri vodostajima ispod kote $81,25 \text{ mnm}$ protok kroz ustavu smanjuje na $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Kako se značajne potrebe u vodi javljaju pri niskim vodostajima Dunava kada ustava nije u stanju da pokrije tražene količine vode, neophodno je prepumpavanje vode u sistem primenom postojećih crpnih stanica. Imajući u vidu da je HS DTD završen pre oko pola veka i da su se klimatske, hidrološke i druge prilike znatno promenile u odnosu na period kada je HS DTD projektovan, jer su male vode kod Bezdana sada niže preko $1,5 \text{ m}$. U takvim uslovima CS Bezdan 2 nije u stanju da obezbedi potrebne količine vode.

Postoje tri osnovna problema napajanja vodom Baračke pri niskim vodostajima: 1. nedovoljna retenciona sposobnost kanala, 2. zasipanje nanosom ulaza kanala na spoju sa Dunavom, 3. nepovoljna geometrija prilaznog dela korita ka crpnoj stanici. Te pojave zajednički nepovoljno utiču na formiranje hidrauličke slike u kanalu i ugrožavaju nesmetan rad crpki i samim tim vodosnabdevanje bačkog sistema u periodu malih

voda. To znači da trenutna konfiguracija dovodnog kanala ne može da zadovoljiti ni projektovano stanje koje podrazumeva isključivo rad crpne stanice Bezdan 2 sa maksimalnim kapacitetom od $12 \text{ m}^3/\text{s}$, dok aktiviranje crpne stanice Bezdan 1 sa dodatnih $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (četiri agregata sa po $5 \text{ m}^3/\text{s}$, kako je projektom rekonstrukcije predviđeno), svakako zahteva detaljnu i temeljitu analizu strujnog režima Baračke. Dodatni potencijalni problem vezan za Baračku je stabilnost dna kanala, koje je u geološkom pogledu sačinjeno od sitnozrnih peskova, izuzetno podložnih eroziji. Iz toga proizilazi da pored hidrauličke analize potrebno je razmatrati stabilnosti dna kao i transporta nanosa, sve sa ciljem osiguranja korita kanala od potencijalne erozije.

Imajući u vidu kompleksnost razmatranog problema, analiza stanja, identifikacija kritičnih lokacija kao i predlog adekvatnih mera za povećanje efikasnosti crpnog sistema pri malim vodostajima Dunava, sprovedena je primenom prostornog matematičkog modela strujanja vode i transporta nanosa Delft3D, koji je u stanju da simulira neustaljeno tečenje vode, transport nanosa i rezultujuće morfološke promene korita za slučaj prirodne mešavine nanosa u vodotoku.

2. FORMIRANJE PROSTORNOG MODELA

2.1. Izbor scenarija za formiranje modela

Navedeni ciljevi - nesmetano doticanje vode u CS Bezdan 2, produbnjivanje Baračke u cilju obezbeđenja proticajnog kapaciteta od $35 \text{ m}^3/\text{s}$ pri minimalnom vodostaju Dunava od $79,60 \text{ mnm}$ na VS Bezdan, rešavanje zasipanja uliva u Baračku – proveravaju se formiranjem prostornog modela što podrazumeva definisanje računске mreže, graničnih i početnih uslova strujanja i transporta nanosa. Usvojen je sledeći program analize:

a) U prvom koraku analizirano je doticanje u crpnu stanicu Bezdan 2. Zbog osetljivosti ovog problema i potrebne detaljnosti strujne slike na ovoj lokaciji, za potrebe ovog segmenta modela razmatrana je oblast neposredno ispred crpne stanice Bezdan 2 i deo prilaznih kanala do ispred usisnih bazena crpki.

b) Za potrebe rekonstrukcije Baračke sa ciljem da se obezdi nesmetan rad crpne stanice Bezdan 2 pri ukupnom protoku od $3 \times 5 = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ i CS Bezdan 1 pri ukupnom protoku od $4 \times 5 = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, a pri minimalnom vodostaju Dunava od $79,60 \text{ mnm}$ na profilu vodomerne stanice Bezdan, u drugoj etapi formiran je model strujanja duž cele razmatrane oblasti, što podrazumeva ceo potez Baračkog kanala od crnih stanica do uliva u Dunav, kao i prethodno definisan segment Dunava.

Nakon uspostavljanja postojećeg stanja na modelu iz septembra 2013.god., identifikovane su problematične lokacije duž kanala sa aspekta smanjene hidrauličke efikasnosti (mesta povećanih lokalnih gubitaka energije) i predložene su adekvatne mere za njihovo otklanjanje u vidu potrebnog produbljenja i proširenja postojećeg korita. Takođe, analizirana je stabilnost 'novog' korita i shodno tome predložene su mere za sprečavanje potencijalne erozije dna kanala koja bi mogla narušiti stabilnost korita i kosina kanala.

c) U cilju eliminisanja zasipanja lokacije spoja Dunava i Baračke u poslednjoj etapi formiran je model strujanja i transporta nanosa kako bi se utvrdili specifični uzroci pojačanog zasipanja uliva u Baračku, i da bi se shodno prethodnim analizama predložile adekvatne mere za efikasno eliminisanje nepoželjnih procesa. Nakon reprodukcije zatečenog stanja i detaljne analize procesa zasipanja uliva u Baračku, u narednom koraku je razmotreno više varijanti rešenja koje imaju za cilj redukciju (po mogućnosti i eliminaciju) zasipanja uliva, od kojih je konačno usvojena ona sa najpovoljnijim pokazateljima.

2.2. Analiza raspoloživih podataka za potrebe MM

Podaci o prostornom položaju korita Baračke obezbeđeni su batimetrijskim merenjima i uključuju i deonice Dunava na potezu od 1300 m nizvodno i 1700 m uzvodno od spoja sa Baračkom (slika 2).



Slika 2. Granice modelirane oblasti tokom maja 2017. god. i položaja četiri dodatna dunavska profila

Hidrauličko-hidrološko-psamološki podaci potrebni za definisanje početnih i graničnih uslova modela strujanja vode i transporta nanosa jednim delom su obezbeđeni od strane Voda Vojvodine u formi izveštaja rada CS Bezdan 2 iz septembra 2013. god. [3], drugim delom su

preuzeti sa sajta RHMZ u vidu godišnjih izveštaja o srednjim dnevnim vrednostima nivoa i protoka na vodomernoj stanici Bezdan. Što se merenih podataka tiče o stanju nanosa i geološke strukture korita u Baračkoj, korišćen je geomehanički elaborat koji je uključivao tri istražne bušotine duž desne obale Baračke. Iz ovog elaborata utvrđen je geološki profil tla na lokaciji Baračke koji je u toj formi primenjen za definisanje stabilnosti novoproyektovanog dna.

Što se podataka tiče vezano za deonicu Dunava, formiranje hidrauličkog i nanosnog modela vršeno je na osnovu podataka u vidu transporta suspendovanog i vučenog nanosa na 6 km dugačkoj istražnoj deonici Dunava, lociranoj između rkm 1438 i rkm 1432 [4], pri čemu je u svakom profilu izabrano sedam mernih vertikalna. U svakoj vertikali vršena su merenja brzina (ADCP metodom) i transporta suspendovanog nanosa po dubini, dok je na dnu svake merne vertikale vršeno i uzorkovanje vučenog nanosa.

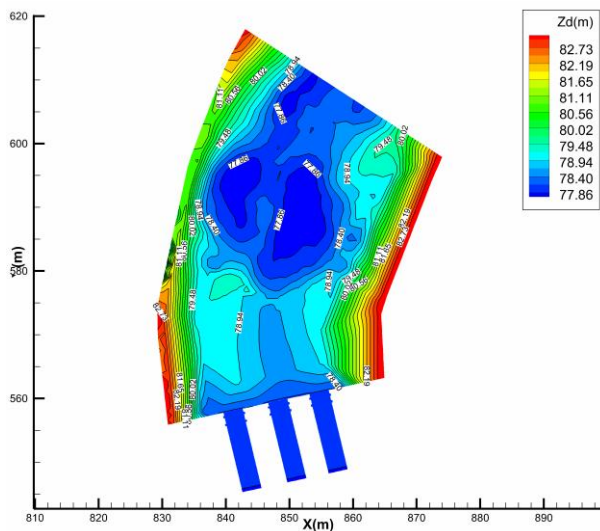
3. MODELIRANJE DOTICANJA U CS BEZDAN 2

3.1. Uspostavljanje i kalibracija modela

Kao prvi problem vezan za rekonstrukciju Baračke identifikovano je nepovoljno doticanje u CS Bezdan 2. Kako bi se utvrdio razlog ovako nepovoljnog strujanja ispred i u delu ulivnih kanala do crpnog bazena CS Bezdan 2, za ovu lokaciju formiran je prvi u nizu prostornih modela strujanja. S obzirom na prirodu samog uliva u kanale koji napajaju crpne bazene prvi korak je bio formiranje računске mreže sa rezolucijom koja u dimenzionom smislu trebao je da zadovolji svaki od navedenih elemenata. Shodno tome, za ovaj model izabrana je računска mreža sa dve različite rezolucije u ulivnim kanalima i u zoni ispred CS. Prikaz batimetrije ove lokacije dat na slici 3.

Da bi se pristupilo analizi problema doticanja primenom matematičkog modela strujanja, pre primene mogućih stanja bilo je potrebno izvršiti kalibraciju parametara kao što su Manning-ov koeficijent hrapavosti, koeficijent horizontalne turbulentne viskoznosti, kao i parametra gubitka na rešetki. Shodno tome, za potrebe kalibracije koristili su se podaci dati u [3]. Za ovo stanje - koje podrazumeva rad samo srednjeg agregata pri protoku od $3,72 \text{ m}^3/\text{s}$, a za koje je merenjem utvrđena kota nivoa vode u Baračkom Dunavu ispred crpke od 79,57 mm i kota nivoa ispred usisnog bazena crpke od 79,46 mm, dobijene su vrednosti Manning-ovog koeficijenta $n=0,035 \text{ s/m}^{1/3}$ i $n=0,019 \text{ s/m}^{1/3}$ u Baračkoj i u ulivnim kanalima, respektivno, dok je za koeficijent horizontalne turbulentne viskoznosti duž cele modelirane oblasti utvrđena vrednost od $\nu_t=0,35 \text{ m}^2/\text{s}$.

Pored toga, za nizvodni i uzvodni granični uslov usvojen je nazivni protok srednjeg agregata od $Q=3,72 \text{ m}^3/\text{s}$ i vrednost nivoa od 79,58 mm, respektivno, dok je za početni uslov izabrano stanje bez strujanja a pri nivou zadatom u uzvodnoj granici.



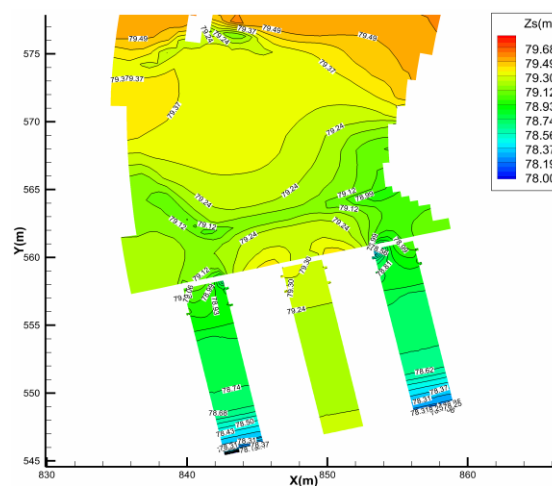
Slika 3. Prikaz batimetrije na predmetnoj lokaciji u okolini crpne stanice Bezdán 2

3.2. Rad sva tri agregata CS Bezdán 2 sa $15 \text{ m}^3/\text{s}$ – postojeće stanje korita

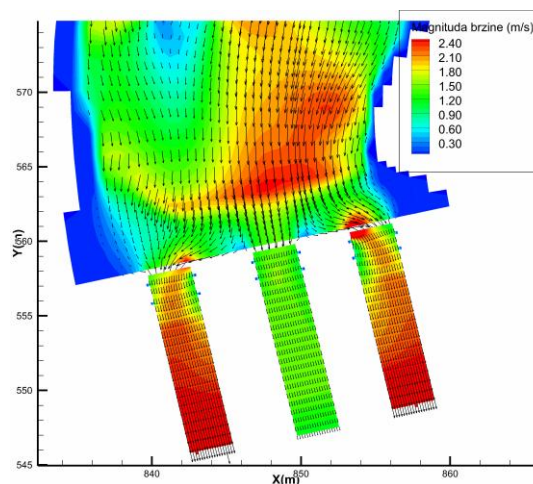
Nakon kalibracije MM pristupilo se modeliranju stanja kada CS radi punim kapacitetom od $3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Kako bi se sa hidrauličkog aspekta analiziralo što ekstremnije stanje koje je ostvarljivo i u realnim okolnostima rada CS Bezdán 2, za uzvodni granični uslov korištena je vrednost nivoa od 79,58 mm, dok je za nizvodni granični uslov zadata vrednost proticaja od $5 \text{ m}^3/\text{s}$ po agregatu. Sa ovako definisanim modelom izvršeno je modeliranje ustaljenog tečenja, a rezultati u vidu prikaza nivoa i rezultujuće strujne slike dati su na slikama 4 i 5. Rezultati su prikazani veličinama osrednjenim po dubini.

Modeliranje rada CS Bezdán 2 pokazuje da se nepovoljni efekti po strujanje višestruko pojačavaju pri maksimalnom kapacitetu crpne stanice u odnosu na slučaj kada je isključivo srednji agregat u funkciji. Kada CS radi sa maksimalnim kapacitetom nivo od uzvodne granične linije do preseka ispred crpnog bazena u krajnjim bočnim kanalima opada za oko 1,27 m, a u ulivnom kanalu srednjeg agregata za oko 0,32 m. Ovako ponašanje strujanja objašnjava se sa nemogućnošću nadomešćenja zahtevane količine vode usled značajnih hidrauličkih gubitaka razmatrane lokacije, nastalih usled izrazito nepovoljne batimetrije. Da bi se nadomestilo

traženih $15 \text{ m}^3/\text{s}$, potrebno je da se na ovoj deonici ostvari odgovarajući pad linije nivoa vodnog ogledala. Imajući u vidu geometriju Baračke na ovoj lokaciji, potrebno obaranje nivoa do tražene kote dovodi do 'izranjanja' plitkih oblasti u formi ostrva na sredini domena i u priobalnoj zoni, neposredno uz ulive u bočne ulivne kanale. Iz svega ovoga može se zaključiti da osnovni razlog za pojačane hidrauličke gubitke na ovoj lokaciji - koji se manifestuju u vidu intenzivnog obaranja nivoa vodnog ogledala što kao takvo nepovoljno utiče na rad crpki (pošto nije obezbeđena potrebna minimalna dubina u crpnom bazenu) - jeste nepovoljna strujna slika uzrokovana geometrijom samog Baračkog kanala na ulivu u CS Bezdán 2.



Slika 4. Nivoa vode u okolini CS Bezdán 2 pri proticaju $3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$ – postojeće stanje



Slika 5. Rezultujuća strujne slike u okolini CS Bezdán 2 pri proticaju $3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$ – postojeće stanje

3.3. Rad sva tri agregata CS Bezdán 2 sa $15 \text{ m}^3/\text{s}$ – projektovano stanje korita

U narednom koraku izvršena je rekonstrukcija prilaznog dela korita CS Bezdán 2 sa osnovnim ciljem eliminacije hidrauličkih gubitaka na ovoj lokaciji i uspostavljanja minimalno potrebne dubine u crpnom bazenu za nesmetan rad crpki. Predložena je rekonstrukcija prilaznog dela korita u vidu izravnavanja dna na kotu 77 mm, sniženje dna ulivnih kanala celom dužinom na kotu 77,60 mm, i spajanje ova dva segmenta u vidu prilaznog praga na rastojanju od 15 m. Novo korito projektovano je tako da prilaz ka ulivnim kanalima sva tri agregata u hidrauličkom smislu bude maksimalno rasterećen, tj. oblikovanjem prilaza postignuta je maksimalna efikasnost doticanja.

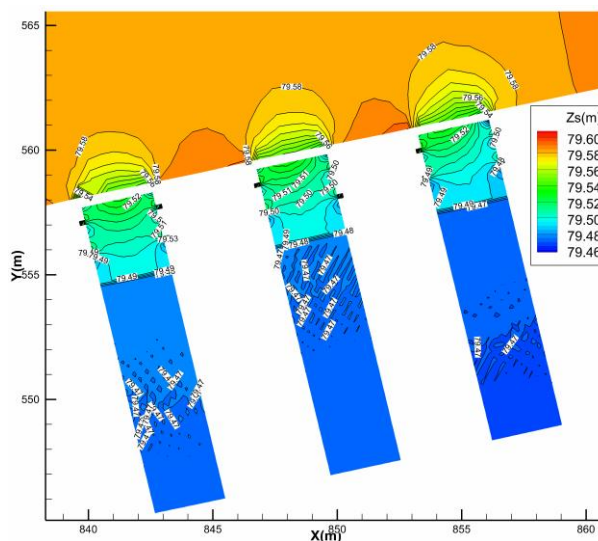
Unošenjem novoprojektovanog korita u MM strujanja, ponovljene su simulacije strujanja na ovoj lokaciji za identične granične i početne uslove kao u slučaju analize postojećeg stanja a pri maksimalnom kapacitetu CS Bezdán 2. Dobijeni rezultati u vidu nivoa dati su na slici 6. Evidentno je da se produblivanjem i oblikovanjem korita Baračke na ulazu u CS Bezdán 2 u potpunosti eliminišu negativni efekti u doticanju. Ukupna denivelacija od uzvodne granične linije pa sve do ulaska u crpni bazen tada iznosi svega 0,10 m i to za sva tri agregata posebno. Prostorni raspored nivoa duž modeliranog domena je zadovoljavajuće uravnotežen između prilaznih kanala, što rezultuje prilično uniformnom slikom nivoa vodnog ogledala za svaki od ulivnih kanala.

4. MODELIRANJE STRUJANJA U BARAČKOJ ZA PROPUŠTANJE PROTOKA OD $35 \text{ m}^3/\text{s}$

Drugi segment revitalizacije crpnog sistema Bezdán podrazumeva rekonstrukciju Baračke radi propuštnja protoka od $35 \text{ m}^3/\text{s}$ pri minimalnom vodostaju od 79,60 mm na profilu VS Bezdán. Ostvarenje ukupnog protoka od $35 \text{ m}^3/\text{s}$ predviđeno je kombinovanim pogonom CS Bezdán 2 sa maksimalnim kapacitetom od $3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$ i CS Bezdán 1 sa maksimalnim kapacitetom pri radu četiri agregata sa po $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ovako definisana raspodela protoka između crpnih stanica kao i minimalni vodostaj od 79,60 mm na profilu VS Bezdán koristiće se kao merodavno stanje za sve simulacije. Ovo najekstremniji slučaj rada crpnog sistema CS Bezdán 1 i 2.

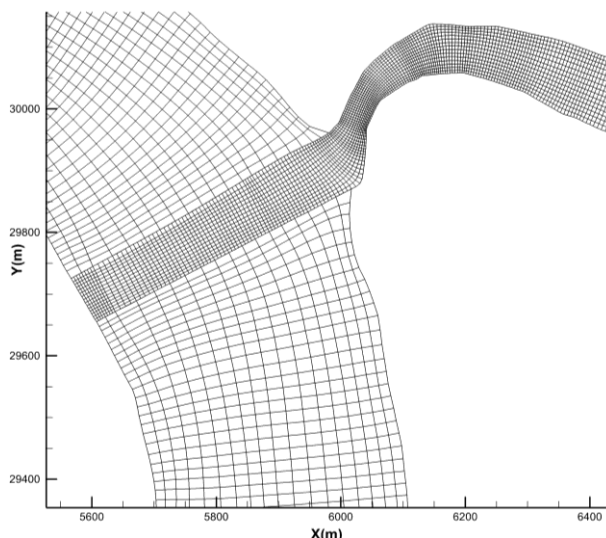
4.1. Uspostavljanje i kalibracija modela

Za potrebe rekonstrukcije Baračkog kanala formiran je novi računski model koji za razliku od prethodnog



Slika 6. Prikaz rezultujućeg nivoa u okolini crpne stanice Bezdán 2 pri $3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$ – projektovano korito

modela obuhvata celokupnu oblast naznačenu na slici 2. Da bi se eliminisao uticaj graničnih uslova Dunavske deonice na strujanje u Baračkoj - što se postiže izmeštanjem graničnih linija dovoljno daleko od modelirane lokacije - one su na Dunavu postavljene 1300,0 m nizvodno i 1700,0 m uzvodno od uliva u Baračku. Na ovaj način je osigurano da zadat protok na uzvodnom kraju i nivo na nizvodnom kraju ne utiče na strujanje koje se formira na ulivu u Baračku ili dalje duž kanala. Sa druge strane, granični uslovi u Baračkoj na lokaciji CS Bezdán 1 i Bezdán 2 postavljeni su u vidu prethodno definisane raspodele protoka. Nakon ovakve analize graničnih linija uspostaljene su granice modelirane oblasti (Slika 1) za koju je u narednom koraku formirana računaska mreža. Da bi se proračun strujanja i transporta nanosa u što većoj meri optimizovao - što imajući u vidu modeliranu oblast i trodimenzionalni model prvenstveno podrazumeva redukciju računskih ćelija sa ciljem smanjenja računskog vremena - različite oblasti modela pokrivene su mrežom različite rezolucije. Tako je na nizvodnom i uzvodnom segmentu modelirane deonice Dunava korištena rezolucija računskih ćelija od prosečno $15 \times 15 \text{ m}$, dok je duž Baračke primenjena dvostruko veća rezolucija sa dimenzijom ćelija $7 \times 7 \text{ m}$ (Slika 7). Kako bi se što bolje i tačnije reprodukovalo strujanje u zoni prilaznih kanala CS Bezdán 1 i Bezdán 2, u njihovoj okolini je korištena rezolucija od $1,5 \times 1,5 \text{ m}$. Nadalje, kao i u prethodnom slučaju, naredni korak u formiranju modela podrazumeva povezivanje izmerene batimetrije sa računskim tačkama mreže.



Slika 7. Računske mreže za potrebe modela doticanja u crpnu stanicu Bezdán 2 - detalj spoja Baračke sa Dunavom

Kao i u slučaju modela doticanja, pre primene mogućih stanja rekonstrukcije kanala Baračke izvršena je kalibracija parametara kao što su Manning-ov koeficijent hrapavosti i koeficijent horizontalne turbulentne viskoznosti, za šta su takođe korištena merenja iz 2003. god. [3]. Kalibracija, koja je podrazumevala variranje kalibracionih parametara uz poređenje dobijenih rezultata sa izmerenim nivoima na lokaciji vodomerne stanice Bezdán i ispred CS Bezdán 2, dala je vrednosti Manning-ovog koeficijenta $n=0,035 \text{ s/m}^{1/3}$ duž cele modelirane oblasti. Za koeficijent horizontalne turbulentne viskoznosti utvrđena je vrednost od $\nu_t=0,35 \text{ m}^2/\text{s}$.

4.2. Produbljanje celog poteza Baračke na kotu 77,0 m uz obezbeđenje najugroženijeg dela korita

Na osnovu prethodno sprovedene dve varijante produbljenja koje su uključivale modeliranje strujanja pri parcijalnom produbljenju Baračke duž plitkih zona na kotu 77,50 m uz nagibe kosina 1:3 i proširenje spoja Baračke sa prilaznim kracima kanala ka crpnim stanicama, utvrđeno je da je stabilnost projektovanog korita kanala i pored zadovoljenja hidrauličkih parametara, potencijalno ugrožena duž celog poteza kanala. Pod ovim se prvenstveno podrazumeva da će materijal na novoprotjektovanoj koti od 77,50 m, koji je po sastavu poprilično uniformno raspoređen pesak srednjeg prečnika zrna $d_{50}=0,2 \text{ mm}$, biti izložen intenzivnom erozionom dejstvu toka. Rezultati takođe pokazuju da je u pogledu intenziteta vučnih sila spoj

Baračke sa Dunavom najugroženiji deo kanala sa petostruko većim vrednostima stvarnih tangencijalnih napona u odnosu na kritični, dok je u preostalom delu kanala $\Delta\tau$ znatno manji i kreće se oko dvostruke vrednosti kritičnog napona. Imajući ovo u vidu, u trećoj varijanti pokušana je da se izvrši dodatna redukcija vrednosti stvarnih tangencijalnih napona duž kanala Baračke, tako da se kanal prvo dodatno produbi za 0,5 m na kotu 77,0 m duž celog poteza. Kako je ovo ujedno i minimalna kota do koje se može ići sa produbljanjem uz uslov da se ne remete postojeći vlasnički odnosi okolnih parcela i da se izbegnu obimni zemljani radovi što bi dodatno povećalo sveukupne troškove rekonstrukcije, preliminarnom analizom utvrđeno je da na najkritičnijem delu, tj. na ulaznoj krivini spoja kanala sa Dunavom, čak ni sa ovom merom se neće moći u potpunosti stabilizovati korito. Ova činjenica postaje evidentna ako se ima u vidu da su na tom mestu stvarni naponi čak petostruko veći od kritičnih, što bi zahtevalo značajne zahvate u vidu produbljenja i proširenja kanala kako bi se stvarni tangencijalni naponi sveli na prihvatljivu vrednost. Pored toga, drugi bitan element kada se razmatra ova lokacija, jeste njena pozicija u odnosu na Dunav. Kako se radi o spoju kanala sa hidraulički veoma intenzivnim tokom Dunava, pokazalo se da je u svrhu trajne stabilizacije korita na ovom delu kanala neophodno izvršiti dodatne zahvate. Imajući u vidu sve navedeno, usvojeno je da se u trećoj varijanti izvrši produbljenje celog poteza kanala na kotu 77,0 m, pri čemu se najkritičnija deonica locirana na ulaznoj krivini dodatno oblaže uz korekciju nagiba obala koji odgovaraju standardima za ovakve zahvate. Za obloženi deo kosina kanala do kote 81,50 m predviđen je nagib od 1:1,5, da bi se zatim nadalje do konačne kote terena od 85,59 m koristio blaži nagib od 1:2.

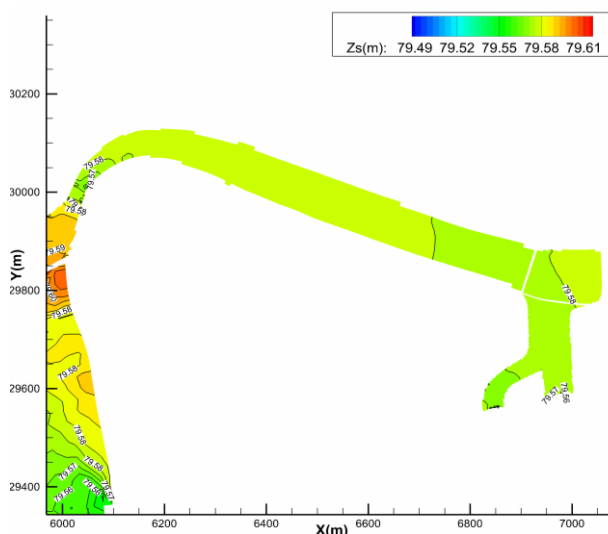
Nakon formiranja novog korita i njegove implementacije u model izvršena je simulacija ustaljenog tečenja. Rezultati u vidu nivoa vodnog ogledala, vektorskog prikaza strujnog polja i razlike stvarnih i kritičnog smičućeg napona dati su na slikama 8, 9, 10 i 11, respektivno. Prvo što se na prostornom prikazu nivoa uočava jeste denivelacija nivoa od ulaza u Baračku do crpnih stanica od svega 0,02 m, što potvrđuje efikasnost sprovedene rekonstrukcije kanala sa ciljem optimizacije u pogledu propusnosti pri ekstremnim uslovima niskih vodostaja. Na istoj slici dat je i vektorski prikaz strujnog polja sa osnovnom karakteristikom uspešno uspostavljene ravnomerne raspodele strujnica duž celog poteza kanala. Kako je prethodno već naglašeno, obaranje dna na kotu 77,0 m u potpunosti je stabilizovalo korito na potezu Baračke od izlaska iz

krivine na spoju kanala i Dunava do samih crpnih stanica, dok je sama ulazna krivina i dalje pod dejstvom veoma intenzivne struje. Posmatrano sa aspekta granulometrijske strukture materijala na ovoj lokaciji, ovde je i dalje prisutna veoma intezivna erozija korita koja u tom pogledu ugrožava stabilnost ne samo primarnog dna kanala, već i stabilnost kosina i okolnog terena (slika 11). Posmatrajući deo Baračke sa izuzetom ulaznom krivinom, primećuje se da je dodatno produbljenje korita od 0,5 m u odnosu na prethodne modele dalo željeni efekat, tj. značajno su oborene vrednosti smičućih napona na ovom delu kanala. Sada prosečna vrednost razlike između kritičnog i stvarnih napona iznosi oko $\Delta\tau = -0,08$ Pa, što ukazuje na skoro upola manju vrednost stvarnog napona u odnosu na kritičnu vrednost. Iz ovoga sledi da predložena geometrija ovog segmenta kanala u pogledu produbljenja i proširenja korita sada u potpunosti zadovoljava kako hidrauličke parametre, tako i parametre stabilnosti korita. Sa druge strane, kako je i očekivano, dodatno produbljenje nije u potrebnoj meri poboljšalo stanje na ulaznom delu kanala (Slika 11). Ovdje su i dalje prisutne dvostruke vrednosti stvarnih smičućih napona u odnosu na kritični napon, što se zbog prethodno navedenih ograničavajućih faktora na ovoj lokaciji ne može korigovati dodatnim produbljenjem i proširenjem preseka kanala. Iz ovih razloga stabilizaciju ovog dela korita moguće je postići jedino dodatnim oblaganjem korita primenom neke od standardnih mera i postupaka. Na ovaj način bi se trajno rešio problem stabilnosti korita i obala na ulaznom potezu Baračke, a oblaganjem samog spoja kanala sa Dunavom dodatno bi se doprinelo stabilnosti ove kritične lokacije.

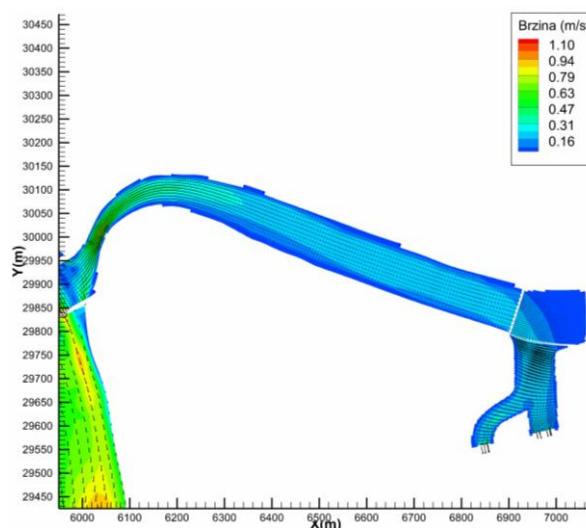
5. MODELIRANJE STRUJANJA I TRANSPORTA NANOSA U BARAČKOJ - ASPEKT TALOŽENJA

U cilju eliminisanja zasipanja spoja Dunava i Baračke u poslednjoj, trećoj etapi formiran je model strujanja i transporta nanosa. Osnovni razlog za uspostavljanje nanosnog modela u ovoj etapi jeste analiza zasipanja spoja Baračke i Dunava i iznalaženje efikasnog rešenja za eliminisanje ovog procesa. Propusnost Baračke, pogotovo pri niskim vodostajima, u velikoj meri je pod uticajem ove lokacije i njene geometrije. Ova činjenica je postala pogotovo evidentna nakon simulacija prikazanih u tački 4, gde je utvrđeno da nanosna formacija obrazovana zasipanjem ove lokacije čini oko 40% svih gubitaka energije manifestovanih u vidu snižavanja nivoa duž kanala. Napominje se da je ovaj podatak dobijen za kalibraciono stanje, tj. pri radu srednjeg agregata proticajem od $Q=3,72$ m³/s, kao i da aktiviranjem punog kapaciteta CS Bezdán 2 model nije

bio u stanju da reprodukuje strujanje u kanalu. Drugim rečima, ova nanosna formacija na ulazu u kanal je osnovni 'krivac' za najveći deo gubitaka u Baračkoj. Nepovoljna činjenica jeste da samo produbljenje kanala, predloženo u prethodnoj etapi, sama po sebi nije dovoljna mera za uspostavljanje dovoljne propusnosti kanala ukoliko se paralelno sa njom adekvatno ne reši i problem zasipanja ulaza. Iz svega navedenog očigledna je važnost adekvatnog rešavanja ovog problema za efikasno funkcionisanje Baračke, zbog čega je i posebno razmatran u nastavku.

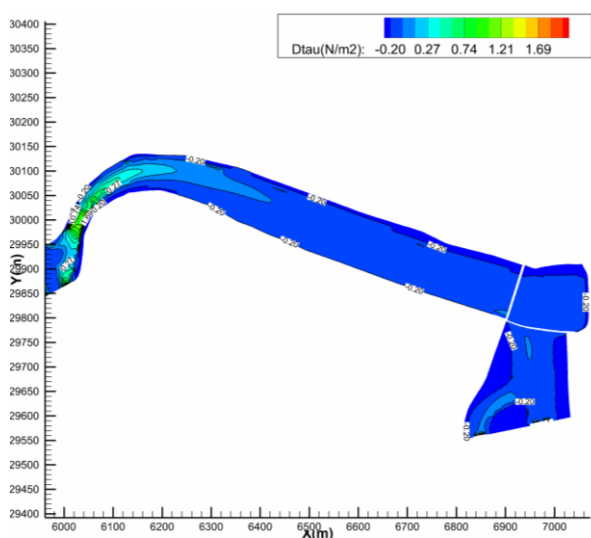


Slika 8. Nivoi vodnog ogledala duž Baračke – v.III

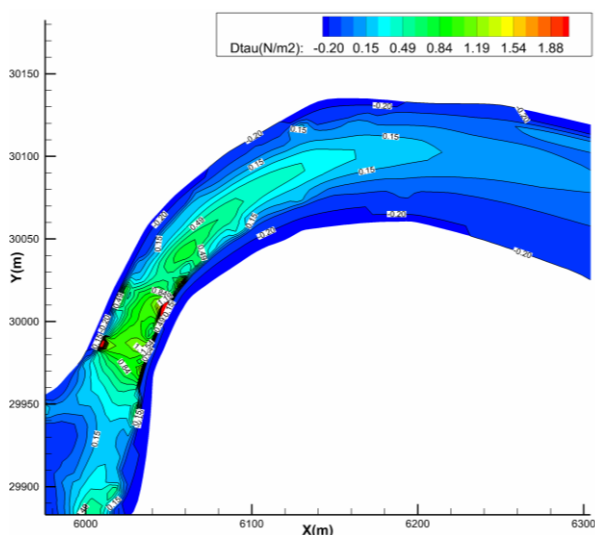


Slika 9. Rezultujuće strujne slike duž Baračke – v.III

U prvom koraku formiran je novi model strujanja i transporta nanosa, koji zbog prirode problema obuhvata novu oblast, a potom u sledećem koraku analiziran je sam proces zasipanja ulazne deonice Baračke. Nakon uspostavljanja postojećeg hidrauličkog stanja i transporta nanosa koji kao takvi daju uvid u sam proces zasipanja, u trećem koraku su predloženi, primenjeni i analizirani efekti mera za efikasno otklanjanje zasipanja uliva u Baračku.



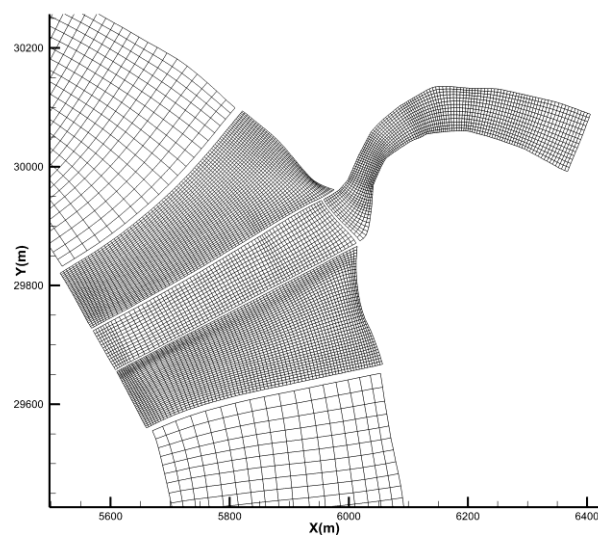
Slika 10. Razlika između kritičnog i stvarnih smičućih napona duž Baračke – varijanta III



Slika 11. Razlike između kritičnog i stvarnih smičućih napona na kritičnoj deonici uliva u Baračku – var. III

5.1. Uspostavljanje i kalibracija modela

Sa ciljem pravilne reprodukcije nanosnih procesa na lokaciji od interesa, za potrebe ovog modela formirana je nova računski mreža sastavljena od više parcijalnih segmenata različite rezolucije. Prikaz segmenata računski mreže dat je na slici 12. Ono što se uočava u poređenju sa prethodnim modelima jeste, sa jedne strane, redukcija kanala Baračke na segment dužine od oko 500,0 m mereno od uliva u kanal, kao i dodatno progušćavanje mreže u okolini zone uliva, sa druge strane. Ovo progušćavanje dela Dunava na potezu od oko 100,0 m uzvodno i nizvodno od uliva, kao i dela Baračke gde prosečna dimenzija računski ćelije iznosi 4,0 x 4,0 m, je urađeno sa ciljem što tačnije reprodukcije nanosnih procesa na ovoj lokaciji. Korekcija segmenta Baračkog kanala na dužini od oko 500,0 m mereno od uliva izvršeno je shodno dinamici nastajanja nanosne formacije i kao posledica optimizacije celokupnog matematičkog modela transporta nanosa. Naime, preliminarnom analizom ustanovljeno je (a to je kasnije modelom i potvrđeno) da nanosna formacija na ulazu u Baračku nastaje u najvećoj meri kada CS Bezdan 2 ne radi, tj. kada nema protoka u Baračkoj. Kako se u tom slučaju matematičko modeliranje strujanja i transporta nanosa kompletne Baračke pokazalo kao suvišno, pogotovo što je sada uključen u proračun i transporta nanosa koji kao takav zahteva značajne memorijske i računski resurse, odlučeno je da se Baračka redukuje na potez dužine oko 500 m.



Slika 12. Računski mreža za potrebe modela transporta nanosa - detalj spoja Baračke sa Dunavom

U pogledu graničnih i početnih uslova oba modula (strujanje i transport nanosa) zahtevaju zadavanje odgovarajućih vrednosti na granicama i duž modela. Kako je u ovom slučaju postojala potreba pored hidrauličkih parametara (protoka i nivoa) i za podacima o suspendovanom i vučenom nanosu, za potrebe uspostavljanja nanosnog modula korišćeni su podaci dati u [4]. Kao što je detaljnije objašnjeno u tački 2, ovi podaci uključuju merenja suspendovanog i vučenog nanosa na potezu Dunava između rkm 1438 i rkm 1432 [4] na sedam mernih profila ravnomerno raspoređenih duž istražne deonice, pri čemu je u svakom profilu izabrano sedam mernih vertikalna. Kao što je rečeno, matematički model Delft3D za modeliranje transporta nanosa i deformacije rečnog korita koristi pristup zasnovan na frakcijama, što daje višestruko detaljniju i tačniju sliku ponašanja nanosa nego što je to slučaj sa primenom srednjeg zrna prečnika d_{50} .

Tabela 1. Usvojeni granulometrijski intervali reprezentativnog prečnika zrna, koncentracije suspendovanog nanosa i β raspodele na dnu

POČETNI USLOV			
d (mm)	d_g (mm)	Konc. [g/l]	β [%]
8,00000	4,00000 (S_6)	0,00000	0,724
2,00000	1,00000 (S_5)	0,00000	2,599
0,50000	0,25000 (S_4)	0,00000	96,526
0,12500	0,07906 (S_3)	0,02649	0,140
0,05000	0,02236 (S_2)	0,03677	0,000
0,01000	0,00316 (S_1)	0,01516	0,000
0,00100			

Nakon odgovarajuće analize dostupnih merenja suspenodvanog i vučenog nanosa - što je uključivalo separaciju svakog od mernih uzoraka po frakcijama i procentualne zastupljenosti na dnu - a potom i njihovu obradu sa aspekta prostorne raspodele sa ciljem formiranja početnog uslova, formiran je odgovarajuć set granulometrijskih intervala za potrebe nanosnog modula. Prikaz usvojenih intervala, zatim dimenzije reprezentativnog zrna dobijenog kao geometrijska sredina granica intervala, koncentracije suspendovanog nanosa u g/L i zastupljenosti usvojenih granulometrijskih intervala na dnu (β raspodela) dat je u Tabeli 1. Iz priložene tabele vidi se da je usvojeno ukupno 6 granulometrijskih intervala (S_1 - S_6) od kojih su prva tri (S_1 - S_3) zastupljena isključivo u suspenziji (osim veoma malog udela od 0,14% frakcije S_3), dok su preostala tri

(S_4 - S_6) zastupljena isključivo na dnu. Uočava se da su koncentracije suspendovanog nanosa sva tri granulometrijska intervala, koje su za potrebe definisanja početnog uslova dobijene osrednjavanjem po vertikali i duž mernih profila merne deonice, u većoj meri međusobno ujednačena, dok u slučaju zastupljenosti odgovarajućeg zrna na dnu dobijena merenja pokazuju potpunu dominaciju intervala S_4 sa čak 96,526 % zastupljenosti. Shodno tome, za potrebe definisanja početnih uslova u formi koncentracije suspendovanog nanosa i zastupljenosti određene frakcije na dnu korišćeni su usvojeni računski intervali dati u Tabeli 1. Da bi se kompletirao modul pronosa nanosa, granični uslovi Dunavskog segmenta u vidu koncentracija $S_1=0,0177 \text{ kg/m}^3$, $S_2=0,0348 \text{ kg/m}^3$, $S_3=0,0332 \text{ kg/m}^3$ i $S_{4-6}=0,0$ su zadati kao uzvodni granični uslov, dok je ekvilibrijum koncentracija zadata kao nizvodni granični uslov. Duž granične linije Baračke korišten je uslov $S_{1-6}=0,0$. Kako bi uslovi strujanja bili konsistentni sa zadatim početnim i graničnim vrednostima transporta nanosa, za uzvodni i nizvodni granični uslov zadat je protok od $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ i nivo od 81,38 mm, respektivno, izmereni tokom mernog perioda na VS Beždan. Za ovako formiranu računsku mrežu, početne i granične uslove hidrauličkog i nanosnog modula u narednom koraku pristupilo se usvajanju određenih rešenja u vidu objekata, zatim njihove primene u modelu i analize dobijenih rezultata i usvajanje konačnog rešenja.

5.2. Matematički model strujanja i transporta nanosa za postojeće i projektovano stanje Baračke

U prvom modelu su razmatrani samo uzroci zasipanja spoja Dunava sa Baračkom. Prvo je modelirano strujanje i transport nanosa za postojeće stanje batimetrije Baračke, da bi se zatim proverilo projektovano korito i ponovile simulacije. Prvi slučaj trebao je da ukaže na mehanizam zasipanja, dok modeliranje strujanja i transporta nanosa za slučaj projektovane geometrije korita pored mehanizma trebalo da pruži uvid u dinamiku i intenzitet zasipanja.

Nakon sprovedene simulacije strujanja, transporta nanosa i defomacije rečnog korita za postojeće stanje batimetrije i period od jednog dana, dobijeni rezultati dati su na slikama 13, 14, 15, i 16, respektivno. Analiza rezultata simulacije sa aspekta strujne slike, prikazane na slici 13 pokazuje da se na spoju Dunava i Baračke javlja poprilično intenzivan vrtlog dimenzija $100 \times 50 \text{ m}$. Vrtlog koji nastaje kao posledica interakcije strujanja vode u Dunavu i mirne vode u Baračkoj, ima povratno strujanje ka Baračkom kanalu i lociran je na samom

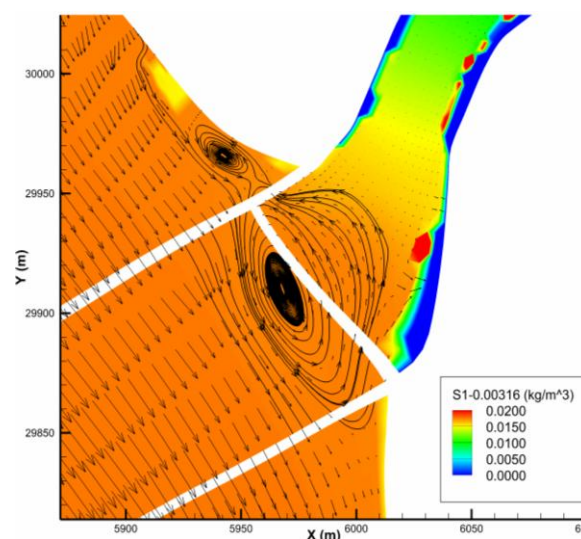
ulazu u Baračku. Na preseku spoja struje Dunava sa Baračkom dolazi do transfera količine kretanja iz Dunava na mirnu vodu u Baračkoj, što zbog zadovoljenja bilansa mase (kontinuiteta) formira vrtložno strujanje sa smerom suprotnim od kazaljke na satu. Ono što je evidentno jeste da kad god nema strujanja vode u Baračkoj, što je stanje zastupljeno najvećim delom godine, dolazi do formiranja ovog vrtloga, koji je odgovoran za ekstrakovanje i prenos materijala iz matice Dunava i njegovog deponovanja na ulaz u Baračku. Ovakva strujna slika predstavlja ekstremniji i vremenski zastupljeniji slučaj u odnosu na stanje kada crpna stanica radi, zbog čega će se ono nadalje razmatrati kao merodavno stanje. Takođe, preliminarnim analizama je konstatovano da sam kanal Baračka nije ugrožen po pitanju zasipanja, tj. sporadična merenja korita pokazuju priličnu stagnaciju dna što predstavlja indicaciju da se najveći deo nanosa istaložava na samom ulazu, dok zanemarljive količine nanosa prolaze do unutrašnjosti kanala (u slučaju Baračke čišćenja kanala vrše se isključivo na ulazu u kanal).

Rezultati prostornog prikaza granulometrijskih intervala S_{1-3} dati na slikama 13-16 jasno ukazuju na fiziku procesa zasipanja uliva. Uočava se prilično ravnomeran raspored duž deonice Dunava intervala S_1 i S_2 , sa prosečnim koncentracijama od $0,017 \text{ kg/m}^3$ i $0,024 \text{ kg/m}^3$, respektivno. Sa druge strane, interval S_3 teži više ka matici struje sa prosečnom koncentracijom od $0,016 \text{ kg/m}^3$. Definisani kalibracioni parametri strujanja, transporta nanosa i deformacije rečnog korita su usvojeni kao definitivne vrednosti i korišćene su nadalje za sve razmatrane modele.

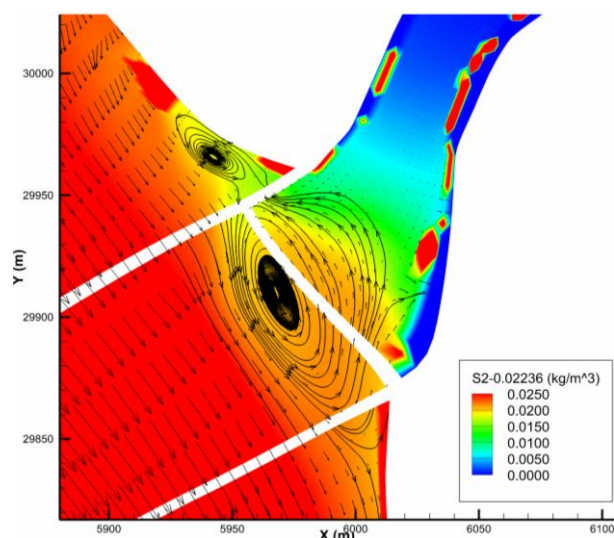
Iz priloženih dijagrama je evidentno da se samo materijal iz suspenzije prvog i drugog granulometrijskog intervala unosi u ulivni deo Baračke gde se i deponuje, dok je treći interval potpuno odsutan sa ove lokacije. Vidi se da formirani vrtlog iz Dunava u najvećoj meri prenosi materijal najsitnije granulacije S_1 (Slika 13) sa prosečnom koncentracijom na ulazu od $0,017 \text{ kg/m}^3$, dok u nešto manjoj meri unosi materijal granulacije S_2 (Slika 14). Shodno prirodi strujanja na ovoj lokaciji, materijal unet iz Dunava se ovde i taloži, što je prikazano na slici 16.

U drugom modelu simulirano je stanje sa istim graničnim i početnim uslovima, ali pri projektovanoj batimetriji, što se može posmatrati i kao postojeće stanje kanala sa sprovedenim čišćenjem uliva. Dobijeni rezultati u vidu strujne slike, prostornog rasporeda koncentracija za sva tri granulometrijska intervala (treći

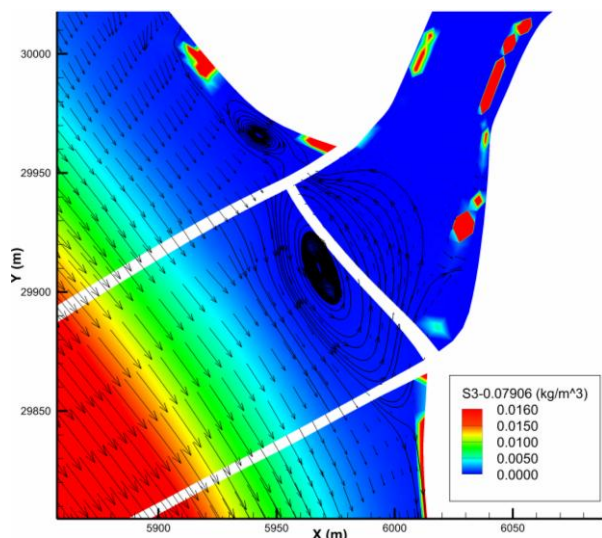
granulometrijski interval S_3 kao i u prethodnom slučaju nema uticaja na zasipanje) kao i kumulativne erozije i deponovanja na ulivu u Baračku su za slučaj novoprojektovanog korita Baračke dati na slikama 17, 18 i 19. I u ovom slučaju rađena je simulacija strujanja vode i transporta nanosa od jednog dana, pri čemu je simulaciji erozije i deponovanja prethodio period od 4 sata ustaljenja strujne slike i uravnoteženja transporta nanosa. Za razliku od prethodno obrađenog stanja sa postojećom batimetrijom, ovde se uočava znatno razvijeniji vrtlog, što je direktna posledica rekonstrukcije dna korita Baračke na ovoj lokaciji.



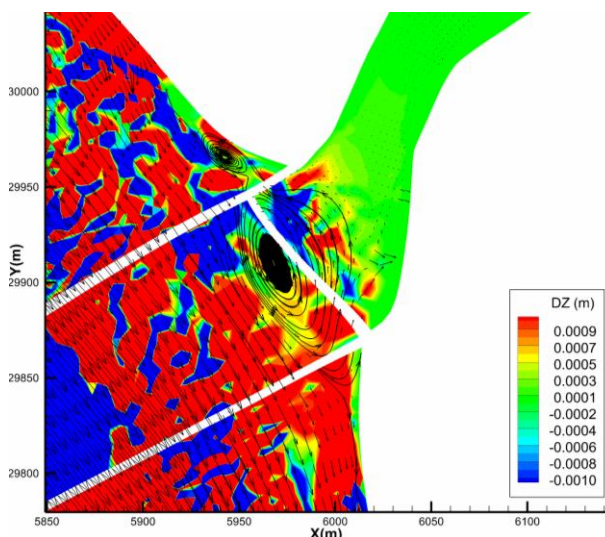
Slika 13. Raspored koncentracije granul. intervala S_1 na spoju Baračke sa Dunavom – postojeće stanje



Slika 14. Raspored koncentracije granul. intervala S_2 na spoju Baračke sa Dunavom – postojeće stanje



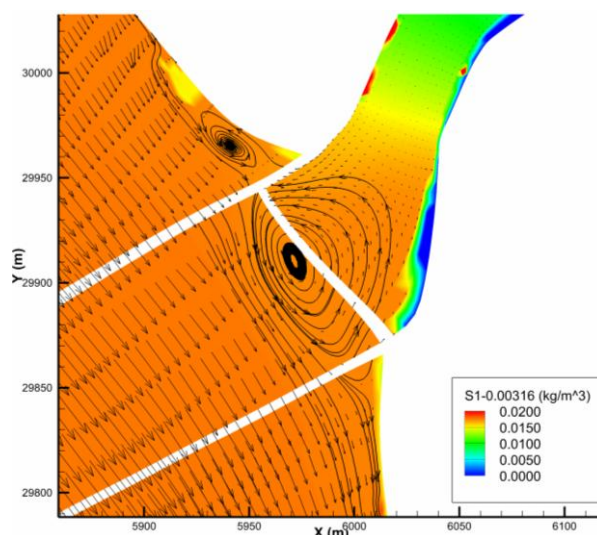
Slika 15. Raspored koncentracije granul. intervala S_3 na spoju Baračke sa Dunavom – postojeće stanje



Slika 16. Prikaz rasporeda kumulativne erozije i deponovanja na spoju Dunava i Baračke – postojeće stanje

Ovo uzrokuje znatno intenzivnije uvlačenje materijala u kanal, što se sa jedne strane manifestuje kao povećanje obima zone taloženja, a sa druge strane prodiranje oblasti zasipanja dalje ka unutrašnjosti kanala formirajući tako nanosnu formaciju sa dimenzijama i pozicijom koja je u skladu sa postojećim stanjem (Slika 19). I u ovom slučaju primjećuje se da su prva dva intervala u najvećoj mjeri zaslužna za zasipanje, dok je treći potpuno odsutan iz procesa. Posmatrajući sa aspekta intenziteta zasipanja, na ovoj lokaciji simulacija od jednog dana dala je prosečno zasipanje od oko 0,7 mm, što je posmatrano u kontekstu tendencije zasipanja

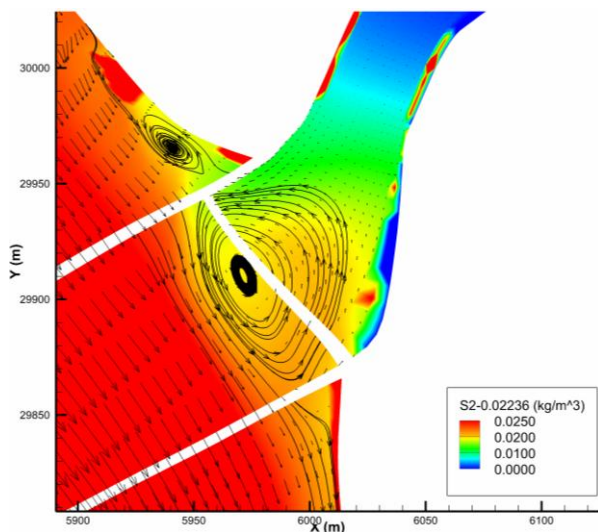
prilično intenzivno taloženje materijala. Napominje se da je osnovni razlog ovog zasipanja nagli spoj dva različita režima strujanja na ovoj lokaciji, tj. relativno brze struje Dunava i potpuno mirne vode u Baračkoj, što za posledicu ima pojavu vrtloga i povratnog strujanja koji kao takav neprekidno unosi materijal u zonu kanala. 'Neravnotežno' stanje toka, pojava ovakvog procesa taloženja sa ovakvim intenzitetom je u potpunosti očekivana i opravdana. Obzirom da je proces zasipanja uliva u Baračku sada u potpunosti definisan i to kako sa aspekta dimenzija same zone zasipanja tako i u pogledu intenziteta, pristupilo se formulisanju predloga potencijalnih rešenja, zatim njihove implementacije u model i analize dobijenih rezultata i konačno izbor optimalnog rešenja sa aspekta redukcije/eliminacije potencijalnog taloženja materijala na ovoj lokaciji. Evidentno je da će sva predložena rešenja prevashodno ići u smeru odbijanja vrtloga od uliva u Baračku, vodeći računa pri tom da se ne ugrozi nesmetan rad Baračkog kanala obrađen pod prethodnim naslovima.



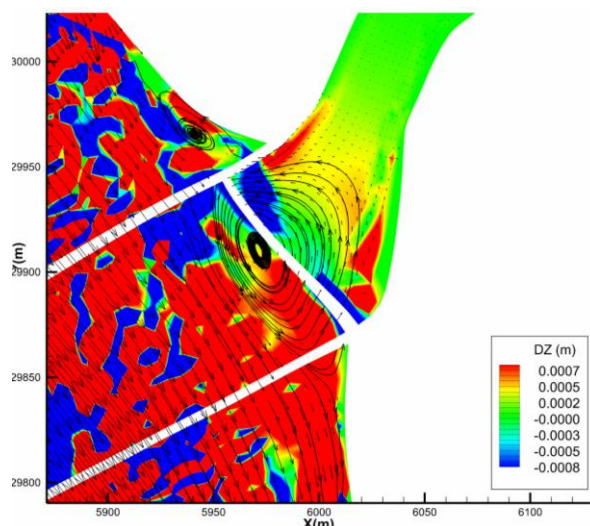
Slika 17. Raspored koncentracije granul. intervala S_1 na spoju Baračke sa Dunavom – projektovano stanje korita

5.3. Varijanta I – naper dužine 30 m postavljen upravno na desnu obalu Baračke

Analizama procesa zasipanja utvrđeno je da je glavni uzrok zasipanja pojava vrtloga na samom spoju Baračke i Dunava. Imajući u vidu uzrok nastanka, zatim dimenzije i lokaciju formiranog vrtloga, očigledno je da je njegova potpuna eliminacija iz ove zone, bez ugrožavanja nesmetanog rada Baračkog kanala, praktično nemoguća. Pod ovim se prvenstveno misli da potpuno razbijanje vrtloga zahteva postavljanje određenog tipa građevine (ili više njih) na sam ulaz u kanal, čime bi se



Slika 18. Raspored koncentracije granul. intervala S_2 na spoju Baračke sa Dunavom –projektovano stanje korita



Slika 19. Raspored kumulativne erozije i deponovanja na spoju Dunava i Baračke – projektovano stanje korita

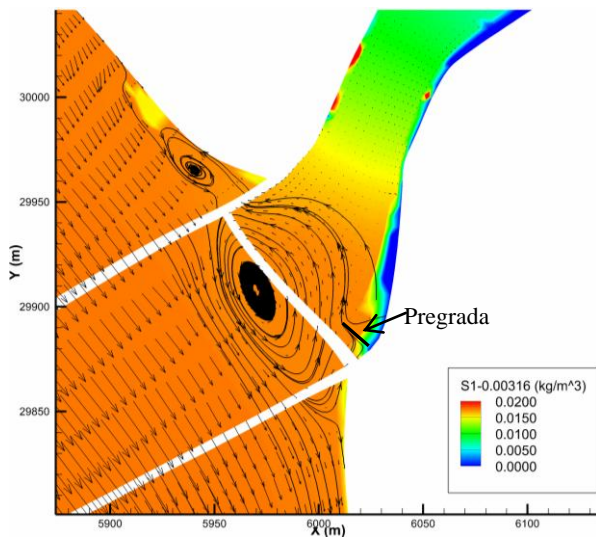
ugrozila hidraulička slika kanala definisana i analizirana prethodno uspostavljenim modelima. Za prvi objekat izabran je naper postavljen upravno na desnu obalu baračke, dužine 30 m koji značajnije ne ugrožava funkciju kanala.

Rezultati simulacije u vidu prikaza prostornog rasporeda koncentracije intervala S_1 i S_2 (interval S_3 je izostavljen usled zanemarljivog efekta na proces zasipanja), strujne slike i kumulativne erozije i deponovanja na ulazu u

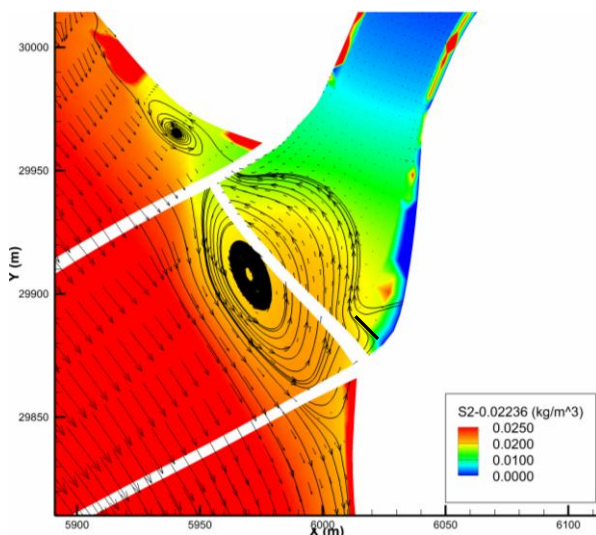
Baračku za slučaj sa bočnim naperom dati su na slikama 20, 21 i 22. Ako se posmatra rezultujuća strujna slika, prvo se uočava da je primena građevine tek delimično uticala na sam vrtlog, pomerajući ga više ka levoj obali Baračke. Osnovni uzrok ovome jesu odnosi dimenzija vrtloga i građevine sa jedne strane, kao i intenzitet strujanja u vrtlogu sa druge strane. Uslovno rečeno, 'prejaka' struja Dunava prodire kroz sada suženi presek između vrha napera i leve obale, formirajući na taj način i dalje vrtložno strujanje koncentrisano sada više ka levoj obali. Iz ovoga se vidi da je ovde reč o veoma intenzivnoj vrtložnoj struji znatnih dimenzija u oba pravca, na koju objekat predloženih dimenzija jednostavno nije u stanju da utiče značajno.

Da je struja ovim zahvatom pomerena više ka levoj obali kanala potvrđuje i prikaz kumulativne erozije i deponovanja dat na slici 22. Sada je taloženje, koje je u prethodnom slučaju bilo ravnomerno raspoređeno po ulaznom preseku kanala, koncentrisano shodno rezultujućoj struji više u levoj polovini kanala sa maksimalnim vrednostima uz samu levu obalu. Iako je ovom građevinom praktično rasterećena desna obala ulaza u kanal sa aspekta deponovanja nanosa, taloženje je i dalje u velikoj meri prisutno na lokaciji i sa intenzitetom kao i u slučaju bez pregrade. Struja i dalje unosi materijal 'duboko' u unutrašnjost kanala gde ga onda deponuje. Simulacije transporta nanosa i deformacije korita (deponovanje / erozija) zbog kompleksnosti modela i značajnih računarskih resursa ograničeni, uslovno govoreći, na kratke vremenske periode, zbog čega priložene rezultate kumulativne erozije treba posmatrati prvenstveno kao pokazatelje tendencije koji pored toga ukazuju na lokaciju i intenzitet deformacije korita, a ne kao na potpuno pouzdane prognostičke vrednosti. Sprovedena analiza ukazala je na još jedan bitan element, a to je da nije moguće izvršiti značajnu modifikaciju vrtloga primenom građevine u zoni samog kanala, a da se pritom u hidrauličkom pogledu ozbiljno ne ugrozi sam ulaz u kanal.

Dalje povećanje dimenzija regulacione građevine na lokaciji uliva u kanal u značajnoj meri može da remeti prethodno definisane parametre strujanja u kanalu u pogledu nesmetanog rada crpnih stanica i to pogotovo pri ekstremno niskim vodostajima. Nakon svega navedenog može se zaključiti da predložen zahvat u vidu bočnog napera na desnoj obali Baračke ne zadovoljava potrebne kriterijume redukcije/eliminacije taloženja nanosa na spoju Baračke sa Dunavom, i da se kao takav neće dalje razmatrati.



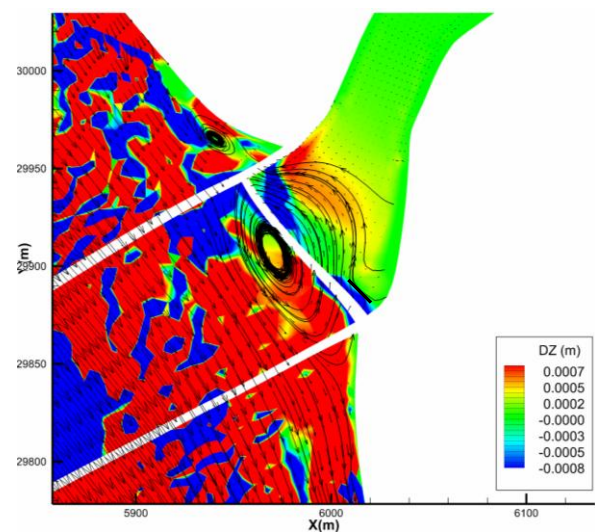
Slika 20. Koncentracija intervala C_1 na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na desnoj obali Baračke



Slika 21. Koncentracija intervala C_2 na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na desnoj obali Baračke

5.4. Varijanta II – naper dužine 70 m KK 81,90 mmm postavljen upravno na levu obalu Dunava

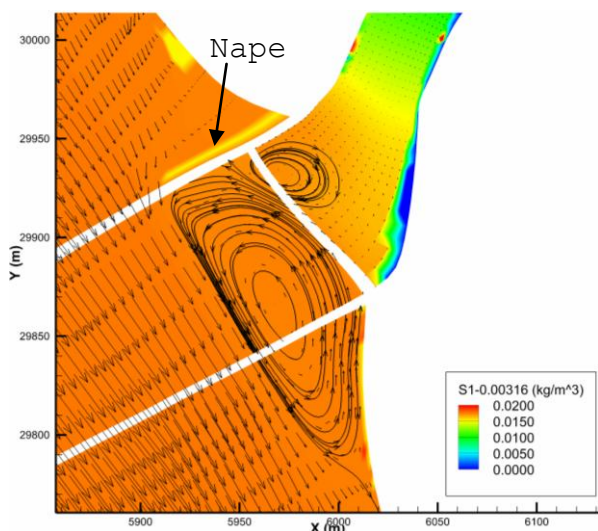
Drugi pristup rešavanja problema zasipanja je 'odbijanje' vrtloga od uliva kanala ka Dunavu. Na ovaj način paralelno sa pomeranjem vrtloga izmešta se i zona deponovanja, što konačno ima za posledicu redukciju nanosne formacije koja kao takva značajno utiče na hidrauličku sliku Baračke. Da bi se ovo postiglo, u prvom pokušaju korišćen je naper dužine 57 m sa kotom krune od $Z_k=81,90$ mmm, postavljen upravno na



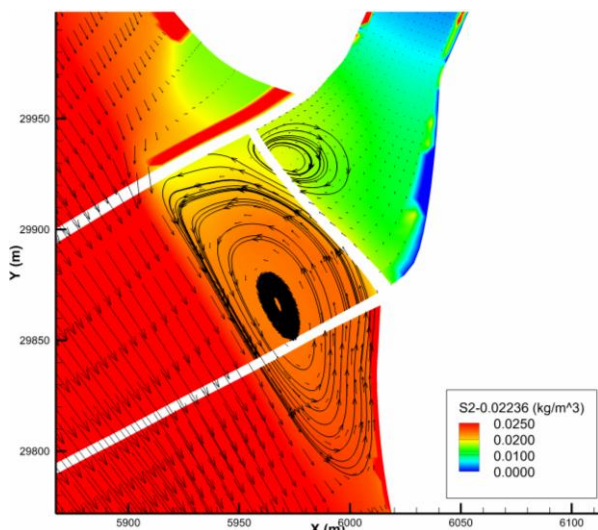
Slika 22. Kumulativna erozije i deponovanja na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na desnoj obali Baračke

levu obalu Dunava na rastojanju od oko 30 m od uliva, dok je u drugom koraku modelirano stanje za slučaj istog napera dužine 70 m, što je ujedno i maksimalna vrednost koja se shodno plovidbenim uslovima može usvojiti. Položaj napera uslovljen je batimetrijom Dunava na ovoj lokaciji i neposrednom blizinom razmatrane lokacije zasipanja. Naper - čiji su osnovni parametri nagibi uzvodne i nizvodne kosine definisani kao 1:1 i 1:2, respektivno, širina krune od 2 m postavljen je upravno na levu obalu Dunava na rastojanju od 30 m mereno uzvodno od uliva u Baračku. Pozicija napera prikazana je na slici 23.

Za ovakvu dispoziciju napera rezultati simulacije za simulacioni period od jednog dana dati na slikama 23, 24 i 25, respektivno. Ono što se uočava sa prikaza vektorskog polja jeste da ovako postavljen naper uspeva da izmesti vrtložni deo struje sa uliva u Baračku više ka matici Dunava, a samim tim i da smanji unos suspendovanog materijala na problematičnu lokaciju (Slika 25). Postavljanjem napera uzvodno od ulaza formira se u hidrauličkom smislu nova kontaktna ravan koja spaja dva režima strujanja, pa se ceo vrtložni proces, prethodno pozicioniran na ulazu u Baračku, sada ostvaruje na nizvodnoj strani napera. Na slici 25 vidi se značajno pomeranje zone zasipanja za oko 50 m ka Dunavu i značajna redukcija dimenzija oblasti zasipanja. Deponovanje materijala se ostvaruje samo na pojasu od oko 7 m mereno od ulaza u Barački kanal, čime se u velikoj meri uspelo u nameri izmeštenja zone taloženja sa kritične lokacije. Imajući u vidu prethodno obrađene slučajeve kao i činjenicu da su ovo maksimalne vrednosti gabarita napera - i to kako u

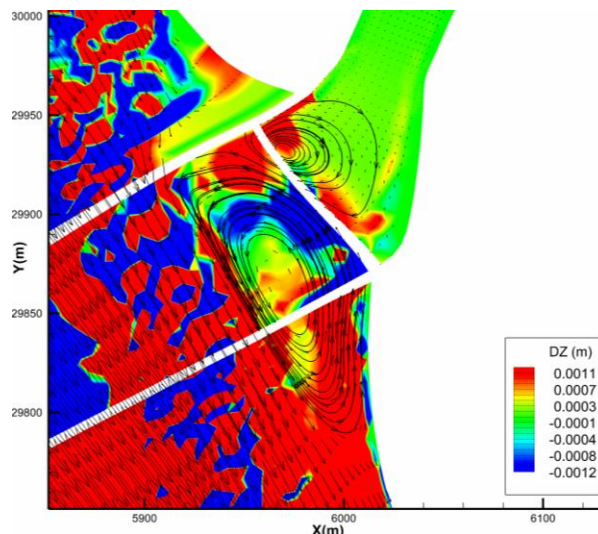


Slika 23. Koncentracija intervala C_1 na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na levoj obali Dunava



Slika 24. Koncentracije intervala C_2 na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na levoj obali Dunava

samoj dužini napera koja je ograničena batimetrijom i granicom plovnog puta na ovoj lokaciji, tako i u pogledu kote krune - može se preliminarno zaključiti da je primena napera ovih karakteristika optimalno rešenje za sprečavanje taloženja na ulivu u Baračku. Dobijeni rezultati ukazuju na to da se sada taloženje ostvaruje samo u jednom uskom pojasu od oko 7 m na samom ulivu, čime je praktično u potpunosti eliminisano taloženje u unutrašnjosti kanala (u odnosu na slučaj bez građevine). S obzirom na maksimalno dopuštene gabarite korištenog napera za ovu lokaciju Dunava dalja



Slika 25. Kumulativna erozija i deponovanje na ulivu u Baračku – stanje sa naperom na levoj obali Dunava

mogućnost za eventualno dodatnu redukciju taloženja nanosa razmatrana je u vidu dodavanja upravnih građevina na vrh postojećeg napera ('T' naper), čime bi se u određenoj meri dodatno pokušalo odvojiti matica Dunava od zone iza napera. Slika se ne prilaže, ali je analiza pokazala da krila napera postavljena paralelno sa tokom na vrhu napera ne menjaju značajno strujnu sliku, pa ne utiču značajno ni na zasipanje uliva.

6. ZAKLJUČAK

U cilju eliminisanja energetske gubitaka na ulazu u CS Bezdan 2, nastalih kao posledica nepovoljne strujne slike uzrokovane geometrijskim karakteristikama korita na ovoj lokaciji, izvršeno je produbljenje prilaznog korita. Energetski gubici na potezu ispred ulaza u CS Bezdan 2 i crnog bazena svakog od agregata ponaosob su na ovaj način svedeni su na vrednost od 0,15 m pri maksimalnom kapacitetu CS Bezdan 2 ($3 \times 5 \text{ m}^3/\text{s}$). Time je u potpunosti eliminisan negativan uticaj geometrije kanala na dostrujavanje u crpnu stanicu. Ovo osigurava potrebne dubine u crpnom bazenu pri uslovima ekstremno niskih vodostaja Dunava, što je kao takvo neophodno za nesmetan rad crpki. Za potrebe povećanja propusnosti kanala Baračke pri niskim vodostajima Dunava izvršena je regulacija celokupnog korita Baračke na kotu od 77 mm uz strogo vođenje računa o bočnim gabaritima kanala. Pored samog produbljenja izvršeno je i dodatno proširenje korita na segmentu spoja Baračke sa prilaznim kanalima CS Bezdan 1. Za ovako definisano korito hidraulička analiza pokazala je da ukupan pad linije vodnog ogledala od ulaza u kanal

pa do crpnih stanica iznosi svega 0,02 m, čime je u potpunosti optimizovan kanal sa aspekta propusnosti pri ekstremno niskim nivoima Dunava. Pored hidrauličke analize izvršena je i dodatna analiza stabilnosti projektovanog korita. Ova analiza je ukazala na to da je pri uslovima maksimalnog kapaciteta od 35 m³/s i vodostajima Dunava od 79,60 mnm, dno Baračke na potezu od ulaza u kanal pa do izlaska iz krivine izrazito nestabilno u pogledu erozije, dok je preostali deo kanala potpuno stabilizovan. U cilju stabilizacije kritičnog dela kanala potrebno je izvršiti dodatno obezbeđenje primenom standardnih postupaka stabilizacije korita vodotoka, koje podrazumeva adekvatno oblaganje korita. Na ovaj način obezbeđena je, pri ekstremnim uslovima rada crpnih stanica Bezdani 1 i 2 i vodostaju Dunava od 79,60 mnm kod VS Bezdani, potpuno optimizovana hidraulička slika kanala u pogledu propusnosti, kao i stabilnost kompletne deonice Baračke u pogledu stabilnosti korita. Kao treći segment analize razmatran je uzrok i shodno tome rešenje za redukciju zasipanja ulaza Baračke sa aspekta modifikacije vrtložnog strujanja primenom postupka matematičke simulacije strujanja, transporta nanosa i defomacije rečnog korita. Nakon seta različitih varijantnih rešenja, koje su uključivale prvenstveno regulacione objekte različite geometrije i lokacije, naper dužine 70 m i kote krune $Z_k=81,90$ mnm, postavljen upravno na levu obalu Dunava neposredno uzvodno od ulaza u Baračku pokazao se kao optimalno rešenje. Osnovni koncept primenjen za analizu varijantnih rešenja za redukciju zasipanja ulaza podrazumevao je, shodno gabaritima i poziciji vrtložnog strujanja, definisanje takvog objekta koji će što efikasnije izvršiti izmeštanje vrtloga što je

moguće dalje od kritične lokacije. Vodeći računa o batimetriji i granicama plovnog puta Dunava na ovoj lokaciji, naper prethodno navedenih karakteristika pokazao se kao optimalno rešenje. Primenom tog objekta značajno je redukovano zasipanje ulaza u Baračku, i to ne samo po intenzitetu već i dimenzijama oblasti deponovanja, pa je objekat kao takav i usvojen kao konačno rešenje.

LITERATURA

- [1] Energoprojekt inženjering a.d., „CS „Bezdan 2“-rekonstrukcija crpne stanice „Bezdan 2“- knjiga 3: glavni projekat rekonstrukcije crpne stanice „Bezdan 2“- sveska 2: građevinski deo“, Beograd, februar 2013.
- [2] Energoprojekt inženjering a.d., „Glavni projekat crpne stanice "Bezdan 1"“, Beograd, februar 2006.
- [3] Vode Vojvodine, „Izveštaj o radu crpne stanice Bezdani 2 za vreme male vode u Dunavu“, Novi Sad, septembar 2013.
- [4] Cooperation in Education: Environmental-Hydraulics Field Training Reach on the Danube River - DANUBE-EHT-2010, Eötvös József College, Baja - University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Subotica, HU-SRB/0901/221/001, 2010.
- [5] Republički Hidrometeorološki zavod Srbije, „Hidrološki godišnjak - 1. površinske vode 2011.“, Beograd, 2012.

MATHEMATICAL MODELLING OF FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE REGION OF THE BARAČKA CHANNEL FROM THE DANUBE TO THE PUMP STATIONS BEZDAN I AND II

by

Ljubomir BUDINSKI, Matija STIPIĆ
Faculty of Technical Sciences, University of Novi SadĐula FABIAN
Faculty of Civil Engineering Subotica, University of Novi Sad

Summary

The main water intake structure of the basic channel system Danube – Tisa – Danube (DTD) in the Bačka region consists of a gate regulated water intake and pump stations Bezdán 1 and 2 on the Baračka channel. One of the fundamental problems in supplying the channel system of the Bačka region with water concerning the Bezdán intake is that the existing installation (gates and pumps) is not apt to fulfill the current water demands set by agriculture in terms of extending the existing watering systems. On the one hand, gravitational water intake through the gate regulated inlet channel is feasible only at high water levels of the Danube, when water demand is minor. On the other hand, water demand is the highest at low water conditions when gravitational water intake is not enough anymore, therefore providing supplementary water by the existing pump stations is required. Since the DTD system was accomplished about half a century ago, since then climatic, hydrologic and other conditions have changed significantly. First of all,

current low water levels of the Danube at Bezdán compared to those experienced in the fifties of the last century have been reduced by more than 1.5 m, therefore it is evident that not even the recently built pump station Bezdán 2 can provide enough water, especially as pump station Bezdán 1 has not been put in function at all since its accomplishment. In order of complete revitalization of the existing pump system to make it capable for the task of supplying the DTD channel system of the Bačka region by water during the low water period of the Danube, flow regime and sediment transport analysis of the intake region has been performed by a 3D mathematical model. The critical locations have been identified and adequate measures are suggested to enable the system to meet the current and forthcoming water demands.

Key words: water intake optimization, flow and sediment analysis, 3D model

Redigovan 8.11.2018.