

# JEDNODIMENZIJSKI NUMERIČKI MODEL USLOJENOGA TEČENJA PLITKIH VODA U IZRAZITO STRATIFICIRANIM UŠĆIMA



dr. sc. Nino Krvavica, mag. ing. aedif.

## ŽIVOTOPIS

Nino Krvavica rođen je 25. 12. 1982. godine u Rijeci, gdje završava osnovnu školu i gimnaziju Andrije Mohorovičića. 2001. godine upisuje studij građevinarstva na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Zvanje diplomirani inženjer građevinarstva stječe 2007. godine pod mentorstvom dr. sc. Nenada Ravlića s temom „Projekt raščlanjenog betonskog gata plivališta u luci Volosko“, koji je iste godine predložen za nagradu Hrvatskih voda kao najbolji diplomski rad iz područja hidrotehnike.

Nakon završetka studija, 2007. godine zapošljava se na Institutu građevinarstva Hrvatske, PC Rijeka, na Odjelu za hidrotehniku. Poslijediplomski doktorski studij upisuje 2009. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, smjer Hidrotehnika priobalnih područja. Na istom se fakultetu 2011. godine i zapošljava u punom radnom vremenu kao znanstveni novak na projektu „*Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu*“, pod mentorstvom prof. dr. sc. Nevenke Ožanić. U suradničkom zvanju asistent na Katedri za hidrotehniku sudjeluje u izvođenju nastave na više kolegija na preddiplomskom, diplomskom i specijalističkom studiju.

Tijekom rada na fakultetu također je aktivno sudjelovao u realizaciji još dva znanstvena projekta: bilateralnom hrvatsko-japanskom projektu „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj“, pod vodstvom prof. dr. sc. Nevenke Ožanić te međunarodnom projektu „*Networking for drinking water supply in Adriatic Region - DrinkAdria*“, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Barbare Karleuša. 2013. godine usavršavao se 2 mjeseca na Sveučilištu u Kyotu u Japanu, kod dr. sc. Yosuke Yamashikia, a 2016. godine boravio je mjesec dana na Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, u sklopu projekta „*Ekomarina*“ kod doc. dr. sc. Dalibora Carevića.

Član je Hrvatskog hidrološkog društva i Hrvatskog saveza građevinskih inženjera. Aktivno je sudjelovao na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima, a koautor je preko 20 znanstvenih i stručnih radova.

Doktorska disertacija je obranjena 11. studenog 2016. godine na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Goran Lončar,  
Građevinski fakultet Sveučilišta u  
Zagrebu (predsjednik),

doc. dr. sc. Elvis Žic, Građevinski  
fakultet Sveučilišta u Rijeci (član),

prof. dr. sc. Nevenka Ožanić,  
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci  
(mentorica i članica).

## PRIKAZ RADA

U doktorskom radu pod naslovom „*One-dimensional numerical model for layered shallow water flow in highly stratified estuaries*“ („*Jednodimenzijanski numerički model uslojenoga tečenja plitkih voda u izrazito stratificiranim ušćima*“) analizirana je problematika numeričkog modeliranja dinamičkog odziva slane i slatke vode u izrazito stratificiranim ušćima. Naime, u ušćima koja nisu pod dominantnim utjecajem plime i oseke u pravilu se formira uslojeno tečenje slane i slatke vode. S obzirom

da u ovakvim tipovima ušća dominiraju horizontalni fizikalni procesi, postavljena je hipoteza da je opravdano koristiti jednodimenzijanski numerički model za simuliranje dinamike izrazito stratificiranih ušća.

Procesne jednadžbe za jednodimenzijanski, dvoslojni i nestacionarni tok plitkih voda u koritima nepravilne geometrije izvedene su iz zakona očuvanja mase i očuvanja količine gibanja. Za rješavanje ovog sustava nelinearnih, hiperboličnih, parcijalnih diferencijalnih jednadžbi korištena je numerička shema temeljena

na metodi konačnih volumena. U tu svrhu, dobro balansirana Q-shema za dvoslojno tečenje u koritima nepravilne geometrije, modificirana je kako bi se uključili dodatni članovi koji opisuju trenje i vertikalno miješanje. Također je predloženo numeričko rješenje pomicanja fronte donjeg sloja te modifikacija izvornih članova jednadžbi na prijelazu između mokrog i suhog dijela prostorne domene. Za nizvodne rubne uvjete predložene su determinističke komponente hoda morskih razi te uvjet kritičnog tečenja u gornjem sloju, dok je uzvodni rubni uvjet forsiran protokom rijeke. Dodatno je razvijen i stacionarni numerički model temeljen na metodi konačnih razlika, koji se koristio za kalibraciju koeficijenta trenja na razdjelnici između slojeva. Oba modela uspješno su verificirana usporedbom s analitičkim rješenjima za pojednostavljeni slučaj dvoslojnog tečenja vode u prizmatičnom koritu.

Za potrebe validacije numeričkog modela prikazana je metodologija i rezultati proizašli iz terenskih mjerenja provedenih tijekom 2014. i 2015. godine na ušću Rječine. Struktura saliniteta određena je pomoću CTD sonde koje mjere tlak, temperaturu i električnu provodljivost. Ulazni protoci određivali su se prema razini vode na hidrološkoj stanici uzvodno od ušća, za koju je poznata protočna krivulja. Akustični Dopplerov strujomjer se povremeno koristio kako bi se validirali uzvodni protoci rijeke te kako bi se izmjerio profil brzina vode na izlazu iz ušća. Mjerenjima je potvrđena kontinuirana stratificiranost stupca vode, neovisno o hidrološkim uvjetima, što opravdava početnu pretpostavku o uslojenom tečenju slane i slatke vode.

Prognostičke sposobnosti modela procijenjene su usporedbom numeričkih rezultata i izmjerenih vrijednosti na ušću Rječine za stacionarne, ali i izrazito nestacionarne uvjete toka. Naime, validacija sličnih numeričkih modela u pravilu se provodi za postupno promjenjive uvjete toka, dok je u ovom doktorskom radu validacija provedena i za izrazito nagle promjene toka, što svakako predstavlja novost i bitan znanstveni doprinos u području numeričkog modeliranja stratificiranih ušća. Uz kalibrirane koeficijente trenja, poklapanja numeričkih rezultata i terenskih mjerenja su zadovoljavajuća u svim analiziranim slučajevima, što ukazuje na vrlo dobru prognostičku moć predloženog modela.

Kombinacija terenskih mjerenja i numeričkih analiza omogućila je detaljniji uvid u relevantne fizikalne procese u izrazito stratificiranim ušćima. Pokazalo se kako protok rijeke ima dominantni utjecaj na dinamiku slanog klina, a u manjoj mjeri utjecaj imaju razina mora i geometrija korita. Naime, smanjenje protoka rijeke ili podizanje morske razine može uzrokovati jači prodor slanog klina uzvodno. Analizom terenskih mjerenja utvrđeno je kako postojeći konstitutivni modeli za određivanje koeficijenta trenja na razdjelnici te intenziteta miješanja među slojevima nisu u potpunosti primjenjivi na ušće Rječine. S obzirom na navedeno, predloženi su i novi empirijski izrazi za prognoziranje intenziteta miješanja i koeficijenta trenja na razdjelnici u izrazito stratificiranim ušćima.

Izvorni znanstveni doprinos ovog doktorskog rada očituje se u formulaciji jednodimenzijskog nestacionarnog numeričkog modela uslojenog tečenja u koritima proizvoljne geometrije, validaciji istoga usporedbom s terenskim mjerenjima na ušću Rječine te boljem razumijevanju fizikalnih procesa u izrazito stratificiranim ušćima. Pri tome treba posebno istaknuti numeričku implementaciju članova koji opisuju trenje i vertikalno miješanje među slojevima, kao i modifikaciju izvornih članova jednadžbe na fronti slanog klina. Vrlo vrijedan znanstveni doprinos očituje se i u proširenju spoznaja o dinamici slanog klina te kritičkom osvrtu na postojeća saznanja o kvantifikaciji trenja i miješanja na razdjelnici između slane i slatke vode. Kombinacijom numeričkih simulacija i terenskih mjerenja prepoznati su dominantni utjecaji na hidrodinamičke karakteristike i duljinu prodora slanog klina te je pružen i detaljniji uvid u relevantne fizikalne procese, kao što su uvjeti očuvanja stratificiranosti i brzina propagacije fronte slanog klina. Konačno, znanstveni doprinos predstavljaju i novo-predloženi empirijski izrazi za kvantifikaciju koeficijenta trenja na razdjelnici i intenziteta vertikalnog miješanja u izrazito stratificiranim sredinama.

Numerički model razvijen u ovom radu pokazao se vrlo pouzdanim i preciznim u simuliranju dinamike slane i slatke vode u izrazito stratificiranim uvjetima. Iako primijenjen na ušću Rječine, provedene analize sugeriraju kako ovaj model može imati široku primjenu u hidrotehničkom inženjerstvu na brojnim sličnim ušćima rijeka diljem svijeta. ■