

RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PROPAGACIJU POPLAVNIH TALASA DUŽ SRPSKOG SEKTORA DUNAVA

Vasiljka KOLAROV, Marina BABIĆ MLADENović
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
E-mail: vasiljka.kolarov@jcerni.co.rs

REZIME

Hidrodinamički model propagacije poplavnih talasa duž srpskog sektora Dunava (od granice sa Mađarskom na km 1433 do Smedereva na km 1116) razvijen je primenom MIKE11 programskog paketa, u okviru naučnog projekta „Razvoj matematičkog modela za propagaciju poplavnih talasa duž srpskog sektora Dunava“, koji su finansirali Ministarstvo nauke i Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede – Republička direkcija za vode. Modelom se simulira neustaljeno tečenje velikih voda. Korito za veliku vodu je modelirano kao više paralelnih tokova (rečno korito i tokovi po inundacijama). Za pripremu modela je korišćeno preko 300 poprečnih profila rečnog korita na rastojanju od oko 1 km (snimljeni 2004. godine), dok su poprečni profili inundacija definisani na osnovu topografskih karata razmere 1:25000. Model je kalibrisan na osnovu podataka o nivoima vode i protocima zabeleženim tokom 2006. godine, a verifikovan na osnovu podataka iz 2005. godine. U ovom radu je dat detaljan opis postavke modela, rezultati kalibracije i verifikacije, neki rezultati simulacije ekstremnih hidroloških situacija, kao i preporuke za dalje korišćenje modela.

Ključne reči: Dunav, matematički model, MIKE11, poplavni talas.

1. UVOD

Prvu deceniju XXI veka obeležile su česte pojave velikih voda u slivu Dunava. Ekstremne vode su zabeležene 2002, 2005. i 2006. godine. U proleće 2006. godine u Srbiji je zabeležena istovremena pojava velikih voda na Dunavu i njegovim najvećim pritokama – Tisi i Savi. Nizvodno od ušća ovih reka su prevaziđeni 100-godišnji vodostaji Dunava. Ovi događaji su skrenuli pažnju javnosti i vodoprivrednih stručnjaka na problem

poplava i potrebu da se vekovima primenjivan princip „*borbe se poplavama*“ zameni principom „*živeti sa poplavama*“. Prvi korak u implementaciji novog koncepta upravljanja poplavama je razvoj hidrodinamičkog modela koji se može koristiti za proračun linije nivoa vode tokom prolaska talasa velikih voda.

MIKE11 (DHI, Danska) je jednodimenzionalni hidrodinamički model neustaljenog tečenja u otvorenim vodotocima, zasnovan na rešavanju jednačina St. Venant-a. Ovaj programski paket je izabran za razvoj modela Dunava zbog brzine proračuna mogućnosti simuliranja kompleksnih rečnih sistema i efikasne kalibracije.

Hidrodinamički model Dunava u Srbiji (km 1433 – km 1116) je razvijen za potrebe simulacije velikih voda na Dunavu, kako onih koje su zabeležene, tako i hipotetičkih ekstremnih hidroloških situacija. Rezultati modela su nivoi vode na svakom profilu reke i mogu se koristiti za operativne potrebe službe odbrane od poplava ili planiranje rekonstrukcije postojećih zaštitnih objekata, za planiranje mera zaštite, odnosno analizu efekata primene pojedinačnih mera i strategija za zaštitu od poplava, pri različitim hidrološkim uslovima na Dunavu i pritokama. Ukoliko bi se povezao sa digitalnim modelom terena, model bi mogao biti korišćen za kartiranje plavnih zona u priobalju Dunava.

2. POSTAVKA MODELA

Hidrodinamičkim modelom simulira se neustaljeno tečenje u rečnom sistemu Dunava kroz Srbiju, od granice sa Mađarskom (km 1433) do Smedereva (km 1116). Složeni rečni sistem čini osnovno korito, veći rukavci, kao i tokovi na većim inundacijama i u zonama rečnih meandara (slika 1). Rukavci su sa osnovnim tokom povezani direktno, a inundacije preko posebnih veza (Link Channel).

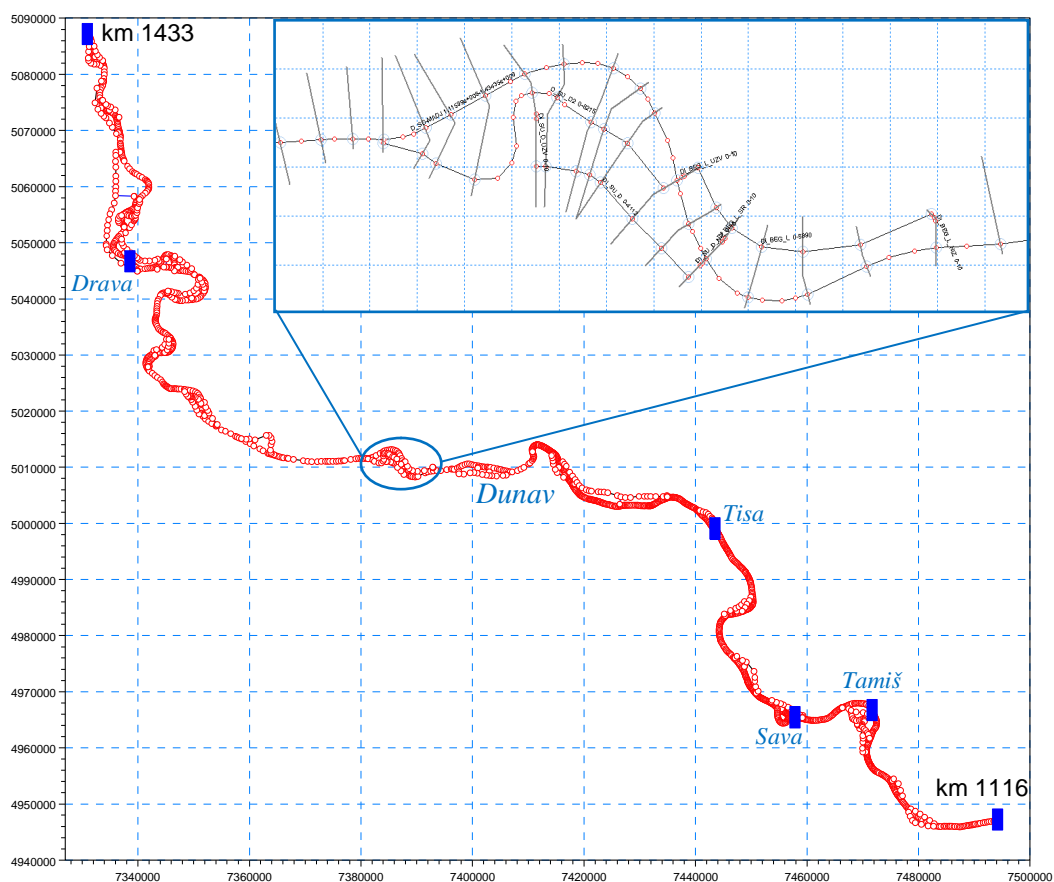
Uzvodni granični uslov predstavljaju srednji dnevni protoci Dunava kod Bezdana, dok su kao nizvodni granični uslov korišćene srednje dnevne vrednosti nivoa vode na hidrološkoj stanici Smederevo. U model su takođe uključeni ulazni protoci na profilima ušća najznačajnijih pritoka – Drave, Tise, Save i Tamiša. Tisa i Sava su najveće pritoke Dunava i imaju znatan uticaj na uslove tečenja i formiranje poplavnih talasa Dunava. Stoga je prilikom proračuna propagacije poplavnih talasa na Dunavu, neophodno uzeti u obzir vreme pojave vrha talasa ovih reka na njihovim ušćima, kao i efekte inundacije. Zato su istovremeno izrađeni i hidrodinamički modeli Tise i Save, a protoci koji su računski dobijeni na njihovim ušćima su ulazni podatak za model Dunava.

Morfološko stanje osnovnog korita Dunava opisano je sa oko 300 poprečnih profila. Profili su snimljeni 2004. godine, na razmaku od oko 1 km (snimanja Plovput-a). Poprečni profili inundacija su definisani na osnovu topografskih karata razmere 1:25000.

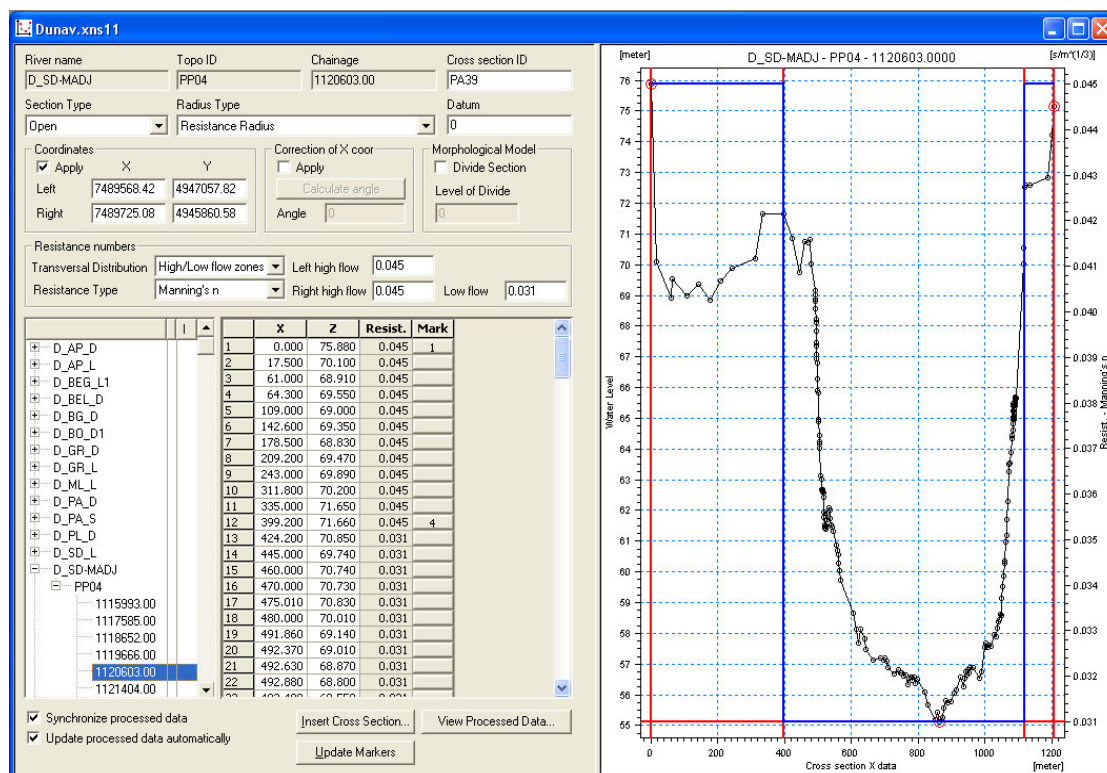
Krajnje tačke i najniža tačka svih poprečnih profila su obeležene markerima. Krajnje tačke su dodatno definisane koordinatama u državnom koordinatnom sistemu čime je određena orijentacija poprečnih profila. Kod poprečnih profila složenog korita, minor korito i inundacije su razdvojeni markerima (leva i desna obala), tako da im se mogu dodeliti različite vrednosti Manningovog koeficijenta rapavosti (slika 2).

Početni uslovi za simulaciju pretpostavljaju se na svim profilima interpolacijom rezultata merenja nivoa vode na hidrološkim stanicama.

Da bi se simulacija ubrzala, tj. da bi se smanjio vremenski korak, izabrani su parametri u računskoj šemi (implicitna Abbott-Ionescu šema) kojima se povećava stabilnost modela. Naime, koeficijent DELTA je povećan sa 0,5 na 0,7 za uslove mirnog tečenja, čime se u numeričkoj šemi veća težina daje rezultatu iz prethodnog vremenskog koraka. Time je omogućeno da se proračun vrši sa korakom od 30 minuta, tako da simulacija perioda od jedne godine traje oko 90 sekundi.



Slika 1. Rečni sistem sa graničnim uslovima



Slika 2. Poprečni profil složenog rečnog korita

3. KALIBRACIJA MODELA

Model je kalibrisan na osnovu hidroloških podataka iz proleća 2006. godine, kada su na Dunavu zabeleženi ekstremni hidrološki uslovi. Naime, u proleće 2006. došlo je do istovremene pojave velikih voda na Dunavu, Tisi i Savi, što je uslovalo kritičnu situaciju nizvodno od ušća ovih reka, tako da su prevaziđeni 100-godišnji vodostaji Dunava.

U procesu kalibracije varirane su vrednosti Maningovog koeficijenta rapavosti korita i inundacija, širina aktivne inundacije, kao i parametri kojima se definišu veze minor korita i inundacija (kota preliivanja, širina preliivanja). Ovi parametri bitno utiču na stabilnost modela, te je njihovo variranje, osim kalibracije, imalo za cilj i povećanje stabilnosti modela.

Usvojene vrednosti Maningovog koeficijenta rapavosti za korito se, u zavisnosti od deonice, kreću u intervalu od 0,026 do 0,033 s/m^{1/3}.

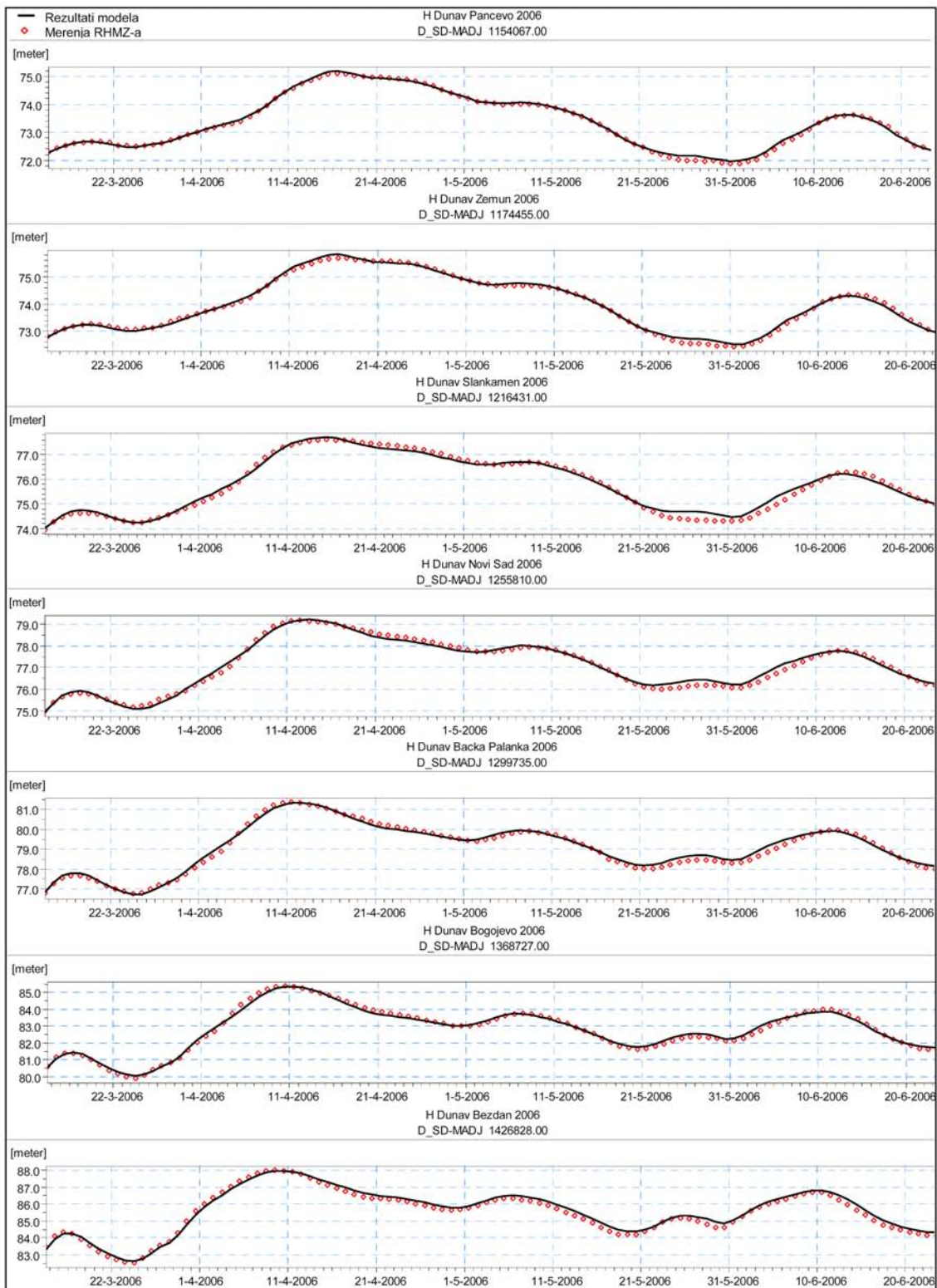
Kao rezultat dobijeni su nivogrami na profilima hidroloških stanica duž Dunava koji dobro prate osmotrene vrednosti, kako u pogledu trajanja tako i po

visini nivoa vode tokom poplavnog talasa. Razlika između osmotrenih i računskih nivoa vode u vrhu poplavnog talasa se razlikuje od stanice do stanice (tabela 1), ali je sasvim zadovoljavajuća sa aspekta postavljenih ciljeva. Između Bezdana i Novog Sada, sam vrh poplavnog talasa je neznatno pomeren u odnosu na zabeleženo vreme pojave.

Tabela 1. Greška modela u fazi kalibracije

Merna stanica	Vrh poplavnog talasa	
	ΔT (dan)	ΔH (m)
Pančevo	0	0,09
Zemun	0	0,12
Slankamen	0	0,09
Novi Sad	+1	0,02
Bačka Palanka	+1	-0,01
Bogojevo	+1	-0,03
Bezdani	+1	-0,01

Na slici 3 upoređeni su računski nivoi vode sa nivoima koje je Republički hidrometeorološki zavod Srbije zabeležio na Dunavu tokom poplavnog talasa 2006. godine, u periodu trajanja redovne i vanredne odbrane od poplava (14.03-26.06.2006.).



Slika 3. Rezultati kalibracije modela

4. VERIFIKACIJA MODELA

Model je verifikovan na osnovu protoka i vodostaja zabeleženih 2005. godine. Nivoi velikih voda na Dunavu su bili znatno niži nego 2006. tako da su kote redovne odbrane tek neznatno prevaziđene. Međutim, kako je ovo bio jedini značajniji talas na Dunavu u novijem periodu, morfološki i hidrološki uslovi iz 2005. su bili najprihvatljiviji za postupak verifikacije.

U fazi verifikacije dobijeni su zadovoljavajući rezultati. Računski nivoi vode su nešto niži od zabeleženih na celom toku Dunava kroz Srbiju. S obzirom na kompleksnost modela i činjenicu da je on namenjen za simulaciju poplavnih talasa koji znatno prevazilaze talas iz 2005. godine, računaska greška (tabela 2) se može smatrati prihvatljivom.

Na slici 4 upoređeni su računski nivoi vode sa vrednostima osmotrenim tokom talasa velikih voda u proleće 2005. godine na sedam mernih stanica na ovom sektoru Dunava.

Tabela 2. Greška modela u fazi verifikacije

Merna stanica	Vrh poplavnog talasa	
	ΔT (dan)	ΔH (m)
Pančevo	-1	-0,08
Zemun	-1	-0,06
Slankamen	-1	-0,11
Novi Sad	-1	-0,12
Bačka Palanka	-1	-0,02
Bogojevo	-1	-0,16
Bezdan	+1	-0,02

5. DISKUSIJA REZULTATA KALIBRACIJE I VERIFIKACIJE MODELA

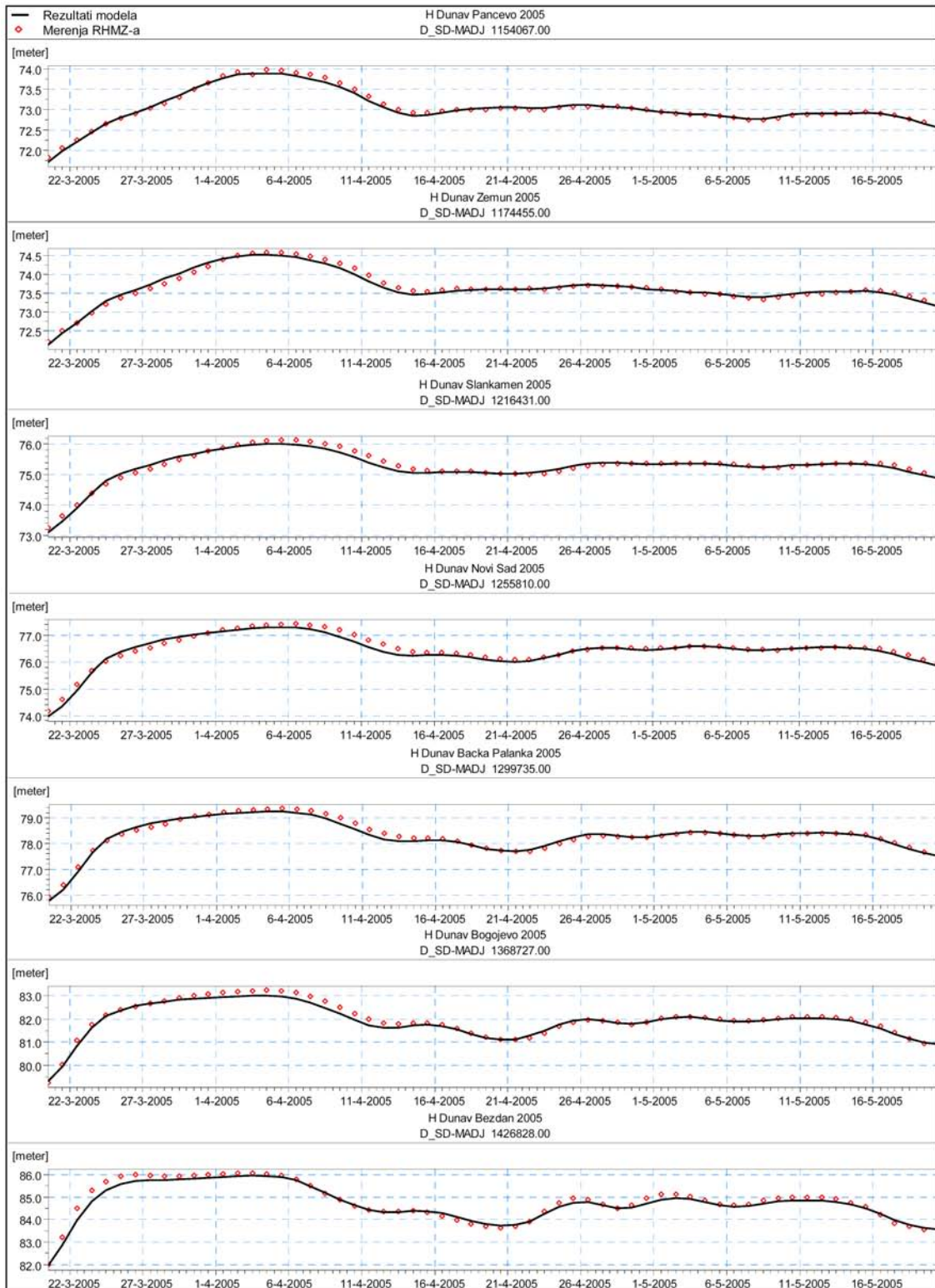
Razvijeni hidrodinamički model daje dobre rezultate prilikom računanja nivoa velikih voda. U procesu kalibracije model je bio osetljiviji na promene koeficijenta rapavosti korita, nego na variranje koeficijenta rapavosti inundacija. To potvrđuje činjenicu da inundacije Dunava imaju relativno malo učešće u protoku velikih voda. Međutim, eventualne greške u predstavljanju inundacija i izboru koeficijenta otpora na inundacijama mogu imati veliki uticaj na tačnost

proračuna nivoa vode u uslovima srednje velikih voda (nivo vode i oblik hidrograma). Na sektoru Dunava uzvodno od Novog Sada, veliki uticaj na oblik nivograma i druge rezultate modela imaju široke inundacije, a posebno Kopački rit.

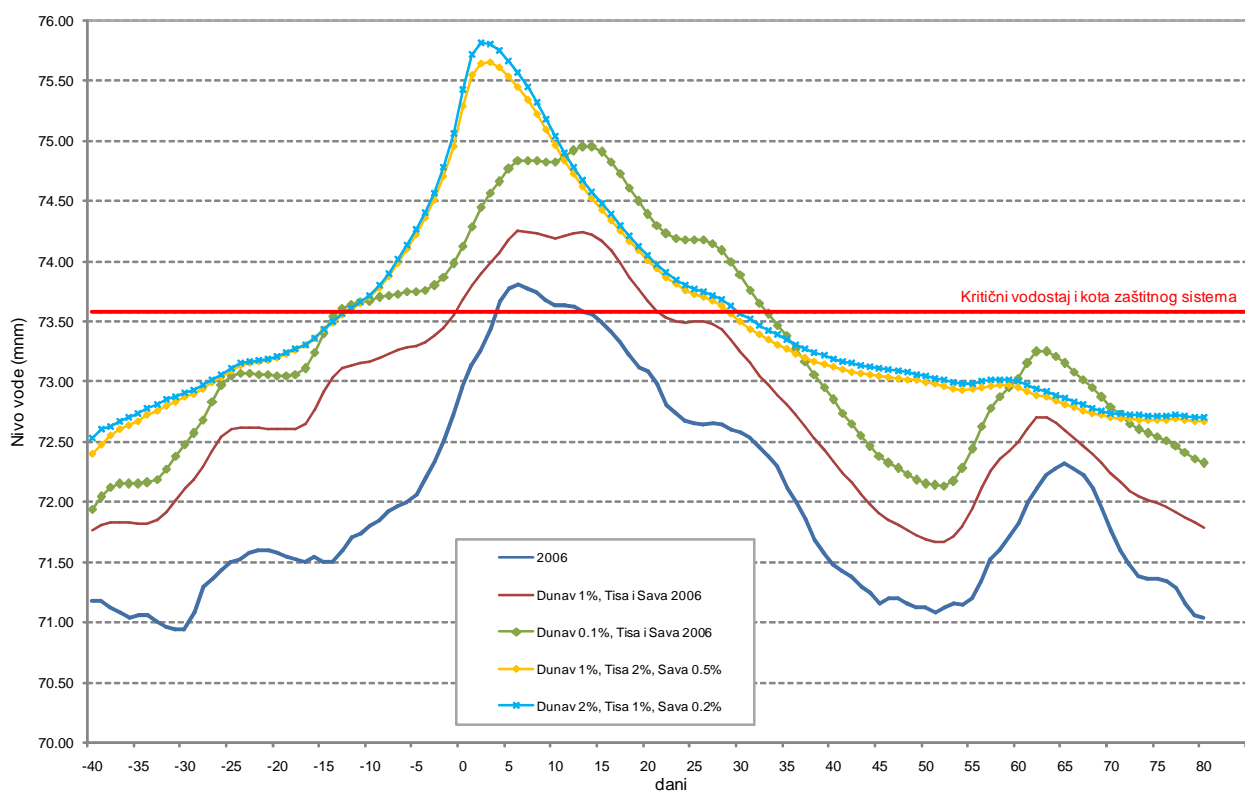
Najvažniji mogući izvori greške modela odnose se na ulazne hidrološke i morfološke podatke. Protoci Dunava i njegovih pritoka su određeni na osnovu raspoloživih krivih protoka RHMZ-a koje su, zbog manjeg broja merenja, manje precizne u domenu nivoa poplavnih voda. Osim toga, protoci pritoka Dunava su definisani na hidrološkim profilima koji su dosta udaljeni od ušća, pa ovi ulazni podaci u model mogu umanjiti tačnost proračuna. Morfološki podaci na kojima se zasniva model se takođe razlikuju po stepenu tačnosti. Naime, dok su poprečni profili minor korita određeni u novije vreme preciznim metodama hidrografskog snimanja, profili inundacija su definisani na osnovu topografskih karata, sitne razmere i zastarelog sadržaja. Poseban problem u konfigurisanju modela, koji može dovesti do grešaka modela, je određivanje kote na kojoj počinje izlivanje vode u inundacije.

6. SIMULACIJA PROPAGACIJE POPLAVNIH TALASA DUNAVA

U okviru naučnog projekta simulirane su neke hipotetičke ekstremne hidrološke situacije na Dunavu, koje nastaju kombinacijom velikih voda različite verovatnoće pojave na Dunavu, Tisi i Savi. U simulacijama je kao nizvodni granični uslov korišćena kriva protoka na hidrološkoj stanici Smederevo, dok su uzvodni granični uslovi na Dunavu, Savi i Tisi bili sintetički hidrogrami velikih voda, određeni posebnim hidrološkim analizama u okviru ranijih studija Instituta „Jaroslav Černi“ [1]. Na slici 5 prikazani su rezultati simulacije – nivoi vode na hidrološkoj stanici Smederevo koji bi se formirali pri istovremenom nailasku različitih konstelacija poplavnih talasa Dunava, Save i Tise. Za naredne faze primene modela planirano je ispitivanje ekstremnih situacija u kojima se poplavni talasi Dunava i pritoka razlikuju po vremenu pojave pika talasa.



Slika 4. Rezultati verifikacije modela



Slika 5. Rezultati simulacije ekstremno velikih voda na profilu hidrološke stanice Smederevo

7. PREPORUKE ZA KORIŠĆENJE MODELA

Razvijeni hidrodinamički model se, nakon dopune potrebnim podacima o morfologiji potencijalnih retenzionih prostora, može koristiti i za ocenu efikasnosti kontrolisanog plavljenja retenzija kao mere upravljanja poplavama. Na osnovu rezultata simulacije biće eventualno predložena nova strategija odbrane od poplava za slučaj pojave velikih voda koje prevazilaze stepen zaštite koji se obezbeđuje postojećim sistemom nasipa.

Kako se pomoću modela mogu na precizniji način odrediti nivoi vode na svakom profilu reke, očekuje se da će služba prognoze Republičkog hidrometeorološkog zavoda prihvatiti njegovo korišćenje kao pomoćno sredstvo za prognozu, a druge institucije za planiranje zaštite od poplava ili edukaciju. Takođe, rezultati proračuna nivoa merodavne velike vode se mogu koristiti u okviru pripreme projekata izgradnje ili rekonstrukcije postojećih zaštitnih objekata.

Nakon izrade digitalnog modela terena, postojeći model bi se mogao integrisati sa 2D modelom terena za potrebe izrade plavnih zona.

Treba istaći da je, pre svakog proračuna, model potrebno ponovo verifikovati, korišćenjem najnovijih podataka osmatranja u periodu velikih voda.

Pored toga, obaveza izrade ovakvog modela je prihvaćena potpisivanjem „Akcionog plana za održivu zaštitu od poplava u slivu Dunava“ [2] u sklopu aktivnosti koje se odnose na poboljšanje prognoze poplava i izradu mapa plavnih zona.

8. ZAKLJUČAK

Model Dunava, od granice s Mađarskom do Smedereva je kalibrisan korišćenjem hidroloških podataka zabeleženih tokom 2006. godine, a verifikovan na osnovu podataka iz 2005. godine. Dobijeni su zadovoljavajući nivogrami velikih voda te se model

može dalje koristiti za simulaciju hipotetičkih ekstremnih hidroloških situacija i planiranje mera zaštite od poplava.

U ovom trenutku institucije nadležne za odbranu od poplava na srpskom sektoru Dunava ne koriste hidrodinamičke modele za simulaciju velikih voda i planiranje mera zaštite od poplava. Korišćenjem razvijenog hidrodinamičkog modela znatno bi se povećala sigurnost zaštite od poplava, zbog preciznije najave i boljeg planiranja operativnih mera. Zato ovaj

model predstavlja doprinos, koji će podići ukupni nivo spremnosti sistema zaštite od poplava.

LITERATURA

- [1] Analiza poplavnog talasa u periodu mart-maj 2006. godine, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd, 2007.
- [2] Action Programme for Sustainable Flood Protection in the Danube River Basin, International Commission on Protection of the Danube River, 2004.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE PROPAGATION OF FLOOD WAVES ALONG THE SERBIAN STRETCH OF THE DANUBE RIVER

by

Vasiljka KOLAROV, Marina BABIĆ MLADENović
The Jaroslav Černi Institute for the Development of Water resources, Belgrade
E-mail: vasiljka.kolarov@jcerni.co.rs

Summary

MIKE11 software was used to develop a hydrodynamic model for the propagation of flood waves along the Serbian section of the Danube River (from the state border with Hungary at km 1433 to the Smederevo town at km 1116). The model was developed within a scientific project “Development of a Mathematical Model for the Propagation of Flood Waves along the Serbian Stretch of the Danube River”, financed by the Serbian Ministry of Science and the Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management – the Republic Directorate for Water. The model has been primarily developed for unsteady simulation of flood waves.. River-winterbed was modelled as a system of several parallel branches (low flow channel and branches along larger floodplains). The river channel

has been defined in the model making use of over 300 cross sections of the river bed - surveyed in 2004 - at approximately 1 km distance. Due to a lack of DEM, the geometry of floodplains was defined by using topographical maps of scale 1:25000. Model calibration was based on a 2006 hydrological dataset and verified against a 2005 hydrological dataset. This paper presents a detailed description of the model development process, shows results of the calibration and verification processes, gives some results of simulation of the extreme hydrological scenarios, and it outlines possible future uses of the developed model.

Key words: Danube, mathematical model, MIKE11, flood wave.

Redigovano 26.08.2009.