

Primljen / Received: 19.9.2011.

Ispravljen / Corrected: 17.2.2012.

Prihvaćen / Accepted: 21.2.2012.

Dostupno online / Available online: 15.3.2012.

Numerički model uslojenog tečenja - primjer zaslanjivanja korita rijeke Neretve (2004.)

Autori:



Dr.sc. **Igor Ljubenković**, dipl.ing.građ.
GRAD invest d.o.o., Split
iljubenkovic@gmail.com



Prof.dr.sc. **Mijo Vranješ**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
mijo.vranjes@gradst.hr

Izvorni znanstveni rad

Igor Ljubenković, Mijo Vranješ

Numerički model uslojenog tečenja – primjer zaslanjivanja korita rijeke Neretve (2004.)

U području donje Neretve postoje dva prirodna pravca prodora slane morske vode: prvi, kroz korito rijeke Neretve te drugi, kroz duboke podzemne slojeve. U radu je opisan numerički model uslojenog tečenja te je primijenjen za proračun zaslanjivanja rijeke Neretve kroz prvi pravac prodora. Kalibracija modela napravljena je na temelju mjerenja iz 2004. godine. Utvrđeno je da se slana voda pojavljuje u Metkoviću pri protocima slatke vode manjim od $180 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je za protoke veće od $500 \text{ m}^3/\text{s}$ slana voda potpuno istisnuta iz korita rijeke.

Ključne riječi:

rijeka Neretva, slani klin, zaslanjivanje, numerički model, uslojeno tečenje, nestacionarno tečenje

Original scientific paper

Igor Ljubenković, Mijo Vranješ

Numerical model of stratified flow – case study of the Neretva riverbed salination (2004)

Two natural directions of saline sea water intrusion have been registered in the lower reaches of the Neretva River: the first direction of intrusion is through the Neretva riverbed, and the second one through deeper underground layers. The numerical model of stratified flow is described, and its application in the analysis of the Neretva River salination via the first direction of intrusion is presented. The model is calibrated based on measurements conducted in 2004. It was established that saline water appears in Metković at fresh water flow rates of less than $180 \text{ m}^3/\text{s}$, while saline water is fully blocked out from the riverbed when water flow exceeds $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Key words:

Neretva River, saline wedge, salination, numerical model, stratified flow, nonstationary flow

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Igor Ljubenković, Mijo Vranješ

Numerisches Modell der Schichtströmung – Beispiel der Versalzung des Neretva-Flussbetts (2004)

In dem unteren Bereich des Flusses Neretva gibt es zwei natürliche Meersalzwasserintrusionen: die erste befindet sich in dem Neretva-Flussbett und die zweite in tiefen Untergrundschichten. In der Arbeit ist das numerische Modell der Schichtströmung beschrieben, welches für die Berechnung der Versalzung des Flusses Neretva bei der ersten Intrusionsstelle angewandt wurde. Die Modellkalibrierung erfolgte auf Grund der Messungen aus dem Jahre 2004. Es wurde festgestellt, dass Salzwasser in Metković bei Durchflüssen von Süßwasser von weniger als $180 \text{ m}^3/\text{s}$ erscheint, während bei Durchflüssen von über $500 \text{ m}^3/\text{s}$ das Salzwasser zur Gänze aus dem Flussbett verdrängt wird.

Schlüsselwörter:

Fluss Neretva, Salzkeil, Versalzung, numerisches Modell, Schichtströmung, instationäre Strömung

1. Uvod

Područje donje Neretve predstavlja osebujan prirodno – geografski prostor okružen okršenim stijenskim masivom. To je područje s blagom mediteranskom klimom i obiljem vode pa je na melioriranim površinama razvijena intenzivna poljoprivredna proizvodnja. Međutim, proizvodnja u posljednje vrijeme postaje ugrožena jer se javlja povremeno ili stalno zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda u području nizvodno od Metkovića [1, 2, 3, 4]. Zbog toga dolazi do redukcije poljoprivrednih prinosa, ali i do uništavanja plodnog poljoprivrednog tla.

U dosadašnjim istraživanjima pokazano je da postoje dva prirodna pravca (puta) prodora soli u područje [4]. Prvi je kroz korito rijeke Neretve, a drugi iz dubokih slojeva gdje je podzemna voda jako zaslanjena. Kretanje soli u aluvijalnom vodonosniku ovisi o klimatskim, hidrološkim i hidrogeološkim uvjetima, ali i o primjeni melioracijskih sustava i sustava za navodnjavanje. Modeliranje podzemnog tečenja zahtijeva razvoj i primjenu posebnih numeričkih modela te odgovarajućih "in-situ" mjerenja, što nije buhvačeno ovim radom.

Pojavu zaslanjivanja vodotoka i riječnih ušća (estuarija i delti) proučavaju mnogi stručnjaci i znanstvenici u svijetu. To se ne čini isključivo zbog ekoloških razloga već i zbog ekonomskih budući da se radi o područjima koja često predstavljaju važne vodene resurse za vodoopskrbu, poljoprivrednu proizvodnju i industriju.

Na riječnim ušćima dolazi do interakcije i miješanja slane morske vode s vodom koja dotječe s uzvodnog dijela sliva. Radi se o vrlo složenim dinamičkim procesima. Da bi se ti procesi spoznali i primjereno opisali te provela odgovarajuća obrana od zaslanjivanja, nužno je primjenjivati suvremene metode u čemu su od iznimne koristi odgovarajući matematički (numerički) modeli, s kojima se u potpunosti može opisati površinsko tečenje višefaznog fluida. Za primjenu takvih modela potrebno je prikupljanje i obrada meteoroloških, hidroloških i hidrogeoloških podataka koji karakteriziraju stanja na analiziranom području vodotoka i ušća.

Intenzivnija proučavanja interakcije slane i slatke vode započela su prije pedesetak godina. Uglavnom se radilo o laboratorijskim modeliranjima [5]. Međutim, razvojem elektroničkih računala počinje primjena numeričkih modela. Danas se zahvaljujući razvoju suvremene mjerne opreme provode intenzivna mjerenja na rijekama ("in situ"). U kombinaciji s numeričkim modelima postižu se izvrsni rezultati [6, 7].

U Hrvatskoj tri najveće rijeke koje se ulijevaju u Jadransko more, Krka [8], Zrmanja [9] i Neretva, zaslanjene su u svom donjem toku. Najopsežnija mjerenja provedena su na rijeci Neretvi, budući da područje donje Neretve s izgrađenim vodoprivrednim objektima čini sustav koji ima veliku gospodarsku važnost za Republiku Hrvatsku. Utvrđeno je da u razdoblju kada su dotoci svježije vode smanjeni, morska voda

prodire kroz riječno ušće u korito Neretve te se formira tečenje slatke vode iznad klina slane morske vode ("salt wedge"). U ljetnom razdoblju slani klin doseže sve do Gabele, oko 25 km od ušća. U kišnom razdoblju kada su dotoci sa sliva, veći klin se potiskuje nizvodno sve dok se u potpunosti ne istisne izvan korita.

Slana struktura u obliku klina javlja se kod rijeka koje se ulijevaju u mora s relativno malom amplitudom morskih mijena [10]. Prema Kurupu [11], to su mora s amplitudom manjom od 2 m. Pripadna riječna ušća još se nazivaju mikrotajdalna ušća [12]. Pozicija slanog klina u njima mijenja se tijekom godine ovisno o promjeni dotoka slatke vode kao dominantnog čimbenika [13, 14], ali i morske mijene plima – oseka, batimetrija kao i djelovanje vjetrova imaju nezanemarljivu ulogu. Maksimalna intruzija klina morske vode u rijeke iznosi od nekoliko kilometara do više stotina kilometara.

Najznačajniji primjeri ovakvog tipa riječnih ušća, koji se često spominju u literaturi, jesu rijeka Ebro (Španjolska) i Rhona (Francuska) na Mediteranu [13, 15] te rijeka Mississippi u SAD-u kod koje je registrirana maksimalna duljina slanog klina otprilike 190 km [16].

Kod slanog klina postoji slabo miješanje slane i slatke vode, koje se isključivo zbiva vertikalnom jednosmjernom advekcijom slane vode u gornji sloj [17, 18, 19]. Između dva sloja je vrlo uska tranzicijska zona. Stoga se između slojeva može usvojiti oštra granica ("sharp interface") koja predstavlja haloklinu u estuariju (nagla promjena saliniteta) koja je ujedno i piknoklina (nagla promjena gustoće po dubini), a često i termoklina (izrazita promjena temperature).

U svrhu rješavanja brojnih vodoprivrednih zadataka u svezi s intruzijom slane (morske) vode u priobalne vodotoke primjenjuju se razni numerički modeli. Na tržištu se mogu naći brojni programski paketi ("software") za modeliranje hidrodinamičkih i transportnih procesa. Međutim, neki od njih nisu primjenjivi za rješavanje uslojenih tečenja. Također, programski paketi su često vrlo skupi i zbog toga nedostupni.

U sklopu početnih istraživanja zaslanjivanja korita rijeke Neretve provedena su mjerenja u nekoliko vertikalna poprečnog presjeka korita [4]. Rezultati su pokazali da je raspodjela slanosti ujednačena po širini poprečnog presjeka. Stoga se nastavilo mjeriti u jednoj vertikali po dubini toka, i to u sredini rijeke (poprečnog presjeka). Iz istog razloga ovdje je odabran jednodimenzionalan model za simulaciju tečenja.

U ovom radu prikazane su osnove jednodimenzionalnog numeričkog modela uslojenog tečenja slane i slatke vode baziranog na teoretskim analizama nekoliko autora provedenih u proteklih pedesetak godina [20, 21, 22, 23]. Također, prikazana je i njegova primjena na realnom koritu rijeke Neretve, pod utjecajem vremenski promjenjivih rubnih uvjeta. Kalibracija parametara i verifikacija modela napravljena je na osnovi mjerenja provedenih u rijeci Neretvi

tijekom 2004. godine. Dobiveni rezultati pokazuju da se jednodimenzionalnim modelom može primjereno simulirati prodor slanog klina u korito rijeke pod utjecajem morskih mijena te dotoka slatke vode s uzvodnoga dijela sliva. Tim su modelom obuhvaćeni samo hidrodinamički parametri tečenja, međutim on se može dalje proširiti i s biološkim i ekološkim komponentama [14, 24].

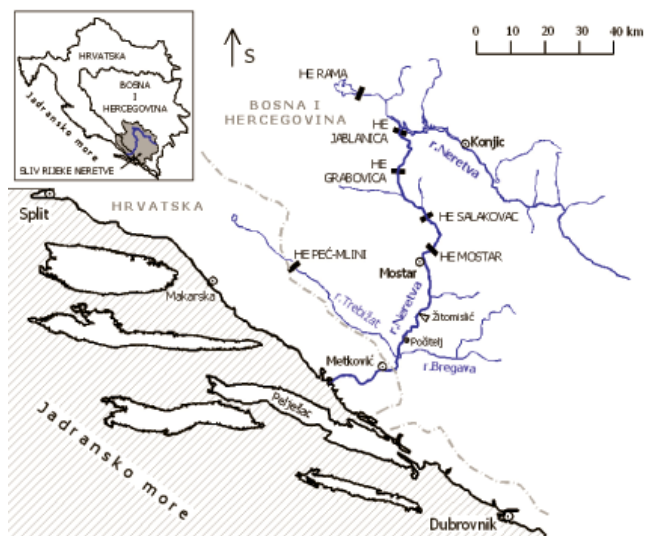
Nekoliko autora u svojim radovima prikazali su razvoj i primjenu dvodimenzionalnih numeričkih modela, s hidrodinamičkim jednadžbama osrednjenim po širini korita [6, 11].

Budući da su geološki, hidrološki i hidrodinamički odnosi u području donje Neretve vrlo složeni, zaštita tla i površinskih vodotoka od zaslanjivanja na ovom području predstavlja vrlo tešku zadaću. Na tom se području isprepleću fenomeni kretanja vode u kršu, tečenja i miješanja slatke i slane vode u aluvijalnoj nehomogenoj sredini kao i u površinskim vodotocima [25].

Očuvanje prirodnih obilježja, biološke i krajobrazne raznolikosti područja donje Neretve osim za Republiku Hrvatsku ima i međunarodni interes. Tako je donji tok Neretve uvršten u Ramsarski popis Konvencije o zaštiti močvarnih područja, kao i u program Ornitološki važnih područja u Europi. O tome treba posebno voditi računa kod planiranja i provedbe zaštite tla i voda od zaslanjivanja.

2. Opis područja

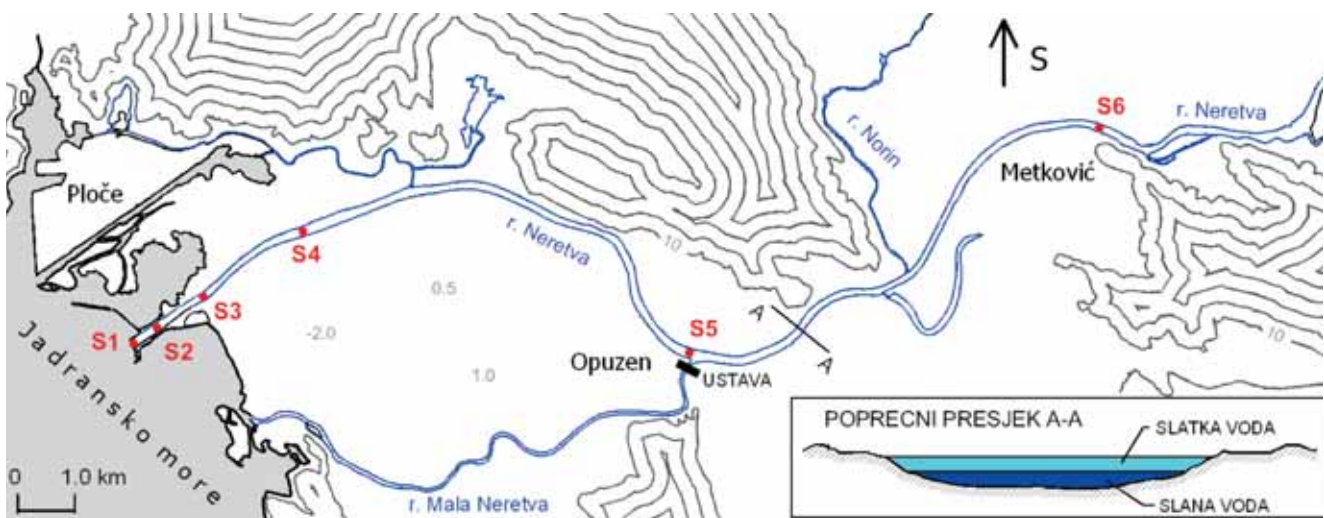
Rijeka Neretva izvire u Bosni i Hercegovini jugoistočno od planine Zelengore na visini od 1095 m n.m. Duljina toka je 215 km, od čega kroz Republiku Hrvatsku prolazi samo 22 km u najnižvodnijem dijelu toka te se ulijeva u Jadransko more (slika 1.). Površina nadzemnog sliva rijeke Neretve procijenjena je otprilike na 10500 km², od čega se oko 280 km² nalazi unutar Republike Hrvatske [25].



Slika 1. Sliv rijeke Neretve

U gornjem i srednjem dijelu toka Neretva predstavlja tipičnu planinsku rijeku koja prolazi uskim dolinama sa strmim padinama. Nizvodno od Počitelja (km 35+800) Neretva izlazi iz kanjonskog dijela toka te protječe kroz dolinu s meandrirajućom maticom (slika 2.).

Kroz dugu geološku povijest ovo je područje nastalo taloženjem erodiranog materijala s cijelog slivnog područja. Na aluvijalnom prostoru površine oko 19000 ha razvila se složena hidrografska mreža i formirala delta rijeke Neretve s brojnim rukavcima. Takvo je stanje bilo sve dok nisu započeli melioracijski radovi sredinom XX. stoljeća. Izgrađeni su brojni nasipi za zaštitu od poplava, ustave i drugi hidrotehnički objekti čime su znatno promijenjena prirodna obilježja delte. U današnjem stanju nizvodno od Metkovića rijeka je usmjerena u glavno korito (maticu).



Slika 2. Područje donje Neretve s mjernim profilima S1 do S6

Osim glavnog toka, na tom su području vidljivi tragovi nekadašnje delte brojni napušteni meandri i rukavci [25]. Na velikom dijelu doline razvijena je poljoprivredna proizvodnja, dok se na preostalom dijelu nalaze močvare i jezera.

U prošlosti, protok Neretve na donjem dijelu njenog toka znatno se mijenjao tijekom godine, ovisno o hidrološkim prilikama na cijelom slivu. Izgradnjom hidroenergetskih građevina na slivu Neretve s pripadnim akumulacijama Jablanica, Rama, Grabovica, Salakovac i Mostar, te kompenzacijskim bazenima HE Čapljina u Popovom Polju i području Svitave, došlo je do izravnavanja izrazito neravnomjernog prirodnog hidrološkog režima rijeke Neretve (slika 1.).

Najveći godišnji protoci u donjem toku Neretve u zimskom su razdoblju, od studenog do travnja, a mali protoci traju obično od lipnja do listopada.

Protok Neretve u Metkoviću (na stacionaži km 20+875) prije svega ovisi o radu HE Mostar. Za određivanje vodenih količina koje dolaze s ove HE koriste se podaci s limnigrafa u Žitomisliću (km 47+000). Nizvodno od Žitomislića pa sve do Metkovića Neretva prima tri veća pritoka, a to su Trebižat (desno) te Bregava i Krupa (lijevo). Količine vode koje one donose u Neretvu određuju se pomoću postojećih vodomjernih stanica smještenih blizu njihovih ušća. U kišnom razdoblju dotoci tih pritoka mogu biti značajni, a iznose i po nekoliko desetaka m^3/s . U sušnom razdoblju njihovi dotoci su samo nekoliko m^3/s .

Protok Neretve od Metkovića do ušća znatno se mijenja duž toka i nije ga lako odrediti, budući da je ovaj dio vodotoka pod snažnim utjecajem mora.

Najveći protok u Metkoviću procijenjen je na $2180 m^3/s$, a odgovara stanju prije izgradnje hidroelektrana na rijeci Neretvi. Srednji višegodišnji protok Neretve u profilu Metković procijenjen je na $355 m^3/s$ [25].

Na potezu od Metkovića do Opuzena rijeka Neretva prima samo desni prtok Norin. Točne ulazne količine Norina u Neretvu teško je odrediti jer je ta rječica pod stalnim usporom vodostaja Neretve.

Ključnu ulogu za distribuciju voda Neretve u Opuzenu ima ustava kojom se kontrolirano upuštaju voda iz glavnog korita Neretve u Malu Neretvu. Budući da ustava služi za zaštitu od zaslanjivanja Male Neretve i obranu od poplava, ona je uglavnom zatvorena. U sušnom razdoblju ustava sprječava prodor slanog klina iz glavnog korita u Malu Neretvu, a u kišnom razdoblju propagaciju poplavnog vala također iz glavnog korita u Malu Neretvu. Korito Male Neretve zaštićeno je i s nizvodne strane ustavom, čime je spriječena izravni prodor mora u njeno korito.

Na širem području sliva donje Neretve postoji velik broj izvora s vrlo različitim kvalitativnim i kvantitativnim hidrološkim karakteristikama. Međutim s aspekta modeliranja tečenja koritom Neretve važno je napomenuti da je u sušnom dijelu

godine izdašnost svih izvora relativno mala, pa se utjecaj izvora može zanemariti.

Vodostaji na području ušća Neretve ovise o protoku vode koja dolazi s uzvodnog dijela sliva i kolebanja morske razine čiji se utjecaj proteže i uzvodno od Metkovića (oko 25 km od ušća) pri protjecanju malih voda Neretvom. Za motrenje vodostaja rijeke Neretve koriste se limnigrafi u Metkoviću i Opuzenu.

Kolebanje razine Jadranskog mora na ušću Neretve uvjetovano je plimom i osekom, ali i djelovanjem vjetra (izdizanje razine mora uz obalu). Morske mijene (plima i oseka) mješovitoga su tipa, što znači da imaju poludnevni i dnevni ritam. Uobičajena dnevna amplituda kolebanja razine mora je 0,5 m, a mijenja se od 0,1 m n.m. do 0,6 m n.m.

Za ovo područje koriste se podaci s mareografa koji je postavljen u blizini ušća Male Neretve.

3. Mjerenja u Neretvi

Organizirana mjerenja slanosti u koritu Neretve provode stručnjaci s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Splitu, i to od 1997. godine.

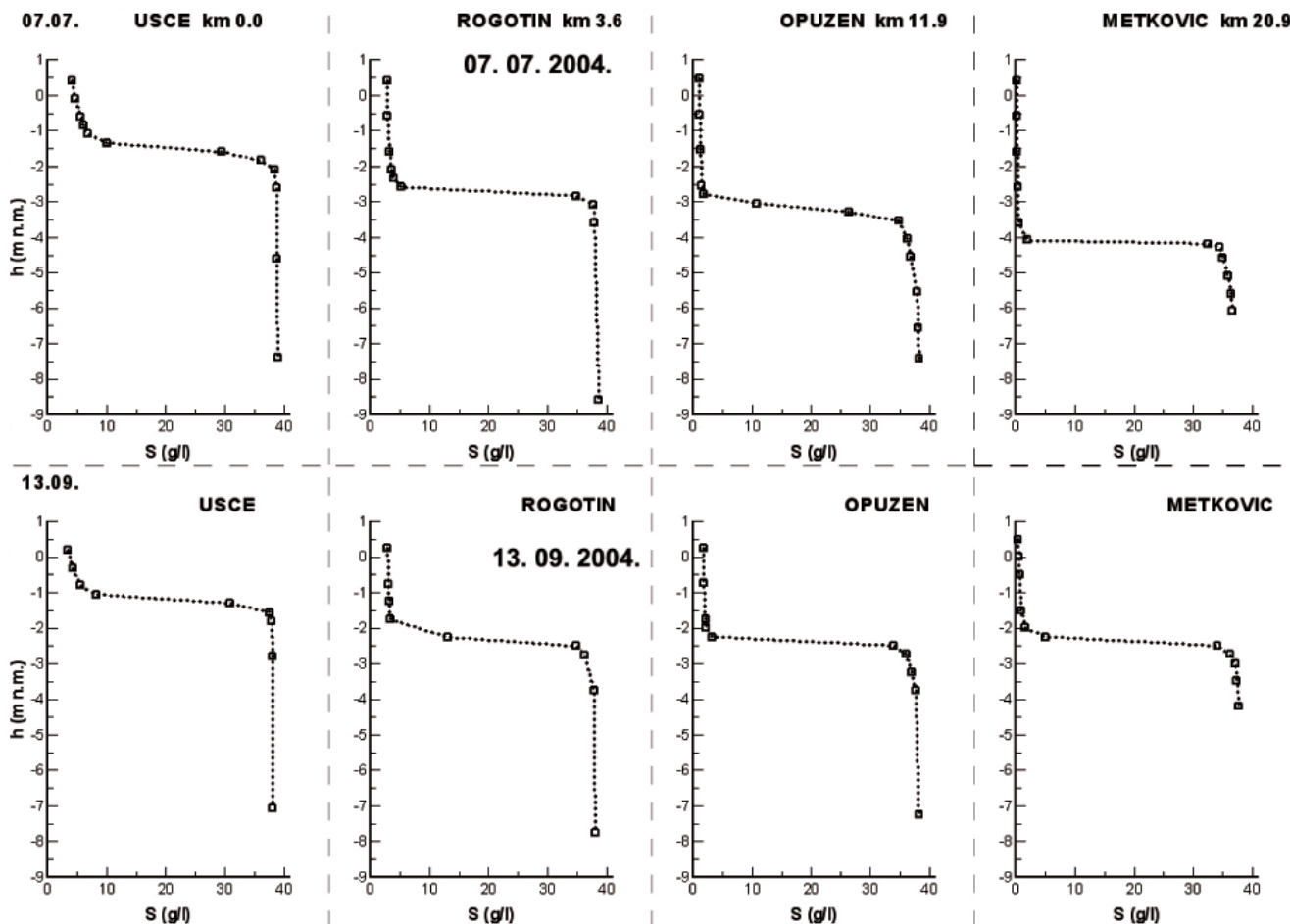
Nabavom sofisticirane mjerne opreme, minisonda Hydrolab, 2002. godine omogućeno je precizno mjerenje sljedećih parametara vode: temperature, elektroprovodljivosti, slanosti, pH i otopljenog kisika. Hidrometrijskim krilom provode se mjerenja brzina. Detaljni prikazi mjerenja i dobivenih rezultata dani su u [4].

Istraživanja su pokazala da se u Neretvi radi o uslojenom tipu tečenja slatke vode iznad klina slane vode (mora) koji se uvlači duboko uzvodno u korito rijeke. Pod utjecajem dotoka slatke vode s uzvodnog dijela sliva te morskih mijena klin se pomiče uzvodno – nizvodno.

Prodor mora u korito Neretve počinje obično u proljeće kada se smanje dotoci slatke vode s uzvodnog dijela sliva. U ljetnim mjesecima klin morske vode prodire kroz ušće rijeke Neretve uzvodno sve do Gabele (oko 25 km). U kasnom ljetnom ili jesenskom razdoblju, kada se povećaju dotoci slatke vode u područje, klin se potiskuje nizvodno sve dok se potpuno ne izbaci izvan korita rijeke.

U proteklom razdoblju mjerenja su provedena na desetak lokacija duž korita od ušća u Jadransko more do mosta u Metkoviću (potez dužine oko 21 km). Najučestalija su mjerenja u vodomjernom profilu u Opuzenu (km 11+880).

Za kalibraciju parametara modela i verifikaciju, u ovom su radu korištena mjerenja iz 2004. godine. U toj godini provedena su najdetaljnija mjerenja, i to 8 puta (dana) u razdoblju od travnja do listopada. Sveukupno je izvršeno 30 mjerenja u 6 profila, od S1 do S6 na slici 2., koji su smješteni na stacionažama 0+000 (ušće), 0+500, 1+000, 3+621,5 (Rogotin), 11+880 (Opuzen limnigraf) i 20+875,5 (Metković most).



Slika 3. Izmjereni profili slanosti duž rijeke Neretve (7. srpnja i 13. rujna 2004.)

Na slici 3. prikazane su izmjerene slanosti u četiri karakteristična profila rijeke Neretve, i to ušće, Rogotin, Opuzen i Metković, tijekom 7. srpnja 2004. i 13. rujna 2004. Na samome ušću bočata voda vrlo male slanosti (< 5 g/l) teče u površinskom sloju debljine 1 – 1,5 m. Na prikazanim ostalim uzvodnim profilima uočava se da u koritu postoje zapravo dva sloja konstantne slanosti. Pri površini voda je vrlo malo bočata, dok se u pridnom sloju nalazi slana morska voda (cca 38 g/l). Tranzicijska zona (prijelazno područje) između gornjega sloja zapravo slatke vode i donjega sloja vrlo je uska (oko 0,5 m). To je glavna karakteristika uslojenog tipa riječnog ušća, pa se pri modeliranju može usvojiti oštra granica (sharp interface) između slojeva. Debljina površinskog sloja postupno se povećava u uzvodnom smjeru da bi u Metkoviću iznosila oko 4,5 m (7. srpnja) odnosno 2,5 – 3,0 m (13. rujna). U oba dana može se uočiti gradijent granične plohe slojeva (halokline) u longitudinalnom smjeru.

Najveće su brzine na samoj površini toka, dok se po dubini smanjuju [26]. U pridnom sloju brzine imaju pozitivne i negativne vrijednosti koje ovise o rubnim uvjetima (promjene dotoka slatke vode i djelovanje morskih mijena).

4. Matematička formulacija uslojenog tečenja

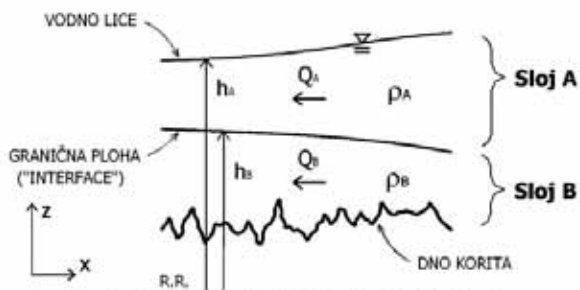
Nekoliko autora [20, 21, 22, 23, 26] prikazali su u svojim radovima matematički model uslojenog tečenja s različitim pretpostavkama. Stoga su u nastavku rada opisane samo osnove jednadžbe i usvojene pretpostavke za simulaciju jednodimenzionalnog nestacionarnog uslojenog tečenja na riječnom ušću.

Za izvod jednadžbi uzete su sljedeće pretpostavke:

- homogen, izotropan i nestišljiv fluid (slatka i slana voda),
- jednodimenzionalan tok,
- miran režim tečenja s blagim promjenama toka,
- korito je složenog poprečnog presjeka koji se opisuje poligonom tako da se integracija članova u modelu radi za cijeli poprečni presjek,
- uslojeno tečenje s oštrom granicom ("sharp interface") bez miješanja,
- gustoća fluida u svakom sloju je konstantna i nepromjenjiva,
- u poprečnom presjeku korita uzima se za svaki sloj srednja brzina tečenja,

- po dubini se usvaja hidrostatička raspodjela tlaka,
- vodno lice kao i granična ploha između dva sloja u poprečnom presjeku su horizontalni,
- nagib dna korita smatra se da je mali pa se može pretpostaviti da je kosinus kuta nagiba dna približno jednak jedinici.

Gornji sloj (Sloj A) nalazi se između vodnog lica i granične plohe te predstavlja slatku vodu, a donji se sloj (Sloj B) nalazi između granične plohe i dna korita, a predstavlja morsku vodu (slika 4.).



Slika 4. Shematski prikaz uslojenog tečenja (Sloj A – slatka voda, Sloj B – slana voda)

Za prethodno iznesene pretpostavke uslojeno tečenje u potpunosti je opisano s četiri zavisne varijable – protokom u Sloju A (\$Q_A\$), protokom u Sloju B (\$Q_B\$), vodostajem Sloja A (\$h_A\$) i vodostajem Sloja B (\$h_B\$). Te su varijable funkcija prostora \$x\$ i vremena \$t\$.

Za određivanje četiri zavisne varijable \$Q_A, Q_B, h_A\$ i \$h_B\$ potrebne su četiri jednačbe, a to su dvije jednačbe kontinuiteta te dvije dinamičke jednačbe (dobivene iz zakona održanja količine gibanja):

- jednačba kontinuiteta za Sloj A

$$\frac{\partial A_A}{\partial t} + \frac{\partial Q_A}{\partial l} = 0, \tag{1}$$

- jednačba kontinuiteta za Sloj B

$$\frac{\partial A_B}{\partial t} + \frac{\partial Q_B}{\partial l} = 0, \tag{2}$$

- dinamička jednačba za Sloj A

$$\frac{\partial Q_A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q_A^2}{A_A} \right) + g A_A \frac{\partial h_A}{\partial l} + \frac{1}{\rho_A} \tau_0 O_A + \frac{1}{\rho_A} \tau_s B_s = 0, \tag{3}$$

- dinamička jednačba za Sloj B

$$\frac{\partial Q_B}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right) + \frac{\rho_A}{\rho_B} g \frac{\partial}{\partial l} (h_A h_B) - \frac{\bar{n}_A}{\bar{n}_B} g h \frac{\partial A_B}{\partial l} + g A_B \frac{\partial h_B}{\partial l} + \frac{1}{\rho_B} \tau_0 O_B - \frac{1}{\rho_B} \tau_s B_s = 0. \tag{4}$$

Indeks A odnosi se na gornji sloj, a indeks B na donji sloj. Varijable A i O predstavljaju površinu protjecajnog presjeka i omočeni opseg. \$B_s\$ je širina granične plohe, \$g\$ je gravitacija, \$\rho\$ je gustoća te \$h\$ debljina gornjeg sloja. Tangencijano naprezanje ima dvije komponente i to uslijed trenja na stijenci korita (\$\tau_0\$) i na graničnoj plohi (\$\tau_s\$).

Jednačbe (1), (2), (3) i (4) hiperboličkog su tipa i nemaju analitičko rješenje, pa je za rješavanje problema primijenjena metoda konačnih elemenata (MKE). To je jedna od približnih numeričkih metoda koja se često koristi u rješavanju inženjerskih zadataka [27].

Diskretizacija kontinuuma na konačne elemente, aproksimacija rješenja po elementima i izbor interpolacijskih funkcija tako da najbolje odgovaraju prirodi problema, predstavlja suštinu MKE.

Uzeti su linearni dvočvorni elementi s oblikovnim funkcijama u obliku Lagrangeovih polinoma prvoga stupnja (linearne funkcije) [28]. Primijenjena je jaka formulacija matematičkog modela uz primjenu Galjerkinove metode.

Jednačbe kontinuiteta i dinamičke jednačbe za svaki element integriraju se po prostoru \$[x_1, x_2]\$ i vremenu \$[t_1, t_2]\$. Po pravilima numeričke integracije one se svode na algebarske nelinearne jednačbe. Dakle, na jednom elementu postavljaju se 4 algebarske jednačbe. Za cijeli sustav s ukupno \$M\$ elemenata postoji takvih \$4M\$ jednačbi.

Prethodne jednačbe koje se dobivaju primjenom zakona održanja mase i količine gibanja postavljene su na izdvojenom dijelu korita, tj. konačnom elementu pa se nazivaju elementne jednačbe.

Za sustav u kojemu je \$M\$ elemenata i \$N\$ čvorova, računa se \$4M\$ protoka i \$2N\$ vodostaja, što ukupno daje \$4M + 2N\$ nepoznanica. Dodatne jednačbe s kojima se sustav zatvara dobivaju se postavljanjem jednačbi kontinuiteta u čvorovima (suma tokova pridruženih čvoru treba biti nula). Za svaki čvor "i" vrijedi da suma svih tokova Sloja A koji ulaze i izlaze iz čvora treba biti nula. Isto vrijedi i za Sloj B. Ove jednačbe nazivaju se čvorne jednačbe.

Za čvor "i" te Sloj A vrijedi:

$$\sum_{j=1}^m (-1)^p \rho_A^i Q_{Ajp}^i + \rho_{AV}^i Q_{AV}^i = 0, \quad i = 1, 2 \dots N, \tag{5}$$

gdje je \$m\$ ukupan broj elemenata vezan na čvor "i", a \$Q_{AV}^i\$ je "vanjski" dotok slatke vode u čvoru "i". Parametar \$p = 1\$ za uzvodni čvor elementa, \$p = 2\$ za nizvodni čvor elementa.

Analogno za Sloj B vrijedi:

$$\sum_{j=1}^m (-1)^p \rho_B^i Q_{Bjp}^i + \rho_{BV}^i Q_{BV}^i = 0, \quad i = 1, 2 \dots N \tag{6}$$

gdje je \$Q_{BV}^i\$ "vanjski" dotok slane vode u čvoru "i".

Primjenom numeričke integracije po vremenu dobivaju se čvorne jednačbe u algebarskom obliku. Elementne jednačbe i čvorne jednačbe (5) i (6) daju sustav od \$4M + 2N\$ nelinearnih jednačbi (\$4M\$ elementnih jednačbi i \$2N\$ čvornih jednačbi):

$$F_n(x_i) = 0 \quad n, i = 1, \dots, 4M + 2N \quad (7)$$

gdje je x_i je vektor traženog rješenja.

Budući da je prethodni sustav jednadžbi (7) nelinearan, za njegovo se rješavanje primjenjuje Newton–Raphsonova iterativna metoda pa se problem svodi na rješavanje linearnog sustava od $4M + 2N$ jednadžbi [27, 28]. Za zadane početne i rubne uvjete dobiva se jednoznačno rješenje nepoznatih funkcija h i Q u čvorovima konačnih elemenata.

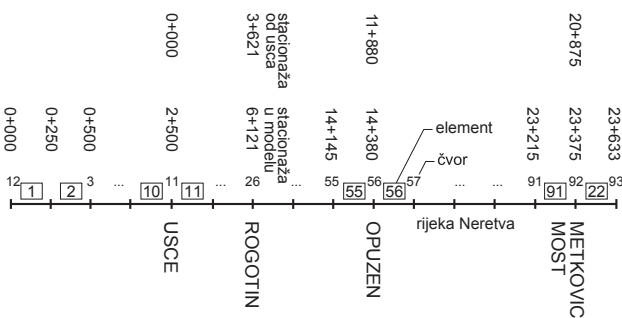
Za početno stanje u sustavu potrebno je zadati vrijednosti vodostaja Sloja A (h_A) i Sloja B (h_B) u svim čvorovima. Također zadaju se po četiri protoka za Sloj A (Q_{A1}) i za Sloj B (Q_{B1}) te na nizvodnom čvoru za Sloj A (Q_{A2}) i Sloj B (Q_{B2}).

Rubni uvjeti zadaju se u obliku hidrograma ($Q-t$) ili nivograma ($h-t$) i to u rubnim čvorovima sustava (početni i završni čvor topološke sheme). U primijenjenoj metodologiji na nizvodnom rubu sustava zadan je nivogram, a na uzvodnom protok. Funkcija rubnog uvjeta (nivogram ili hidrogram) diskretizira se polinomom u vremenskoj domeni. Raspored diskretnih točaka ovisi o brzini promjene funkcije rubnog uvjeta.

5. Primjer – ušće rijeke Neretve

5.1. Topološka shema

Za opis korita Neretve uzeta su 82 poprečna presjeka od ušća u Jadransko more do mosta u Metkoviću, s prosječnim razmakom oko 250 m. Također je uzeto u obzir još 10 fiktivnih presjeka koji se nalaze u moru neposredno ispred ušća, kako bi se na njima anulirala eventualna pogreška u procjeni nizvodnog rubnog uvjeta. Uzeti presjeci ujedno predstavljaju čvorove konačnih elemenata. Numeracijom čvorova (profila) i elemenata formira se topološka shema (slika 5).

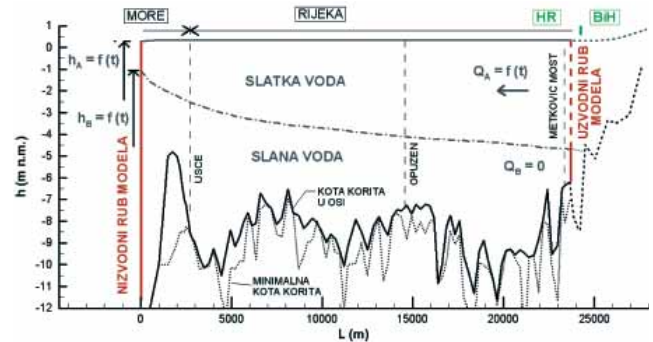


Slika 5. Topološka shema

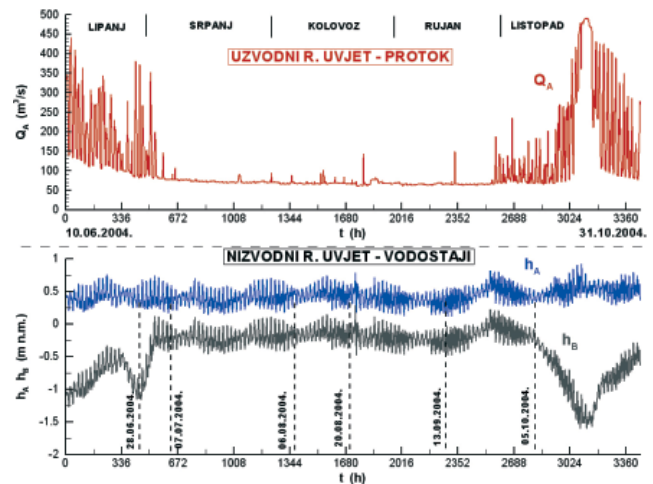
5.2. Rubni uvjeti

Uzdužni presjek korita prikazan je na slici 6. s naznačenim rubovima sustava. Nizvodni rub modela postavljen je u moru, udaljen 2,5 km nizvodno od samog riječnog ušća. Uzvodni rub nalazi se u Metkoviću na mjestu starog srušenog mosta. Ostaci, koji se nisu uklonili stvorili su prag na dnu korita, koji otežava jači prodor morske vode uzvodno [2]. Bez obzira

na ovu umjetnu barijeru, nekoliko kilometara uzvodno od Metkovića korito rijeke je izdignuto pa čini prirodnu prepreku koja sprječava daljnju intruziju morske vode. Rubni uvjeti uzeti su za razdoblje kada je provedena simulacija, a to je od 10. lipnja 2004. (10h) do 31. listopada 2004. (24h).



Slika 6. Uzdužni presjek rijeke Neretve s usvojenim rubovima modela



Slika 7. Rubni uvjeti: a) dotok slatke vode (Q_A), b) nizvodni vodostaji (h_A i h_B)

Iako se u Metkoviću nalazi limnigraf na kojem se kontinuirano mjeri vodostaj, ovaj profil nalazi se pod usporom mora pa se na njemu ne može egzaktno odrediti protok. Stoga je uzet protok s prve raspoložive uzvodne stanice, a to je limnigraf u Žitomisliću (km 47+000). U ljetnom razdoblju protok slatke vode u Metkoviću prije svega ovisi o radu HE Mostar jer su bočni dotoci u Neretvu vrlo mali. Stoga je za uzvodni rubni uvjet usvojeno da je $Q_{A,RUB} = Q_{\text{ŽITOMISLIĆ}}$. Dakle, rubni protok je funkcija vremena $Q_{A,RUB} = f(t)$ koja se zadaje u obliku polinoma u najuzvodnijemu čvoru sustava (čvor br. 93). Satne vrijednosti protoka prikazane su na slici 7a. Za donji sloj slane vode rubni protok je konstantno nula $Q_{B,RUB} = 0$, a fizikalno znači da je na uzvodnom rubu usvojena nepropusna barijera za donji sloj. Općenito, na riječnom ušću slatka voda istječe u more u površinskom sloju koji se širi lepezasto. Radi se o procesu prostornog strujanja višefaznog fluida, koji se ovdje neće posebno analizirati pa je debljinu površinskog sloja slatke vode

na nizvodnom rubu potrebno procijeniti ($h_{A\text{RUB}} - h_{B\text{RUB}}$). Upravo zbog svega navedenog kako bi se smanjio utjecaj pogreške procijenjenog nizvodnog rubnog uvjeta na rješenje problema tj. vodostaje i protoke u koritu, uzeti su "morski" profili.

Na nizvodnom rubu sustava za vodostaj Sloja A uzeta su mareografska mjerenja (satne vrijednosti) registrirana na mareografu s ušća Male Neretve $h_{A\text{RUB}} = h_{\text{MAREOGRAF}}$ (slika 7b). Rubni vodostaj slane morske vode ($h_{B\text{RUB}}$) procijenjen je na osnovi "in-situ" mjerenja vertikalnog profila saliniteta, pri čemu je za pojednini $Q_{A\text{RUB}}$ registriran $h_{A\text{RUB}} - h_{B\text{RUB}}$. Za određeni vodostaj Sloja A ($h_{A\text{RUB}}$) i rubnih protoka slatke vode ($Q_{A\text{RUB}}$), debljina sloja slatke vode na nizvodnom rubu ($h_{A\text{RUB}} - h_{B\text{RUB}}$) promjenjiva je, a mijenja se od 0,6 m kod manjih dotoka do 2,0 m kod većih protoka (slika 7b).

5.3. Opis simulacije

Simulirana je dinamika slanog klina u razdoblju od 10. lipnja 2004. (10h) do 31. listopada 2004. (24h).

Kako bi se izabrala najbolja kombinacija parametara modela (interval vremenske integracije Δt , parametar interpolacije i dr.) u fizikalnom i numeričkom smislu, kao i njihove optimalne vrijednosti koje najbolje aproksimiraju mjerenja, model je više puta pokrenut [13]. Usvojen je vremenski interval $\Delta t = 3$ min te parametar vremenske integracije $\theta = 0,75$.

Koeficijenti trenja dobiveni su kalibracijom s mjerenjima provedenim u 2004. godini, a usvojene su vrijednosti $c_f = 0,003$ (koeficijent trenja na stijenci korita) i $c_{fs} = 0,0015$ (koeficijent trenja na graničnoj plohi) [21]. Potrebno je napomenuti da su stvarni koeficijenti trenja na graničnoj plohi promjenjivi prostorno, dakle duž granične plohe u longitudinalnom smjeru kao i vremenski zbog nestacionarnosti brzina i dubina [22].

Ovdje su uzete konstantne vrijednosti koeficijenta trenja, koje predstavljaju prosječne vrijednosti stvarnih koeficijenata.

Raspoloživa i korištena mjerenja za kalibraciju parametara modela prikazana su u tablici 1. Za položaj granične plohe, tj. vodostaja Sloja B (h_B) uzete su dubine iz izmjerenih profila slanosti u kojima je $S = 20\text{‰}$ (g/l).

Tablica 1. Mjerenja za kalibraciju modela

Datum mjerenja	Mjerni profil	Dubina granične plohe	Srednji dnevni protok	Datum mjerenja	Mjerni profil	Dubina granične plohe	Srednji dnevni protok
		(m)	(m ³ /s)			(m)	(m ³ /s)
10.06.2004	P5	-4.77	330	05.10.2004	P1	-1.15	86
28.06.2004	P5	-3.77	177		P3	-1.96	
07.07.2004	P1	-1.46	79		P4	-2.34	
	P4	-2.70			P5	-2.80	
	P5	-3.19			P6	-4.15	
	P6	-4.14		20.08.2004	P1	-0.36	67
06.08.2004	P1	-0.83	72		P2	-0.63	
	P2	-0.77			P3	-1.58	
	P4	-1.72			P4	-1.90	
	P5	-2.34			P5	-2.40	
	P6	-3.31			P6	-2.60	
20.08.2004	P1	-0.36	67	13.09.2004	P1	-1.17	66
	P2	-0.63			P2	-1.17	
	P3	-1.58			P3	-1.61	
	P4	-1.90			P4	-2.32	
	P5	-2.40			P5	-2.37	
	P6	-2.60			P6	-2.36	
13.09.2004	P1	-1.17	66	05.10.2004	P1	-1.15	86
	P2	-1.17			P3	-1.96	
	P3	-1.61			P4	-2.34	
	P4	-2.32			P5	-2.80	
	P5	-2.37			P6	-4.15	
	P6	-2.36					
05.10.2004	P1	-1.15	86				
	P3	-1.96					
	P4	-2.34					
	P5	-2.80					
	P6	-4.15					

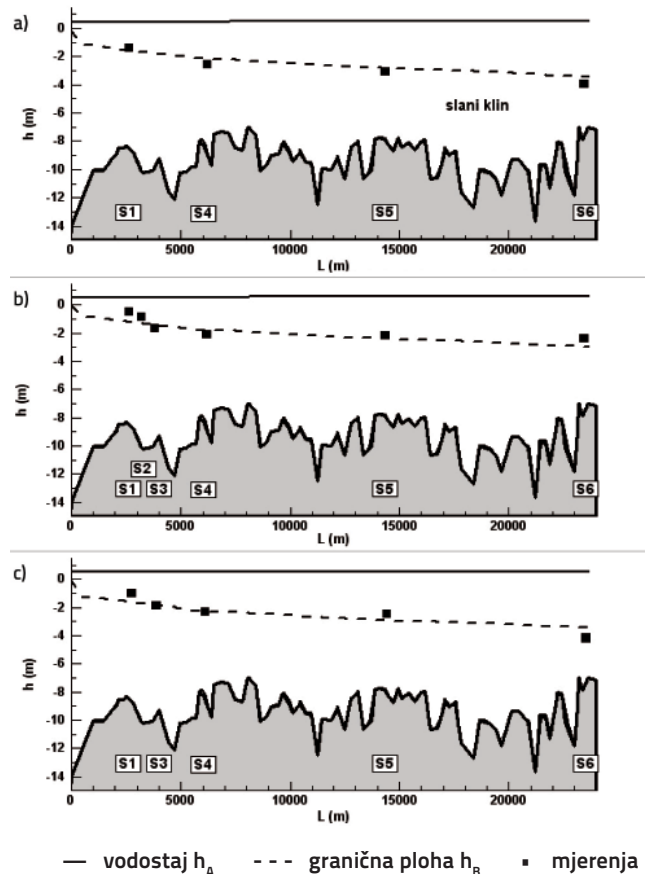
Usvojena je gustoća površinskog sloja slatke vode $\rho_A = 1000 \text{ kg/m}^3$ i sloja slane vode (Sloj B) $\rho_B = 1025 \text{ kg/m}^3$. Za početno stanje (10. lipnja 2004. u 10h) zadani su vodostaji h_A i h_B u svim čvorovima, a odgovaraju ravnotežnom stacionarnom stanju granične plohe slojeva tako da je protok na svim elementima isti te iznosi u gornjem sloju $Q_A = 247,52 \text{ m}^3/\text{s}$, a u donjem sloju $Q_B = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (zaustavljeni slani klin). Mjerenje slanosti u Opuzenu u tom početnom vremenu pokazuje da je stvarno stanje drugačije ($h_{B \text{ Opuzen}} = -4,77 \text{ m.n.m.}$). Granična ploha se nalazi nešto više u odnosu na pretpostavljeno početno stanje, a u uzdužnom smjeru postoje gradijenti protoka u oba sloja. Takvo nestacionarno rješenje ne može se pretpostaviti, jer je ono posljedica sveukupnog djelovanja svih klimatskih i hidrauličkih faktora u prethodna dva do tri dana. Stoga se pretpostavlja stacionarno početno stanje. Takvo stanje poželjno je i u numeričkom smislu jer vodostaji imaju blagi gradijent u uzdužnom smjeru, a protoci su konstantni. Na ovaj način kod simulacije predmetnog problema pogreška u procjeni početnog uvjeta iščezava u vrlo kratkom razdoblju (2 do 3 dana) tj. početni uvjet nakon dva do tri dana više ne utječe na funkcije rješenja – vodostaje i protoke, već se oni nakon toga uravnotežuju prema zadanim rubnim uvjetima.

5.4. Prikaz i analiza rezultata

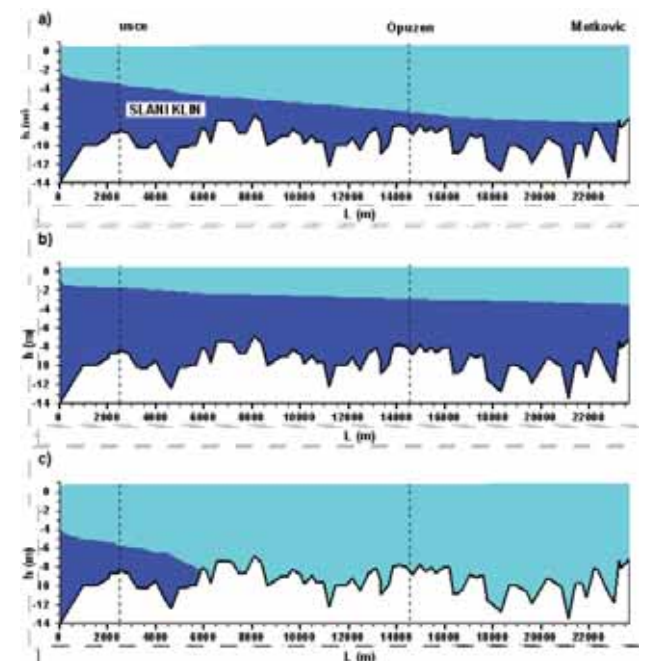
Na slici 8. prikazani su proračunano vodno lice (h_A) i granična ploha (h_B) te odgovarajuća mjerenja za tri datuma (7. srpnja, 20. kolovoza i 5. listopada). Proračunani vodostaj Sloja A (h_A) imaju vrlo mala odstupanja od registriranih vodostaja u Opuzenu i Metkoviću, a iznose tek nekoliko centimetara. Prosječne pogreške vodostaja Sloja B odnosno odstupanja od mjerenja se razlikuju po profilima te iznose 46 cm na ušću, 23 cm u Rogotinu, 34 cm u Opuzenu te 55 cm u Metkoviću. Prema prikazanim slikama može se uočiti da granična ploha modela osrednjava provedena mjerenja. Stoga se dobiveno rješenje može smatrati pouzdanom procjenom stvarne halokline, a uzeti koeficijenti trenja da su realni.

Tijekom lipnja dotoci slatke vode u sustav bili su vrlo promjenjivi s prosjekom od $200 \text{ m}^3/\text{s}$ i vršnim vrijednostima većim od $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Stoga se vrh klina uglavnom nalazio između Opuzena i Metkovića (slika 9.a). Nakon toga slijedi razdoblje s praktički konstantnim dotokom slatke vode od približno $70 \text{ m}^3/\text{s}$ koje je trajalo sve do kraja rujna. Kratkotrajna i relativno manja povećanja dotoka u tom razdoblju nisu znatno utjecala na pomicanje klina. Prodor klina dosezao je duboko u korito, uzvodno od Metkovića (slika 9.b). Slatka voda je protjecala u površinskom sloju promjenjive debljine, a iznosila je oko 1,0 m na ušću, oko 2,5 m u Opuzenu te oko 3,5 m u Metkoviću.

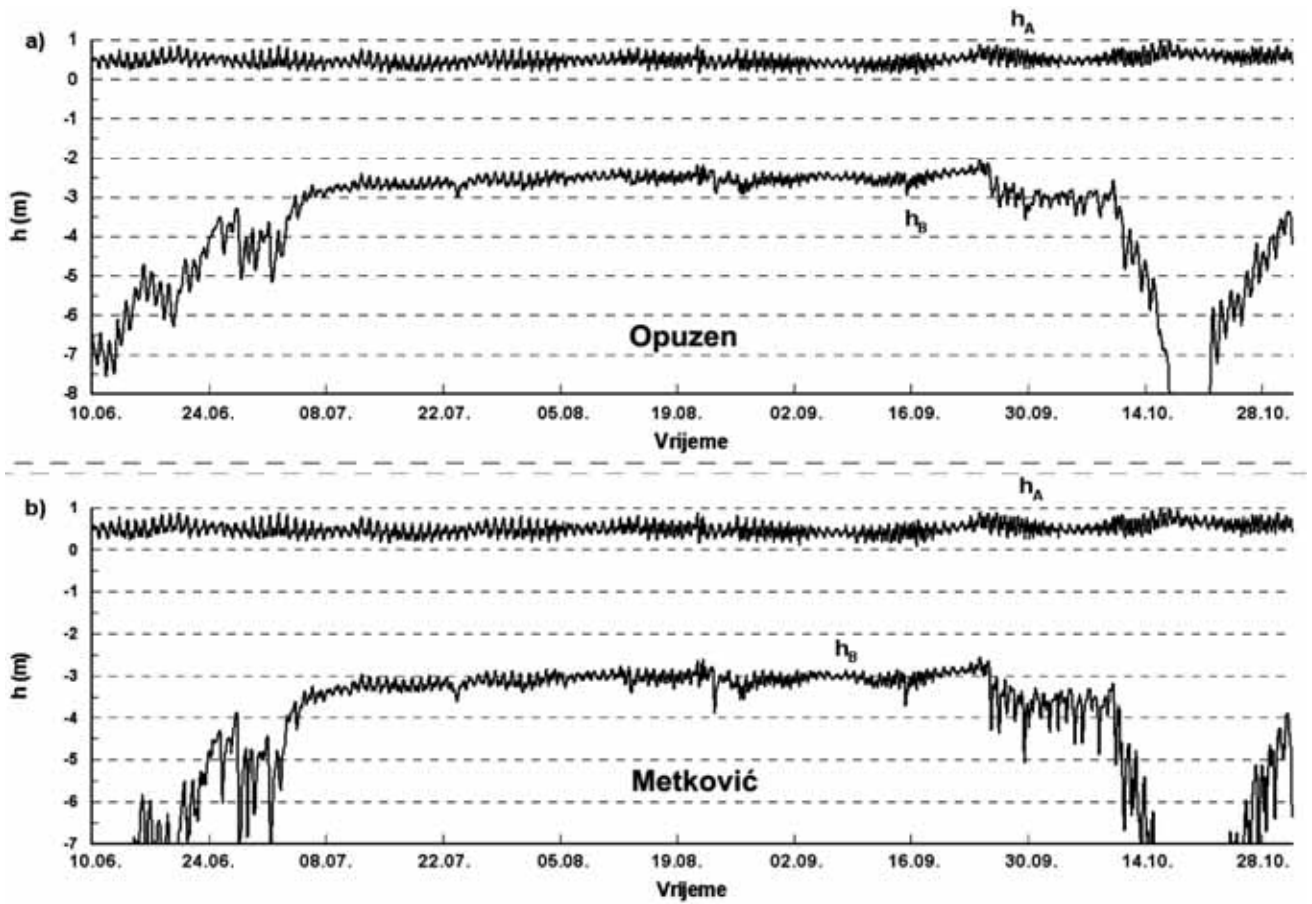
U listopadu uslijed povećanih oborina na cijelom slivu, porastao je dotok slatke vode u donji tok Neretve, da bi u drugoj polovici listopada protoci dosegli vrijednosti i veće od $450 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 7.). Stoga se vrh slanog klina potisnuo sve do Rogotina (slika 9.c).



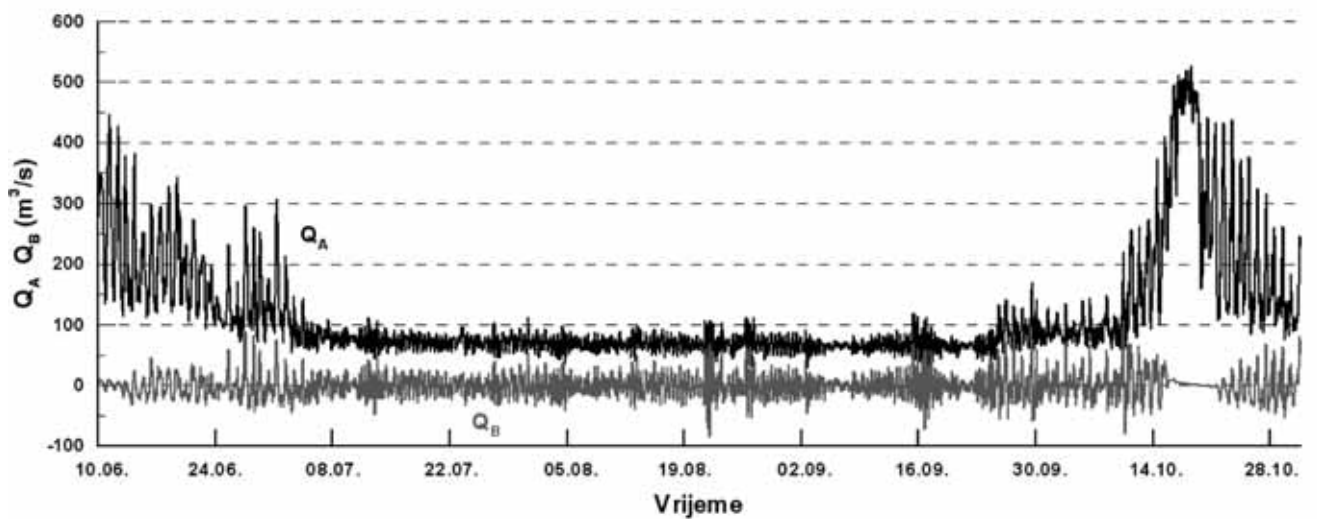
Slika 8. Usporedba rješenja modela za vodostaj h_A i graničnu plohu h_B s mjerenjima za: a) 7. srpnja, b) 20. kolovoza, c) 5. listopada 2004. (mjerni profili S1-S6)



Slika 9. Karakteristična stanja slanog klina: a) $Q_A = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, b) $Q_A = 70 \text{ m}^3/\text{s}$, c) $Q_A = 450 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 10. Promjena vodostaja (h_A) i granične plohe (h_B): a) Opuzen, b) Metković



Slika 11. Protoci u Opuzenu slatke (Q_A) i slane vode (Q_B)

Na slici 10. prikazana je modelski simulirana promjena vodostaja i granične plohe u Opuzenu i Metkoviću u analiziranom razdoblju. Očita je promjena vodostaja Sloja A u Opuzenu pod djelovanjem plime i oseke. Kota vodnog lica je u prosjeku nekoliko centimetara veća od razine mora. Vodostaji Sloja B uglavnom ovise o dotoku slatke vode tj. o veličini (Q_A) i trajanju.

Protoci u Opuzenu za cijelo analizirano razdoblje prikazani su na slici 11. Protoci u površinskom sloju (Q_A) osciliraju u skladu s rubnim dotocima u Metkoviću, a vrijednosti im variraju približno od 20 m³/s do 520 m³/s. Tijekom srpnja i kolovoza prosječna brzina tečenja slatke vode je oko 0,15 m/s, a u listopadu kod najvećih protoka iznosi oko 0,5 m/s. U Sloju B protoci (Q_B) fluktuiraju oko nule od - 80 m³/s do 100 m³/s. Sredinom ljeta u pridnenom sloju protoci su uglavnom unutar intervala ± 20 m³/s, s pripadajućim srednjim brzinama $\pm 0,05$ m/s.

U analiziranom razdoblju dubina intruzije slane morske vode mijenja se pod utjecajem zadanih rubnih uvjeta. Vrh slanog klina nalazi se uglavnom uzvodno od Metkovića, a samo u kraćim razdobljima tijekom lipnja i listopada nalazi se nizvodno od Metkovića.

6. Zaključak

Brojni stručnjaci i znanstvenici, ali i organizacije u svijetu bave se problemom zaslanjivanja priobalnih vodotoka. Da bi se ovi procesi spoznali i odgovarajuće opisali, provode se mjerenja fizikalnih parametara na rijekama te razvijaju odgovarajući numerički modeli.

U Hrvatskoj su u posljednjih nekoliko godina napravljena intenzivna mjerenja slanosti u donjem toku rijeke Neretve [4]. Utvrđeno je da je u svakom trenutku tečenje u rijeci uslojeno. Prikupljena mjerenja predstavljaju osnovu za razvoj numeričkih modela.

Uslojeno tečenje (slani klin) javlja se kod rijeka koje se ulijevaju u mora s relativno malom amplitudom morskih mijena (mikrotajdalna mora). Njihova su ušća povremeno ili čak tijekom cijele godine uslojena.

Procesi zaslanjivanja vodotoka i cirkulacije slatke, morske i bočate vode na riječnim ušćima ubrajaju se u vrlo složene dinamičke i stohastičke procese. Uvodeći određene pretpostavke razvijen je jednodimenzionalni model uslojenog tečenja bez miješanja među slojevima ("sharp interface"). Za rješavanje jednadžbi problema primijenjena je metoda konačnih elemenata (MKE).

Prikazana je primjena modela za simulaciju dinamike slanog klina na koritu Neretve u razdoblju od 10. lipnja do 31. listopada 2004. U ljetnom razdoblju intruzija slane morske

vode u područje je najintenzivnija, a s druge strane potreba za svježom čistom vodom vrlo je visoka zbog razvijene poljoprivredne proizvodnje na tom području.

Kalibracija modela provedena je na temelju provedenih mjerenja iz 2004. godine [4]. Dobivena granična ploha slojeva ("interface") ima relativno mala odstupanja od odgovarajućih mjerenja u longitudinalnom presjeku korita pa se ovakvo rješenje može smatrati pouzdanom procjenom stvarne halokline.

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da slani klin seže sve do Metkovića pri protocima svježe vode od približno 180 m³/s, do Opuzena za protoke približno od 280 m³/s, a do Rogotina kod protoka od približno 450 m³/s. Procjenjuje se da kod protoka većih od 500 m³/s ne dolazi do intruzije morske vode u korito rijeke. Ove vrijednosti odgovaraju približno stacionarnim uvjetima, pa ih se treba uzeti u obzir samo kao orijentacijske veličine. Treba istaknuti da je problem zaslanjivanja izrazito nestacionaran proces. Osim količina slatke vode koje dolaze u sustav, važno je i njihovo trajanje, jer zbog inercije vode sustav ne reagira trenutačno. Stoga za određeni protok dužina zaslanjenosti korita može biti bitno različita, ovisno o tome je li posrijedi faza intruzije morske vode ili njeno potiskivanje nizvodno.

Kada se uzmu u obzir spomenute karakteristične vrijednosti protoka ("threshold") i cjelogodišnji dotoci slatke vode s uzvodnog dijela sliva, može se procijeniti da klin seže do Metkovića i/ili uzvodno u više intervala tijekom godine, čije je ukupno godišnje trajanje oko četiri mjeseca. Riječno korito nije zaslanjeno samo u kraćim intervalima s vrlo velikim dotocima slatke vode, čije je ukupno godišnje trajanje tek oko mjesec dana.

Kod minimalnih protoka od 70 m³/s, slatka voda teče u površinskom sloju debljine oko metar na samome ušću, a u uzvodnom dijelu od Rogotina do Metkovića u sloju debljine od 2 do 3 metra.

Za daljnja istraživanja i preciznija modeliranja zaslanjivanja ostaje još mogućnosti, primjerice uključiti miješanje među slojevima, preciznije odrediti nizvodni rubni uvjet odnosno modelirati širenje slatke vode u priobalnom akvatoriju i dr. Prije svega treba i dalje provoditi monitoring kako bi se što bolje spoznali vrlo složeni fizikalni procesi.

Bez obzira na navedene daljnje mogućnosti, rezultati prikazani u ovome radu daju dobru simulaciju pomicanja slanog klina uzduž korita Neretve pa se primjena ovakvog modela može smatrati prikladnom za praktičnu uporabu kod raznih vodoprivrednih rješenja.

U svrhu zaštite od zaslanjivanja korita rijeke Neretve moguća je izvedba hidrauličke barijere kojom bi se zaustavio prodor slanog klina.

LITERATURA

- [1] Romić, D., Tomić, F., Marušić, J., Klačić, Ž., Vranješ, M.: *Kakvoća i mogućnost upotrebe vode za navodnjavanje u dolini Neretve*, 2. Hrvatska konferencija o vodama, 813-819, Dubrovnik 19.-22. svibnja, 1999.
- [2] Vidoš, D., Vranješ, M., Gereš, D., Romić, D.: *Navodnjavanje u području donje Neretve*, 2. Hrvatska konferencija o vodama, 805-811, Dubrovnik 19.-22. svibnja, 1999.
- [3] Romić, D., Vranješ, M., Ondrašek, G.: *Prodor morske vode i njen utjecaj na kakvoću površinskih voda u dolini Neretve*, 3. Hrvatska konferencija o vodama, 443-449, Osijek 28.-31. svibnja, 2003.
- [4] Vranješ, M. i suradnici: *Obrana od zaslanjivanja vode i tla u donjoj Neretvi*, Razvojni projekt, Građevinski fakultet Split i Hrvatske vode, 1995-2004.
- [5] Keulegan, G.H.: *The mechanism of an arrested saline wedge*, U: Ippen A.T. (ur), *Estuaries and coastline hydrodynamics*, 546-574, McGraw-Hill, 1966.
- [6] Haralambidou, K.I., Sylaios, G.K., Tsihrintzis, V.A.: *Testing alternatives for salt wedge management in an estuary with the use of monitoring and mathematical model*, Global Nest: the Int. J., Vol. 5, No. 2, 107-118, 2003.
- [7] Liu, W.C., Chen, W.B., Cheng, R.T., Hsu, M.H., Kuo, A.Y.: *Modeling the influence of river discharge on salt intrusion and residual circulation in Danshuei River estuary, Taiwan*. *Continental Shelf Res.*, 27, 900-921, 2007.
- [8] Legović, T.: *Exchange of water in stratified estuary with an application to Krka (Adriatic sea)*, *Marine Chemistry*, 32, 121-135, 1991.
- [9] Burić, Z., Viličić, D., Orlić, M., Smirčić, A., Kršinić, F., Gržetić, Z., Caput, K.: *Termohalni odnos i raspodjela planktona u estuariju rijeke Zrmanje (listopad 1998.)*, Druga hrvatska konferencija o vodama, 277-282, Dubrovnik 19.-22. svibnja, 1999.
- [10] Ibanez, C., Pont, D., Prat, N.: *Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries*, *Limnol. Oceanogr.* 42(1), 89-101, 1997.
- [11] Kurup, G.R., Hamilton, D.P., Patterson, J.C.: *Modelling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in Microtidal Estuary*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48, 191-208, 1998.
- [12] Juračić, M., Sondi, I., Rubinić, J., Pravdić V.: *Sedimentacija u neravnotežnom estuariju pod utjecajem rijeke: krški estuarij Raše (Hrvatska)*, Prvi hrvatski geološki kongres, Opatija, 1995.
- [13] Sierra, J.P., Sanchez-Arcilla, A., Figueras, P.A., Gonzalez Del Rio, J.; Rassnussen, E.K.; Mosso, C.: *Effects of Discharge Reductions on Salt Wedge Dynamics of the Ebro River*, *River Research and Applications*, 20, 61-77, 2004.
- [14] Kasai, A., Kurikawa, Y., Ueno, M., Robert, D., Yamashita, Y.: *Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86, 408-414, 2010.
- [15] Day, Jr. J.W., Maltby, E., Ibanez, C.: *River basin management and delta sustainability: A commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan*, *Ecol. Eng.*, 26, 85-99, 2006.
- [16] McNally, W.H., Pritchard, D.W.: *Salinity Control in Mississippi River under Drought Flows*, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 34-40, Jan/Feb, 1997.
- [17] Christodoulou, G.C.: *Interfacial mixing in stratified flows*, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24, 77-91, 1986.
- [18] Grubert, J.P.: *Interfacial Mixing in Stratified Channel Flows*, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.115, No.7, 887-905, 1989.
- [19] Grubert, J.P.: *Interfacial Mixing in Estuaries and Fjords*, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.116, No.2, 176-193, 1990.
- [20] Schijf, J.B., Schonfeld, J.C.: *Theoretical Consideration on the Motion of Salt and Fresh Water*, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, USA, 321-333, 1953.
- [21] Hodgins, D.O., Osborn, T.R., Quick, M.C.: *Numerical Model of Stratified Estuary Flows*, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, Vol. 103, 25-42, 1977.
- [22] Arita, M., Jirka, G.H.: *Two-Layer Model of Saline Wedge. I: Entrainment and Interfacial Friction*, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.113, No.10, 1229-1248, 1987.
- [23] Arita, M., Jirka, G.H.: *Two-Layer Model of Saline Wedge. II: Prediction of Mean Properties*, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.113, No.10, 1249-1263, 1987.
- [24] Wolanski, E., Chicharo, L., Chicharo, M.A., Morais, P.: *An ecohydrology model of the Guadiana Estuary (South Portugal)*, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 70, 132-143, 2006.
- [25] Vranješ, M. i suradnici: *Vodnogospodarsko rješenje sliva donje Neretve*, Građevinski fakultet Split, 1996.
- [26] Dermisis, V.: *Velocity Distribution in Arrested Saline Wedge*, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.116, No.1, 1990.
- [27] Jović, V., Vranješ, M.: *Matematički model nestacionarnog tečenja u prirodnim koritima i kanalima*, Deseto savjetovanje JDHI, Zbornik radova, 86-100, Sarajevo, 1990.
- [28] Jović, V.: *Uvod u inženjersko numeričko modeliranje*, Aquarius, Split, 1993.