



R 1.32.

METODA PRORAČUNA DNEVNIH PROTOKA NERETVE U METKOVIĆU

Dijana Oskoruš, Nino Krvavica, Mirjana Švonja

SAŽETAK: U uvjetima izrazito nestacionarnog, složenog tečenja u zoni riječnih ušća u more nemoguće je proračunati dnevne i satne vrijednosti protoka na osnovi prethodno definiranih protočnih krivulja. Iz tog se razloga na krškim rijekama Jadranskog sliva poput: Zrmanje, Krke, Cetine, Neretve i drugih, nije raspolagalo podacima o dnevnim količinama slatke vode koja utječe u Jadransko more. Dolaskom na tržište nove generacije ultrazvučnih mjerača za kontinuirano mjerenje protoka u takvim slučajevima su se postigli uvjeti za poboljšanje. U ovom radu je dan prijedlog metode proračuna dnevnih protoka na osnovi analize podataka prikupljenih na hidrološkoj postaji Metković - Neretva, kao oglednom primjeru. Također, provedena je simulacija površinskog prodora morske vode numeričkim modelom kako bi se izračunale dubine i protoci slojeva slane i slatke vode duž korita Neretve. Budući da se očekuje unaprjeđenje i modernizacija sustava za hidrološko praćenje površinskih voda kroz buduće projekte, stekli bi se uvjeti za prikupljanjem istovjetnih podataka i na drugim hidrološkim postajama neposredno prije ušća u more.

KLJUČNE RIJEČI: riječna ušća, mjerači protoka, model dvoslojnog tečenja

METHOD FOR CALCULATING DAILY DISCHARGES OF THE NERETVA RIVER AT METKOVIĆ

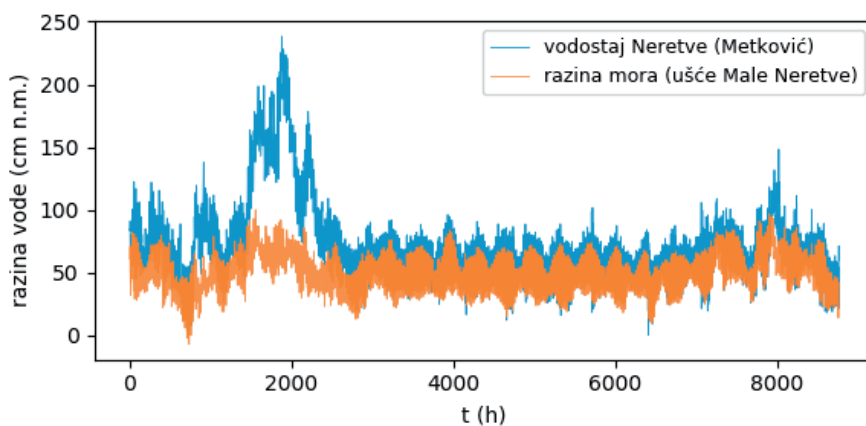
ABSTRACT: In extremely nonstationary, complex flow conditions of estuary zones, it is not possible to calculate daily and hourly discharge values based on previously defined discharge rating curves. For this reason, there was no available data on the daily quantities of freshwater flowing into the Adriatic Sea for karst rivers in the Adriatic basin, such as the Zrmanja, Krka, Cetina or Neretva Rivers. The appearance of a new generation of ultrasonic flow meters for continuous flow measurement on the market, these conditions have improved. The paper proposes a method for calculating daily discharges based on the analysis of data collected at the hydrological station Metković-Neretva as an example. Additionally, a simulation of surface saltwater intrusion using a numerical model was performed in order to calculate the depths and discharges of saltwater and freshwater layers along the Neretva riverbed. Since an upgrade and modernisation of the system for hydrological monitoring of surface waters within future projects is expected, conditions

have been met for the collection of such data at other hydrological stations as well immediately preceding the estuary mouth.

KEYWORDS: river mouth, flow meters, two-layer flow model

1. UVOD

Hidrološka postaja Metković na Neretvi osnovana je 1934. godine na lijevoobalnom zidu, nizvodno od cestovnog mosta, oko 21 km od ušća u Jadransko more. Od 1957. godine na postaji se bilježe satne vrijednosti vodostaja te se mogu pratiti dnevne oscilacije uslijed utjecaja morske plime i oseke koja se osjeća sve do uzvodno od Metkovića (slika 1). Od 1954. godine postoje i podaci o vodomjerenjima koja su se do 1972. godine vršila pomoću hidrometrijskog krila, a od 2004. godine mjerenja protoka se vrše ultrazvučnim mjerачem trenutnih brzina (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP). Na slici 2 prikazani su rezultati vodomjerenja iz oba razdoblja na kojima se uočava veliko raspršenje rezultata naročito u području malih voda ($Q < 300 \text{ m}^3/\text{s}$). Odstupanja u rezultatima protoka se pojavljuju i kod srednjih protoka, što je vidljivo na rezultatima novijih mjerenja.

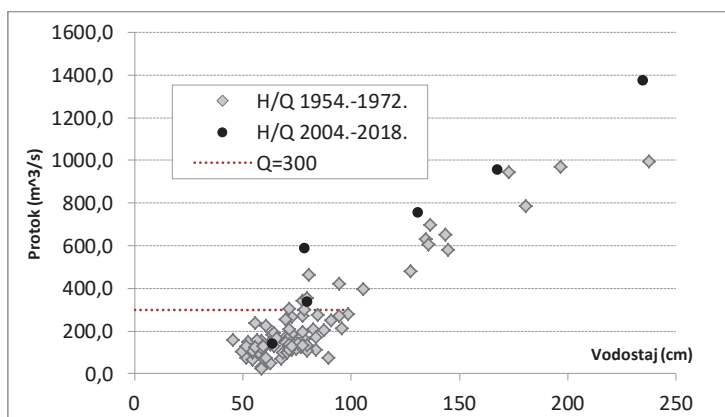


Slika 1. Prikaz izmjerenih apsolutnih razina Neretve u Metkoviću i mora na ušću Male Neretve tijekom 2018. godine

2. PRIKAZ STANJA

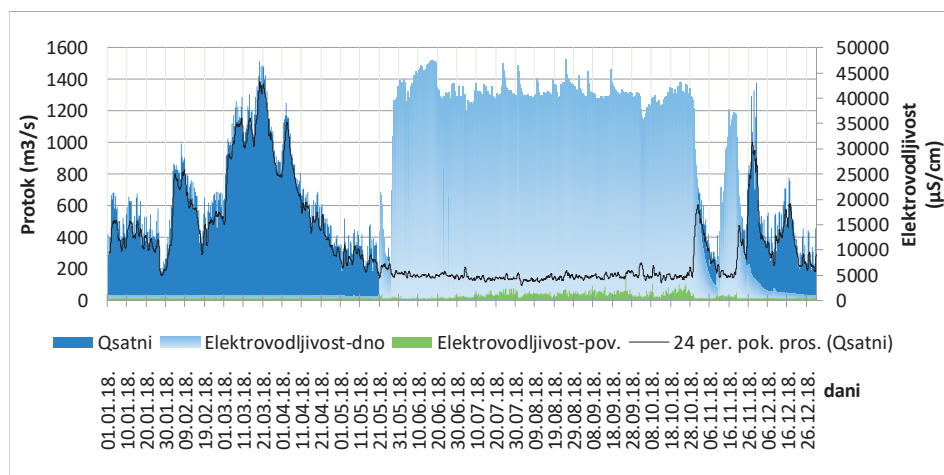
Prema grafičkom prikazu na slici 2, najveći protok u ovom profilu ($Q=1374,8 \text{ m}^3/\text{s}$) izmjeren je pri vodostaju $H=235 \text{ cm}$, dana 20.3.2018. godine. Uslijed snažne propagacije vodnog vala koji je bio posljedica naglog topljenja snijega s uzvodnog sliva u Bosni i Hercegovini, srednja profilska brzina toka Neretve iznosila je 1,54 m/s. U takvim uvjetima tečenje je bilo jednosmjerno prema moru. Prema grafičkom prikazu vidljivo je da vodomjerenja u domeni velikih voda ($Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$) pokazuju čvrsti korelacijski odnos te da bi se za taj segment mogao definirati jednoznačan konsumpcijski odnos. Međutim, za vrijednosti ispod srednjih protoka ($Q_{sr} = 325 \text{ m}^3/\text{s}$), to nije moguće. Iz prikaza se može zaključiti da je u slučajevima izrazito nestacionarnog, složenog tečenja za vrijeme malih

voda, nemoguće proračunati dnevne i satne vrijednosti protoka na osnovi prethodno definiranog jednoznačnog konsumpcijskog odnosa.



Slika 2. Rezultati vodomjerenja na HP Neretva-Metković, 1954. - 1972. i 2004. - 2018.

Kao što je već poznato, na ušćima priobalnih rijeka Jadranskog sliva javlja se uslojeno tečenje, gdje sloj slatke vode teče prema ušću iznad sloja morske vode koja prodire uzvodno (tzv. slani klin) (Krvavica, 2016). Stoga se od 2015. godine u profilu cestovnog mosta mjeri trenutni protok pomoću tri ugrađena horizontalna ADCP uređaja, elektrovodljivost, mutnoća i drugi fizički parametri.



Slika 3. Vrijednosti protoka i elektrovodljivosti za 2018. godinu u profilu mosta u Metkoviću

Položaj mjerača protoka, način njihove montaže te položaj sonde za mjerenje elektrovodljivosti, imao je za cilj definiranje minimalnog protoka vode pri kojem Neretva potisne more (slanu vodu) iz profila u Metkoviću te mjerenje većih protoka za analizu obrane od poplava. Mjerači protoka su postavljeni horizontalno, u svaki otvor mosta po jedan i nalaze se uvijek u slatkom sloju, a tvrtka Higma d.o.o. tri puta godišnje vrši kontrolna mjerenja pri protoku $Q > 200 \text{ m}^3/\text{s}$ radi provjere i kalibracije ugrađenih ADCP uređaja. Senzori za mjerenje elektrovodljivosti postavljeni su na dnu korita i pri površini. U režimu velikih voda postavljena oprema i metoda mjerenja zadovoljava potrebe. Na slici 3, dan je grafički prikaz ukupnih vrijednosti protoka dobivenih zbrajanjem protoka sva tri mjerača i elektrovodljivosti izmjerene na dnu i na površini tijekom 2018. godine. Na grafičkom prikazu je vidljivo da se vrijednosti elektrovodljivosti kreću od 0,74 do 2640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na površini, a od 0,74 do čak 80100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na dnu korita. Prema Priručniku o temeljnoj kakvoći vode u Hrvatskoj (Dadić, 2003), kod boćatih voda elektrovodljivost je viša od 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a kod morske vode prelazi 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Švonja, 2018.). Na grafičkom prikazu je vidljivo da su se od svibnja do listopada vrijednosti elektrovodljivosti izmjerene na dnu kretale oko 40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što odgovara salinitetu 37 PSU (pri 10 °C) te ukazuje na prisutnost morske vode. Povećana elektrovodljivost na površini ukazuje na prisutnost boćate vode, što upućuje na činjenicu da se razdjelnica između slane i slatke vode nalazi vrlo blizu površine. U navedenom razdoblju, od svibnja do listopada 2018. godine, ukupna razina vode na postaji Metković vrlo jasno prati promjene razine mora zabilježene na ušću Male Neretve (od 2880 h do 6480 h na slici 1).

Velike vode se na Neretvi obično javljaju od studenog do travnja, a male vode od svibnja do listopada. Uzvodni dotok je ovisan o upravljanju postojećim hidro-energetskim sustavom s pet izgrađenih akumulacija u gornjem i srednjem toku Neretve na području BiH. Nakon izgradnje hidroelektrana, na Neretvi ne postoji više prirodni režim malih voda već se nizvodno ispušta kontrolirani minimalni protok iz HE Mostar. Kako je hidrološka postaja Metković-Neretva sastavni dio državne hidrološke mreže, motivacija ovog istraživanja bila je provesti proračun dnevnih protoka u svim režimima kao i definirati godišnje količine slatke vode koja Neretvom utječe u more. S tim u vezi posebna pažnja je usmjerena na analizu malih voda i proračun protoka u ljetnim mjesecima, budući da baš tada dolazi do značajnog prodiranja slane vode sve do Metkovića (slika 3). Metodom proračuna protoka za uslojeno tečenje dvaju fluida različite gustoće, moglo bi se utvrditi minimalni protok Neretve koji bi garantirao potiskivanje slane vode prema ušću, budući da je pitanje zaslanjivanja od velikog interesa za cijelu Neretvansku dolinu.

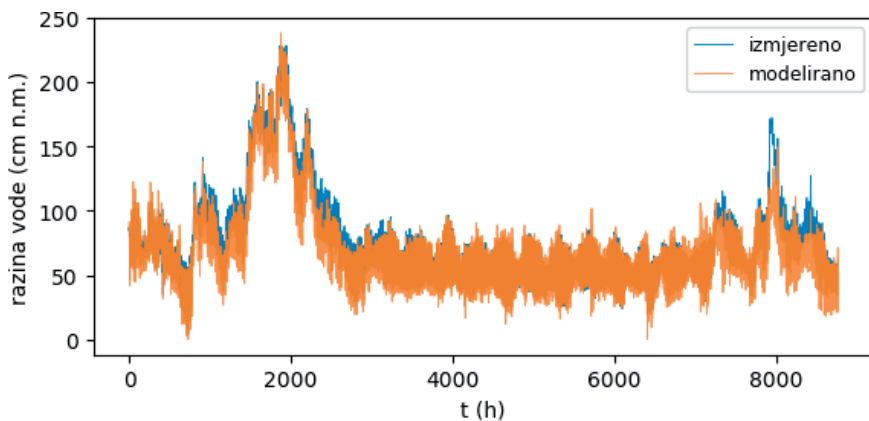
3. OPIS NUMERIČKOG MODELA

Kako bi se potvrdile pretpostavke o prisutnosti slane vode i njihovom utjecaju na ukupnu razinu vode na postaji Metković, provedene su preliminarne simulacije pomoću odgovarajućeg numeričkog modela. U tu svrhu, proračun debljine sloja slatke i slane vode te protoka u svakom od slojeva proveden je numeričkim modelom STREAM 1D kojim se definira dvoslojno tečenje fluida različite gustoće u uslojenim uvjetima karakterističnima za riječna ušća (Krvavica et al., 2016., 2017.). Model se temelji na metodi konačnih volumena te je prethodno detaljno validiran na ušću Rječine, za stacionarne i nestacionarne uvjete toka (Krvavica et al., 2016., 2017.).

Proračun je proveden za razdoblje od 1. siječnja do 31. prosinca 2018. godine. Prostorna

domena modela obuhvaća 30 km uzvodno od ušća u Jadransko more. Geometrija korita Neretve opisana je realnim nagibom dna korita te pravokutnim poprečnim presjekom korita konstantne širine 90 m. Domena je podijeljena na 150 ćelija, s prostornim korakom $\Delta x=200$ m, uz promjenjiv vremenski korak koji zadovoljava uobičajeni uvjet stabilnosti definiran s $CFL = 0.8$. Relativna gustoća zadana je s vrijednosti $r=0.975$ ($\rho_1=1000$ kg/m³, $\rho_2=1026$ kg/m³).

Sumarni protoci izmjereni fiksnim horizontalnim ADCP uređajima u profilu mosta u Metkoviću (HP Metković – Neretva) korišteni su kao gornji rubni uvjet modela (slika 1). Razine mora izmjerene na HP Ustava ušće nizvodno - Mala Neretva zadane su na nizvodnom rubnom uvjetu (slika 1). Kako bi se odredili mjerodavni koeficijenti trenja između fluida i korita, provedena je kalibracija modela usporedbom ukupnih razine vode s izmjerenim vrijednostima na HP Metković – Neretva. Na temelju zabilježenih satnih vrijednosti protoka i vodostaja u razdoblju 2015. - 2018. godine, kao i rezultatima pojedinačnih vodomjerenja iz razdoblja 2004. - 2018. (slika 2), određen je dogovarajući Manningov koeficijent hrapavosti u iznosu od $n=0.03$ s/m^{1/3}. Posmično naprezanje između slojeva slane i slatke vode je opisano koeficijentom trenja f_i . Preliminarnom kalibracijom, s obzirom na prethodno poznate duljine prodora morske vode (slanog klina), određeno je da navedeni koeficijent ovisi o protoku Neretve te je zadan izrazom $f_i = 8e-7Q + 7e-4$. Rezultat kalibracije modela, odnosno usporedba izračunatih i izmjerenih razina vode na postaji HP Metković – Neretva za 2018. godinu prikazana je na slici 4.

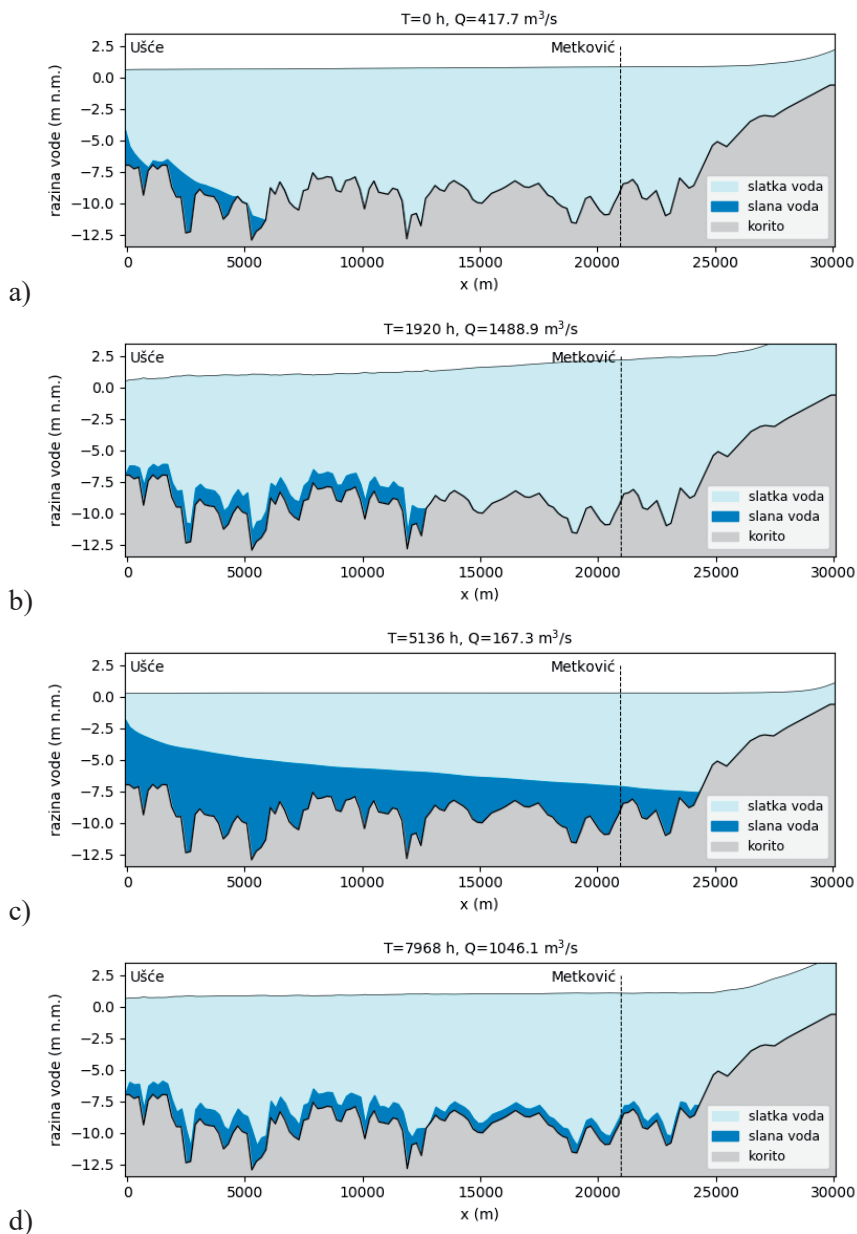


Slika 4. Usporedba izmjerene i simulirane razine vode na HP Metković – Neretva za 2018. godinu

3.1. Rezultati

Rezultati numeričkog modela omogućuju uvid u dinamiku slanog klina, odnosno u promjene debljine slojeva slane i slatke vode, kao i protoke u svakom od navedenih slojeva. Iako je vremenski korak modela svega nekoliko sekundi, rezultati su zabilježeni svakih sat vremena. Ispis rezultata dan je obliku excel datoteke koja sadrži: srednje dnevne, maksimalne i minimalne satne vrijednosti za odabranu lokaciju, u ovom slučaju

HP Metković – Neretva udaljena 21 km od ušća. Na slici 5 prikazano je nekoliko karakterističnih rezultata u vidu uzdužnog presjeka korita Neretve s proračunatim oblikom slanog klina (debljinom sloja slane i slatke vode).

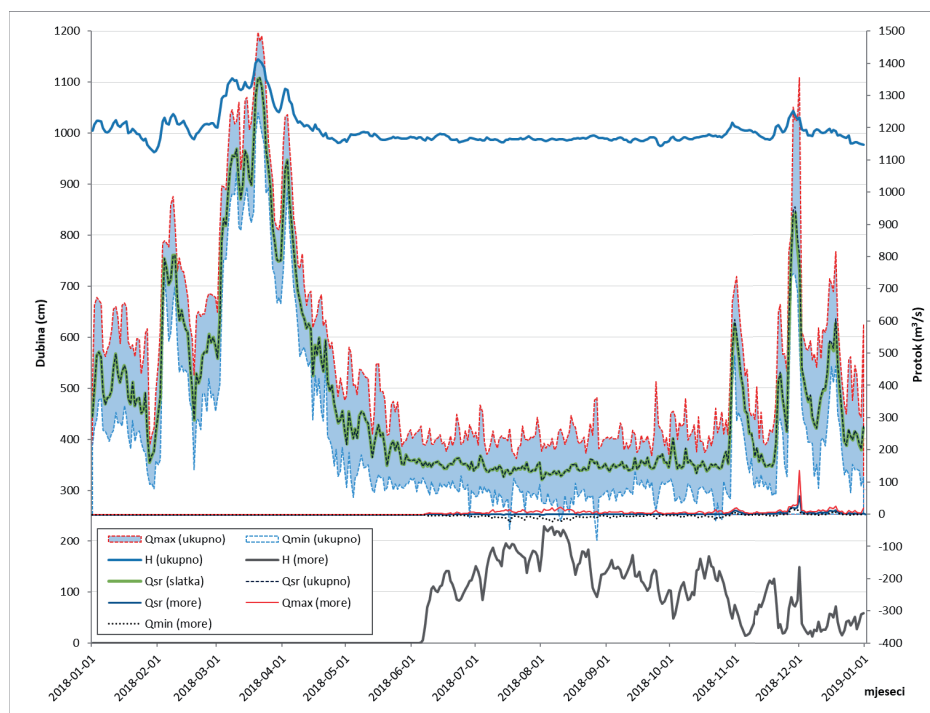


Slika 5. Rezultati numeričkog modela: Uzdužni presjek Neretve u različitim vremenima tijekom 2018. godine: a) $T_1=1.1.$, b) $T_2=21.3.$, c) $T_3=2.8.$, d) $T_4=28.11.$

Na slici 5 dani su uzdužni presjeci korita Neretve za četiri različita trenutka:

- T_1 - na dan 1.1.2018. ($T=0$ h) pri protoku $Q=417,7$ m³/s, gdje je vidljivo da slani klin prodire samo do udaljenosti od 5 km od ušća;
- T_2 - na dan 21.3.2018. ($T=1920$ h) pri vrhu vodnog vala sa maksimalnim protokom $Q=1488,9$ m³/s, gdje Neretva potiskuje slani klin te se morska voda nalazi samo u tankom sloju pri dnu korita, ali i do 13 km od ušća, što je posljedica prethodno duljeg prodora slanog klina;
- T_3 - na dan 2.8.2018. ($T=5136$ h) pri malom protoku od $Q=167,3$ m³/s, gdje slani klin prodire u korito sve do uzvodno od Metkovića;
- T_4 - na dan 28.11.2018. ($T=7968$ h) gdje ponovo povećani protok Neretve od $Q=1046,1,4$ m³/s istiskuje slani klin iz korita, ali je morska voda prisutna u tankom sloju pri dnu, sve do Metkovića.

Na slici 6 su prikazani preliminarni rezultati proračuna za 2018. godinu kako bi se prikazalo kakve se vrijednosti protoka i razina slane vode mogu očekivati. Primjećuje se kako je početkom prosinca zabilježen izraženiji pozitivni protok u donjem sloju ($Q>100$ m³/s), označen sa oznakom Q_{max} (more), a koji može imati znatan utjecaj na nepreciznost procjene protoka Neretve iz ADCP mjerenja. Naime, računalni algoritam implementiran u ADCP uređajima protoke računa iz raspodjele brzine vode izmjerenih po cijeloj površini poprečnog presjeka korita.



Slika 6. Prikaz debljine slojeva slane i slatke vode i pripadajućih protoka Neretve u profilu Metković za 2018. godinu (Q – protok, H – razina vode, sr – srednje, max – maksimalno, min – minimalno)

ZAKLJUČAK

Uzimajući u obzir da su brzine ispod mosta u Metkoviću pri malim dotocima izrazito male, a poprečni presjek dosta velik, vrlo se teško mjeračima protoka može definirati mala voda na takvim profilima. Također, na površinske brzine određeni utjecaj ima i vjetar, kojeg ne treba zanemariti pogotovo kod malih protoka.

Radarsko mjerenje površinskih brzina dalo bi možda bolje rezultate, ali je tu pitanje mjerodavnih vrijednosti. Naime, metoda određivanja protoka iz površinskih brzina temelji se na vertikalnom profilu brzina koji je lako predvidljiv za tečenje jednog sloja vode (uz poznat koeficijent trenja). Međutim, za dvoslojno tečenje, vertikalni profil brzina ovisi o posmičnom naprezanju na razdjelnici te intenzitetu miješanja između dva sloja slane i slatke vode te bi pretpostavke u tom slučaju išle u smjeru prevelikog pojednostavljenja.

Prvi korak u definiranju preciznijeg vertikalnog profila saliniteta svakako bi trebao biti ugradnja vertikalne letve sa CTD uređajima za mjerenje elektrovodljivosti, postavljenim na različite visine kako bi se dobio vertikalni profil saliniteta. To bi se nadalje moglo nadograditi s vertikalnim ADCP uređajem, koji bi se postavio na dno i na taj način izmjerio vertikalni profil brzina. U kombinaciji s horizontalnim ADCP uređajem, mogao bi se uz određeni trud izraditi jednostavni algoritam za proračun protoka.

Numerički modeli dvoslojnog tečenja dva fluida različitih gustoća, poput STREAM 1D prikazanog u ovom radu, također mogu biti koristan element metodologije izračuna malih voda na ušćima priobalnih rijeka. S time da se model obavezno mora kalibrirati nakon provedenih mjerenja dubine slanog klina pri nekoliko različitih protoka i razina mora. Nakon kalibracije, ovakvi modeli mogu poslužiti i za prognozu očekivanih događaja, posebno kod ekstremnih vrijednosti malih voda te izrazito visokih razina mora, koje se mogu sve češće očekivati u budućnosti.

LITERATURA

- [1] Dadić, Ž. (2003). *Priručnik o temeljnoj kakvoći vode u Hrvatskoj*. Zagreb, Hrvatski zavod za javno zdravstvo.
- [2] Krvavica, N., Travaš, V., & Ožanić, N. (2016). 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.
- [3] Krvavica, N. (2016). *One-dimensional numerical model for layered shallow water flow in highly stratified estuaries*, Doktorski rad. Rijeka: Građevinski fakultet, 2016.
- [4] Krvavica, N., Kožar, I., Travaš, V., i Ožanić, N. (2017). Numerical modelling of two-layer shallow water flow in microtidal salt-wedge estuaries: Finite volume solver and field validation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(1), 49-59.
- [5] Švonja, M., (2018) Mjerač protoka na rijeci Neretvi u Metkoviću, Znanstveno-stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem „*Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda te smanjenja poplavnih rizika - Suvremeni trendovi i pristupi*“, Brela, 18. - 20. listopada 2018., Zbornik radova str. 301-304.
- [6] Izvor podataka: *HIS 2000*, Baza hidroloških podataka, DHMZ, Hrvatske vode

AUTORI

dr. sc. Dijana Oskoruš ^a

doc. dr. sc. Nino Krvavica ^b

mr. sc. Mirjana Švonja ^c

^a Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb, 10000, Hrvatska,
oskorus@cirus.dhz.hr

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

^c Hrvatske vode, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, 10000, Hrvatska,
smirjana@voda.hr