

ZNANSTVENO STRUČNI SKUP S MEĐUNARODNIM SUDJELOVANJEM

*Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda,
te smanjivanja poplavnih rizika –
Suvremeni trendovi i pristupi*

Brela, 18. - 20. listopada 2018.

**DVOSLOJNI MODEL RJEČNIH UŠĆA U SLUŽBI
ZAŠTITE I KORIŠTENJA VODA U PRIOBALNIM
PODRUČJIMA**

**TWO-LAYER ESTUARINE MODEL IN SERVICE
OF WATER PROTECTION AND WATER USE IN
COASTAL AREAS**

Nino Krvavica^a, Igor Ružić^a, Nevenka Ožanić^a

KLJUČNE RIJEČI: numerički modeli, stratifikacija, ušća, zaštita voda, navodnjavanje
KEYWORDS: numerical models, stratification, estuaries, water protection, irrigation

1. UVOD

Problematika prodiranja morske vode koritima priobalnih rijeka vrlo je aktualna u Republici Hrvatskoj, a vezana je prvenstveno uz planove navodnjavanja poljoprivrednih površina, primjerice u dolini rijeka Neretve i Mirne. Naime, na ušćima priobalnih rijeka Jadranskog sliva javlja se uslojeno tečenje, gdje sloj slatke vode teče prema ušću iznad sloja morske vode koja prodire uzvodno (tzv. slani klin). Pri odabiru lokacije vodozahvata za potrebe navodnjavanja te definiranju mjera zaštite od prodora slane vode, neophodno je provesti analizu dinamike slanog klina. Višegodišnja terenska istraživanja na donjem toku rijeka Neretve i Rječine pokazala su kako je duljina prodora slane vode prvenstveno pod utjecajem protoka rijeke, ali i

^a Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, nino.krvavica@uniri.hr; iruzic@uniri.hr, nozanic@uniri.hr

razine mora (Krvavica i drugi, 2012; Ljubenkov i Vranješ, 2012).

Kako bi se što preciznije moglo analizirati postojeće stanje te prognozirati utjecaj planiranih građevinskih zahvata na takvim ušćima, potrebno je koristiti fizikalno relevantne i pouzdane računalne modele. Upravo u tu svrhu razvijen je numerički model STREAM 1D koji opisuje tečenje dvaju fluida različitih gustoća u stratificiranim uvjetima (Krvavica, 2016). Navedeni model je detaljno verificiran te validiran usporedbom s terenskim mjerenjima provedenima na ušću Rječine tijekom 2014. i 2015. godine (Krvavica, 2016; Krvavica i drugi, 2017a,b).

2. OPIS MODELA

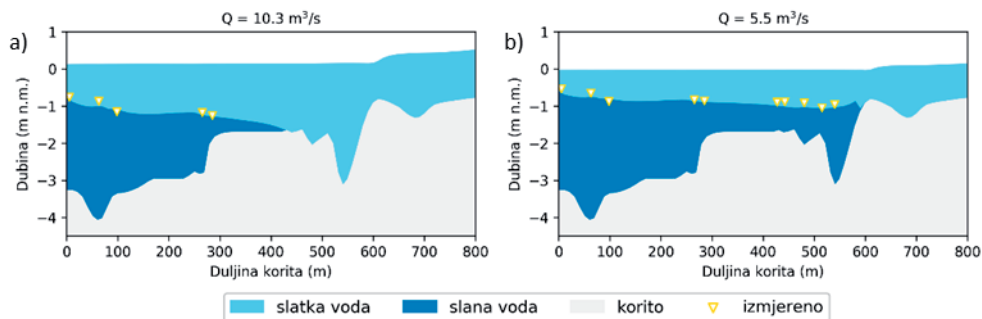
STREAM 1D rješava sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi izvedenih iz zakona očuvanja mase i količine gibanja za dva sloja različitih gustoća (Krvavica, 2016). Na ovaj način model može prognozirati jednodimenzijsko (1D) tečenje plitkih voda kroz korita proizvoljne i promjenjive geometrije, uz uključivanje trenja te miješanja među slojevima. Navedeni sustav jednadžbi aproksimiran je metodom konačnih volumena, odnosno pomoću dobro balansirane Roeve Q sheme (Castro i drugi, 2004), koja precizno opisuje nestacionarno tečenje te dozvoljava prijelaze između mirnog i burnog režima tečenja. Cjelokupni numerički algoritam implementiran je u Python 3.6 programskom okruženju. Svi ostali detalji vezani uz procesne jednadžbe, numeričke sheme te detalje implementacije algoritma dostupni su u radovima Krvavice (2016) te Krvavice i drugih (2017a,b).

3. REZULTATI

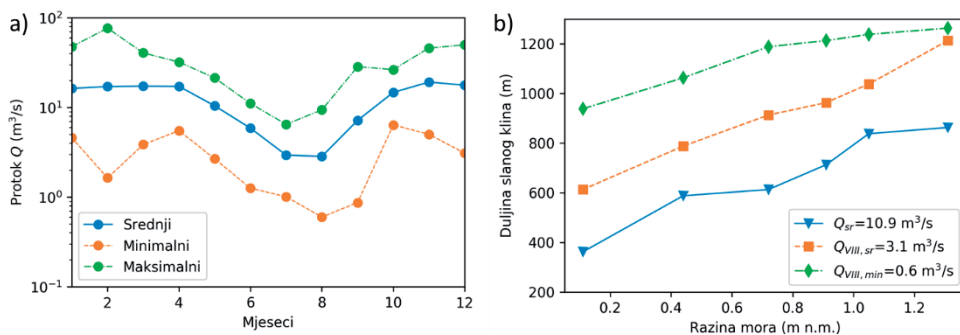
U nastavku se prikazuju rezultati proračuna uslojenog tečenja na ušću Rječine, za različite protoke i razine mora. Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s mjerenjima dubine razdjelnice između slojeva slane i slatke vode provedenih tijekom 2015. godine (Krvavica, 2016). Nizvodni rubni uvjet definiran je zabilježenim razinama mora, dok je uzvodni rubni uvjet definiran izmjerenim protocima Rječine. Trenje na razdjelnici između dvaju slojeva opisano je izrazom dobivenim iz niza mjerenja na ušću Rječine (Krvavica i drugi, 2016). Na Slici 1 prikazani su rezultati proračuna pomoću modela STREAM 1D na ušću Rječine za dva različita protoka. Primjetno je da duljina slanog klina varira s obzirom na protok, te da iznosi $L = 430$ m za $Q = 10,3$ m³/s, odnosno $L = 590$ m za $Q = 5,5$ m³/s. Usporedba s provedenim terenskim mjerenjima ukazuje na zadovoljavajuću preciznost modela.

Pomoću niza ovakvih numeričkih proračuna, moguće je odrediti zavisnost duljine slanog klina o protoku Rječine i razini mora. Naime, ovo je posebno korisno kod planiranja vodozahvata kako bi se procijenila opasnost od prodora slane vode do odabrane lokacije te definirale odgovarajuće konstruktivne mjere za zaštitu iste. Primjerice na ušću Rječine, za period 1999.-2015., prosječni godišnji protok iznosi 10,9 m³/s, dok su najmanji srednji i minimalni mjesečni protoci zabilježeni u kolovozu

i iznose $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$, odnosno $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Slika 1a). Na Slici 1b prikazane su izračunate duljine slanog klina za navedena tri karakteristična protoka te raspon visokih razina mora koje se mogu očekivati u razdoblju 2020.-2100. (Krvavica i drugi, 2017b). Primjetno je povećanje duljine slanog klina s razinom mora za svaki od odabranih protoka Rječine.



Slika 1. Uzdužni presjek ušća Rječine s izračunatim i izmjerenim dubinama razdjelnice među slojevima za: a) $Q = 10,3 \text{ m}^3/\text{s}$ i b) $Q = 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 2. Srednji, minimalni i maksimalni mjesečni protok Rječine na postaji Sušak-tvornica u periodu 1999.-2015. (a), te izračunate maksimalne duljine slanog klina na ušću Rječine za karakteristične protoke i različite razine mora (b)

4. ZAKLJUČAK

U danom radu prikazan je samo dio mogućnosti računalnog programa STREAM 1D. Model se pokazao kao pouzdan alat za prognoziranje prodiranja morske vode u stratificiranim uvjetima. Treba napomenuti da ovakve numeričke analize moraju pratiti i odgovarajuća terenska mjerenja, kako bi se što točnije opisali fizikalni procesi koji se odvijaju na razdjelnici među slojevima različitih gustoća.

LITERATURA

- [1] Castro, M. J., Garcia-Rodriguez, J. A., González-Vida, J. M., Macias, J., Parés, C., Vázquez-Cendón, M. E. (2004): *Numerical simulation of two-layer shallow water flows through channels with irregular geometry*, Journal of Computational Physics, (195/1), 202-235.
- [2] Krvavica, N., Mofardin, B., Ružić I., Ožanić, N. (2012): *Mjerenje i analiza zaslanjivanja na ušću Rječine*, Građevinar, (64/11), 923-933.
- [3] Krvavica, N. (2016): *One-dimensional numerical model for layered shallow water flow in highly stratified estuaries*, Doktorski rad, Rijeka, Građevinski fakultet.
- [4] Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N. (2016): *A field study of interfacial friction and entrainment in a microtidal salt-wedge estuary*, Environmental Fluid Mechanics. (16/6), 1223-1246.
- [5] Krvavica, N., Kožar, I., Travaš, V., Ožanić, N. (2017a): *Numerical modelling of two-layer shallow water flow in microtidal salt-wedge estuaries: finite volume solver and field validation*, Journal of Hydrology and Hydromechanics, (65/1), 49-59.
- [6] Krvavica, N., Travaš, V., Ožanić, N. (2017b): *Salt-wedge Response to Variable River Flow and Sea-Level Rise in the Microtidal Rječina River Estuary, Croatia*. Journal of Coastal Research, (33/4) , 802-814.
- [7] Ljubenković, I., Vranješ, M. (2012): *Numerical model of stratified flow—case study of the Neretva riverbed salination (2004)*, Građevinar, (64/2), 101-112.