

JEDAN PRIMER KORIŠĆENJA SAVREMENIH NUMERIČKIH ALATA U PROJEKTOVANJU I ODRŽAVANJU REČNIH REGULACIONIH GRAĐEVINA

Miodrag B. JOVANOVIĆ
mjovanov@grf.bg.ac.rs

REZIME

U ovom prikazan je veoma instruktivan primer korišćenja 2D i 3D numeričkih modela za detaljnu analizu strujnog polja u blizini rečnih regulacionih građevina. Ovi modeli su korišćeni za potrebe projekta obnove praga i pripadajućih obaloutvrda na Velikoj Moravi, neposredno nizvodno od Markovačkog mosta. U sprezi sa odgovarajućim terenskim merenjima, rezultati numeričkih simulacija poslužili su da se: (i) sagleda uzrok oštećenja ovih građevina u periodima velikih voda; (ii) odrede najugroženija mesta; (iii) predlože optimalne mere sanacije i (iv) odrede obim i cena neophodnih radova.

Ključne reči: rečna hidraulika, višedimenzioni numerički modeli, regulacione građevine, prag na Velikoj Moravi

1. UVOD

Prag na reci Velikoj Moravi izgrađen je 2008. godine, na stacionaži km 91+097, neposredno nizvodno od mosta na putu Markovac – Svilajnac („Markovačkog mosta“, Slika 1), a oko 300 m nizvodno od vodozahvata TE „Morava“. Prag, izgrađen od kamena i betonskih blokova, ima za cilj da podigne nivo reke u periodima ekstremno malih voda i da na taj način spreči prekid rada termoelektrane. Detaljan opis ovog objekta, kao i rešavanje nekih specifičnih hidrauličkih problema njegovog projektovanja, prikazani su u jednom ranijem radu [5]. U studiji [7] sumirani su efekti praga na energetiku, vodoprivredu i zaštitu životne sredine nakon petogodišnjeg perioda eksploatacije ovog objekta.

Od izgradnje praga do danas, obavljen je čitav niz terenskih merenja rečnog korita u zoni praga, strujnog polja (ADCP uređajem), kao i osnovnih parametara kvaliteta vode. Rezultati ovih merenja prikazani su u nekoliko tehničkih izveštaja i u studiji [7].



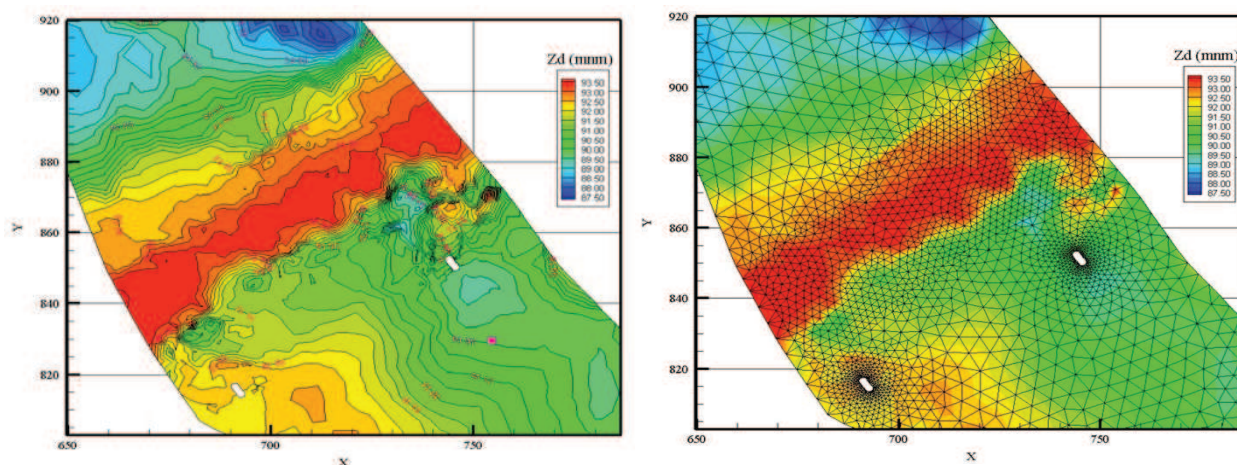
Slika 1. Prag na Velikoj Moravi kod Markovačkog mosta u periodu male vode (GoogleEarth[®])

Merenja su pokazala da je prag u više navrata bio izložen dejstvu izuzetno velikih voda i leda, što je dovelo do njegovog oštećenja i oštećenja pripadajućih obaloutvrda od kamenog nabačaja. Ovo nije iznenađujuće, jer su oštećenja pod uticajem velikih voda neminovna kod svih rečnih građevina od kamena. Snimljene su i erozione jame u koritu uzvodno i nizvodno od praga. Lokalna erozija korita je posledica velike turbulentnosti prelivnog toka, veoma složene strujne slike oko stubova mosta uzvodno od praga, poremećaja u pronosu vučenog nanosa zbog prisustva praga i tendencije reke da uspostavi novo ravnotežno stanje korita. Sanacijom praga 2015. godine, po njegovoj kruni su postavljeni gabionski madraci, međusobno povezani mrežom armature [6]. Međutim, uočeno je da su se već nakon kratkog vremena u kruni praga formirala dva proloka na mestima gde su oštećeni i delimično odneti gabionski madraci. Ima indicija da su ova oštećenja izazvana stablima koje je velika voda nosila preko praga.

Sondiranjem korita i inspekcijom praga i obaloutvrda sredinom 2016. godine, sagledan je obim oštećenja ovih građevina i potvrđeno je postojanje proloka u rečnom koritu uzvodno i nizvodno od praga. Postalo je jasno da bez ozbiljne hidrauličke analize nije moguće predložiti bilo kakve održive sanacione mere. Uobičajena primena standardnog 1D proračuna u ovom slučaju nije dovoljna, jer se radi o lokalnim deformacijama građevina i korita pod uticajem veoma složenog prostornog (3D) strujanja sa vertikalnim ubrzanjima i nehidrostatičkim rasporedom pritiska po dubini. Iz tog razloga, hidraulička analiza je obavljena na osnovu rezultata numeričkih simulacija sprovedenih pomoću poznatog softverskog alata Telemac 2D i Telemac3D [1, 8]. Najinteresantniji rezultati proračuna prikazuju se u nastavku.

2. REZULTATI PRIMENE 2D MODELA

Numerički 2D model je zasnovan na metodi konačnih elemenata [1, 2]. Rešenje jednačina u kojima su promenljive osrednjene po dubini, daje raspored po vremenu i prostoru (u horizontalnoj ravni) svih osnovnih hidrauličkih veličina (kao što su: kote nivoa, dubine, komponente brzine i tangencijalnog napona na dnu i dr.), turbulentnih karakteristika toka (vrtložna viskoznost, kinetička energija, brzina disipacije), kao i pokazatelja transportnih procesa, ako su ovi od interesa (koncentracija i pronos nanosa, širenje zagađenja itd.). U konkretnom slučaju, tečenje u reci je tretirano kao ustaljeno. Korišćen je standardni model turbulencije zasnovan na Boussinesqovoj vrtložnoj viskoznosti [1, 2, 8].

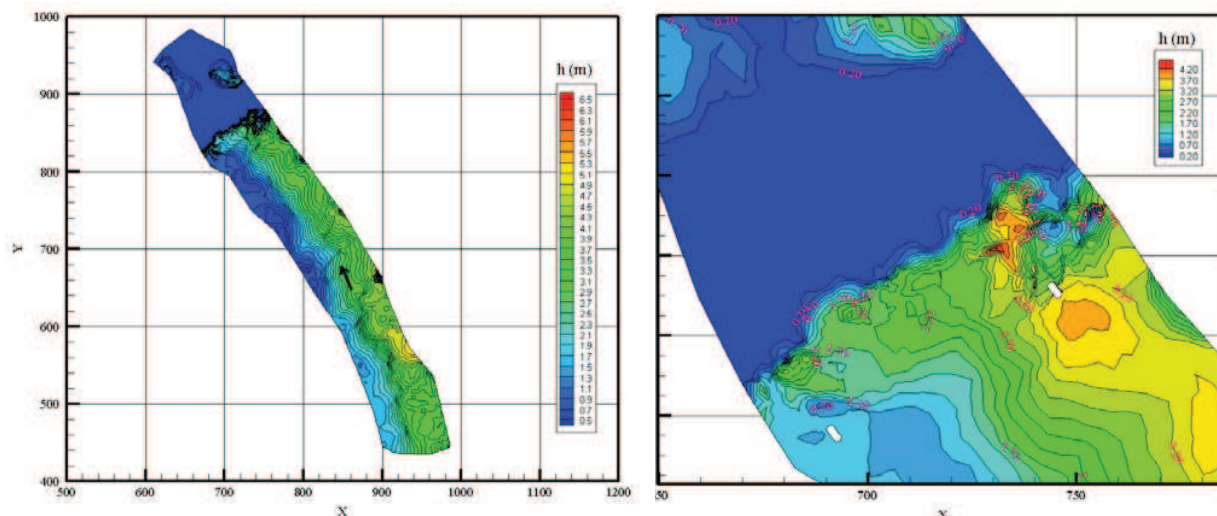


Slika 2. Levo: izobate rečnog korita u zoni praga (2015-2016); desno: računsku mrežu čija je gustina povećana u zonama od posebnog interesa (telo praga, mostovski stubovi)

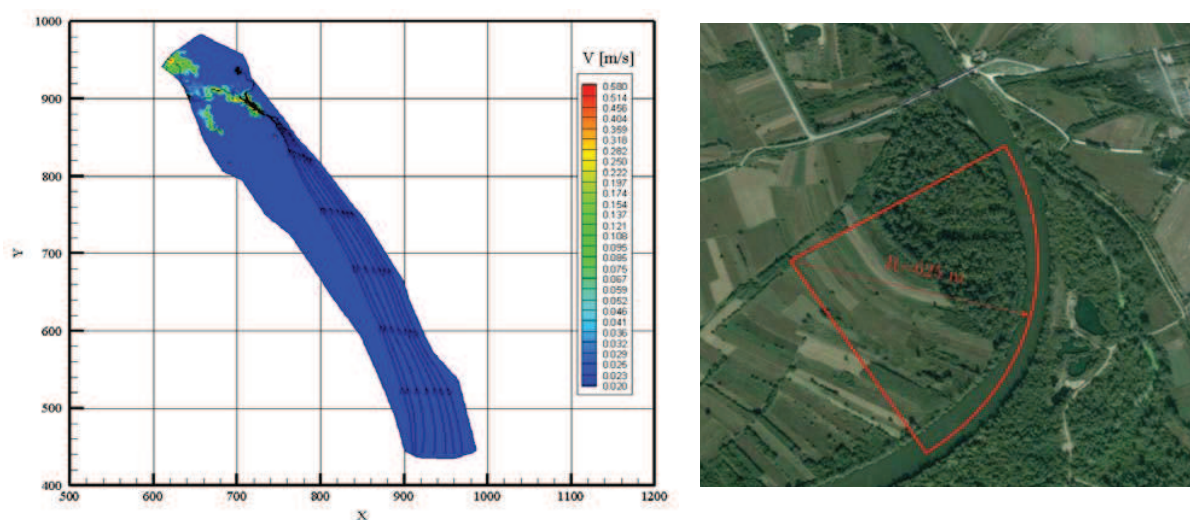
Na osnovu batimetrije korita izmerene 2015., a dopunjene 2016. godine (Slika 2), formirana je mreža konačnih elemenata na računskom domenu koji je obuhvatio neposrednu lokaciju praga, kao i rečno korito na dužini od oko 0,5 km uzvodno od praga. Računska mreža, čiji je detalj prikazan na Slici 2, sastojala se od 3992 čvora i 7619 elemenata dužine 1,7 – 4,0 m.

Kako su terenska snimanja obuhvatila samo glavno korito, proračun je (za sada) sproveden samo za dva protoka: srednje vode $Q_{sv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$ i srednje velike vode: $Q_{svv} = 700 \text{ m}^3/\text{s}$ (protok punog glavnog korita). Rapavost korita je usvojena na osnovu ranijih 1D proračuna [5].

Na Slici 3 prikazan je raspored sračunatih dubina pri protoku srednje vode: $Q_{sv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$. Može se zapaziti da se zona relativno malih dubina (manjih od 1 m) prostire celom dužinom leve obale uzvodno od praga, što je posledica poznatog fenomena istaložavanja nanosa duž konveksne obale u krivini. Na pragu su dubine takođe male (0,2 - 0,7 m). Velike dubine (iznad 3,5 m) su lokalizovane u vidu proloka neposredno uzvodno od mostovskog stuba pri desnoj obali, kao i na samom pragu (Slika 3 - desno). Objašnjenje položaja ovih proloka, odnosno ugroženih delova rečnog korita i praga, direktno proizilazi iz rasporeda strujnica koji je prikazan na Slikama 4 i 5.



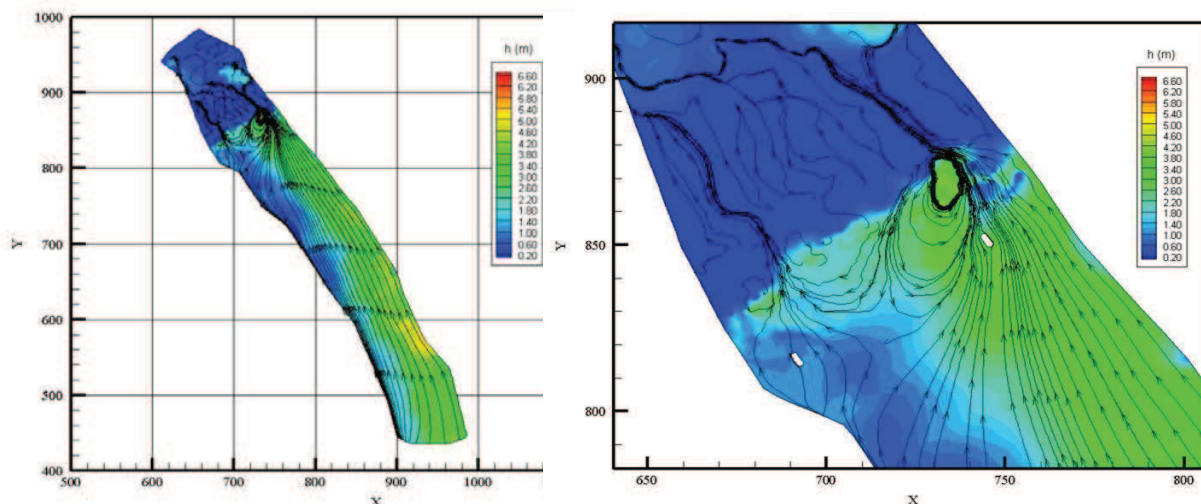
Slika 3. Raspored sračunatih dubina pri protoku $Q_{sv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$; levo: razmatrana deonica; desno: detalj u zoni praga



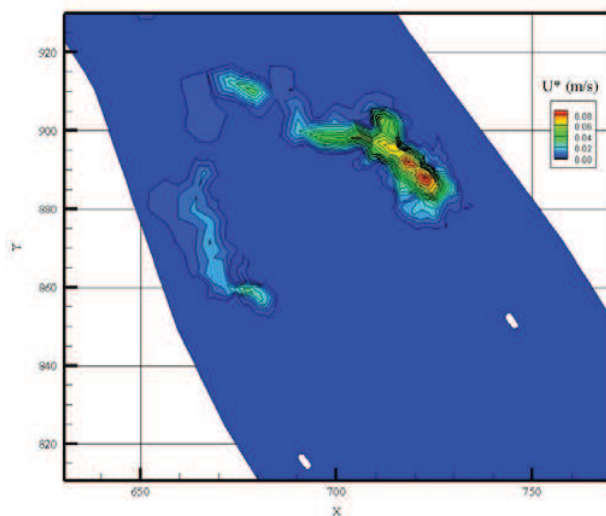
Slika 4. Protok srednje vode $Q_{sv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$; strujnice, sračunate na osnovu polja brzina osrednjenih po dubini, pokazuju uticaj oštre krivine na strujanje u zoni praga

Vrlo je indikativan raspored strujnica pri srednjoj vodi, prikazan na Slici 4. Na izlasku iz oštre krivine poluprečnika $R = 625 \text{ m}$, ceo tok se sužava i usmerava ka desnoj obali, čime mnogo doprinosi i sprud duž leve, konvenske obale. Iako su brzine relativno male, tok je koncentrisan na mali prostor između mostovskog stuba i desne obale. “Sabijanje” strujnica na tom mestu jasno ukazuje gde je glavni pravac “udara” na prag. Snimljene proloke na ovom delu nedvosmisleno potvrđuju rezultat hidrauličkog proračuna.

Nešto izmenjenu strujnu sliku daju strujnice sračunate za protok srednje velike vode, pri potpuno ispunjenom glavnom koritu (Slika 5). Dubine su sada znatno veće, uočava se potopljenost spruda duž leve obale, pa je tok uzvodno od praga ravnomernije raspoređen po širini korita. Neposredno uzvodno od praga je i dalje prisutna tendencija skretanja toka ka desnoj obali, ali se, za razliku od prethodnog slučaja, sada javljaju dva izražena pravca “prodora” preko samog praga, što je takođe uočeno na terenu.



Slika 5. Protok srednje velike vode $Q_{svv}=700 \text{ m}^3/\text{s}$; levo: raspored strujnica na razmatranoj deonici; desno: detalj u zoni praga



Slika 6. Raspored smičuće brzine na pragu

Na Slici 6 je prikazan raspored intenziteta smičuće brzine (tangencijalnog napona) pri protoku srednje velike vode ($Q_{svv} = 700 \text{ m}^3/\text{s}$). Najveće vrednosti (oko $0,1 \text{ m/s}$) pokazuju gde se nalaze najugroženija mesta na nizvodnoj kosini praga.

Kako je zbog velikih brzina i vrtloženja prelivnog toka, telo praga nepristupačno za bilo kakvo merenje dubine, rezultat prikazan na Slici 6 je od neprocenjive koristi, jer upućuje na položaj postojećih ili potencijalnih proloka na nizvodnoj kosini praga koje treba sanirati.

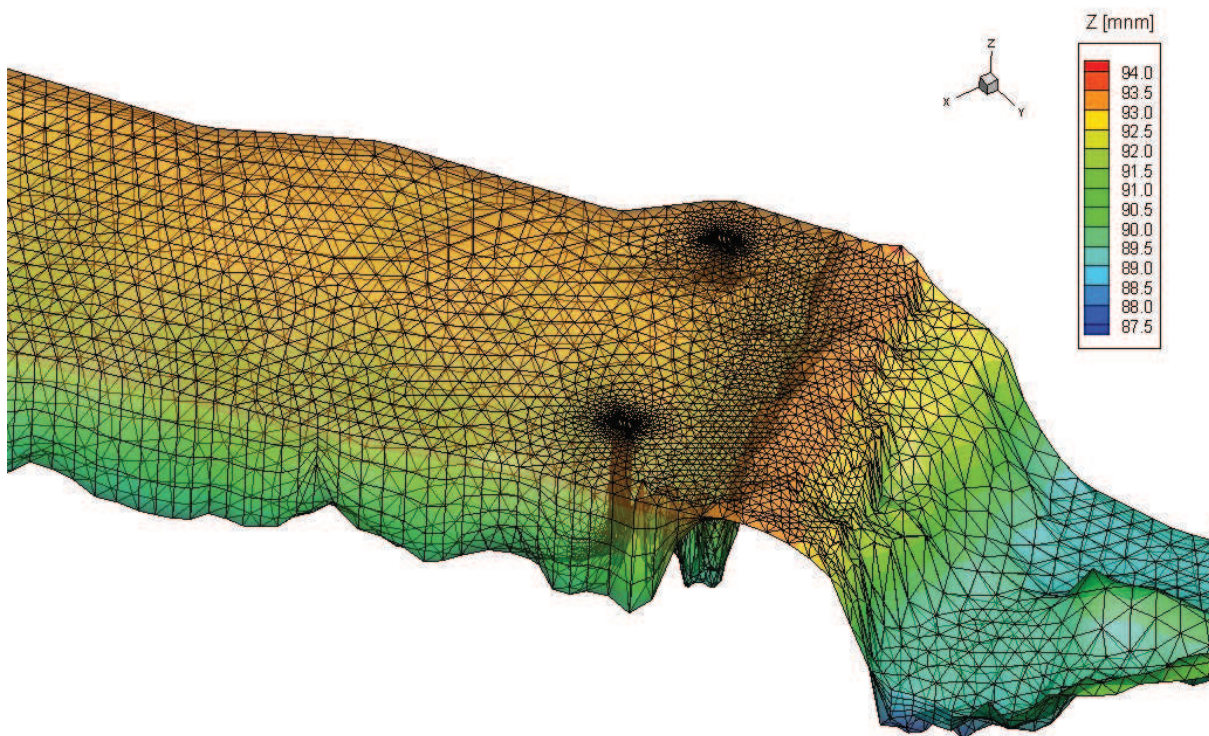
3. REZULTATI PRIMENE 3D MODELA

Proloke u koritu i oštećenja na pragu i obaloutvrđama su posledica veoma složenog vrtložnog strujanja koje se ne može u potpunosti numerički simulirati pomoću 2D modela. Zato je primenjen 3D model, sa ciljem da se dobije veoma detaljna strujna slika prelivnog mlaza, kao i opstrujavanja mostovskih stubova, koji, zbog svoje blizine, utiču na raspored protoka na prelivu.

Teorijske osnove 3D modela, koji dozvoljava nehidrostatički raspored pritiska po dubini, mogu se naći u literaturi [1, 4, 8]. Pomoću ovog modela dopunjeni su rezultati 2D modela prostornim rasporedima sve tri komponente brzine i strujnica.

Na Slici 7 prikazana je računaska mreža 3D modela, koja se sastoji od 5 računskih nivoa po dubini, sa ukupno 19960 čvorova i 38096 elemenata. Proračunom su obuhvaćeni ista dva protoka kao 2D modelom. Računski period potreban za uspostavljanje ustaljenog režima tečenja iznosio je 5,8 sati, sa računskim korakom $\Delta t = 1 \text{ s}$.

Na Slici 8 prikazano je vektorsko polje brzine oko mostovski stubova i na pragu, pri protoku srednje vode $Q_{svv}=223 \text{ m}^3/\text{s}$. Može se uočiti da vektori lokalne brzine imaju različita usmerenja po dubini toka. Na pragu to prividno izgleda kao da iz iste tačke polazi više vektora. Usmerenje vektora jasno ukazuje na smer "prodora" prelivnog toka kroz dva oštećena mesta krune praga sa nižom kotom dna. Na taj način su lokalizovane proloke na kruni praga koje treba popuniti.



Slika 7. Računske mreže 3D modela (prikaz u distordovanoj razmeri: x:y:z=1:1:5)

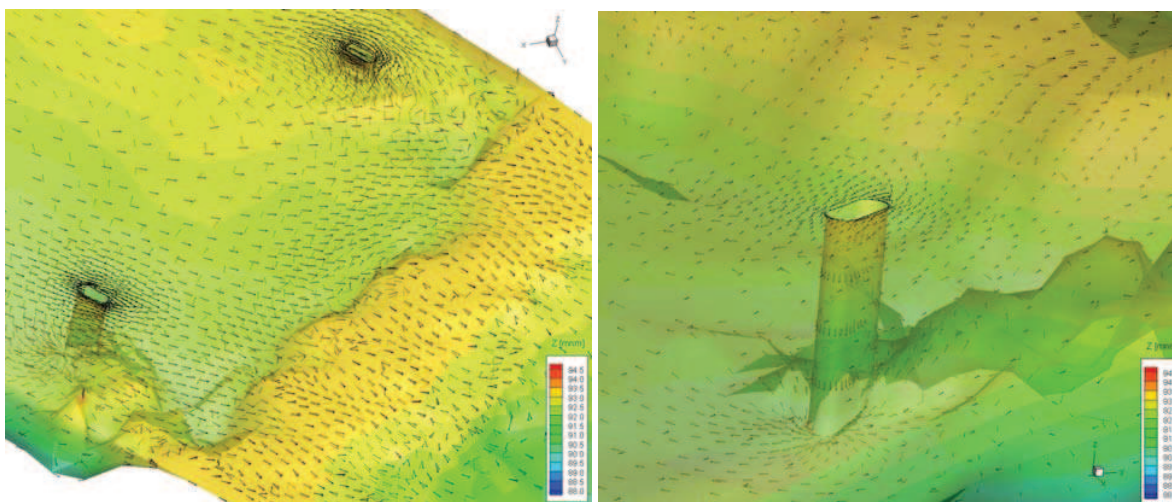
Za projektanta može biti od velike koristi i raspored brzine po dubini toka, u blizini mostovskih stubova. Duž uzvodne, “zaustavne” konture, vektori brzine su usmereni ka dnu (Slika 8-desno), a zatim se duž bočnih ravni stuba postepeno “ispravljavaju” u pravcu glavnog toka. Pri dnu rečnog korita javlja se povratno strujanje, jer prag na ovoj visini predstavlja prepeku za tečenje u pravcu glavnog toka. Opisana struktura toka u blizini građevina se još jasnije uočava na Slici 9, gde je prikazan raspored strujnica u blizini desnog mostovskog stuba. Prikazane su strujnice na površini, na sredini dubine i pri dnu.

Raspored površinskih strujnica pokazuje da se prelivni tok račva prema prolokama na kruni praga. Mostovski stub izaziva samo lokalni poremećaj, sa začetkom zaustavnog strujanja ka dnu i vrtložnog traga nizvodno od stuba. Strujnice na sredini dubine su pravilno rasporedjene do uzvodne konture stuba, kada naglo poniru ka dnu. Nizvodno od stuba, strujnice se prepliću, što je indikator intenzivnog vrtloženja, a zatim naglo skreću ka levoj obali, što je uslovljeno prisustvom prepreke – praga. Povijanje ka levoj obali pokazuju i strujnice pri samom dnu korita.

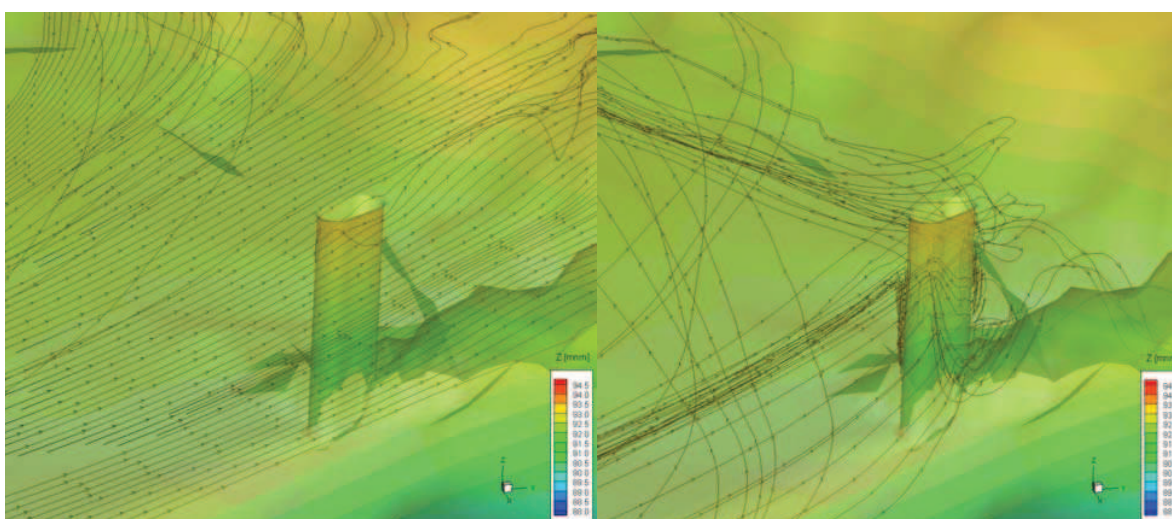
Kako je za projektovanje i održavanje objekata merodavna velika voda, sproveden je proračun za protok srednje velike vode $Q_{svv}=700 \text{ m}^3/\text{s}$. Ovde se prikazuje samo deo rezultata.

Na Slici 10 prikazano vektorsko polje brzina na pragu i neposredno uzvodno od njega, u zoni uticaja mostovskih stubova. Odmah se uočava velika nesrazmera između intenziteta brzine na pragu i uzvodno od njega. Na pragu su brzine izuzetno velike (i preko 3 m/s), što je posledica male dubine prelivnog mlaza. Još jasnije nego u slučaju srednje vode, uočavaju se dva “privilegovana” pravca na prelivu, koji se poklapaju sa mestima oštećenja krune praga, odnosno prolokama. Fotografija preliva iz juna 2016. godine daje mogućnost vizuelne potvrde dobijenih rezultata.

Na Slici 11 prikazani su sistemi strujnica na raznim dubinama toka. Može se konstatovati da je u sva tri slučaja izražena tendencija skretanja toka od desne obale (koja je produžetak konkavne obale na uzvodnoj krivni), ka levoj obali. Samo su oblast i intenzitet tog usmerenja različiti po dubini toka. Pri površini, recirkulacija je najmanjeg obima, što je očekivano, jer veći deo



Slika 8. Vektorsko polje brzine oko mostovoskih stubova i na pragu pri protoku $Q_{svv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$, (x:y:z=1:1:3)

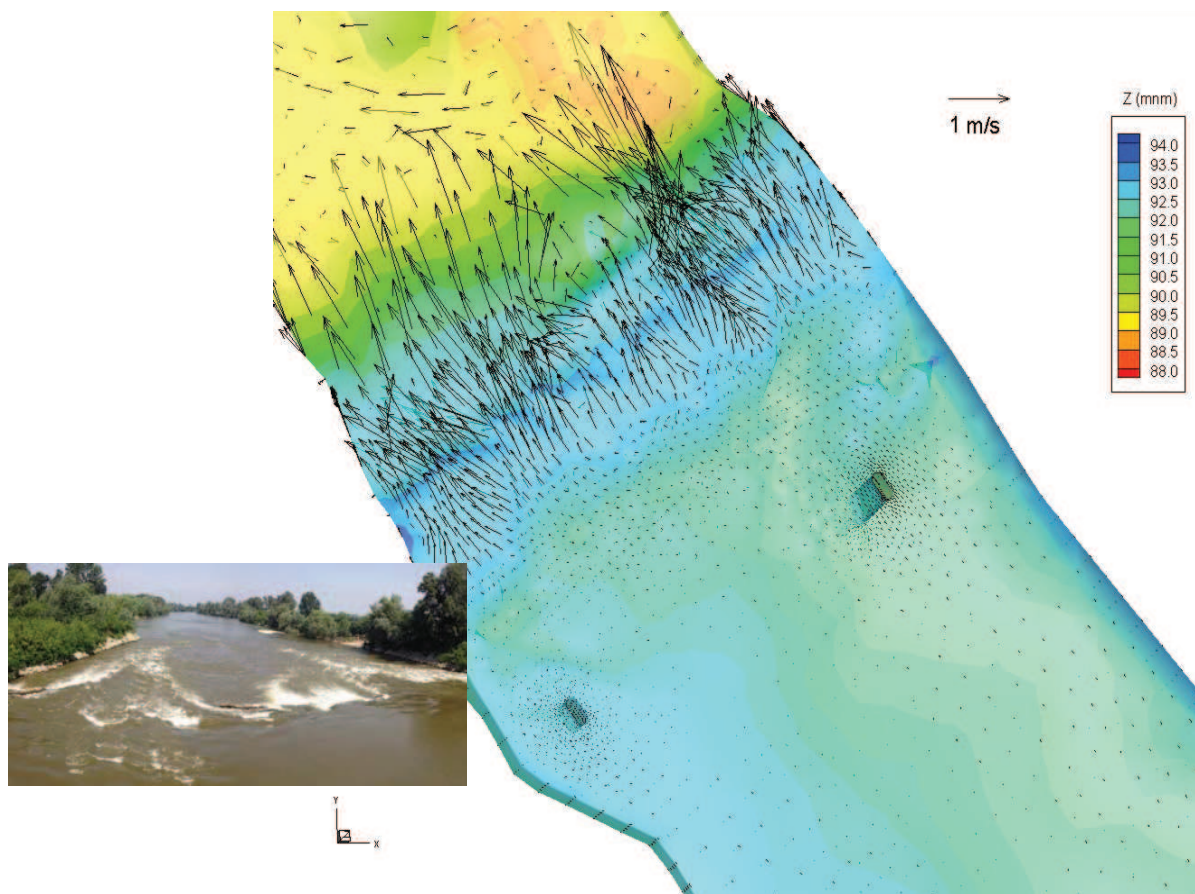


Slika 9. Strujnice u blizini desnog mostovskog stuba pri protoku $Q_{svv} = 223 \text{ m}^3/\text{s}$, (x:y:z=1:1:3); levo: strujnice na površini, oko 3,5 m od dna; desno: stujnice na sredini dubine i pri dnu

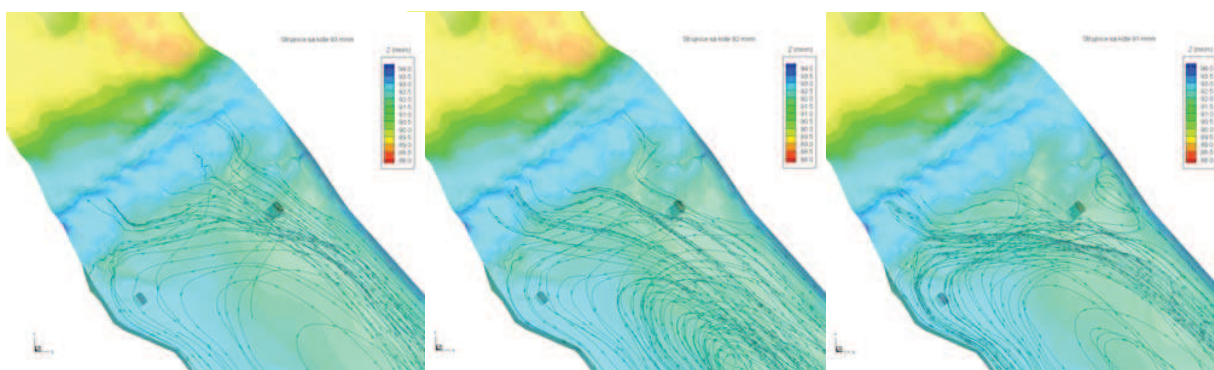
protoka otpada na prelivni tok. Pri dnu, tok je izraženo skrenut ka levoj obali, a intenzivno povratno strujanje oko levog mostovskog stuba može izazvati njegovo potkopavanje.

Vrlo važno pitanje kod korišćenja numeričkih modela je njihova kalibracija. U datom slučaju, ispostavilo se da je to veoma veliki problem, jer je, zbog velike brzine i vrtložnosti toka, pristup pragu potpuno onemogućen, pa se bilo kakva merenja ne mogu sprovesti. Kalibracija je moguća jedino na deonici uzvodno od praga, gde je i

obavljena za slučaj 1D modela. Računsko polje brzine dobijeno pomoću 2D modela je samo delimično provereno na osnovu rezultata merenja, dok rezultati 3D modela nisu proveravani, osim indirektno, vizuelnim upoređenjem, kao na Slici 10. Međutim, ovaj primer pokazuje kako i bez formalne kalibracije, rezultati 2D i 3D numeričkih modela mogu biti od velike koristi, jer pokazuju trendove fizičkih procesa i daju mogućnost sagledavanja lokalnih hidrauličkih fenomena, koji su bitni za projektovanje i održavanje građevina u rečnom koritu [9, 10].



Slika 10. Računsko polje brzine na praga i neposredno uzvodno od njega za protok srednje velike vode $Q_{svv}=700 \text{ m}^3/\text{s}$ ($x:y:z=1:1:3$) i fotografija koja vizuelno potvrđuje rezultat proračuna



Slika 11. Strujnice pri protoku srednje velike vode $Q_{svv}=700 \text{ m}^3/\text{s}$ ($x:y:z=1:1:3$), na raznim dubinama strujnog polja; s leva na desno: kote 93 mm (pri površini), 92 mm i 91 mm (pri dnu).

4. ZAKLJUČAK

Analiza složenih vrtložnih struktura, kakve se javljaju u blizini mostovskih stubova i poprečnih regulacionih građevina, nije moguća bez korišćenja savremenih, višedimenzionih numeričkih modela. Primer koji se odnosi na eksploataciju i održavanje praga na Velikoj Moravi pokazao je da se pomoću 2D i 3D modela mogu uspešno sagledati uzroci oštećenja kamenog praga i deformacije korita u njegovoj blizini. Rezultati numeričkih simulacija ukazali su na najugroženije delove ovog objekta i dali mogućnost da se izaberu optimalne mere sanacije i utvrdi cena neophodnih radova.

LITERATURA

- [1] Hervouet, J-M., Hydrodynamics of free surface flows – modelling with the finite element method, Wiley, Chichester, England, 2007.
- [2] Jovanović, M., Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova, Građevinski fakultet Beograd, 1998.
- [3] Jovanović, M., Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet Beograd, 2008.
- [4] Jovanović, M., Numerička simulacija prostornog strujanja na prelivima, Vodoprivreda 0350-0519, 45(2013) 246-266.
- [5] Jovanović, M., Rosić, N., Proračun prelivanja kamenog praga u rečnom koritu pri malim vodama, Vodoprivreda 0350-0519, 42(2010) 243-245, p. 55-60.
- [6] Predlog hitnih radova u okviru tekućeg održavanja praga na Moravi kod Markovačkog mosta, Građevinski fakultet Beograd, 2012.
- [7] Studija efekata praga kod Markovačkog mosta na rad TE “Morava”, morfologiju korita Velike Morave i režim površinskih i podzemnih voda u priobalju – period 2008-2012., Građevinski fakultet Beograd, 2012.
- [8] Telemac Modelling System – Operating Manual, EDF France, 2007.
- [9] Zindović, B., Jovanović, M., Kapor, R., Prodanović, D., Đorđević D., Oblikovanje ulaza u zaliv primenom modela ravanskog i prostornog tečenja, Vodoprivreda, 0350-0519, 39(2007) 225-227 p. 73-78.
- [10] Zindović, B., Jovanović, M., Kapor R., Prodanović, D., Đorđević, D., Numerička simulacija strujnog polja u blizini vodozahvata, Vodoprivreda 0350-0519, 42(2010) 246-248 p.157-163.

ONE EXAMPLE OF THE USE OF CONTEMPORARY NUMERICAL TOOLS IN DESIGN AND MAINTENANCE OF RIVER TRAINING STRUCTURES

by

Miodrag B. JOVANOVIĆ
mjovanov@grf.bg.ac.rs

Summary

This paper presents a very instructive example of the use of 2D and 3D numerical models for detailed analyses of flow field in the vicinity of river training structures. These numerical models were used for a project of reconstruction of a stone sill and pertaining riprap on the Velika Morava River, immediately downstream from the Makovački bridge (in Serbia).

Coupled with the field measurements, results of numerical simulations helped: (i) to find the cause of damage of the

sill during extremely high flows; (ii) to assess the most endangered locations; (iii) to design the most appropriate reconstruction measures, and (iv) to determine the range and price of the required works.

Key words: river hydraulics, multidimensional numerical models, river training works, stone sill on the Velika Morava river.

Redigovano 10.11.2016.