

PRILOG UNAPREĐENJU SUSTAVA HIDROLOŠKIH MJERENJA PRIJELAZNIH VODA: HIDRAULIČKA I SPEKTRALNA ANALIZA PROTOKA NA RIJECI NERETVI

doc. dr. sc. Nino Kravica, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
Sveučilište u Rijeci, Centar za umjetnu
inteligenciju i kibernetičku sigurnost
Radmile Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska
nino.kravica@uniri.hr

prof. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb,
Hrvatska

dr. sc. Dijana Oskoruš, dipl. ing. građ.

Državni hidrometeorološki zavod
Ravnice 48, Zagreb, Hrvatska

doc. dr. sc. Igor Ružić, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
Radmile Matejčić 3, Rijeka, Hrvatska

U priobalnim rijekama koje su pod utjecajem uspora mora često nije moguće odrediti protok na osnovi izmjerenih vodostaja, odnosno jednoznačno definirati protočnu krivulju. Iz tog se razloga u Hrvatskoj još uvijek ne raspolaže pouzdanim podacima o dnevnim količinama slatke vode koja utječe u Jadransko more. Tehničkim razvojem ultrazvučnih strujomjera postigli su se uvjeti za poboljšanje hidroloških mjerenja prijelaznih voda. Prvi takav sustav kontinuiranog mjerenja protoka postavljen je 2015. godine na rijeci Neretvi u Metkoviću. U ovome radu provedena je hidraulička i spektralna analiza nove generacije mjerenja. U prvom je koraku pomoću numeričkog modela istražen utjecaj dinamike pridnenog sloja slane vode na izmjerene protoke u Metkoviću. Potom je provedena nestacionarna spektralna analiza kako bi se usporedili vremenski nizovi izmjerenih i modeliranih razina mora te vodostaja i protoka u Metkoviću, te kako bi se identificirao i okarakterizirao uzrok unutar dnevnih oscilacija protoka. Provedene su analize pokazale da dinamika slane vode u pridnenom sloju može imati značajan utjecaj na izmjerene vrijednosti protoka, posebno tijekom sušnog perioda. Numerička i spektralna analiza sugeriraju da unutar dnevnih oscilacija izmjerenih vodostaja i protoka djelomično imaju uzrok u plimnim oscilacijama, ali u većoj mjeri uzrok treba potražiti u oscilacijama dotoka s uzvodnog dijela sliva.

Ključne riječi: prijelazne vode, rijeka Neretva, mjerenje protoka, numerički model, STREAM 1D, uslojenost saliniteta, spektralna analiza, kontinuirana valična transformacija

1. Uvod

Prijelazne vode javljaju se u područjima kontakta priobalnog mora i kopna gdje plima i oseka znatno utječu na dinamiku toka slatkih voda. Prema Okvirnoj direktivi o vodama (ODV, 2000/60/EZ) prijelazne vode su tijela površinskih voda u blizini riječnih ušća, koja su djelomično slana uslijed blizine mora, ali se nalaze pod znatnim utjecajem slatkovodnih tokova. U jadranskom vodnom području prijelazne vode su

nizvodni tokovi priobalnih rijeka Dragonje, Raše, Mirne i Rječine, koje pripadaju istarsko-primorskim slivovima, te rijeka Zrmanje, Krke, Jadro, Cetine, Neretve i Omble, koje pripadaju dalmatinskim slivovima. Prema Planu upravljanja vodnim područjima (PUVP, 2016.) ukupna površina svih prijelaznih voda iznosi 160,7 km², pri čemu prijelazne vode rijeke Neretve zauzimaju najveću površinu



Slika 1: Tipovi prijelaznih voda s obzirom na intenzitet miješanja slane i slatke vode (Krvavica, 2016.).

(50 %), a slijede je prijelazne vode rijeke Zrmanje, Krke i Cetine.

U Planu upravljanja vodnim područjima (PUVP, 2016.) tipizacija prijelaznih voda provedena je prema sustavu B ODV-a, odnosno prema četiri obvezna kriterija: ekoregija, geografska širina i duljina, raspon plime i oseke te srednji godišnji salinitet; te jednim izbornim kriterijem: sastavom supstrata. Svih deset područja prijelaznih voda nalaze se u ekoregiji Sredozemnog mora te u mikroklimnim uvjetima (raspon oscilacija plime i oseke manji od 2 m), a razlikuju se prema preostala tri kriterija. Međutim, za hidrološke analize i prognoze potrebno je dodatno identificirati tipove prijelaznih voda i s obzirom na vertikalnu uslojenost. Naime, ovisno o intenzitetu miješanja između slane i slatke vode, prijelazne vode mogu se kategorizirati kao (Dyer, 1997.): a) izrazito uslojene, b) djelomično izmiješane i c) potpuno izmiješane. Pritom, intenzitet miješanja ovisi o vanjskim djelovanjima s kopna i mora, kao što su plimne oscilacije, valovi, dotoci slatke vode, vjetar te geometrija korita. Na slici 1 dan je prikaz tipične strukture ovih triju tipova prijelaznih voda.

Izrazito uslojene prijelazne vode nastaju u područjima s dominantnim djelovanjem rijeka (dotokom slatke vode) ili u morima s vrlo malim plimnim amplitudama, kao što je to Jadransko more. U ovome tipu prijelaznih voda prisutna je vertikalna uslojenost slane i slatke vode, s vrlo ostrim gradijentom saliniteta i gustoće vode (slika 1). U idealnim uvjetima, površinski sloj slatke vode jasno je odvojen od pridnenog sloja slane vode, koji se u literaturi često naziva *slanim klinom* (Hansen i Rattray, 1966.). Tipični primjer strukture slanog klina javlja se u priobalnim rijekama Sredozemnog mora, kao što su rijeke Ebro, Rona i Po. Rijeka Mississippi (SAD) rubni je primjer slanog klina, dok su rijeke Amazona (Brazil), Fraser (Kanada) i Merrimack (SAD) tipični primjeri nestacionarnog slanog klina, u kojem je moguće i raslojavanje dvoslojne strukture s obzirom na ciklus plime i oseke ili sezonske promjene protoka slatke vode (Geyer i Ralston, 2011.). S obzirom na izrazito male amplitude plime i oseke, prijelazne vode na svim rijekama jadranskog slivnog područja mogu se kategorizirati kao izrazito uslojene (klasični slani klin) s karakterističnom dvoslojnom strukturom. Izražena vertikalna uslojenost potvrđena je i terenskim mjerenjima profila saliniteta u rijekama Neretvi (Ljubenković i Vranješ, 2012.), Jadro (Ljubenković, 2014.) i Rječini (Krvavica i sur., 2016.).

Razumijevanje dinamike toka u prijelaznim vodama važno je za učinkovito upravljanje vodama i provedbu aktivnosti kao što su: a) prognoziranje i zaštita od poplava, prodora slane vode i zaslanjenja tla; b) definiranje bioloških minimuma; c) procjene utjecaja jaružanja kanala ili porasta razine mora; d) odabir optimalne lokacije zahvata slatke vode za navodnjavanje; ili e) procjene pronosa nanosa (Geyer i Ralston, 2011.). Ključni preduvjet za razumijevanje i prognoziranje dinamike toka je uspostava pouzdanog sustava mjerenja vodostaja i protoka rijeke (Cai i sur., 2014.). Jedna od najjednostavnijih metoda za određivanje protoka su protočne (konsumpcijske) krivulje, koje definiraju funkcionalnu zavisnost između vodostaja i protoka na određenom profilu rijeke (Jones i sur., 2019.). Izvan utjecaja uspora mora protočne su krivulje relativno konstantne i smatraju se dovoljno pouzdanima, stoga je uobičajena praksa u Hrvatskoj protoke proračunati iz izmjerenih vodostaja i protočne krivulje koja se definira na osnovi više pojedinačnih vodomjerenja, po mogućnosti jednoliko raspoređenih po visini vodostaja. Međutim, u priobalnim je rijekama lokalna razina vode često rezultat nelinearne interakcije između protoka slatke vode te dinamike plime i oseke (Cai i sur., 2014.; Jones i sur., 2019.). U takvim uvjetima nije uvijek moguće uspostaviti jednoznačan odnos između vodostaja i protoka, a protočna krivulja ima nestacionarni karakter i poprima oblik petlje (Jones i sur., 2019.). Iz tog se razloga u Hrvatskoj još uvijek ne raspolaže pouzdanim i potpunim podacima o količinama slatke vode koje utječu u Jadransko more.

U posljednjih je desetak godina predloženo više različitih pristupa za kontinuirano praćenje protoka u priobalnim rijekama pod utjecajem uspora mora, koji imaju uporište u primjeni naprednih računalnih metoda ili ugradnji dodatnih, često i skupih, mjernih uređaja. U tu se svrhu najčešće koriste nestacionarni numerički modeli (Warner i sur., 2005.), metode strojnog učenja (Hidayat i sur., 2014.), spektralne analize vodostaja (Moftakhari i sur., 2013.), metode indeksne brzine u kombinaciji s mjerenjima profila brzine (Chen i sur., 2012.) ili se ugrađuju horizontalni ultrazvučni Dopplerovi strujomjeri (H-ADCP) (Hoitink i sur., 2009.; Sassi i sur., 2011.).

Fokus predmetnog rada usmjeren je na rijeku Neretvu, čije prijelazne vode čine više od 50 % svih prijelaznih voda u Hrvatskoj (PUVP, 2016.). Zbog važnosti ovog područja iz perspektive zaštite od zaslanjivanja i zaštite od poplava, ali i procjene ukupnih količina slatke vode koje dotječu iz susjedne Bosne i Hercegovine te utječu u priobalno more, 2015. godine uspostavljen je sustav kontinuiranog mjerenja protoka i elektrovodljivosti pomoću H-ADCP i CTD uređaja, stalno postavljenih u Metkoviću (slika 2). Protok iz ADCP mjerenja se određuje pomoću internog algoritma koji je sastavni dio mjernog sustava, ali osnovni princip je integriranje izmjerenog polja brzina po površini poprečnog presjeka. Na temelju preliminarnih analiza izmjerenih protoka i elektrovodljivosti (Oskoruš i sur., 2018.), zaključeno je

kako u vremenskom nizu satnih protoka postoje vrlo izražene unutardnevne oscilacije, nepoznatog uzroka, a koje doprinose nesigurnosti prilikom procjene srednjih dnevnih protoka, posebno pri malim dotocima tijekom ljetnih mjeseci. Pored toga, prisutnost sloja slane vode u pridnenom sloju u Metkoviću također može imati nezanemariv doprinos spomenutim oscilacijama protoka, a koji do sada još nije jasno kvantificiran.

Cilj predmetnog istraživanja je pobliže istražiti fizikalne procese u prijelaznim vodama rijeke Neretve s naglaskom na promjene vodostaja i protoka pod utjecajem oscilacija plime i oseke te dotoka s uzvodnog dijela sliva. Pritom, dva su specifična cilja ovoga rada:

- I. Istražiti dinamiku pridnenog sloja slane vode (slanog klina) te kvantificirati njegov doprinos ukupnim protocima rijeke Neretve pomoću numeričkog modela dvoslojnog toka (STREAM 1D). U tu svrhu potrebno je prvo kalibrirati i validirati navedeni model te potom provesti kontinuirane simulacije za recentno razdoblje.
- II. Istražiti porijeklo unutardnevnih oscilacija protoka izmjerenih u Metkoviću pomoću numeričkih simulacija te nestacionarne spektralne analize vremenskih nizova, odnosno utvrditi u kojoj mjeri su ove oscilacije rezultat dinamike plime i oseke, a u kojoj mjeri rezultat prirodnih ili antropogenih procesa na uzvodnom dijelu sliva.

2. RIJEKA NERETVA

Rijeka Neretva najveća je rijeka istočne obale Jadranskog mora. Ukupne je duljine 215 km, većim dijelom protječe kroz Bosnu i Hercegovinu (BiH), a utječe u Jadransko more kod Ploča. Završni nizvodni tok duljine 22 km nalazi se na području Hrvatske gdje formira široku aluvijalnu deltu sa složenom hidromelioracijskom mrežom. Površina njezinog sliva iznosi oko 10.240 km², od čega se oko 280 km² nalazi u Hrvatskoj (Ljubenković i Vranješ, 2012.).

2.1. Opća obilježja prijelaznih voda rijeke Neretve

Prijelazne vode rijeke Neretve obuhvaćaju cjelokupno područje rijeke nizvodno od granice s BiH, sva površinska vodna tijela u delti Neretve te dio priobalnih voda u kojima je prosječni godišnji salinitet manji od 20 PSU-a. Kopneni dio prijelaznih voda okarakteriziran je kao oligohalini estuarij krupnozrnatog sedimenta, a priobalni dio kao mezohalini i polihalini estuarij sitnozrnatog sedimenta (PUVP, 2016.). Delta Neretve jedno je od najvažnijih i najplodnijih poljoprivrednih područja u Hrvatskoj, koje pokriva blizu 5.200 ha obrađenih površina (Racetin i sur., 2020.). Nažalost, blizina mora predstavlja prijetnju budućnosti poljoprivrede na ovom području, zbog sve izraženije i učestalije pojave zaslanjenja tla te prodora slane vode duž korita Neretve tijekom ljetnih mjeseci (Racetin i sur., 2020.; Srzić i sur., 2020.). Već duži niz godina provodi se detaljan monitoring zaslanjivanja na ovom području, koje ukazuje na činjenicu da je skoro 40 % svih poljoprivrednih površina povremeno zaslanjeno

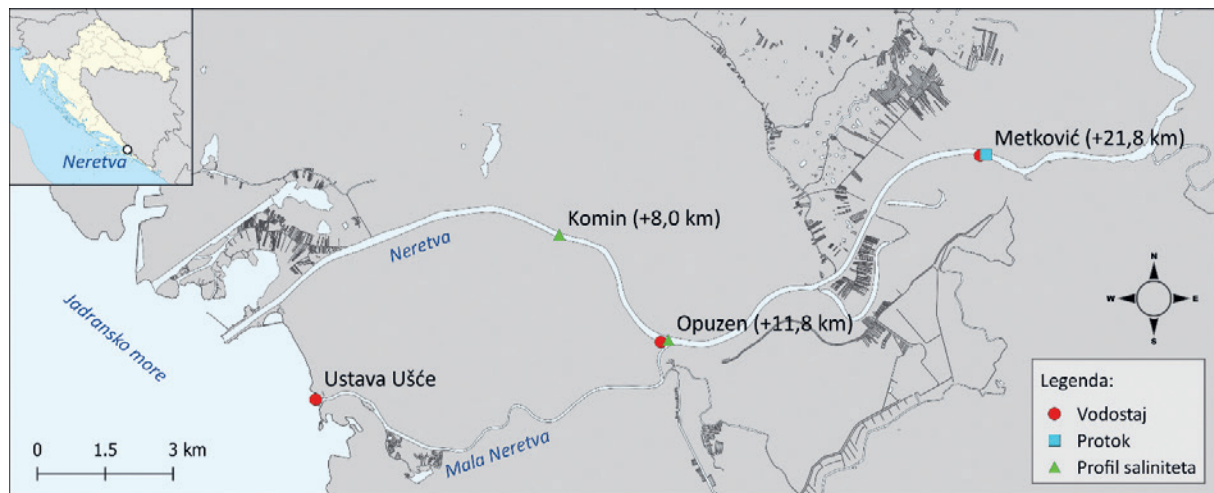
(Racetin i sur., 2020.). Očekuje se da će problemi za prodorom soli postajati sve ozbiljniji uslijed klimatskih varijacija i promjena, prvenstveno izdizanja razine mora, kao i smanjenja dotoka slatke vode s uzvodnog dijela sliva (Krvavica i Ružić, 2020.). Kao jedno od mogućih mjera za ublažavanje posljedica prodora slane vode i zaslanjivanja tla, prihvaćeno je rješenje izgradnje pomične pregrade u koritu Neretve, čije funkcioniranje je nedavno istraženo putem modelskih analiza (Lončar i sur., 2020.).

Protok Neretve ima tipični sezonski karakter, velike vode se obično javljaju u razdoblju od studenog do travnja, a male vode od svibnja do listopada. Dotok s uzvodnog dijela sliva ovisan je o upravljanju postojećim hidroenergetskim sustavom koji se sastoji od pet izgrađenih akumulacija u gornjem i srednjem toku Neretve na području BiH. Nakon izgradnje hidroelektrana (HE), na Neretvi više ne postoji prirodni režim malih voda već se nizvodno ispušta kontrolirani minimalni protok iz HE Mostar (Oskoruš i sur., 2019.). Nizvodno od HE Mostar, na dionici koja se proteže do Metkovića, Neretva prihvaća tri veća pritoka (Trebizat, Bregava i Krupa). Količine slatke vode ovih triju pritoka određuju se pomoću postojećih vodomjernih stanica. U kišnom razdoblju zbroj ovih dotoka može iznositi i po nekoliko desetaka m³s⁻¹, dok u sušnom razdoblju njihovi dotoci rijetko kada prelaze svega nekoliko m³s⁻¹ (Ljubenković i Vranješ, 2021.). Na potezu od Metkovića do Opuzena rijeka Neretva prihvaća prtok rijeke Norin, međutim doprinos ovog pritoka teško je procijeniti jer je pod stalnim usporom vodostaja Neretve, odnosno posredno pod usporom mora.

Periodička mjerenja i analize prodora slane vode u koritu Neretve provode se duži niz godina. Analizom terenskih mjerenja provedenih tijekom 2004. godine te nizom numeričkih simulacija zaključeno je da se sloj slane vode u Metkoviću pojavljuje pri protocima manjima od 180 m³s⁻¹, dok pri protocima većima od 500 m³s⁻¹ površinski sloj slatke vode gotovo u potpunosti istisne sloj slane vode iz korita rijeke (Ljubenković i Vranješ, 2012.). Ovo istraživanje nadopunjeno je 2021. godine nizom numeričkih simulacija i komparacijom s kontinuiranim mjerenjima protoka i elektrovodljivosti provedenima u razdoblju od 2015. - 2018. godine (Krvavica i sur., 2021.). U navedenom radu, potvrđeno je kako duljina prodora slanog klina u Neretvi prvenstveno ovisi o protoku slatke vode, ali djelomično i o razini mora koja utječe na unutardnevne oscilacije. Pritom je precizno identificirana funkcionalna zavisnost maksimalne duljine prodora slanog klina o protoku slatke vode.

2.2. Hidrološka mjerenja i podloge

Na rijeci Neretvi uspostavljene su dvije hidrološke postaje (slika 2). Hidrološka postaja Neretva-Metković počela je s radom u srpnju 1934. godine, od kada i postoje podaci o vodostajima. Vodokaz je postavljen na lijevoj obali Neretve, na kamenom obalnom zidu nizvodno od kolnog mosta u Metkoviću, a u prosincu 1957. godine postaja je opremljena limnigrafom. Kota



Slika 2: Karta nizvodnog toka rijeke Neretve s označenim položajima mjernih postaja vodostaja i protoka te lokacijama terenskih mjerenja profila saliniteta.

nule nije se mijenjala do današnjeg dana iako postoji nekoliko kraćih prekida motrenja vodostaja u godinama 1940., 1944. i 1945. Osim vodostaja, na ovoj postaji se od 1948. sa prekidima mjeri i temperatura vode, a od 1954. godine izvršeno je ukupno 96 pojedinačnih mjerenja protoka. Vodostaj mjeri se od 1972. godine vršila pomoću hidrometrijskog krila, a od 2004. godine mjerenja protoka se vrše ultrazvučnim strujomjerima. Na hidrološkoj postaji Neretva-Opuzen vodostaji se mjere od 1936. do današnjeg dana, sa prekidima motrenja u razdoblju 1940. - 1945. godine, a satni vodostaji postoje od 1982. godine.

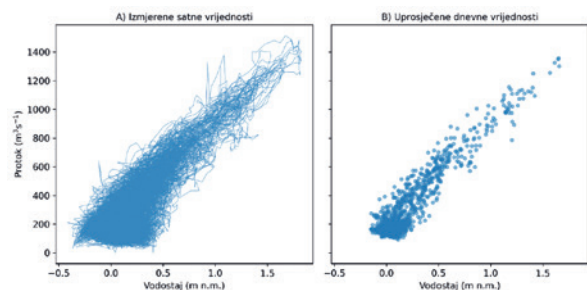
Hidrološka postaja Mala Neretva-Opuzen ustava nizvodno uspostavljena je u siječnju 1976., a podaci o vodostajima postoje od 1977. godine do danas, sa kratkim prekidom od lipnja 2004. do siječnja 2005. godine, zbog radova na rekonstrukciji ustave. U ožujku 2010. postavljen je limnigraf i od tada postoje satne vrijednosti vodostaja. Postaja Mala Neretva-Ustava ušće nizvodno počela je sa radom u veljači 1976., kada je postavljen vodokaz na brani, s nizvodne strane, a od ožujka 1990. postoji kontinuirani limnigrafski zapis satnih vodostaja. Limnigraf s vodokaznom letvom se nalazi 50 m istočno od brane, na novoizgrađenom moliću. Na ovoj hidrološkoj postaji postoji neprekinuti niz razina vode (mora) od 1977. godine do danas. Od 2014. godine sve navedene hidrološke postaje su postale automatske, što znači da daljinskom dojavom stižu podaci u približno realnom vremenu (slika 2).

Sredinom 2015. godine u rijeci Neretvi uspostavljeno je i kontinuirano mjerenje protoka i elektrovdljivosti u Metkoviću. Mjerna oprema postavljena je u profilu cestovnog mosta, oko 90 m uzvodnije od postojeće hidrološke postaje u Metkoviću (slika 2). U tu svrhu ugrađena su tri ultrazvučna strujomjera *Channel Master H-ADCP* u svaki od tri otvora mosta, višeparameterska sonda *Eureca Manta 2* za mjerenje fizikalno-kemijskih parametara kakvoće vode te CTD sonda *TruBlue 585* za mjerenje elektrovdljivosti u površinskom sloju i pri dnu korita radi kontrole prisutnosti slane vode.

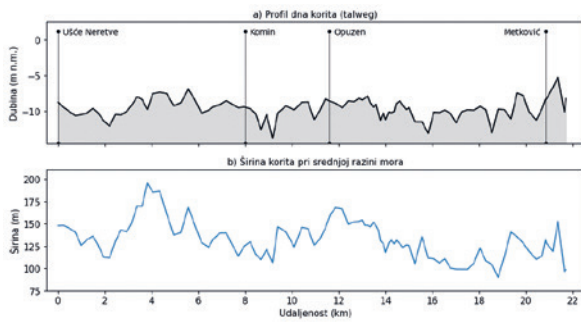
Ukupni protok rijeke Neretve se računa zbrajanjem istovremeno zabilježenih vrijednosti protoka na svakom od tri ultrazvučna mjerača. Svaki mjerac protok računa integriranjem polja brzine po površini poprečnog presjeka u svakom otvoru. Pored navedenog kontinuiranog mjerenja, provode se i povremena dopunska mjerenja protoka, a tijekom 2015. godine provedeno je mjesečno mjerenje profila temperature i elektrovdljivosti na lokacijama Komina i Opuzena, iz čega su određeni i vertikalni profili saliniteta i gustoće (Kravica i sur., 2021.).

Na slici 3 prikazana je usporedba satnih vrijednosti izmjerenih vodostaja i protoka Neretve u Metkoviću te uprosječene dnevne vrijednosti za razdoblje od 2017. do 2019. godine. Iz danog se prikaza može primijetiti nestacionarni karakter protočne krivulje iz koje nije moguće odrediti jedinstvenu funkcionalnu zavisnost protoka o vodostaju rijeke čak ni pri visokim protocima. Nažalost niti prosječne dnevne vrijednosti ne daju jasniju sliku zbog znatnih odstupanja protoka pri istim vodostajima (slika 3b).

Na hidrološkoj postaji Neretva-Metković se također mjere i dnevne vrijednosti temperature vode. Temperature i saliniteti mora preuzeti su iz *Copernicus Monitoring Environment Marine Service* (CMEMS) baze podataka (Clementi i sur., 2021.), također u dnevnoj rezoluciji za lokaciju neposredno ispred ušća Neretve. Gustoće slatke i



Slika 3: Međuodnos izmjerenih protoka i vodostaja na postaji Neretva-Metković iz kontinuiranih mjerenja tijekom razdoblja 2017. - 2019. a) izmjerene satne vrijednosti, b) uprosječene dnevne vrijednosti.



Slika 4: Uzdužni profil rijeke Neretve: a) dubine dna korita (talweg), b) širine korita pri srednjoj razini mora.

slane vode potom su proračunate iz poznatih vrijednosti temperature i saliniteta, koristeći poznate empirijske izraze (Fofonoff, 1985.).

Nedavno je (2020. godine) izrađen i novi geodetski snimak cijelog korita Neretve što je omogućilo generiranje digitalnog modela terena za provedbu numeričkih simulacija. Na slici 4 prikazani su uzdužni profili dna kanala (*talweg*) i širine kanala pri srednjoj razini mora. Prosječna dubina korita iznosi -9,6 m n. v., a prosječna širina pri srednjoj razini mora 132 m, oboje bez primjetnog trenda na dionici od ušća do Metkovića.

3. METODOLOGIJA

Postavljeni ciljevi ovog istraživanja ostvarit će se putem dvaju računalnih metoda: a) numeričkim analizama pomoću hidrauličkog modela dvoslojnog toka te b) nestacionarnim spektralnim analizama pomoću kontinuirane *wavelet* transformacije. Obje metode će se poblizje opisati u nastavku.

3.1. Numerički model dvoslojnog toka

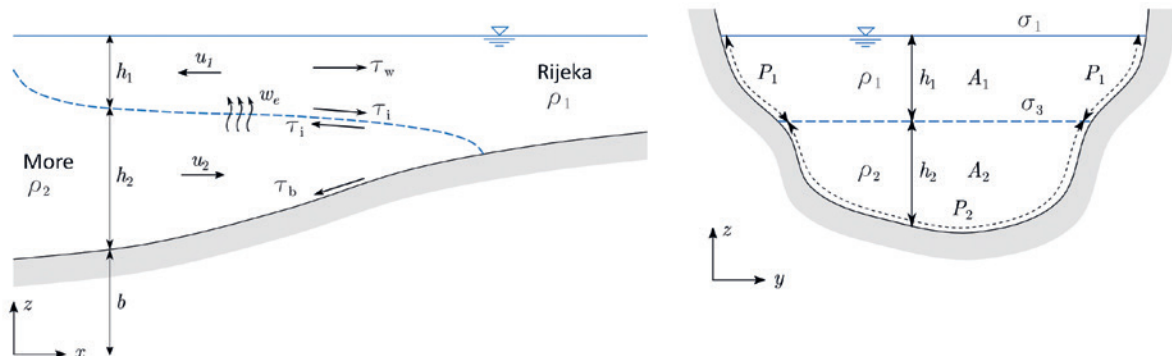
Hidraulički proračun nestacionarnog toka duž korita rijeke Neretve proveden je pomoću numeričkog modela *STRatified EstuArine Model* (STREAM 1D) (Krvavica i sur. 2017a,b). Navedeni model je jednodimenzionalan (1D) te opisuje dvoslojni tok fluida različite gustoće u koritima proizvoljne geometrije, a primarna mu je namjena simulacija nestacionarnog toka u izrazito uslojenim priobalnim rijekama koje su pod utjecajem dinamike

mora i dotoka slatke vode. STREAM 1D prethodno je korišten u različitim studijama priobalnih rijeka Rječine (Krvavica i sur., 2017.a,b) i Neretve (Krvavica i Ružić 2020., Krvavica i sur., 2021.), u okviru kojih je analizirana dinamika slanog klina, kao i utjecaj promjenjivog protoka te podizanja razine mora na dinamiku slojeva slane i slatke vode u ovim rijekama. U navedenim radovima, pokazalo se kako model ima vrlo visoku preciznost u prognoziranju dinamike slanog klina.

Procesne jednadžbe modela STREAM 1D izvedene su iz dvoslojnog sustava jednadžbi plitkih voda (engl. *shallow water equations*, SWE), uz sljedeća pojednostavljenja i pretpostavke (Krvavica i sur. 2017b): a) zbog jake uslojenosti vertikalna struktura može se opisati s dva sloja različitih gustoća koja su odvojena piknoklinom zanemarive debljine, b) vertikalni profil brzine i gustoće u svakom sloju je konstantan, c) vertikalna ubrzanja su jednaka nuli, d) pritisak u svakom sloju je hidrostatski, e) nagib dna kanala je blag, te f) viskozni procesi poput trenja i turbulencije se mogu opisati jednostavnim empirijskim jednadžbama. Iz ovih pretpostavki može se izvesti sustav četiri parcijalne diferencijalne jednadžbe koje slijede iz zakona očuvanja mase i očuvanja količine gibanja. Potpuni opis i izvod ovih jednadžbi dostupan je u prethodnim radovima autora (Krvavica i sur. 2017a,b), a grafička shema STREAM 1D modela s prikazom karakterističnog uzdužnog i poprečnog presjeka korita rijeke dana je na slici 5.

Sustav procesnih jednadžbi rješava se poluanalitičkom Roeovom shemom koja je izvedena u okviru metode konačnih volumena (Krvavica i sur., 2018.). Ovo je eksplicitna shema, stabilna uz zadovoljavanje klasičnog Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) uvjeta, a usporedbom sa sličnim numeričkim pristupima pokazala se kao najučinkovitija numerička shema prvog reda točnosti (Krvavica, 2020.).

Kako bi se uspostavio numerički model dvoslojnog toka potrebno je definirati i zadati četiri rubna uvjeta, za mirni režim toka to su dva rubna uvjeta na nizvodnom i dva na uzvodnom rubu domene modela. Na uzvodnom rubu domene obično se zadaju vrijednosti protoka u površinskom i pridnom sloju. Pritom se zbog stabilnosti modela preporuča domenu definirati na način da uzvodni



Slika 5: Shematski prikaz uzdužnog i poprečnog presjeka priobalnih rijeka za uslojeni dvoslojni tok.

rub modela bude postavljen uvijek izvan maksimalnog dosega pridnenog sloja.

Nizvodni rub domene najčešće se postavlja na tzv. hidraulički kontroliranom profilu u kojem se ostvaruje unutarnji (dvoslojni) kritični tok. U prirodnim uvjetima, unutarnji kritični tok se javlja na područjima naglog suženja ili proširenja korita, kao što je samo ušće rijeke (Armi i Farmer, 1986.). Slično kao i u klasičnoj definiciji kritičnog toka za jednoslojne sustave, unutarnji kritični tok u dvoslojnim sustavima javlja se kada je kompozitni Froudeov broj jednak jedinici, što je definirano sljedećim izrazom:

$$G^2 = F_{d1}^2 + F_{d2}^2 - (1 - r) \frac{\sigma_2}{\sigma_3} F_{d1}^2 F_{d2}^2 = 1, \quad (1)$$

pritom je denzimetrijski Froudeov broj površinskog F_{d1}^2 i pridnenog sloja F_{d2}^2 definiran izrazima:

$$F_{d1}^2 = \frac{Q_1^2 \sigma_1}{g(1-r)A_1^3 \sigma_2} \quad \text{i} \quad F_{d2}^2 = \frac{Q_2^2 \sigma_3}{g(1-r)A_2^3}, \quad (2)$$

gdje su Q_1 i Q_2 protoci u površinskom i pridnenom sloju, g je ubrzanje gravitacije, σ_{123} karakteristične širine kanala, $r = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_{sr}}$ je relativni omjer gustoća dvaju fluida, ρ_1 i ρ_2 su gustoće slatke vode u površinskom sloju, odnosno gustoće slane vode u pridnenom sloju, ρ_{sr} je prosječna gustoća dvaju fluida, a A_1 i A_2 su površine omočenog poprečnog presjeka površinskog i pridnenog sloja. Točnost i pouzdanost rubnog uvjeta danog Jed. (1) i (2) u izrazito uslojenim priobalnim rijekama analizirana je u prethodnoj studiji na rijeci Rječini gdje je potvrđeno dobro slaganje izmjerenih i izračunatih dubina razdjelnice između dvaju slojeva na samom ušću (Krvavica i sur., 2016).

U predmetnoj analizi nizvodni rubni uvjet postavljen je na samom ušću rijeke Neretve, gdje je zadana ukupna razina vode koja odgovara izmjerenim vrijednostima na postaji Mala Neretva–Ustava ušće nizvodno. Dubina razdjelnice izračunata je iterativno iz izraza (2) pomoću kojeg su određene i dubine površinskog i pridnenog sloja. Uzvodni rubni uvjet postavljen je na stacionaži +25,0 km od ušća, približno 4 km uzvodno od postaje Neretva–Metković, kako bi se osiguralo da slani klin ne prodire uzvodnije od ovog profila te je zadan protok u površinskom sloju koji odgovara izmjerenim protocima u Metkoviću.

Odgovarajući početni uvjet definiran je u dva koraka. Prvo je proveden barotropni stacionarni proračun uz pretpostavku prisutnosti samo površinskog sloja slatke vode za unaprijed definirane vrijednosti protoka rijeke Neretve (uzvodni rubni uvjet) i razine mora (nizvodni rubni uvjet) kako bi se odredio uzdužni profil ukupne razine vode. U drugom je koraku provedena baroklinska

nestacionarna analiza dvoslojnog toka uz fiksiranje rubnih uvjeta dok se ne postigne stacionarno rješenje. Konačni rezultat ove analize korišten je kao početni uvjet za buduće simulacije.

3.2. Nestacionarna spektralna analiza

Vremenski nizovi unutar dnevnih oscilacija izmjerenih protoka i vodostaja Neretve u Metkoviću uspoređeni su s oscilacijama razina mora na ušću Male Neretve pomoću nestacionarne spektralne analize. U tu svrhu primijenila se kontinuirana *wavelet* transformacija (CWT) kako bi se direktno usporedila prisutnost i snaga pojedinih harmonijskih komponenti iste ili slične frekvencije tijekom promatranog razdoblja. CWT je široko prihvaćena metoda i efikasan alat za analiziranje nestacionarnih fizikalnih procesa pod utjecajem plimnih oscilacija. Ova se metoda često primjenjuje pri analizi propagacije i deformacije plimnih valova u priobalnim rijekama (npr., Jay i Flinchem, 1997.; Sassi i Hoitink, 2013.; Guo i sur., 2015.). CWT metoda koristi *wavelet* transformaciju kao pojasni filter primijenjen na vremensku seriju signala. Na taj se način jednodimenzionalni ulaz (vremenska serija) pretvara u dvodimenzionalni izlaz u vremensko-frekventnoj domeni, istodobno rješavajući i dominantne frekvencije, kao i varijacije pojedinih signala u vremenu (Jay i Flinchem, 1997.; Torrence i Compo, 1998.).

Kontinuirana *wavelet* transformacija koristi konvoluciju vremenske serije signala x_k , ($k=1,2..M$), a definirana je sljedećim izrazom (Guo i sur., 2015.):

$$W_{k(s)} = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{k'=1}^M x_{k'} \psi \left[(k' - k) \frac{\delta t}{s} \right], \quad (3)$$

gdje je s *wavelet* skala (najčešće zadana kao niz frekvencija), k i k' su indeksi vremenske serije, δt je vremenski korak serije x_k (1h u ovome radu), M je duljina vremenske serije, a ψ je normalizirana *wavelet* funkcija koja ima jediničnu energiju na svakoj skali. *Wavelet* amplituda $|W_{k(s)}|$, kao i *wavelet* snaga $|W_{k(s)}|^2$ aproksimirani su variranjem *wavelet* skale s uz translaciju *wavelet* funkcije ψ duž lokaliziranog indeksa vremena k .

CWT zahtjeva definiranje *wavelet* funkcije čiji oblik je primjeren za analizu plimnih oscilacija. U ovome radu odabrana je Morlet funkcija u skladu s preporukama prethodnih istraživanja (Torrence i Compo, 1998.; Sassi i Hoitink, 2013.; Guo i sur., 2015.), koja je definirana sljedećim izrazom:

$$\psi(\gamma) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \gamma} e^{-1/2\gamma^2}, \quad (4)$$

gdje je ω_0 bezdimenzionalna frekvencija (u ovome radu jednaka 6), a γ bezdimenzionalno vrijeme. Osim što je Morlet funkcija svojim oblikom primjeren za plimne oscilacije, njezina prednost je činjenica da je *wavelet* skala ove funkcije skoro identična Fourierovom periodu (Torrence i Compo, 1998.).

4. REZULTATI I DISKUSIJA NUMERIČKIH ANALIZA

Definirano je nekoliko različitih scenarija numeričkih proračuna toka rijeke Neretve, pri čemu su provedene simulacije za nepotpunu 2015. godinu te kontinuirano razdoblje od 2017. do 2019. godine. Model je prvo kalibriran na temelju niza iz 2015. godine (svibanj - prosinac). Iako je niz nepotpun, ova je godina odabrana zbog dostupnosti detaljnih mjesečnih mjerenja vertikalnog profila saliniteta i temperature na dvije lokacije (Komin i Opuzen), a koja su omogućila precizniju kalibraciju koeficijenta trenja na razdjelnici. Za validaciju modela odabrana je 2018. godina zbog najpotpunijeg niza podataka, ne samo vodostaja i protoka, već i saliniteta u Metkoviću. Procjena utjecaja dinamike pridnenog sloja slane vode na tok Neretve, prodor slanog klina te specifično na vodostaje i protoke u Metkoviću provedena je na temelju trogodišnjeg niza podataka od 2017. do 2019. godine.

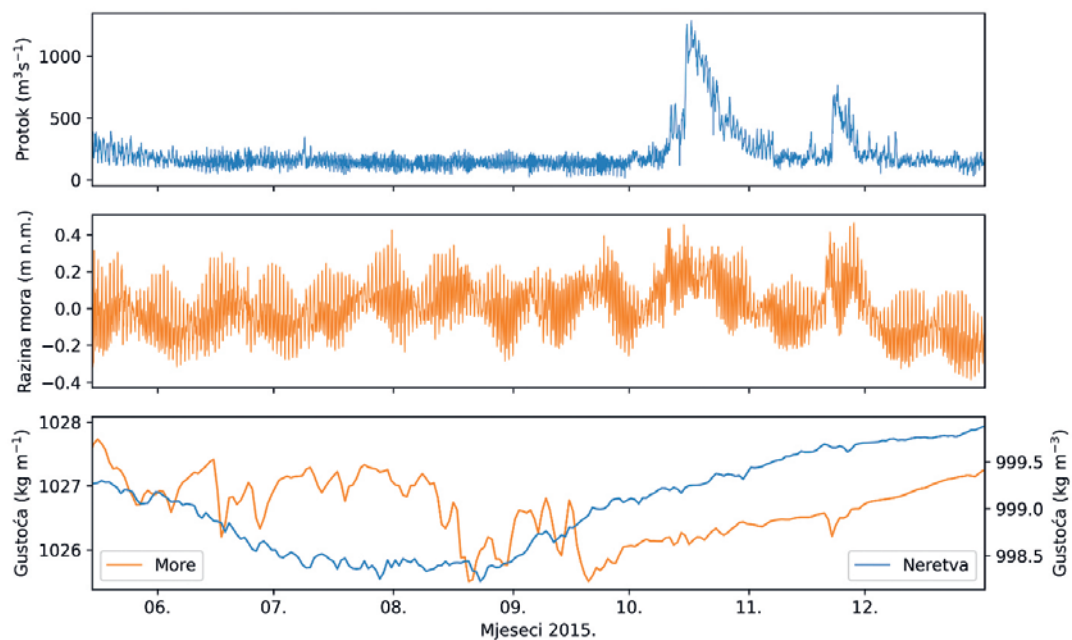
U svim su navedenim scenarijima na nizvodnom rubu domene zadani izmjereni nizovi satnih razina mora, a na uzvodnom rubu izmjereni nizovi satnih protoka. Uz to je provedena i jedna „kontrolna“ simulacija na temelju niza iz 2018. godine, u kojoj je uzvodni rub domene pomaknut na stacionažu + 40 km od ušća te je kao rubni uvjet zadan uprosječeni dnevni niz protoka, kako bi se eliminirale unutardnevne oscilacije prisutne u nizu izmjerenih protoka. Rezultati ove analize prikazani su u narednom poglavlju u kojem se analiziraju uzroci unutardnevnih oscilacija protoka. Tijekom svih numeričkih simulacija prostorna domena modela podijeljena je na konačne volumene duljine $\Delta x = 50$ m, a vremenski korak je adaptivno prilagođavan kako bi se zadovoljio uvjet

stabilnosti $CFL = 0.9$. Ubrzanje gravitacije je zadano s vrijednosti $g=9.8 \text{ ms}^{-2}$.

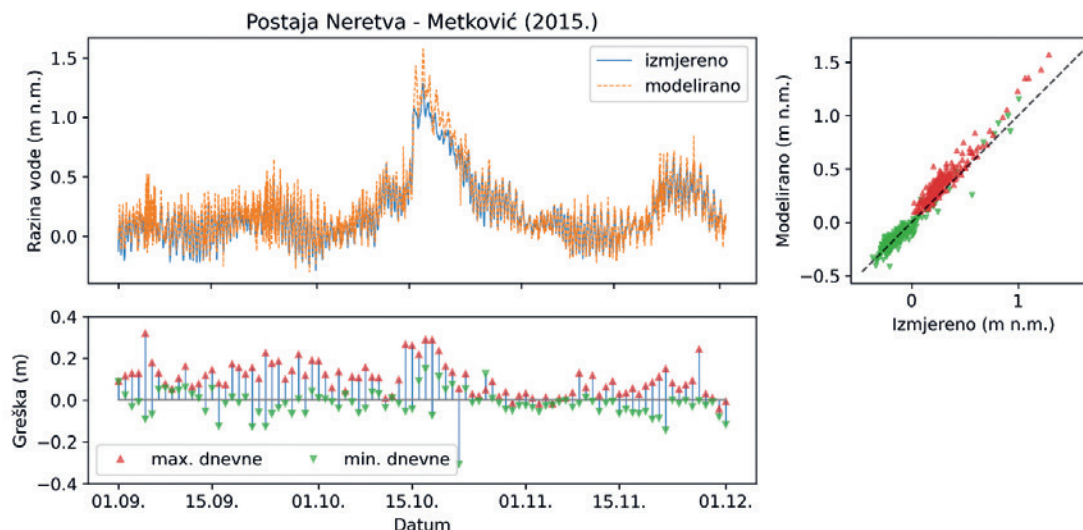
4.1. Kalibracija numeričkog modela

Cilj kalibracije modela je odabir odgovarajućeg Manningovog koeficijenta trenja n između fluida i korita rijeke Neretve te faktora trenja f na razdjelnici između dvaju fluida različitih gustoća. Treba napomenuti kako je kalibracija modela STREAM 1D za rijeku Neretvu provedena u prethodnom radu autora (Krvavica i sur., 2021.), međutim ista je ponovljena u okviru predmetnog istraživanja s obzirom na novi geodetski snimak korita Neretve te dodatno uključivanje podataka o dnevnim promjenama gustoće slatke i slane vode.

Na slici 6 prikazane su izmjerene vrijednosti protoka na postaji Neretva–Metković, razine mora na postaji Mala Neretva–Ustava ušće nizvodno, gustoće morske vode izračunate na osnovi temperature i saliniteta mora te gustoće riječne vode izračunate na osnovi izmjerenih temperatura vode za period od sredine svibnja do kraja 2015. godine. Ljetni period 2015. godine (lipanj - rujanj) karakterizira kontinuirano niski prosječni protok od $144 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ uz izražene unutardnevne oscilacije (standardna devijacija $41 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Zabilježena su i dva izraženija vodna vala te godine i to tijekom jeseni, prvi se javio u listopadu s maksimalnim satnim protokom od $1284 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a drugi krajem studenog s maksimalnim satnim protokom od $766 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U navedenom je razdoblju razina mora varirala između $-0,39$ i $+0,46$ m n. v., uz prosječnu amplitudu od 17 cm. Gustoća mora kretala se od $1025,5$ do 1028 kg m^{-3} , dok se gustoća slatke vode kretala između $998,2$ i $999,9 \text{ kg m}^{-3}$, oboje s najnižim vrijednostima zabilježenima tijekom kolovoza.



Slika 6: Izmjereni satni nizovi protoka rijeke Neretve u Metkoviću, razina mora na ušću Male Neretve te gustoće mora i rijeke tijekom razdoblja V – XII 2015. godine.



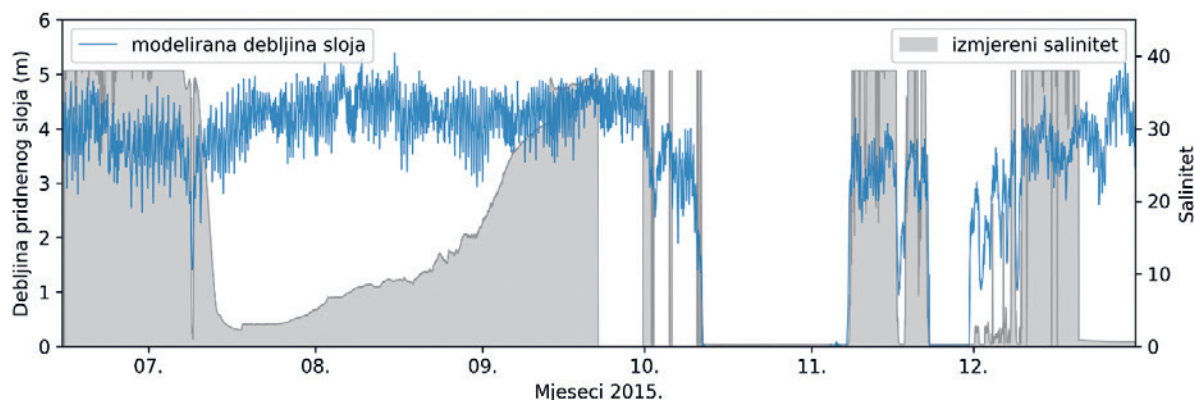
Slika 7: Usporedba i korelacija modeliranih i izmjerenih razina vode na hidrološkoj postaji Neretva-Metković za odabrana tri mjeseca 2015. godine s procjenom grešaka.

Slika 7 prikazuje usporedbu modeliranih i izmjerenih razina vode na postaji Neretva– Metković tijekom tromjesečnog razdoblja krajem 2015. godine. Najbliže vrijednosti izmjerenima ostvarene su za Manningov koeficijent hrapavosti $n=0,25 \text{ m s}^{-1/3}$, za koji srednja apsolutna greška iznosi 9,0 cm za maksimalne dnevne razine, odnosno 4,1 cm za minimalne dnevne razine. Općenito usporedba izmjerenih i modeliranih vrijednosti se može smatrati zadovoljavajućom, a jedina izraženija odstupanja su primjetna prvi vrhu vodnog vala sredinom listopada kada model precjenjuje razine za približno 30 cm. Treba napomenuti kako je ovo nešto niža vrijednost u odnosu na prethodnu studiju (Kravica i sur., 2021.) u kojoj je odabran $n=0,27 \text{ m s}^{-1/3}$, što se može pripisati novoj geodetskoj snimci korita Neretve, odnosno razlikama u hidrauličkim parametrima poprečnih presjeka korita, prvenstveno hidrauličkog radijusa koji je sastavni dio Manningove jednadžbe.

Nakon odabira odgovarajućeg koeficijenta hrapavosti između fluida i korita kanala, pristupilo se kalibraciji faktora trenja između dvaju fluida različitih gustoća, odnosno trenja na razdjelnici između slojeva slatke i slane vode. Navedeni faktor trenja ima dominantan utjecaj na uzdužni nagib razdjelnice, a time prvenstveno

određuje duljinu prodora pridnenog sloja (slanog klina). Kalibracija faktora trenja na razdjelnici provedena je sličnim pristupom pokušaja i pogrešaka kao i pri kalibraciji Manningovog koeficijenta hrapavosti, s razlikom što je procjena provedena usporedbom dvaju različitih mjerenja: a) kontinuirane vremenske serije izmjerenih saliniteta u Metkoviću te b) pojedinačnih mjesečnih mjerenja profila saliniteta kod Opuzena i Komina.

Unatoč višestrukim pokušajima i širokim rasponom mogućih vrijednosti, nije pronađena jedna vrijednost faktora trenja koja bi dala zadovoljavajuće rezultate za sve protoke. Do istoga zaključka su došli autori i u prethodnoj studiji rijeke Neretve (Kravica i sur., 2021.), u kojoj je proveden i dodatan napor da se pronađe zavisnost faktora trenja o različitim bezdimenzionalnim brojevima, kao što su denzimetrijski Froudeov broj i Reynoldsov broj te njihove različite kombinacije. Međutim, najbolje slaganje modeliranih i izmjerenih vrijednosti postignuto je za izraz koji faktor trenja definira kao funkciju apsolutne razlike protoka u slojevima slane Q_2 i slatke vode Q_1 te je konačno definirana sljedeća jednadžba:

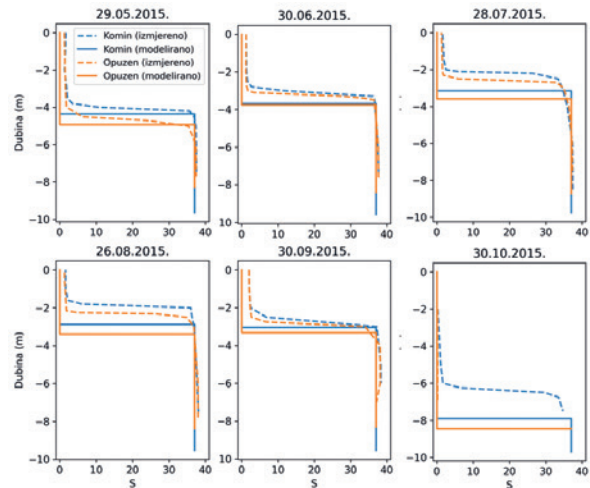


Slika 8: Usporedba modeliranih debljina pridnenog sloja slane vode s izmjerenim salinitetima pri dnu korita rijeke Neretve u Metkoviću tijekom 2015. godine.

$$f_i = 1.4 \times 10^{-6} |Q_1 - Q_2|. \quad (5)$$

Na slici 8 prikazana je usporedba modeliranih debljina pridnenog sloja slane vode u Metkoviću s izmjerenim vrijednostima saliniteta pri dnu. S obzirom na pojednostavljenije dvoslojnjog modela, izračunate vrijednosti saliniteta su konstantne u svakom sloju, stoga je umjesto direktne usporedbe vrijednosti saliniteta, moguća jedino provjera koliko precizno model predviđa razdoblja kada će slani klin prodirati uzvodno od Metkovića. Naime, ako u istom razdoblju kada su izmjerene saliniteti viši od neke minimalne vrijednosti (npr. $S > 2$) model izračuna debljinu sloja veću od nule, tada usporedba zadovoljava. U slučaju kada je izračunata debljina sloja slane vode veća od nule, a istodobno su izmjerene vrijednosti saliniteta niže od 2, tada se može zaključiti da model precjenjuje duljinu prodora slanog klina, dok u slučaju kada je izračunata debljina sloja slane vode jednaka nuli, a istodobno su izmjerene vrijednosti saliniteta više od 2, tada se može zaključiti da model podcjenjuje duljinu slanog klina. Iz danog prikaza može se zaključiti da model dobro prognozira hidrauličke uvjete pri kojima je slani klin potisnut nizvodno od Metkovića, odnosno u kojima prodire uzvodno od ove lokacije.

Druga se provjera sastoji od usporedbe dubine razdjelnice s izmjerenim vertikalnim profilom saliniteta na lokacijama Komin (+8,0 km) i Opuzen (+11,8 km) (vidi sliku 2). Na slici 9 prikazana je usporedba modeliranih i izmjerenih profila saliniteta, podudarnost je zadovoljavajuća, iako dva profila izmjerena krajem srpnja i kolovoza upućuju da model podcjenjuje debljinu sloja slane vode na oba profila. S obzirom na tendenciju modela da precjenjuje duljinu slanog klina, ovi rezultati

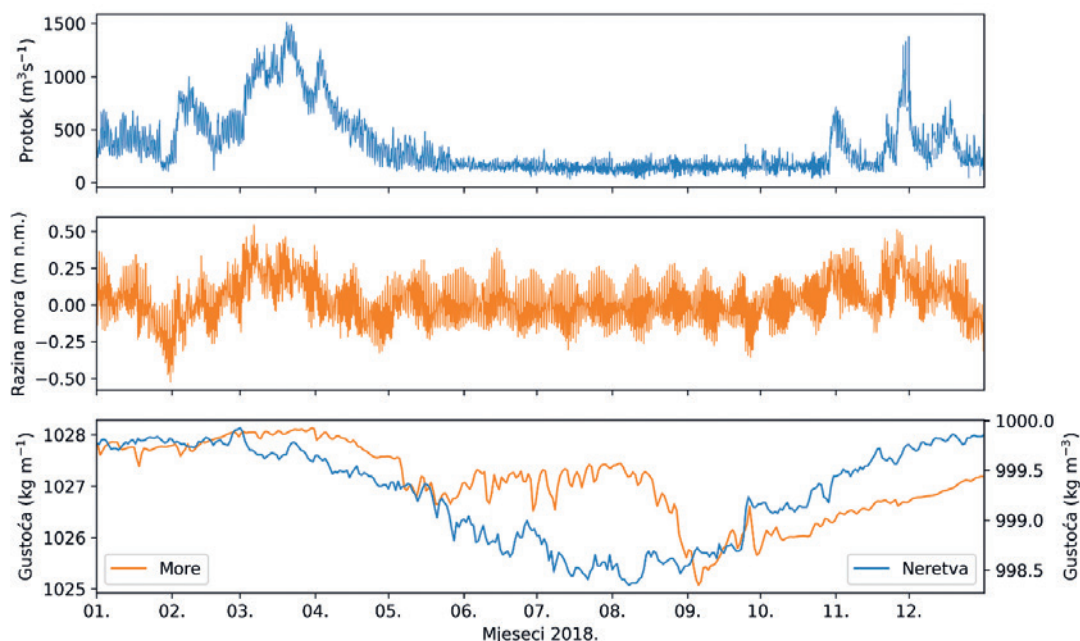


Slika 9: Usporedba modeliranih dubina razdjelnice s izmjerenim vertikalnim profilima saliniteta u rijeci Neretvi kod Komina i Opuzena tijekom 2015. godine.

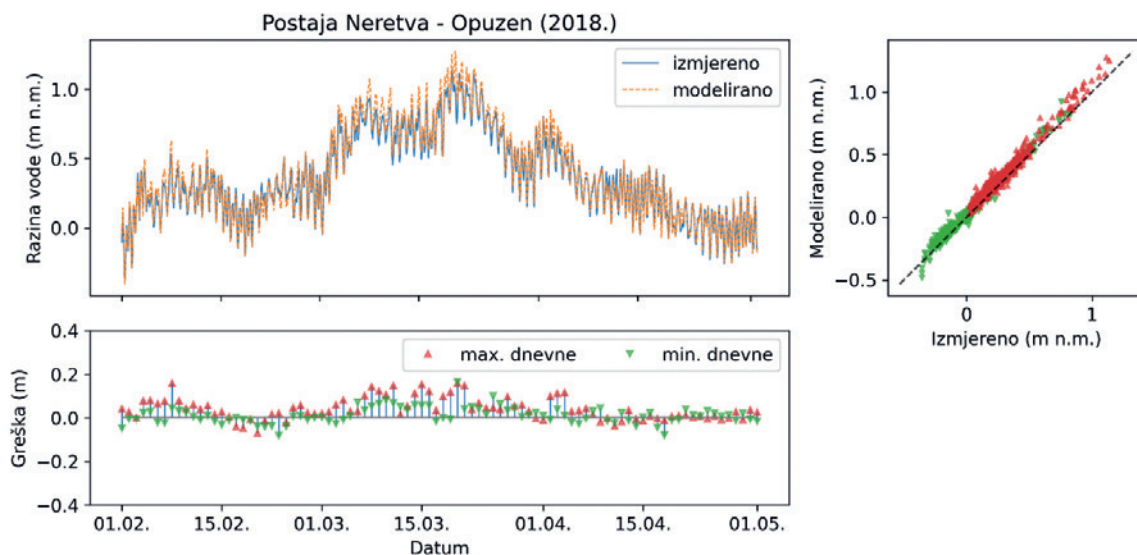
modela mogu se pripisati potencijalno prestrogoj definiciji nizvodnog rubnog uvjeta, odnosno unutarnjeg kritičnog toka tijekom malih protoka. Do sličnih su rezultata i zaključaka došli autori i u prethodnoj studiji Neretve (Krvavica i sur., 2021.).

4.2. Validacija numeričkog modela

Nakon kalibracije svih koeficijenata i faktora trenja, provedena je validacija modela koristeći niz podataka iz 2018. godine. Na slici 10 prikazane su izmjerene vrijednosti protoka na postaji Neretva–Metković, razine mora na postaji Mala Neretva–Ustava ušće nizvodno, gustoće morske vode izračunate na osnovi temperature i saliniteta mora te gustoće riječne vode izračunate na osnovi izmjerenih temperatura vode za 2018. godinu. Slično kao i u 2015. godini primjetan je



Slika 10: Izmjereni satni nizovi protoka rijeke Neretve u Metkoviću, razina mora na ušću Male Neretve te gustoće mora i rijeke tijekom 2018. godine.



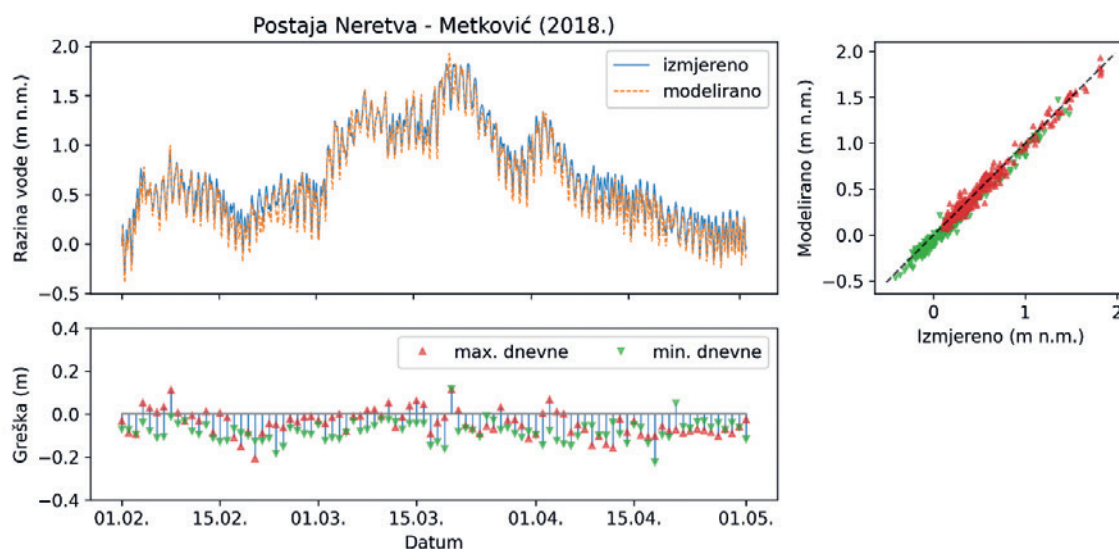
Slika 11: Usporedba i korelacija modeliranih i izmjerenih razina vode na hidrološkoj postaji Neretva-Opuzen za odabrana tri mjeseca 2018. godine s procjenom grešaka.

sezonski karakter protoka rijeke Neretve. Ljetni period (lipanj – ruj) karakterizira kontinuirano niski prosječni protok od $157 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ uz izražene unutar-dnevne oscilacije (standardna devijacija $64 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Zabilježena su i dva izraženija vodna vala te godine, prvi se javio u ožujku s maksimalnim satnim protokom od $1514 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a drugi krajem studenog s maksimalnim satnim protokom od $1367 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U navedenom je razdoblju razina mora varirala između $-0,53$ i $+0,54 \text{ m n. v.}$, uz prosječnu amplitudu od $16,4 \text{ cm}$. Gustoća mora kretala se od $1025,1$ do $1028,1 \text{ kg m}^{-3}$, dok se gustoća slatke vode kretala između $998,3$ i $999,9 \text{ kg m}^{-3}$, s najnižim vrijednostima zabilježenima tijekom rujna, odnosno kolovoza.

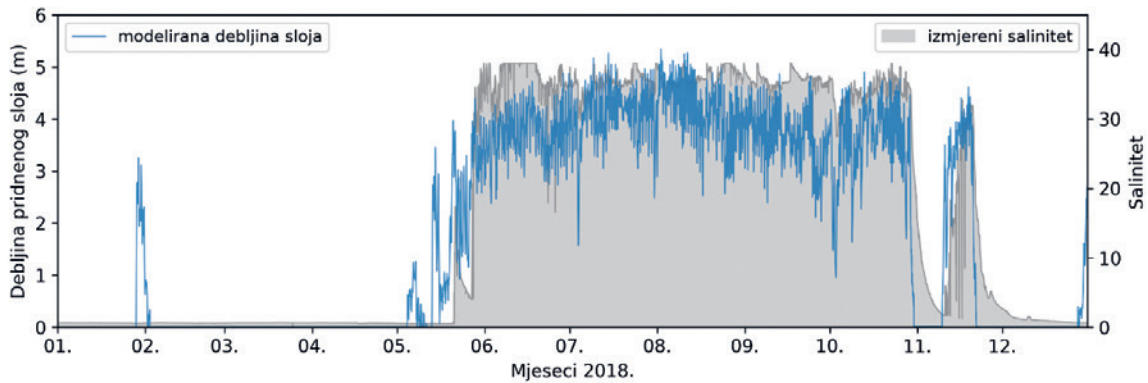
Uspješnost modela u prognoziranju razina vode ocijenjena je na dvjema lokacijama: Opuzenu i Metkoviću. Slika 11 prikazuje usporedbu modeliranih i izmjerenih razina vode na postaji Neretva-Opuzen

tijekom tromjesečnog razdoblja početkom 2018. godine kada su i zabilježene najveće promjene vodostaja i protoka. Srednja apsolutna greška iznosi $5,5 \text{ cm}$ za maksimalne dnevne razine, odnosno $3,5 \text{ cm}$ za minimalne dnevne razine. Slika 12 prikazuje usporedbu modeliranih i izmjerenih razina vode na postaji Neretva-Metković tijekom istog razdoblja. Na ovoj lokaciji srednja apsolutna greška iznosi $4,1 \text{ cm}$ za maksimalne dnevne razine, odnosno $5,9 \text{ cm}$ za minimalne dnevne razine. Općenito usporedba izmjerenih i modeliranih vrijednosti može se smatrati zadovoljavajućom na obje lokacije duž korita Neretve.

Nadalje, kako bi se ocijenila uspješnost modela u prognoziranju duljine slanog klina provedena je usporedba rezultata na lokaciji Metković. Na slici 13 prikazana je usporedba modeliranih debljina pridnog sloja slane vode u Metkoviću s izmjerenim vrijednostima



Slika 12: Usporedba i korelacija modeliranih i izmjerenih razina vode na hidrološkoj postaji Neretva-Metković za odabrana tri mjeseca 2018. godine s procjenom grešaka.



Slika 13: Usporedba modeliranih debljina pridnenog sloja slane vode s izmjerenim salinitetima pri dnu korita rijeke Neretve u Metkoviću tijekom 2018. godine:

saliniteta pri dnu. Kvantitativna ocjena upućuje da model 92,0 % vremena točno predviđa duljinu slanog klina, 5,4 % vremena model precjenjuje duljinu, dok samo tijekom 2,6 % vremena model podcjenjuje duljinu slanog klina. Stoga, gledajući cjelokupni niz 2018. godine, uspješnost modela se može ocijeniti zadovoljavajućom.

4.3. Dinamika pridnenog sloja slane vode i njen utjecaj na protoke slatke vode

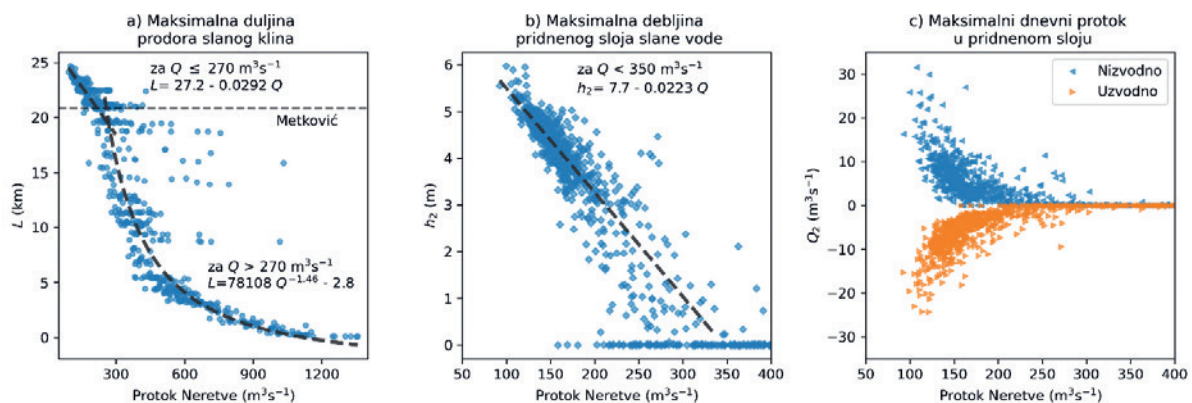
Kako bi se kvantificirao i opisao doprinos pridnenog sloja slane vode na vodostaje i protoke izmjerene u Metkoviću analizirane su uprosječene dnevne vrijednosti modeliranog trogodišnjeg niza podataka (2017. - 2019.). Na slici 14 prikazane su maksimalne duljine prodora slanog klina, maksimalne debljine pridnenog sloja slane vode te maksimalni dnevni protoci u pridnenom sloju, ovisno o protoku rijeke Neretve. Iz danih se prikaza može zaključiti da duljina slanog klina snažno ovisi o protoku rijeke Neretve te da slani klin prodire do Metkovića pri protocima manjima od $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a uzvodnije od Metkovića pri protocima manjima od $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (slika 14a). Ove vrijednosti u skladu su s prethodnim istraživanjem dinamike slanog klina u rijeci Neretvi (Kravica i sur., 2021), ali nešto veće od stacionarnih analiza (Ljubenkov i Vranješ, 2012.) zbog inercije mase slane vode u pridnenom sloju. Provedena je i prilagodba

linearnih i nelinearnih krivulja prikazanim podacima metodom najmanjih kvadrata te je uspostavljena sljedeća funkcionalna zavisnost duljine prodora slanog klina L o protoku rijeke Neretve Q (slika 14a):

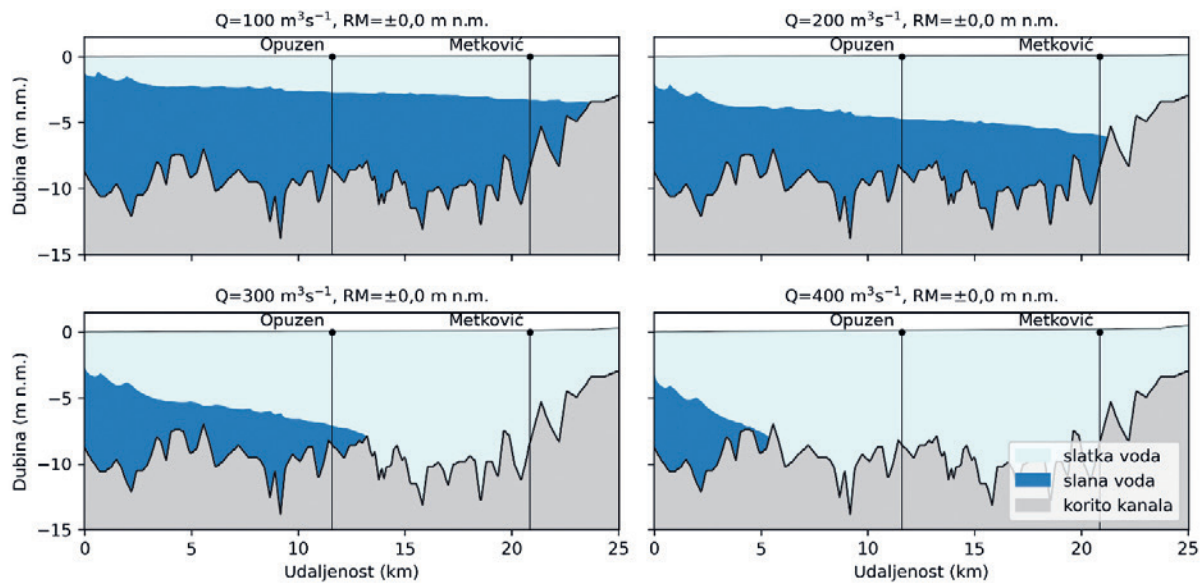
$$L = \begin{cases} 27,2 - 0,0292Q & \text{za } Q \leq 270 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \\ 78108Q^{-1,46} - 2,8 & \text{za } Q > 270 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

Pojedinačna mjerenja koja znatnije odstupaju od definirane krivulje (npr. $L > 14 \text{ km}$ za $Q > 600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) odražavaju specifične nestacionarne pojave u kojima, nakon duljeg razdoblja malih voda i maksimalnog prodora slanog klina, dolazi do naglog povećanja protoka, pri čemu je ponekad potrebno nekoliko dana da se slani klin postepeno potisne nizvodno te uspostavi ravnoteža između inercijalnih, gravitacijskih i sila trenja.

Također, iz danog prikaza (slika 14b) može se primijetiti kako debljina sloja slane vode kod Metkovića također ovisi o protoku rijeke Neretve s kojom je negativno korelirana. Naime, što je protok Neretve veći, to je i debljina površinskog sloja slatke vode veća, a debljina slanog klina manja. Pritom, za najniže zabilježene protoke ispod $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ debljina pridnenog sloja može narasti i do 6 m, što je više od polovice ukupne dubine vode pri najvišim zabilješnim vodostajima. Treba naglasiti



Slika 14: Promjena hidrauličkih parametara slanog klina ovisno o protoku rijeke Neretve (2017. - 2019.): a) maksimalna duljina prodora slanog klina L , b) maksimalna debljina pridnenog sloja slane vode h_2 i c) maksimalni dnevni protoci u pridnenom sloju Q_2 :



Slika 15: Modelirano stacionarno rješenje uzdužnog profila slanog klina u rijeci Neretvi za srednju razinu mora i protoke $Q=100, 200, 300$ i $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

kako pridneni sloj slane vode može propagirati uzvodno (suprotno od glavnog toka rijeke Neretve) u kojem slučaju mjerenja brzine po površini cijelog poprečnog presjeka mogu podcijeniti stvarne protoke slatke vode, ali i u nizvodnom smjeru u kojem slučaju mjerenja mogu precijeniti stvarne protoke. Prikazanim vrijednostima prilagođena je linearna krivulja te je uspostavljena sljedeća funkcionalna zavisnost debljine sloja slane vode kod Metkovića h_2 o protoku rijeke Neretve Q (slika 14b):

$$h_2 = 7,7 - 0,0223Q \text{ za } Q \leq 350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}. \quad (7)$$

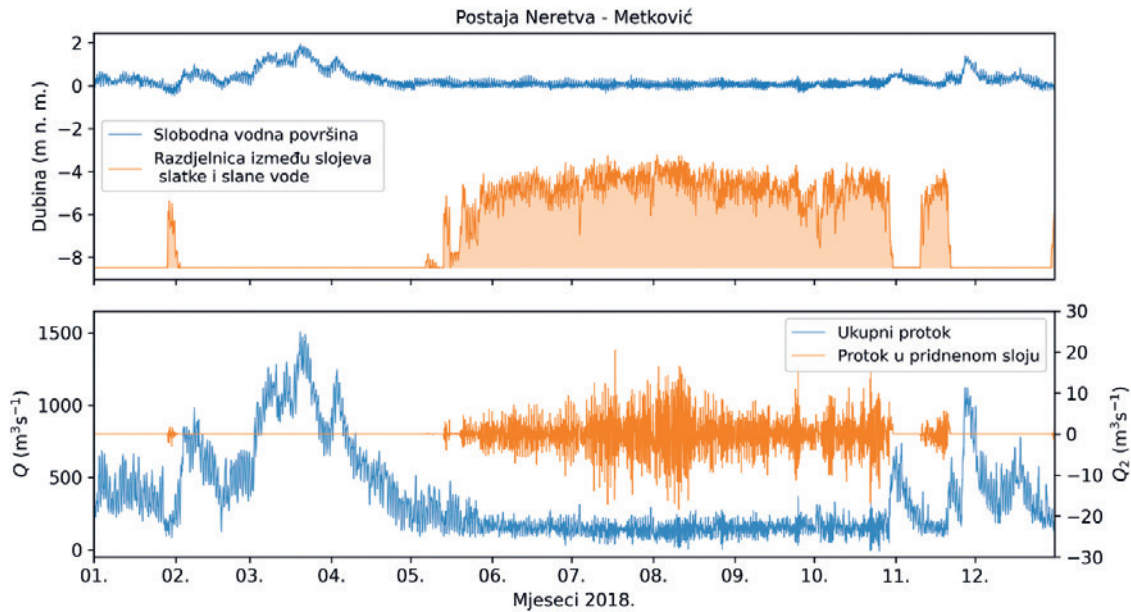
Protoci u pridnenom sloju su također negativno korelirani s protokom rijeke, odnosno izraženiji su pri malim protocima kada u oba smjera mogu dosegnuti vrijednosti od $\pm 30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (slika 14c). Iz prikazanih analiza slijedi kako izmjereni protoci rijeke Neretve u Metkoviću, koji su dobiveni integriranjem polja brzine po površini cjelokupnog omočenog poprečnog presjeka, mogu imati određenu grešku pri vrijednostima manjima od $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a koja može dosegnuti i do 30 % ukupne vrijednosti.

Iz skupa modeliranih nizova, izdvojena je 2018. godina kako bi se pobliže istražili fizikalni procesi, odnosno interakcija slane i slatke vode u Neretvi. Za početak su proračunate referentne vrijednosti stacionarnih rješenja za srednju razinu mora ($RM=0,0 \text{ m n.v.}$) te protoke $Q=100, 200, 300$ i $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Na slici 15 prikazani su uzdužni profili slanog klina za navedene scenarije. Za najmanji protok $Q=100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, slani klin prodire uzvodnije od Metkovića; za $Q=200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, slani klin se još uvijek nalazi neposredno uzvodno od Metkovića, ali je razdjelnica između slojeva slane i slatke vode znatno niže u odnosu na prethodni slučaj; za $Q=300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, slani klin je potisnut skoro do Opuzena (na približno $+13,0 \text{ km}$); dok je za $Q=400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ slani

klin gotovo u potpunosti istisnut iz korita, odnosno do stacionaže $+5,0 \text{ km}$. Treba napomenuti da bi ova rješenja za više razine mora pokazivala nešto dulje prodore slanog klina pri istim protocima te obrnuto za niže razine mora. Također, treba naglasiti da tijekom promjenjivih protoka trenutna duljina slanog klina može znatno odstupati od ovih rješenja zbog nestacionarnih procesa.

Na slici 16 prikazana je vremenska serija modeliranih vrijednosti dubine i protoka slane vode u pridnenom sloju u Metkoviću za 2018. godinu. Može se primijetiti kako se tijekom ljetnih mjeseci (od sredine svibnja do kraja listopada) razdjelnica, koja dijeli površinski sloj slatke vode od pridnenog sloja slane vode, nalazi na prosječnoj dubini od -4 m n.v. odnosno približno na polovici ukupne dubine, a protoci u pridnenom sloju tijekom cijelog ovog razdoblja osciliraju s amplitudom do $\pm 20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Iz navedenih analiza slijedi da određeni udio izmjerenih unutardnevnih oscilacija protoka rijeke Neretve ima direktan uzrok u oscilacijama pridnenog sloja slane vode pri protocima nižima od $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Međutim, čak i pri najnižim protocima taj doprinos ne prelazi 30 %, stoga uzrok preostalim oscilacijama treba potražiti drugdje. Treba napomenuti kako su ovo unutardnevne promjene koje ne bi trebale imati značajan utjecaj na uprosječene dnevne vrijednosti protoka.

Iz numeričkih se analiza također može zaključiti kako trenutne vrijednosti izmjerenih protoka u Metkoviću ne moraju odgovarati protocima na ušću Neretve, odnosno količinama slatke vode koje utječu u Jadransko more. Na razini satnih podataka, trenutne vrijednosti ne odgovaraju prvenstveno zbog zakašnjenja vodnih valova, koje na dionici od Metkovića do ušća iznosi $0,5 - 1,0 \text{ h}$ ovisno o protoku. Međutim, neslaganje protoka izmjerenih u Metkoviću i na ušću Neretve je primjetno čak i na razini uprosječenih dnevnih vrijednosti zbog prisutnosti slanog klina. Naime, pri svakom izraženijem povećanju protoka slatke vode, dolazi do djelomičnog

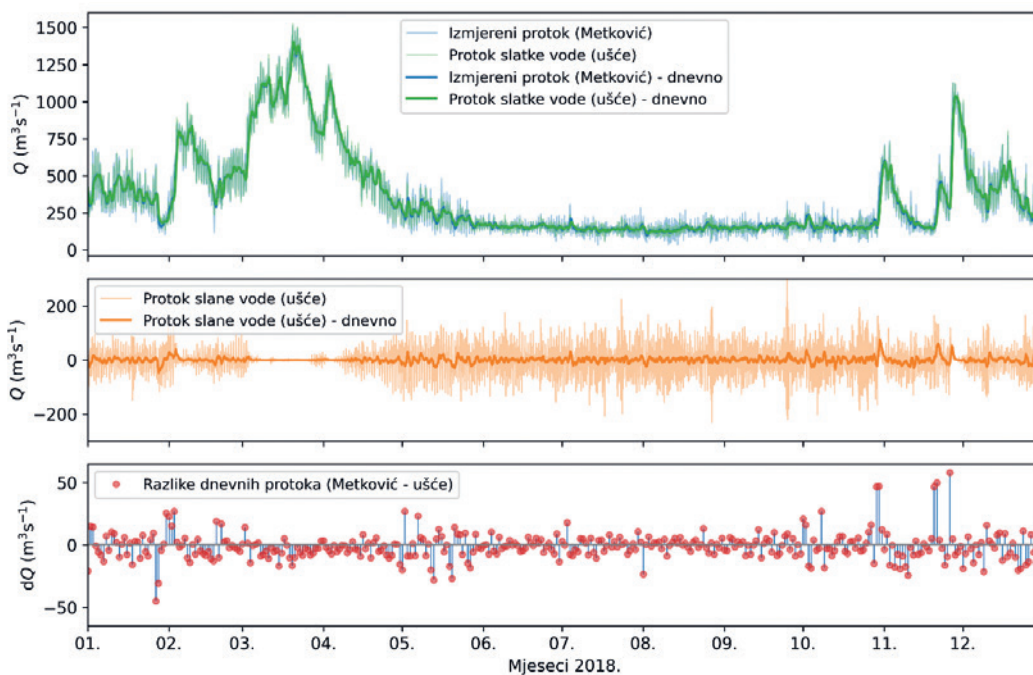


Slika 16: Modelski rezultati slobodne vodne površine i dubine razdjelnice između slojeva slane i slatke vode te ukupnih protoka i protoka u pridnenom sloju u Metkoviću tijekom 2018. godine.

istiskivanja slanog klina, pa se stoga na dnevnoj razini određeni volumen slatke vode koja dotječe sa uzvodnog dijela sliva privremeno zadržava u koritu rijeke, dok preostali volumen istječe u Jadransko more. Na slici 17 prikazane su satne i uprosječene dnevne vrijednosti izmjerenog protoka u Metkoviću te modeliranog protoka slatke i slane vode na ušću. Najveće razlike dnevnih vrijednosti protoka izmjerenih u Metkoviću i protoka slatke vode na ušću Neretve dosežu $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, odnosno 20 % ukupnih protoka, a zabilježene su upravo pri naglim porastima protoka.

5. UZROK UNUTARDNEVNIH OSCILACIJA IZMJERENIH PROTOKA

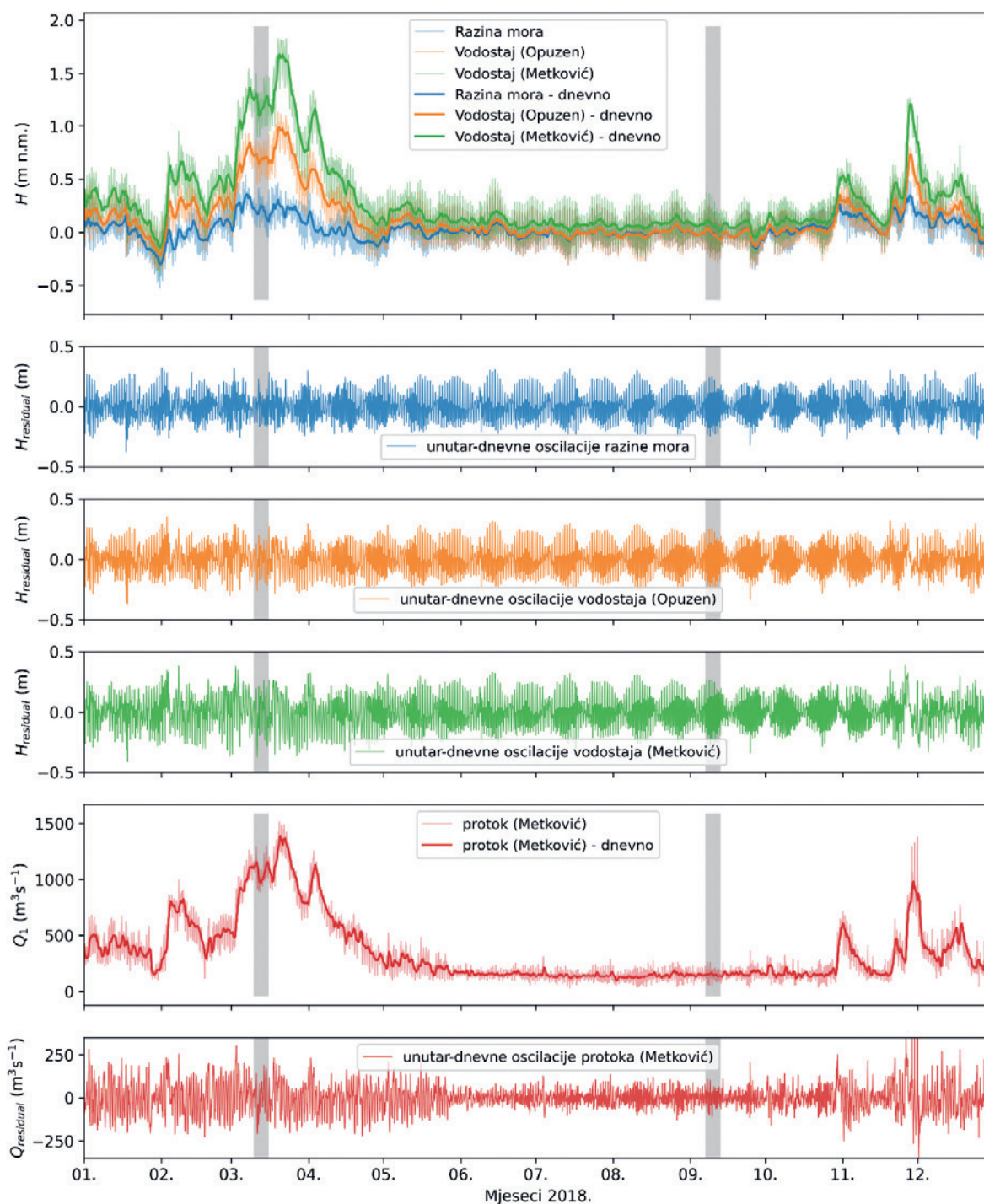
Pored utjecaja dinamike pridnenog sloja slane vode, dva su moguća uzroka unutardnevnih oscilacija izmjerenih protoka Neretve u Metkoviću. Prvi je plima i oseka, naime periodičko spuštanje i podizanje razine mora generira pozitivne i negativne plimne valove koji propagiraju u uzvodnom smjeru, a u Metkoviću mogu rezultirati oscilacijama vodostaja i protoka. Drugi se uzrok jedino može pripisati upravljanjem vodama na uzvodnom dijelu sliva, kojim se kontrolira protok rijeke Neretve.



Slika 17: Izmjereni ukupni protoci Neretve u Metkoviću i modelirani protoci slatke vode na ušću Neretve, modelirani protoci slane vode na ušću te razlike između izmjerenih protoka u Metkoviću i protoka slatke vode na ušću Neretve.

Kako bi se utvrdio dominantni uzrok unutardnevnih oscilacija izmjerenih u Metkoviću proveden je dodatni numerički eksperiment. U ovom scenariju korito Neretve produženo je do stacionaže +40,0 km koja je u potpunosti izvan utjecaja i doseg a uspora mora. Na nizvodnom rubu domene zadani su satni vodostaji iz 2018. godine, a na uzvodnom rubu domene su zadani uprosječeni dnevni protoci izmjereni u Metkoviću s vremenskim pomakom od 0,6 h (prosječno vrijeme zakašnjenja od uzvodnog ruba domene do Metkovića). Na ovaj su način iz vremenskog

niza izmjerenih protoka uklonjene sve unutardnevne oscilacije. Ako je glavni uzrok unutardnevnih oscilacija protoka zaista plima i oseka, tada bi proračun protoka u Metkoviću trebao pokazati identične oscilacije kakve su prisutne u izmjenom nizu protoka i vodostaja. Međutim, ako oscilacije izostanu ili se pojave, ali u znatno slabijem obliku, tada se jedino logično može zaključiti da su izmjerene oscilacije protoka u Metkoviću u određenoj mjeri rezultat upravljanja vodama Neretve na uzvodnom dijelu sliva, odnosno da izmjerene oscilacije



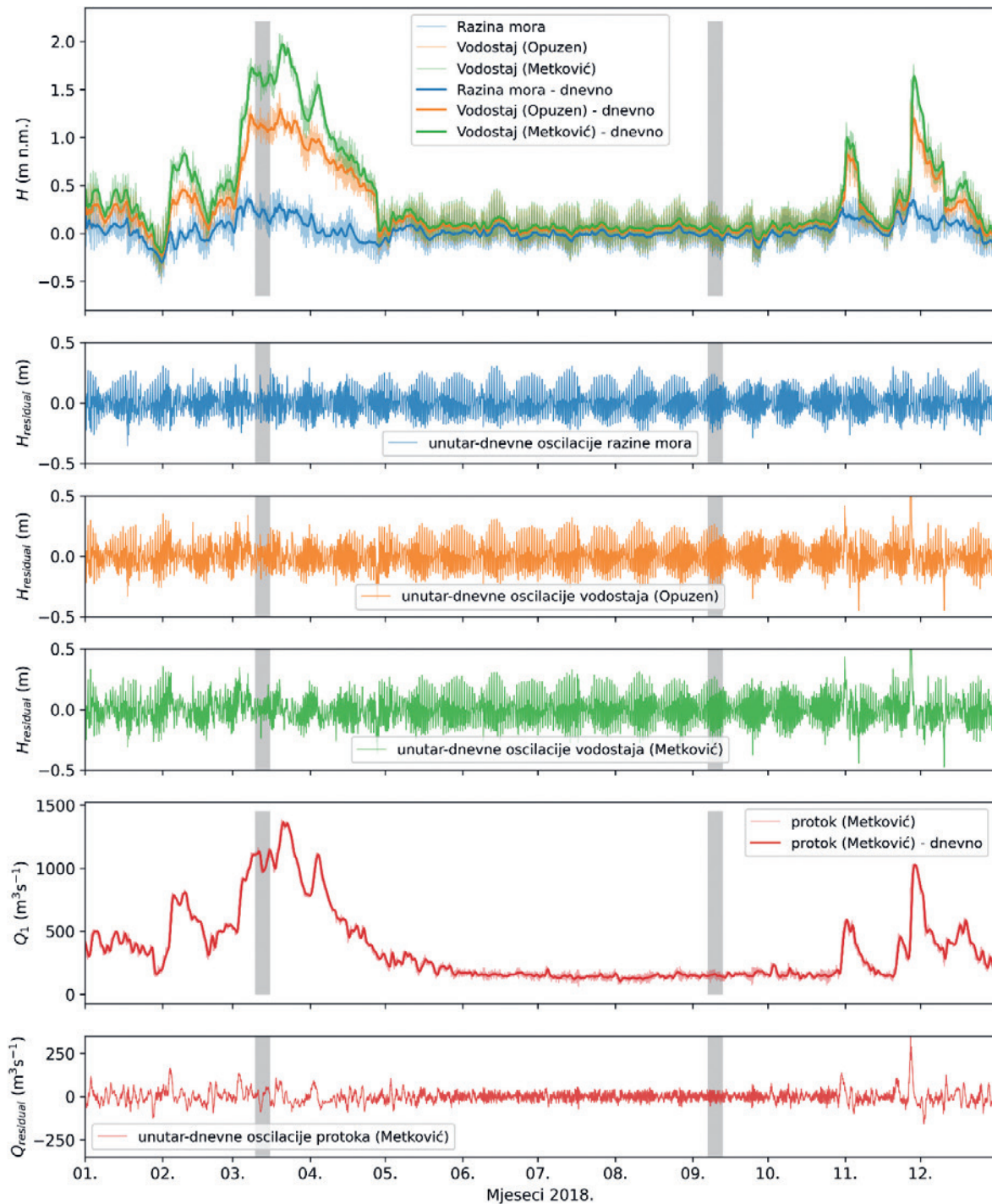
Slika 18: Vremenska serija izmjerenih vrijednosti razina mora, vodostaja Neretve u Opuzenu i Metkoviću te protoka u Metkoviću (satne vrijednosti, uprosječene dnevne vrijednosti te rezidualne unutardnevne oscilacije). Sivi pravokutnik označava dva izdvojena detalja prikazana na slici 20.

kod Metkovića zaista daju reprezentativne vrijednosti protoka koje dotječu iz BiH u Hrvatsku.

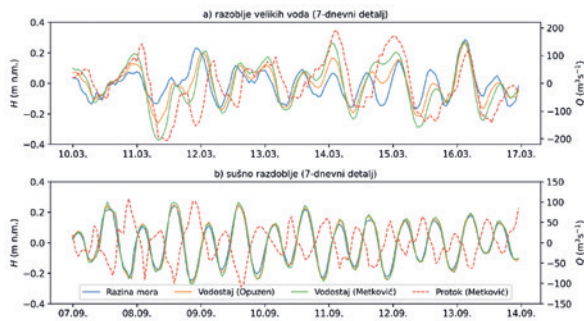
5.1. Rezultati usporedbe izmjerenih i modeliranih nizova

Na slici 18 prikazane su satne i uprosječene dnevne vrijednosti izmjerenih razina mora, vodostaja (Opuzen i Metković) te protoka (Metkovića) s izdvojenim unutardnevnim oscilacijama. Za usporedbu, na slici 19 prikazane su iste vrijednosti modeliranih nizova

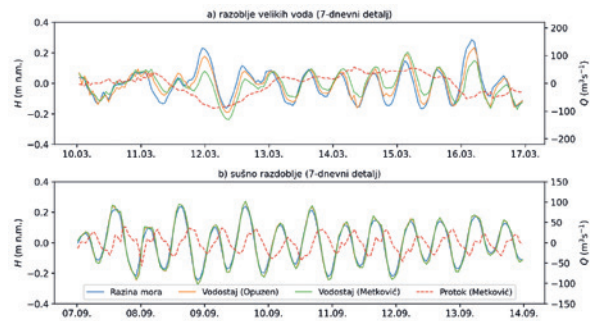
iz scenarija u kojem su uprosječeni dnevni protoci zadani kao uzvodni rubni uvjet. Vodostaji razine mora su identični u oba slučaja jer su u numeričkom modelu zadani direktno kao nizvodni rubni uvjet. Vodostaji u Opuzenu i Metkoviću vrlo su slični s podjednakim amplitudama oscilacija, iako su tijekom velikih voda modelirane oscilacije vodostaja nešto slabije od izmjerenih. Međutim, oscilacije protoka u Metkoviću se primjetno razlikuju, modelirane vrijednosti su znatno slabije od izmjerenih-tijekom velikih voda skoro da i



Slika 19: Vremenska serija modeliranih vrijednosti razina mora, vodostaja Neretve u Opuzenu i Metkoviću te protoka u Metkoviću (satne vrijednosti, uprosječene dnevne vrijednosti te rezidualne unutardnevne oscilacije). Sivi pravokutnik označava dva izdvojena detalja prikazana na slici 21.



Slika 20: Izdvojeni detalji izmjerene 7-dnevne vremenske serije rezidualnih unutardnevni oscilacija razina mora te vodostaja i protoka rijeke Neretve u Metkoviću tijekom: a) velikih voda i b) malih voda.



Slika 21: Izdvojeni detalji modelirane 7-dnevne vremenske serije rezidualnih unutardnevni oscilacija razina mora te vodostaja i protoka rijeke Neretve u Metkoviću tijekom: a) velikih voda i b) malih voda.

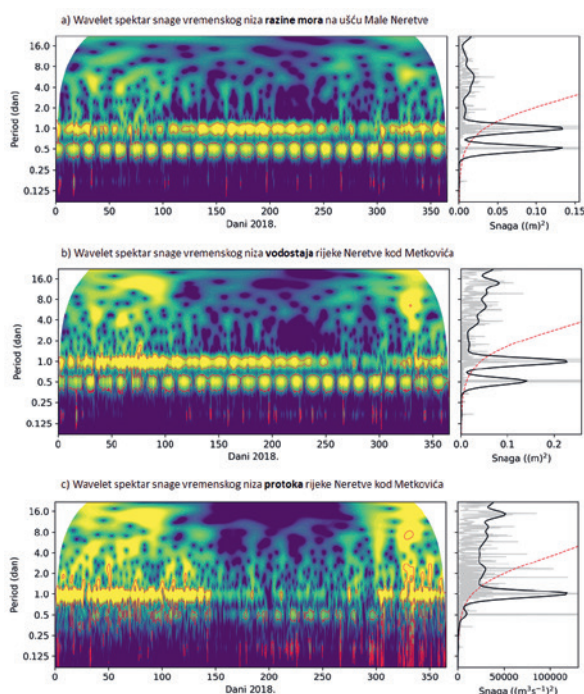
nisu prisutne, a u sušnom razdoblju su primjetno manjih amplituda.

Radi jasnije usporedbe na slikama 20 i 21 prikazani su izdvojeni detalji izmjerenih i modeliranih vodostaja i protoka u Metkoviću za dva odabrana sedmodnevna razdoblja. Tijekom velikih voda (sredina ožujka) primjetne su snažne oscilacije izmjerenih protoka, koje su gotovo u potpunosti odsutne iz modeliranih vrijednosti. Oscilacije izmjerenih vodostaja su također jače izražene od modeliranih, koje jasno prate oscilacije razina mora s malim pomakom u fazi. Tijekom malih voda, izmjereni i modelirani vodostaji su vrlo sličnih amplituda i frekvencija, a oba niza vrlo blisko prate oscilacije razina mora. Oscilacije protoka su slične, iako su i u ovom slučaju izraženije amplitude izmjerenih nizova.

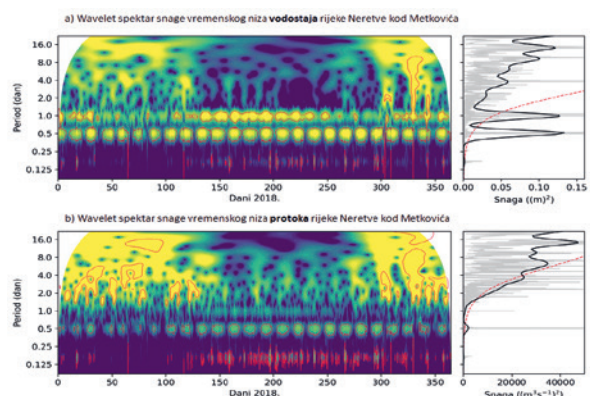
5.2. Rezultati spektralne analize izmjerenih i modeliranih nizova

Kako bi se potvrdio zaključak iz prethodnog poglavlja, provedena je i nestacionarna spektralna analiza razina mora te izmjerenih i modeliranih vrijednosti vodostaja i protoka Neretve u Metkoviću. U svrhu ove analize iz navedenih vremenskih nizova uklonjen je trend (24-h klizni prosjek) kako bi se izdvojile residualne unutardnevne oscilacije, što je i prikazano na slikama 18 i 19. Potom je primijenjena kontinuirana wavelet transformacija (CWT) kako bi se odredila spektralna gustoća snage unutardnevni oscilacija u vremensko-frekventnoj domeni. Na slici 22 prikazani su rezultati CWT-a, odnosno dijagram spektra snage unutardnevni oscilacija izmjerenih vremenskih nizova razine mora te vodostaja i protoka Neretve u Metkoviću, a na slici 23 dijagram spektra snage modeliranih vremenskih nizova vodostaja i prosjeka koji su proračunati za scenarij uprosječenih dnevnih protoka uzvodno od Metkovića.

Na prikazanom spektru snage razina mora (slika 22a) jasno se ističu dnevne (D_1) i poludnevne (D_2) harmonijske komponente podjednake snage, koje su kontinuirano prisutne tijekom cijele godine. Treba napomenuti da u Jadranskom moru dnevni harmonici odgovaraju astronomskim plimnim komponentama K_1 , O_1 i P_1 , dok



Slika 22: Rezultati CWT analize izmjerenih nizova: a) razine mora te b) vodostaja i c) protoka rijeke Neretve u Metkoviću: Lijevi panel prikazuje spektar snage normaliziranog signala u frekventno-vremenskoj domeni (crvene linije označavaju područja iznad 95 %-tne značajnosti), desni panel prikazuje globalni spektar snage originalnog signala (siva boja odgovara FFT spektru, crna boja wavelet globalnom spektru snage, a crvena isprekidana linija označava prag 95 %-tne značajnosti).



Slika 23: Rezultati CWT analize modeliranih nizova: a) vodostaja i b) protoka rijeke Neretve u Metkoviću: Lijevi panel prikazuje spektar snage normaliziranog signala u frekventno-vremenskoj domeni (crvene linije označavaju područja iznad 95 %-tne značajnosti), desni panel prikazuje globalni spektar snage originalnog signala (siva boja odgovara FFT spektru, crna boja wavelet globalnom spektru snage, a crvena isprekidana linija označava prag 95 %-tne značajnosti).

poludnevni harmonici odgovaraju komponentama M_2 , S_2 , N_2 i K_2 .

Spektar snage izmjerenih oscilacija vodostaja Neretve (slika 22b), slično razinama mora, ukazuje na značajnu prisutnost D_1 i D_2 komponenti. Pritom je snaga poludnevne komponente približno konstantna tijekom godine, dok je dnevna komponenta nestacionarna. Globalni spektar sugerira da je poludnevna komponenta oscilacije vodostaja slične snage u usporedbi s oscilacijama razina mora, dok je dnevna komponenta jače snage. S druge strane spektar snage modeliranih oscilacija vodostaja (slika 23a), pokazuje skoro identičnu sliku izmjerenim razinama mora (slika 22a), s podjednako izraženim D_1 i D_2 komponentama. Primjetna je razlika između izmjerenih i modeliranih dnevnih komponenti oscilacija vodostaja, gdje kod modeliranih vrijednosti nije prisutno pojačanje dnevnog signala početkom godine (0. – 150. dan), što sugerira da je u tom periodu prisutan sekundarni izvor oscilacija.

U prikazu spektra snage izmjerenih oscilacija protoka Neretve (slika 22c) dominira dnevna komponenta s izraženim nestacionarnim karakterom. Poludnevna komponenta je također prisutna, ali je znatno slabije snage, koja tek povremeno prelazi prag 95 %-tne značajnosti. Spektar snage modeliranih oscilacija protoka (slika 23b) pokazuje drugačiju sliku, dnevna komponenta je potpuno odsutna, a poludnevna komponenta, iako prisutna, vrlo je slabe snage (slično kao i kod izmjerenih protoka). Također, u modeliranim protocima zapravo dominiraju oscilacije dugačkog perioda (4 i 16 dana).

Iz svega prikazanog može se zaključiti kako oscilacije dnevnog perioda dominiraju u izmjerenim protocima kod Metkovića te da uzrok navedenih oscilacija nije dinamika plime i oseke, već da su one prisutne u protocima koji dotječu s uzvodnog dijela sliva. Također se može zaključiti kako su oscilacije vodostaja kod Metkovića prvenstveno rezultat plime i oseke, ali pojačane oscilacije vodostaja tijekom razdoblja od siječnja do svibnja 2018. godine rezultat su superpozicije valova iz nizvodnog smjera (od plime i oseke) i valova iz uzvodnog smjera (oscilacije dotoka).

6. ZAKLJUČAK

Uspostava kontinuiranog mjerenja protoka i elektrovodljivosti rijeke Neretve u Metkoviću znatno je unaprijedila sustav hidrološkog praćenja prijelaznih voda. Kako bi se utvrdila pouzdanost ovih mjerenja provedena je analiza koje uključuje numeričke simulacije dvoslojnog toka Neretve te nestacionarnu spektralnu analizu izmjerenih vremenskih nizova razine mora, vodostaja i protoka.

Iz provedenih numeričkih simulacija može se zaključiti sljedeće:

- Numerički modeli dvoslojnog toka plitkih voda pouzdan su alat za prognozirane dinamike toka u prijelaznim vodama rijeke Neretve te mogu precizno proračunati vodostaje, duljine prodora slanog klina, kao i brzine, odnosno protoke slane i slatke vode na odabranim profilima.

- Dinamika slanog klina u Neretvi ponajviše ovisi o protoku rijeke, ali i o plimnim oscilacijama. Pritom, duljina prodora je izraženija tijekom nižih protoka i viših razina mora.
- Tijekom sušnog razdoblja koje obično traje od svibnja do listopada, pridneni sloj slane vode prodire uzvodnije od Metkovića pri protocima nižima od $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Pritom, protoci slane vode u pridnenom sloju osciliraju s plimom i osekom, a mogu dosegnuti vrijednosti od $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, što doprinosi nepouzdanosti izmjerenih protoka pri malim vodama. Ocijenjeno je da ova greška može iznositi do 30 % ukupnih protoka.
- Dvoslojna struktura, odnosno slani klin, ima znatan utjecaj i na razliku između protoka u Metkoviću i protoka na ušću Neretve. Naime, pored zakašnjenja u protoku vode od Metkovića do ušća (21,8 km), prisutne su i razlike u dnevnim količinama vode koje istječu u Jadransko more. Navedene razlike mogu dosegnuti $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, odnosno 20 % ukupnih protoka, a javljaju se najčešće pri naglim porastima protoka. Pritom, utjecaji kontinuiranih bočnih dotoka tijekom kišnih razdoblja ili evapotranspiracije tijekom sušnih razdoblja su ocijenjeni kao zanemarivi u odnosu na vrijednosti dnevnih protoka.

Iz provedenih spektralnih analiza može se zaključiti sljedeće:

- U oscilacijama razina mora podjednako su izražene dnevne i poludnevne harmonijske komponente astronomskog porijekla.
- U oscilacijama vodostaja Neretve u Metkoviću također su prisutne dnevne i poludnevne komponente podjednake snage. Tijekom sušnog perioda, oscilacije vodostaja blisko prate promjene razine mora, dok su u preostalom razdoblju godine promjene vodostaja rezultat superpozicije plimnih valova te vodnih valova s uzvodnog dijela sliva.
- U oscilacijama protoka Neretve u Metkoviću prisutne su dominantno dnevne komponente koje imaju izražen nestacionarni (sezonski) karakter, a izraženije su u kišnom razdoblju, dok poludnevne komponente tek povremeno prelaze prag značajnosti. Pritom, dnevne komponente su uzrokovane primarno promjenama dotoka s uzvodnog dijela sliva.

S gledišta ocjene pouzdanosti izmjerenih protoka može se zaključiti sljedeće:

- S obzirom na slaganje izmjerenih i modeliranih vodostaja ocjenjuje se kako su izmjereni protoci dovoljno pouzdani i odražavaju stvarne protoke u koritu rijeke Neretve u Metkoviću.
- Ocjenjuje se da protoci izmjereni u Metkoviću ne odražavaju u potpunosti dnevne količine slatke vode koje dotječu s uzvodnog dijela sliva (z BiH), što je posebno izraženo tijekom sušnog perioda, jer izmjereni protoci uključuju i protoke pridnenog

sloja slane vode te nesimetrične unutardnevne oscilacije protoka koje su rezultat propagacije plimnih valova.

- Ocjenjuje se da protoci izmjereni kod Metkovića ne odražavaju u potpunosti dnevne količine slatke vode koja utječe u Jadransko more, jer se tijekom naglog rasta protoka smanjuje volumen slane vode u koritu Neretve, stoga samo dio slatke vode izmjeren u Metkoviću utječe u Jadransko more.

Buduća istraživanja fokusirat će se na uspostavu šireg hidrauličkog modela koji će uključivati i srednji tok Neretve, od Žitomislića do ušća. Dio istraživanja će se također posvetiti boljem razumijevanju fizikalnih procesa, prvenstveno interakciji plimnih i vodnih valova, u izrazito uslojenim ušćima u kojima je prisutan slani klin. Konačno, daje se preporuka da se na godišnjoj razini

provede modelska reanaliza izmjerenih podataka, poput ove prikazane u predmetnom radu za 2018. godinu, pomoću koje je moguće točnije procijeniti količine slatke vode koja utječe u Jadransko more. U nastavku istraživanja također se planira primjena strojnog učenja kako bi pomoću rezultata numeričkih simulacija inverzno odredile i dnevne količine slatke vode koja dotječe s uzvodnog dijela sliva. ■

ZAHVALA

Ovaj rad je financiran u okviru projektne linije ZIPUNIRI Sveučilišta u Rijeci, za projekt ZIP-UNIRI-1500-1-20 „Estimating river discharges in highly stratified estuaries“ te u okviru projekta UNIRI-TECHNIC-18-54 „Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškim područjima“.

LITERATURA

- Armi, L., Farmer, D. M. (1986.): Maximal two-layer exchange through a contraction with barotropic net flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 164, 27-51.
- Cai, H., Savenije, H. & Jiang, C., (2014.): Analytical approach for predicting fresh water discharge in an estuary based on tidal water level observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), p.4153.
- Chen, Y. C., Yang, T. M., Hsu, N. S., Kuo, T. M. (2012.): Real-time discharge measurement in tidal streams by an index velocity. *Environmental monitoring and assessment*, 184(10), 6423-6436.
- Clementi, E., Aydogdu, A., Goglio, A. C., Pistoia, J., Escudier, R., Drudi, M., Grandi, A., Mariani, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Creti, S., Coppini, G., Masina, S., Pinardi, N. (2021.): Mediterranean Sea Physical Analysis and Forecast (CMEMS MED-Currents, EAS6 system) (Version 1) Data set . Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS).
- Direktiva 2000/60/EZ Europskog parlamenta i vijeća od 23. listopada 2000. o uspostavi okvira za djelovanje Zajednice u području vodne politike.
- Dyer, K.R. (1997.): *Estuaries: a physical introduction*. 2nd edition. John Wiley and Sons/Wiley & Sons: Chichester. ISBN 0-471-9741-4. xiv, 195 pp.
- Fofonoff, N. P. (1985.): Physical properties of seawater: A new salinity scale and equation of state for seawater. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C2), 3332-3342.
- Geyer, W. R., Ralston, D. K. (2011.): 2.03—The dynamics of strongly stratified estuaries. *Treatise on Estuarine and Coastal Science. Amsterdam: Elsevier*, 37-52.
- Guo, L., van der Wegen, M., Jay, D. A., Matte, P., Wang, Z. B., Roelvink, D., He, Q. (2015.): River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3499-3521.
- Hansen, D. V., Rattray Jr, M. (1966.): New dimensions in estuary classification. *Limnology and oceanography*, 11(3), 319-326.
- Hidayat, H., Hoitink, A. J. F., Sassi, M. G., Torfs, P. J. J. F. (2014.): Prediction of discharge in a tidal river using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), 04014006.
- Hoitink, A. J. F., Buschman, F. A., Vermeulen, B. (2009.): Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river. *Water resources research*, 45(11).
- Jay, D.A., Flinchem, E. P. (1997.): Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide: A demonstration of wavelet tidal analysis methods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C3), 5705-5720.
- Jones, A. E., Hardison, A. K., Hodges, B. R., McClelland, J. W., Moffett, K. B. (2019.): An expanded rating curve model to estimate river discharge during tidal influences across the progressive-mixed-standing wave systems. *Plos one*, 14(12), e0225758.
- Krvavica, N. (2016.): One-dimensional numerical model for layered shallow water flow in highly stratified estuaries. Disertacija. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.
- Krvavica, N. (2020.): Re-evaluating efficiency of first-order numerical schemes for two-layer shallow water systems by considering different eigenvalue solutions. *Advances in Water Resources*, 137, 103508.
- Krvavica, N., Gotovac, H., Lončar, G. (2021.): Salt-wedge dynamics in microtidal Neretva River estuary. *Regional Studies in Marine Science*, 43, 101713.
- Krvavica, N., Kozar, I., Travas, V., Ozanic, 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.

- Krvavica, N., Ružić, I. (2020.): Assessment of sea-level rise impacts on salt-wedge intrusion in idealized and Neretva River Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 234, 106638.
- 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.
- 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.
- Krvavica, N., Tuhtan, M., Jelenić, G. (2018.): Analytical implementation of Roe solver for two-layer shallow water equations with accurate treatment for loss of hyperbolicity. *Advances in water resources*, 122, 187-205.
- Ljubenković, I. (2015.): Hydrodynamic modeling of stratified estuary: case study of the Jadro River (Croatia). *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(1), 29.
- Ljubenković, I., Vranješ, M. (2012.): Numerički model uslojenog tečenja-primjer zaslanjivanja korita rijeke Neretve (2004.). *Građevinar*, 64(02.), 101-112.
- Lončar, G., Krvavica, N., Gotovac, H., Oskoruš, D., Kulić, T. (2020.): Numerička analiza djelovanja brane na sprječavanje prodora slane vode duž korita rijeke Neretve. *Hrvatske vode*, 28(112), 113-124.
- Moftakhari, H. R., Jay, D. A., & Talke, S. A. (2016.): Estimating river discharge using multiple-tide gauges distributed along a channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(4), 2078-2097.
- Oskoruš, D., Krvavica, N., Švonja, M. (2019.): Metoda proračuna dnevnih protoka Neretve u Metkoviću. In U: Biondić, D., Holjević, D., Vizner, M.(ur.), 7. hrvatska konferencija o vodama „Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode“, Zbornik radova.
- Racetin, I., Krtalic, A., Srzić, V., Zovko, M. (2020.): Characterization of short-term salinity fluctuations in the Neretva River Delta situated in the southern Adriatic Croatia using Landsat-5 TM. *Ecological Indicators*, 110, 105924.
- Sassi, M. G., Houtink, A. J. F., Vermeulen, B. (2011.): Discharge estimation from H-ADCP measurements in a tidal river subject to sidewall effects and a mobile bed. *Water Resources Research*, 47(6).
- Srzić, V., Lovrinović, I., Racetin, I., Pletikosić, F. (2020.): Hydrogeological Characterization of Coastal Aquifer on the Basis of Observed Sea Level and Groundwater Level Fluctuations: Neretva Valley Aquifer, Croatia. *Water*, 12(2), 348.
- Torrence, C., Compo, G. P. (1998.): A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Vlada Republike Hrvatske (2016.): *Plan upravljanja vodnim područjima 2016. – 2021.*, Zagreb.
- Warner, J. C., Geyer, W. R., & Lerczak, J. A. (2005.): Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C5).

A CONTRIBUTION TO IMPROVING THE SYSTEM OF TRANSITIONAL WATERS' HYDROLOGICAL MEASUREMENTS: HYDRAULIC AND SPECTRAL ANALYSES OF THE NERETVA RIVER FLOW RATE

Abstract. It is often not possible to determine the flow rate based on the measured water levels, i.e. to unambiguously define the stage-discharge curve, in coastal rivers affected by sea backwater. For this reason, reliable data on the daily quantities of fresh water flowing into the Adriatic Sea are still not available in Croatia. The technical development of ultrasonic flow meters has created the conditions for improving hydrological measurements of transitional waters. The first continuous flow measurement system was installed on the Neretva River at Metković in 2015. This paper is comprised of the conducted hydraulic and spectral analyses of the new generation of measurements. In the first step, the influence of theseawater bottom layer dynamics on the measured discharges at Metković was investigated using a numerical model. This was followed by a non-stationary spectral analysis aimed at comparing the time series of measured and modelled sea levels and water levels and flow rates at Metković, as well as at identifying and characterising the cause of fluctuations in intra-day flow. The conducted analyses showed that seawater dynamics in the bottom layer can have a significant impact on measured values of discharge, especially during a dry period. The numerical and spectral analyses suggest that intra-day fluctuations of measured water levels and discharges are partly caused by tidal fluctuations; however, to a greater extent, their cause should be looked for in inflow fluctuations from the upstream part of the basin.

Key words: transitional waters, Neretva River, flow measurements, numerical model, STREAM 1D, salinity stratification, spectral analysis, continuous wavelet transformation

BEITRAG ZUR VERBESSERUNG DES SYSTEMS FÜR HYDROLOGISCHE MESSUNGEN VON ÜBERGANGSGEWÄSSERN: HYDRAULISCHE ANALYSE UND SPEKTRALANALYSE VON DURCHFLÜSSEN AM FLUSS NERETVA

Zusammenfassung. An den küstennahen Flüssen, die wegen des Meeres langsamer fließen, ist es oft unmöglich, den Durchfluss auf Grund von gemessenen Wasserständen zu bestimmen, bzw. die Durchflusskurve eindeutig zu definieren. Aus diesem Grunde stehen in Kroatien zuverlässige Angaben zu den Tagesmengen an Süßwasser, die in das Adriatische Meer fließen, noch immer nicht zur Verfügung. Dank der technischen Entwicklung von Ultraschall-Durchflussmessern konnten die hydrologischen Messungen von Übergangsgewässern verbessert werden. Ein erstes System zur kontinuierlichen Durchflussmessung wurde 2015 am Fluss Neretva in Metković eingesetzt. In dieser Untersuchung wurden die hydraulische Analyse und Spektralanalyse einer neuer Generation von Messungen durchgeführt. In der ersten Phase wurde anhand eines numerischen Modells der Einfluss der Dynamik der bodennahen Salzwasserschicht auf die gemessenen Durchflüsse in Metković untersucht. Danach wurde die nicht-stationäre Spektralanalyse durchgeführt, um die Zeitreihen von den gemessenen und von den modellierten Meeresspiegeln sowie Wasserständen und Durchflüssen in Metković zu vergleichen und die Ursache von täglichen Durchflussschwankungen zu bestimmen und zu beschreiben. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass die Salzwasserdynamik in der bodennahen Schicht auf die gemessenen Durchflusswerte einen großen Einfluss haben kann, besonders während der Trockenzeit. Die numerische Analyse und die Spektralanalyse deuten darauf hin, dass die täglichen Durchflussschwankungen von gemessenen Wasserständen und Durchflüssen teilweise ihre Ursache in Flutschwankungen haben. In größerem Maße soll aber die Ursache in Zulaufschwankungen im oberen Teil des Einzugsgebietes gesucht werden.

Schlüsselwörter: Übergangsgewässer, Fluss Neretva, Durchflussmessung, numerisches Modell, STREAM 1D, Salinitätsschichten, Spektralanalyse, kontinuierliche Wavelet-Transformation