

Primljen / Received: 5.9.2012.
 Ispravljen / Corrected: 25.10.2012.
 Prihvaćen / Accepted: 29.11.2012.
 Dostupno online / Available online: 15.12.2012.

Mjerenje i analiza zaslanjivanja na ušću Rječine

Autori:



Nino Krvavica, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
nino.krvavica@gradri.hr



Boris Mofardin mag.ing.aedif.
 Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
boris.mofardin@gmail.com



Igor Ružić, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
igor.ruzic@gradri.hr



Prof.dr.sc. **Nevenka Ožanić**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
nevenka.ozanic@gradri.hr

Prethodno priopćenje

Nino Krvavica, Boris Mofardin, Igor Ružić, Nevenka Ožanić

Mjerenje i analiza zaslanjivanja na ušću Rječine

Tijekom prve polovine 2012. godine proveden je veći broj mjerenja saliniteta u donjem toku Rječine. Pokazalo se kako je u ušću Rječine prisutno uslojeno tečenje slatke riječne vode iznad klina slane morske vode. Izrađeno je nekoliko regresijskih analiza koje opisuju funkcionalnu vezu protoka Rječine s duljinom slanog klina. U radu se također prikazuje usporedba izmjerenih vrijednosti dimenzija slanog klina s Keuleganovim poluempirijskim izrazima.

Ključne riječi:

Rječina, salinitet, slani klin, mjerenje, regresija, Keulegan

Preliminary note

Nino Krvavica, Boris Mofardin, Igor Ružić, Nevenka Ožanić

Measurement and analysis of salinization at the Rječina estuary

A number of salinity measurements were made in the first half of 2012 at the lower reaches of the Rječina River. The presence of stratified fresh water flow above the salt water wedge was established at the estuary of the Rječina River. Several regression analyses were made in order to describe functional relationship between the Rječina flow rate and the salt wedge length. The comparison of measured salt wedge dimensions and the Keulegan semi-empirical expressions is also presented in the paper.

Key words:

Rječina, salinity, salt wedge, measurement, regression, Keulegan

Vorherige Mitteilung

Nino Krvavica, Boris Mofardin, Igor Ružić, Nevenka Ožanić

Messung und Analyse der Versalzung an der Mündung des Flusses Rječina

In der ersten Hälfte des Jahres 2012 wurde eine bedeutende Anzahl von Messungen des Salzgehaltes im Unterlauf des Flusses Rječina durchgeführt. In der Mündung des Flusses konnte über dem Salzwasserkeil ein geschichteter Süßwasserstrom festgestellt werden. Eine Reihe von Regressionsanalysen ist durchgeführt worden, die den funktionellen Zusammenhang der Strömung des Flusses Rječina mit der Länge des Salzwasserkeils beschreiben. Außerdem ist in der Arbeit ein Vergleich der durch die Messungen erhaltenen Bemessungswerte des Salzwasserkeils mit den semi-empirischen Ausdrücken nach Keulegan dargestellt.

Schlüsselwörter:

Fluss Rječina, Salzgehalt, Salzwasserkeil, Messung, Regression, Keulegan

1. Uvod

Vodotok Rječine je tipični primjer priobalne krške rijeke, na čijem je ušću nastalo i kroz povijest se razvijalo urbano središte grada Rijeke. Područje smješteno uz donji tok Rječine ima znatan urbanistički potencijal i tendenciju transformacije u centralni gradski park [1] čije će održavanje svakako zahtijevati određene količine vode za zalijevanje zelenih površina. Uz nezaobilazan problem traženja alternative čišćenju gradskih ulica pitkom vodom, očito je kako u gradu Rijeci postoje čvrste osnove za promišljanja o kvalitativnim i kvantitativnim mogućnostima zahvaćanja voda iz donjeg toka Rječine za višenamjenske komunalne potrebe.

Riječno ušće je općenito tranzicijsko područje u kojem dolazi do miješanja slatke riječne i slane morske vode. Propagacija morske vode u riječno korito uzvodno od ušća može varirati od nekoliko stotina metara do čak i nekoliko stotina kilometara, ovisno o hidrološkim prilikama, morskim mijenama i batimetriji kanala [2].

Prisutnost klorida može negativno utjecati na kvalitetu vode i učiniti je neprikladnom za korištenje u komunalne ili agrikulturne svrhe. U tom smislu potrebno je analizirati proces intruzije morske vode u ušće Rječine s ciljem definiranja optimalnog položaja zahvata vode iz zone dovoljno niskog saliniteta.

Interakcija slane i slatke vode vrlo je kompleksan hidrodinamički problem, s mnogim još uvijek nedovoljno razjašnjenim procesima [2]. Pristupa ima mnogo: regresijske metode, empirijski izrazi, fizikalni modeli, 1D modeli uslojenog tečenja ili u novije vrijeme 3D numerički modeli [3, 4, 5]. Iako su ovi pristupi različiti, zajednička im je potreba za terenskim mjerenjima u cijelom rasponu utjecajnih parametara [2].

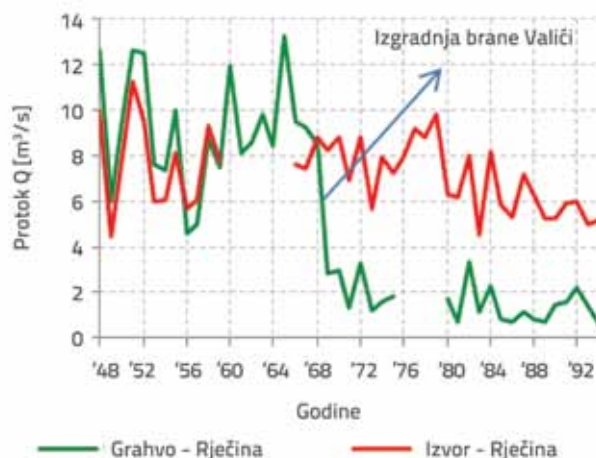
Ovisno o intenzitetu miješanja morske i riječne vode, ušće može biti potpuno izmiješano, djelomično izmiješano ili se može formirati "slani klin". Strukturu saliniteta u obliku klina karakterizira vrlo slabo turbulentno miješanje i izrazita vertikalna stratifikacija s prisutnom haloklinom (diskontinuitet saliniteta), odnosno piknoklinom (diskontinuitet gustoće). Ovakav se tip ušća formira u područjima s relativno velikim protocima te s vrlo malim amplitudama plimnih oscilacija, tzv. mikrotajdalnim morima (amplitude manje od 2,0 m) [2].

Stacionarno stanje u kojem se javlja slani klin zove se zarobljeni slani klin, čije su dimenzije vrlo detaljno analizirane s teoretske [6] i eksperimentalne osnove [7].

2. Istražno područje

Rječina je relativno kratka alogena krška rijeka duljine 18,6 km, čiji tok počinje Izvorom Rječine u zaleđu grada Rijeke na koti od 325 m n. m., a završava u samome urbanom središtu grada utokom u Jadransko more. Vodni resursi Rječine koriste se pretežito u dvije svrhe; za hidroenergetiku (protočna hidroelektrana sa zahvatom na brani Valiči i strojarnicom u centru grada) te za vodoopskrbu (glavni zahvati na Izvoru Rječine te na izvoru Zvir).

Režim toka u srednjem i donjem dijelu Rječine značajno se promijenio nakon izgradnje 35 metara visoke betonsko-gravitacijske brane Valiči 1968. godine i formiranja akumulacije od oko 0,47 mil. m³ u blizini naselja Grohovo (slika 1) [8].



Slika 1. Prikaz kretanja srednjih godišnjih protoka na postaji Izvor-Rječina i Grohovo-Rječina (1948.-1994.) [8]

Akumulacija Valiči funkcionira kao dnevni kompenzacijski bazen HE Rijeka locirane u samom centru grada, do koje vodi 3,1 km dug tunel kapaciteta 10,5 m³/s. Nizvodno od brane, korito rijeke suho je veći dio godine, osim u vrlo vodnim razdobljima kada dolazi do prelijevanja brane. U donjem toku Rječine, udaljeno svega 1.700 m od mora, nalazi se vrelo Zvir na 4,7 m n. m., najizdašnije izvorište na području Grada Rijeke. Građevinskim zahvatima na kaptiranju izvora formirano je mirno jezero promjera 24 m koje se na južnoj strani prelijeva u korito Rječine. Neposredno nizvodno od izvora Zvir, preljevne vode HE Rijeka također utječu u korito Rječine. Na slici 2. prikazani su svi spomenuti elementi donjeg toka Rječine.



Slika 2. Situacijski položaj vodnih resursa i hidroloških postaja u donjem dijelu sliva Rječine

Nakon velikih poplava i izvedenih regulacijskih radova u 19. st., na ušću Rječine, između Mrtvog kanala (starog korita Rječine) i novog korita Rječine, nastao je teren trokutastog oblika koji je upravo zbog takvog oblika dobio naziv Delta. Dugogodišnjim nasipavanjem ovog područja produživalo se i novo korito Rječine, sve do sadašnjeg oblika ušća omeđenog Deltom s jedne i lukom Brajdica s druge strane (slika 3.).



Slika 3. Područje Delte i ušća Rječine (foto: Rino Gropuzzo)

Plimne oscilacije u Jadranskom moru mješovitog su tipa, što znači da u jednom razdoblju prevladavaju poludnevne komponente dvaput izmjenjujući plimu i oseku u jednom danu, dok u drugom dominiraju dnevne komponente koje rezultiraju samo jednom dnevnom izmjenom plime i oseke. Dnevne amplitude morskih mijena kontinuirano rastu od južnog prema sjevernom Jadranu, pa je tako na osnovi dugogodišnjeg mjerenja na mareografskoj postaji u Bakru izračunata srednja dnevna amplituda u iznosu od 30 cm.

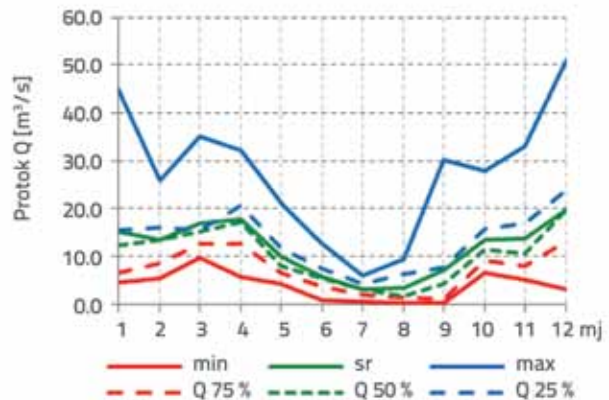
Jadransko more ima relativno visok prosječni salinitet od 38,3 ‰, za razliku od prosječnog saliniteta oceana koji iznosi 35 ‰ [9].

3. Hidrološka analiza donjeg toka Rječine

Opažanja na najnižvodnijoj hidrološkoj postaji "Sušak tvornica – Rječina" nažalost nisu kontinuirano provedena, uglavnom zbog neodržavanja i čestih kvarova na postaji. Zbog važnosti tog završnog profila, mjerenja su ipak obnovljena 1998. godine (uz kraće prekide), što je omogućilo recentniju hidrološku analizu za razdoblje 1999. – 2011. Srednji godišnji protok na ovom profilu (1999. – 2011.) iznosi 10,4 m³/s s blagim trendom rasta, što je nešto niža vrijednost u odnosu na prethodne analize srednjega godišnjeg protoka na istom profilu u iznosu od 12,9 m³/s, izrađene na osnovi bilance cijelog sliva (1961. – 1990.) [10]. Ova se razlika može objasniti relativno kratkim nizom analiziranih godina koje uz to sadržavaju i vrlo sušne 2003. i 2007. godinu.

Srednje mjesečne protoke, za razdoblje od 1999.-2011., karakteriziraju izrazite sezonske oscilacije, najveći srednji mjesečni protoci zabilježeni su u zimskim mjesecima (51,1

m³/s u prosincu 2010.), dok se minimalni srednji mjesečni protoci javljaju u ljetnim mjesecima (0,14 m³/s u kolovozu 2003.), kada Izvor Rječine u pravilu presušuje, pa bilančni doprinos u donjem toku čine uglavnom preljevne vode izvora Zvir. Slika 4. prikazuje statističke parametre srednjih mjesečnih protoka na postaji Sušak tvornica – Rječina za razdoblje 1999.-2011. Osim prosječnih vrijednosti (*sr*), prikazane su minimalne (*min*) i maksimalne vrijednosti (*max*) te protoci vjerojatnosti prekoračenja 75% (Q75 %), 50% (Q50 %) i 25% (Q25 %).



Slika 4. Statistički parametri srednjih mjesečnih protoka na postaji Sušak tvornica – Rječina (1999.-2011.)

Maksimalni dnevni protok u istom razdoblju iznosio je 124,0 m³/s (26. siječanj 2001.), dok je tijekom mjeseca kolovoza i rujna sušne 2003. godine korito gotovo presušilo (< 0,1 m³/s). Ovdje također treba napomenuti kako donji dio toka Rječine (nizvodno od preljeva iz HE Rijeka) karakterizira i izrazita dnevna oscilacija protoka uslijed periodičnog rada HE Rijeka. Naime, hidroelektrana radi po nekoliko sati na dan punim kapacitetom (10,5 m³/s), što znači da se u sušnijim mjesecima protok može naglo povećati, odnosno smanjiti i nekoliko puta u jednom danu.

4. Metodologija mjerenja na ušću Rječine

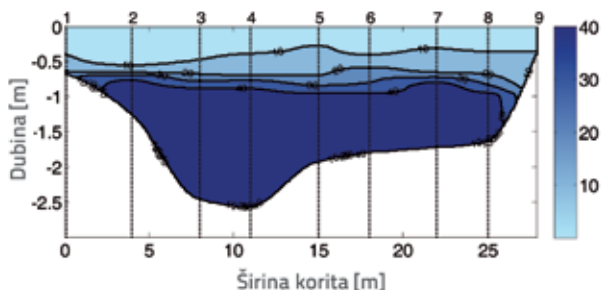
Mjerenja saliniteta duž donjeg toka Rječine provedena su u razdoblju od veljače do kolovoza 2012. godine kroz ukupno 16 ispitivanja. Na istražnom području duž toka Rječine, počevši od samog ušća definirano je 8 mjernih profila, ukupne dužine 613,0 m. Svi profili se nalaze na lokaciji postojećih mostova preko Rječine, što je omogućilo jednostavno i nesmetano mjerenje u danim uvjetima (slika 5.).

Prilikom mjerenja korišten je CTD Diver Schlumberger DI263 koji kontinuirano mjeri i u digitalnom obliku zapisuje podatke o specifičnoj vodljivosti (u nastavku vodljivost) [mS/cm], temperaturi [°C] i tlaku [hPa]. Mjerni je uređaj programiran da zapisuje podatke svaku sekundu, a brzina uranjanja instrumenta u vodu prilagođena je vrijednosti od 10 cm/s ili manje. U preliminarnim analizama mjerenja provedena na



Slika 5. Situacijski položaj mjernih profila u donjem toku Rječine

više mjesta po poprečnom profilu rijeke, na osnovi kojih je zaključeno kako se vertikalni profil vodljivosti i temperature ne mijenja značajno po širini poprečnog profila te kako je dovoljno samo jedno mjerenje na svakom profilu, na mjestu najveće dubine. (Slika 6.)



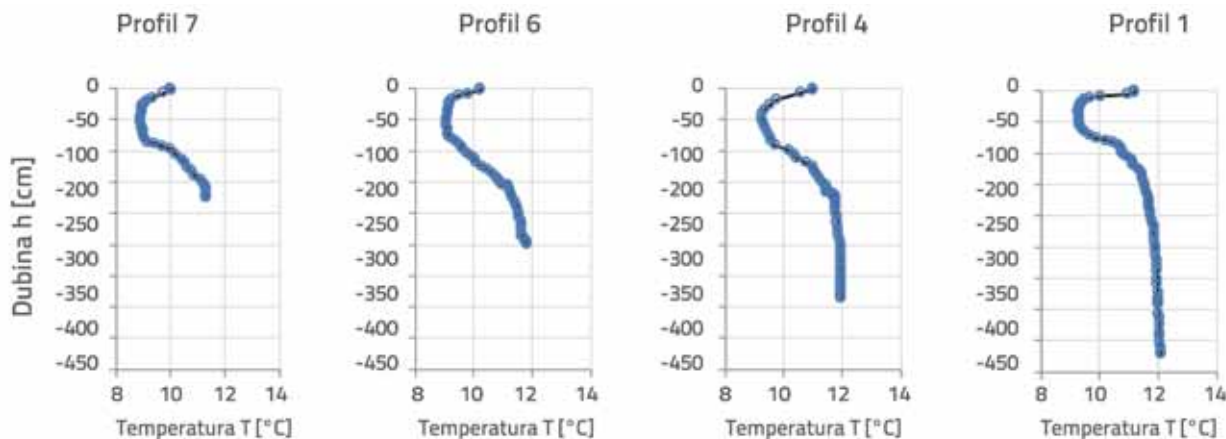
Slika 6. Primjer izmjerenih vrijednosti vodljivosti vode (mS/cm) po poprečnom presjeku Rječine (profil P4)

Na slikama 7. i 8. prikazano je nekoliko primjera vertikalnih profila dubinske raspodjele temperature i vodljivosti izmjerenih 16. travnja pri protoku od $Q=9,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Vidljiva je izrazita stratifikacija između donjeg sloja slane morske vode

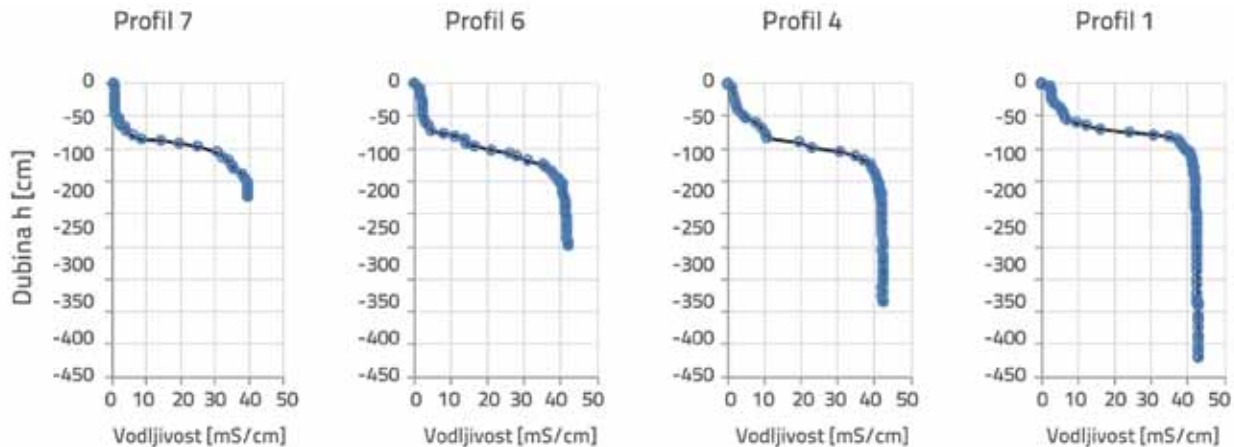
i gornjeg sloja slatke riječne vode. Prijelazno područje je vrlo kratko s naglim skokom, čime je potvrđena prisutnost slanog klina.

Neposredno prije početka svakoga pojedinog mjerenja zabilježena je i razina vode na hidrološkoj postaji "Sušak tvornica – Rječina" (izvan dosega maksimalne intruzije slanog klina), koja je preko postojeće usvojene protočne krivulje preračunata u protok. Uz poznatu geometriju poprečnog presjeka najuzvodnijeg profila (P8) izračunata je i brzina vode uprosječena po površini poprečnog presjeka. U slučaju kada je zabilježena prisutnost slane vode na najuzvodnijem profilu, brzina vode je izračunata na osnovi površine poprečnog presjeka gornjeg sloja slatke vode. Mjerenja su obično provedena dva puta na dan i to za vrijeme plime i oseke.

Vrijednost praktičnog saliniteta (u nastavku salinitet) izračunata je prema poznatim empirijskim izrazima [11] na osnovi izmjerenih vrijednosti vodljivosti, temperature i tlaka. Praktični salinitet je bezdimenzionalna veličina, ali se u praksi vrlo često označava jedinicom PSU (Practical Salinity Unit). Iako se mjerenje vodljivosti često definira kao indirektna metoda mjerenja saliniteta, treba imati na umu da je njihova veza nelinearna te ovisi i o tlaku i o temperaturi. Utjecaj tlaka je u slučaju mjerenja vodljivosti u rijekama malih dubina praktički

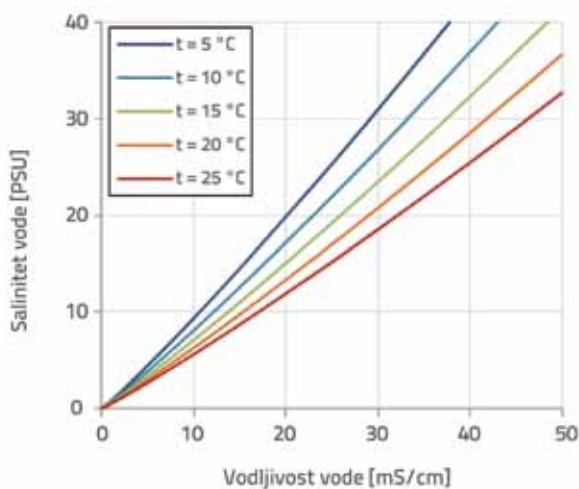


Slika 7. Vertikalni profili temperature vode izmjereni 16. travnja 2012.



Slika 8. Vertikalni profili vodljivosti vode izmjereni 16. travnja 2012.

zanemariv, ali temperatura ima veliki utjecaj na proračun saliniteta (kao i gustoće). Na slici 9. prikazan je dijagram odnosa vodljivosti i saliniteta za različite temperature vode na dubini od 1,0 m.



Slika 9. Dijagram odnosa vodljivosti i saliniteta vode pri različitim temperaturama

Kako su uzdužni razmaci među profilima duž vodotoka relativno kratki, vrijednosti između dvaju susjednih profila su interpolirane (*bicubic spline* interpolacija) radi točnijeg prikaza izohalina (konture istih vrijednosti saliniteta) duž korita Rječine (Slike 16. a, b, c i d).

5. Izmjerene dimenzije slanog klina

Zabilježeni protoci na analiziranom dijelu toka Rječine, razine mora, ukupne dubine vode, fizikalne karakteristike riječne i morske vode te izmjereni, predviđeni (regresijska analiza) i izračunati (Keuleganov izraz) parametri duljine slanog klina i dubine razdjelnice slojeva na ušću prikazani su u tablici 1. Razdjelnica slojeva definirana je kao izolinja 50%-tne

vrijednosti između maksimalne i minimalne gustoće fluida (najčešće podudara i s maksimalnim gradijentom gustoće) [12]. U skladu s navedenim i po uzoru na recentnu literaturu koja se bavi sličnom problematikom [13], duljina slanog klina L_{30} definirana je kao horizontalna udaljenost izohaline vrijednosti 30 PSU od ušća, dok je dubina razdjelnice slojeva h_{15} definirana kao vertikalna udaljenost izohaline vrijednosti 15 PSU od površine vode.

Tijekom svih 16 mjerenja, u svakom vertikalnom profilu zabilježena je potpuna stratifikacija, čime je dokazana prisutnost slanog klina u cijelom rasponu izmjerenih protoka ($2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ – $30,4 \text{ m}^3/\text{s}$), kao i morskih mijena (od $-0,05$ do $+0,57 \text{ m n. m.}$). Prema Hansen – Rattray klasifikaciji [14] ušće Rječine spada u tip 4 – slani klin. Prisutnost slanog klina već je zabilježena kod većine mediteranskih rijeka: Rhone u Francuskoj i Ebro u Španjolskoj [15], rijeke Po u Italiji [16], rijeke Strymon u Grčkoj [13] te Mirne, Raše [17] i Neretve [18] u Hrvatskoj.

Dobivene vrijednosti odabranih mjernih parametara u velikoj su mjeri pomogli pri razumijevanju dinamike slanog klina u donjem toku Rječine. Najveći prodor slanog klina u duljini od približno $L_{30}=710 \text{ m}$ (izvan opsega mjerenja) zabilježen je 12. kolovoza pri protoku od $Q=2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ tijekom plime ($+0,47 \text{ m}$). Najmanji prodor slanog klina u duljini od $L_{30}=100 \text{ m}$ zabilježen je 9. svibnja pri protoku $Q=24,8 \text{ m}^3/\text{s}$ i razini mora $+0,25 \text{ m}$. Za vrijeme još većih protoka, primjerice 26. travnja ($Q=29 \text{ m}^3/\text{s}$) ili 8. svibnja ($Q=30,4 \text{ m}^3/\text{s}$) duljine klina bile su nešto duže, što se može objasniti većim razinama mora u trenutku navedenih mjerenja. Tijekom provedenih mjerenja nije zabilježen niti jedan slučaj potpunog istiskivanja slanog klina izvan ušća. Najveća dubina razdjelnice slojeva na ušću od $h_{15}=1,96 \text{ m}$ očekivano se pojavila za vrijeme vrlo velikog protoka, izmjerenog 26. travnja ($Q=29 \text{ m}^3/\text{s}$). Za vrijeme najvećeg protoka $Q=30,4 \text{ m}^3/\text{s}$ zabilježenog 8. svibnja dubina razdjelnice bila je neznatno manja, $h_{15}=1,84 \text{ m}$. Najmanja dubina od $h_{15}=0,29 \text{ m}$ pojavila se u trenutku najmanjeg protoka izmjerenog 12. kolovoza ($Q=2,9 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tablica 1. Izmjereni i izračunati parametri slanog klima (veljača - kolovoz 2012. godine)

DATUM I VRIJEME MJERENJA	22.2.'12.	16.3.'12.	16.3.'12.	21.3.'12.	21.3.'12.	5.4.'12.	5.4.'12.	16.4.'12.	17.4.'12.	17.4.'12.	20.4.'12.	20.4.'12.	26.4.'12.	8.5.'12.	9.5.'12.	12.8.'12.
	14:00	10:30	19:00	13:00	20:00	14:00	20:00	17:00	13:00	20:00	14:30	20:00	17:00	21:00	11:00	17:00
Razina mora u odnosu na H.N. [cm]	-5	11	39	11	50	12	57	42	15	51	21	54	37	54	25	47
Hidrološka stanica - Sušak tvornica																
Protok riječne vode Q [m³/s]	4.3	5.1	4.4	6.1	14.8	6.3	15.6	9.2	17.3	13.5	17.9	16.2	29.0	30.4	24.8	2.9
Profil P1 - ušće																
Ukupna dubina vode na ušću h' [m]	2.86	3.51	3.85	3.42	3.83	3.67	4.11	4.20	3.82	4.22	4.06	3.93	3.95	4.08	3.82	3.95
Salinitet morske vode S ₁ [PSU]	37.8	38.0	37.7	37.6	37.9	38.2	38.3	37.8	38.4	37.8	37.6	37.7	37.0	37.4	37.5	37.8
Temperatura morske vode t _s [°C]	9.1	9.7	9.8	10.1	10.1	12.0	11.8	12.1	12.0	12.1	12.6	12.6	12.9	17.6	15.8	22.6
Gustoća morske vode ρ _s [kg/m³]	1029.3	1029.3	1029.1	1029.0	1029.2	1029.1	1029.2	1028.8	1029.2	1028.8	1028.5	1028.6	1028.0	1027.3	1027.8	1026.3
Profil P8 - najuzvodniji profil																
Dubina riječne vode h [m]	1.12	1.08	1.43	1.00	1.43	1.38	1.67	1.75	1.47	1.77	1.62	2.00	1.68	1.68	1.30	1.57
Birzina riječne vode v [m/s]	0.14	0.17	0.12	0.21	0.40	0.17	0.37	0.21	0.46	0.31	0.44	0.33	0.69	0.72	0.72	0.07
Salinitet riječne vode S ₁ [PSU]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temperatura riječne vode t _r [°C]	8.7	9.3	9.5	9.7	8.6	10.1	10.9	9.8	8.3	8.7	8.7	8.7	11.7	8.9	11.1	15.9
Gustoća riječne vode ρ _r [kg/m³]	999.6	999.6	999.6	999.5	999.6	999.5	999.5	999.5	999.7	999.6	999.6	999.6	999.3	999.6	999.4	999.6
Viskoznost riječne vode ν [cm²/s x 10 ⁻⁶]	1.36	1.33	1.32	1.32	1.36	1.30	1.32	1.32	1.37	1.36	1.36	1.36	1.25	1.35	1.27	1.32
Reynoldsov broj gustoće Re [x 10 ⁶]	0.47	0.45	0.69	0.40	0.67	0.66	0.88	0.93	0.69	0.80	0.92	1.10	0.92	0.84	0.61	0.76
Froudov broj Fr	0.042	0.052	0.032	0.068	0.107	0.047	0.092	0.051	0.121	0.110	0.074	0.075	0.170	0.177	0.203	0.019
Froudov broj gustoće Fr _ρ	0.241	0.300	0.187	0.399	0.623	0.276	0.534	0.298	0.706	0.648	0.432	0.438	1.007	1.065	1.203	0.113
IZMJERENO																
Dubina razdjelnice slojeva na ušću h ₁₅ ' [m]	0.3	0.42	0.33	0.4	1.08	0.44	1.1	0.72	1.37	1.15	1.34	1.25	1.96	1.84	1.74	0.29
Duljina slanog klima L ₃₀ ' [m]	490	500	590	490	340	540	350	560	300	425	300	420	120	110	100	710
PREDVIĐENO																
Dubina razdjelnice slojeva na ušću h ₁₅ [m]	0.36	0.42	0.37	0.50	1.13	0.52	1.18	0.74	1.28	1.04	1.32	1.21	1.89	1.95	1.70	0.25
Duljina slanog klima L ₃₀ [m]	511.9	506.2	640.5	497.7	392.2	496.2	375.4	521.7	313.3	421.0	299.5	632.6	125.9	105.3	195.9	680.5
IZRAČUNATO																
Visina slanog klima na ušću H ₃ [m]	2.42	3.03	3.38	2.88	2.79	3.09	3.01	3.42	2.66	3.21	2.85	2.78	2.26	2.32	2.35	3.58
Dubina razdjelnice slojeva na ušću h _c [m]	0.44	0.48	0.47	0.54	1.04	0.58	1.10	0.78	1.16	1.01	1.21	1.15	1.68	1.76	1.47	0.37
Duljina slanog klima L _s [m]	2056.1	1143.9	5453.1	500.0	268.0	1967.1	491.2	2247.1	201.8	895.6	285.4	1017.9	102.1	87.1	45.8	2143.4
Modificirana duljina slanog klima L _s ' [m]	600	540	600	490	300	580	340	600	270	420	300	420	120	105	80	>620

Treba napomenuti kako je HE Rijeka radila tijekom nekoliko mjerenja (21. ožujka, 5. travnja, 26. travnja, 8. svibnja), ali su ona provedena unutar razdoblja u kojima nije bilo oscilacija dolaznog protoka (zbog čega je opravdano tok okarakterizirati kao stacionaran). Iako, zbog nepoznavanja inertnosti slanog klina (vrijeme nakon promjene protoka u kojemu slani klin zauzima svoj ravnotežni položaj), ostaje upitno je li izmjereni položaj slanog klina uistinu stacionaran.

Iz svega navedenog, razvidno je kako protok Rječine snažno utječe na duljinu i dubinu slanog klina. Plime i oseke također imaju određeni utjecaj, posebice pri vrlo malim protocima (<4 m³/s) kada zbog nagiba dna korita duljina propagacije slanog klina ponajviše ovisi o razini mora.

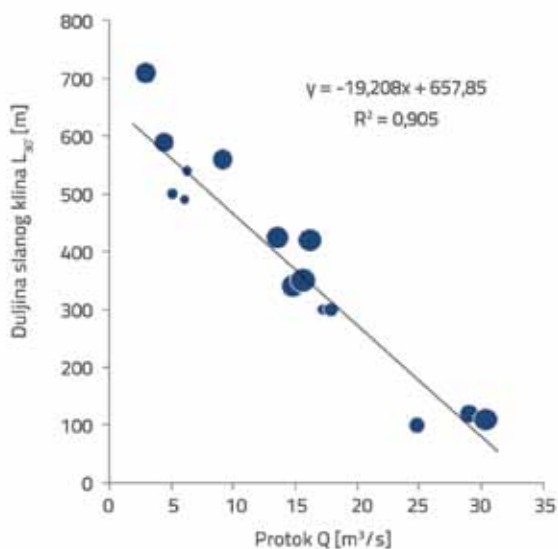
6. Regresijska analiza dimenzija slanog klina

Temeljem izmjerenih vrijednosti saliniteta izvedeno je nekoliko regresijskih jednadžbi koje opisuju funkcionalnu vezu protoka i duljine slanog klina (slika 10.), odnosno protoka i dubine razdjelnice slojeva na ušću (slika 11.). Najbolji su rezultati dobiveni izjednačavanjem s linearnom funkcijom u slučaju duljine slanog klina te polinomom II stupnja u slučaju dubine razdjelnice, čime je ta veza opisana sljedećim izrazima:

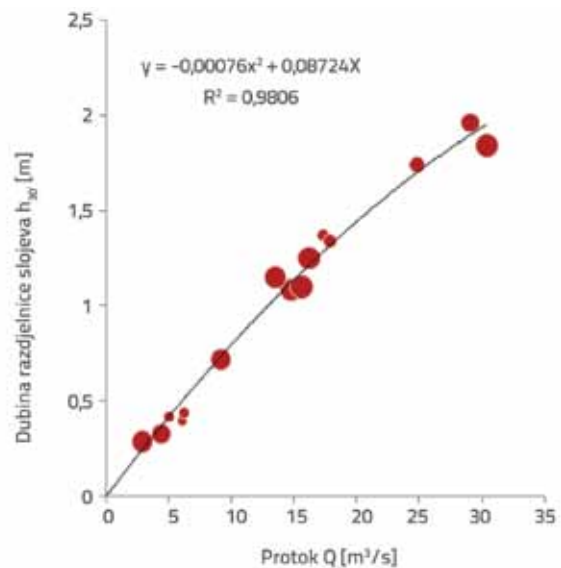
$$L_{30} = 657,85 - 19,208 \times Q \quad (1)$$

$$h_{15} = 0,08724 \times Q - 0,00076 \times Q^2 \quad (2)$$

gdje je L_{30} horizontalna udaljenost izohaline vrijednosti 30 PSU od ušća u [m], h_{15} vertikalna udaljenost izohaline vrijednosti 15 PSU od površine u [m] te Q protok Rječine uzvodno od ušća u [m³/s].



Slika 10. Regresijska funkcija izmjerenih protoka i duljine slanog klina (veličina točke je proporcionalna razini mora iznad hidrografske nule)



Slika 11. Regresijska funkcija izmjerenih protoka i dubine razdjelnice slojeva na ušću (veličina točke je proporcionalna razini mora iznad hidrografske nule)

Regresijska jednadžba (2) za dubinu razdjelnice slojeva na ušću ima izrazito čvrstu vezu s protokom Rječine ($R^2=0,988$) što je i bilo očekivano budući da debljina sloja slatke vode na ušću ovisi isključivo o hidrauličkim karakteristikama (brzini i dubini vode). Iako i regresijska jednadžba (1) za duljinu slanog klina upućuje na čvrstu vezu s protokom ($R^2=0,9$), određenog rasipanja ipak ima (slika 11.), što je vrlo vjerojatno posljedica nejednolikog nagiba dna korita s jedne strane te utjecaja razine mora (RM) na promjenu hidrauličkih karakteristika toka (utjecaj uspora) s druge.

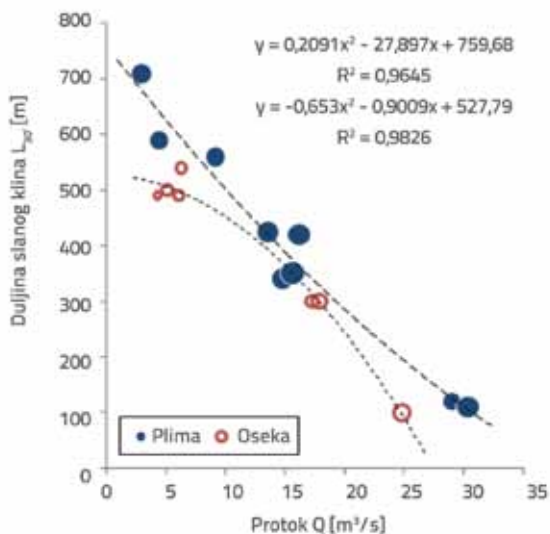
Pokušalo se preciznije povezati protok s duljinom klina, pa je napravljena dodatna regresijska analiza zasebno za izmjerene vrijednosti duljine slanog klina za vrijeme plime ($RM > 25$ cm) i za vrijeme oseke ($RM < 25$ cm), (slika 12.). U tom slučaju dobivena je još čvršća veza ($R^2=0,965$ za vrijeme plime, odnosno $R^2=0,983$ za vrijeme oseke):

$$L_{30,plima} = 759,68 - 27,897 \times Q + 0,2091 \times Q^2, \text{ za } RM > 25 \text{ cm} \quad (3)$$

$$L_{30,oseka} = 527,79 - 0,9009 \times Q - 0,6653 \times Q^2, \text{ za } RM < 25 \text{ cm} \quad (4)$$

Na slici 12. vidljivo je kako su regresijske krivulje za plimu (3) i oseku (4) praktički identične, za srednje vrijednosti protoka, dok su najveće razlike pri vrlo malim i vrlo velikim protocima. U oba su ekstrema te razlike posve moguće i vrlo indikativne. Naime, u slučaju vrlo malih protoka, intenzitet inercijalnih sila nije dovoljan da bi spriječio napredovanje slane vode uzvodno od ušća, pa je zapravo nagib dna korita glavni faktor koji ograničava njezin prodor. Maksimalna duljina prodora u hipotetskoj situaciji presušenog korita i ekstremne plime nije izmjerena niti se može predvidjeti bez detaljnog snimka batimetrije korita uzvodno od zadnjeg profila. Prema

regresijskim jednadžbama (3) i (4) maksimalna duljina slanog klina pri $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ za vrijeme oseke iznosi 528 m, dok za vrijeme plime ona iznosi 760 m (tu se naravno govori o prosječnim vrijednostima plime i oseke, u slučaju ekstremnih plima višegodišnjega povratnog razdoblja ta duljina može biti i nešto veća).



Slika 12. Regresijske funkcije izmjerenih protoka i duljine slanog klina za vrijeme plime i oseke (veličina točke proporcionalna je razini mora iznad hidrografske nule)

Pri većim protocima ($Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) također je prisutan utjecaj razine mora na duljinu slanog klina L_{30}' . Do potpunog istiskivanja slanog klina iz ušća $L_{30}=0 \text{ m}$ prema regresijskoj analizi (3) i (4) dolazi puno ranije u slučaju oseke ($Q_{krit,oseka} = 27,5 \text{ m}^3/\text{s}$), nego u slučaju plime ($Q_{krit,plima} = 38,1 \text{ m}^3/\text{s}$).

7. Primjena poluempirijskih modela

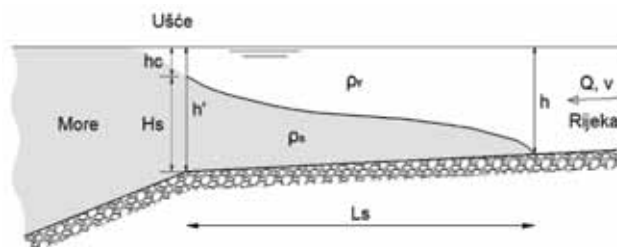
Keulegan je istraživanjem na fizikalnim modelima razvio poluempirijski izraz za određivanje duljine slanog klina u pravilnim kanalima s horizontalnim dnom [7]. Rattray i Mitsuda (prema Ibanezu [15]) pokazali su kako se izmjereni rezultati na realnim koritima vrlo dobro slažu s Keuleganovim izrazom kada je odnos duljine slanog klina i dubine vode u rijeci unutar raspona $10^2 - 10^4$, što je slučaj i kod Rječine, osim pri vrlo velikim protocima kada je slani klin gotovo istisnut izvan ušća.

Usporedba izmjerenih vrijednosti i izračunatih vrijednosti duljine slanog klina prema Keuleganu L_s prikazana je u tablici 1. Keuleganov koeficijent određen je kalibracijom s provedenim mjerenjima, a odabran je s vrijednosti $K=2$ u slučaju osnovnoga Keuleganovog izraza, odnosno $K=1,2$ u slučaju modificiranoga Keuleganovog izraza.

Izmjerene i izračunate vrijednosti imaju relativno dobro poklapanje za vrijednosti protoka $Q > 14 \text{ m}^3/\text{s}$, dok za manje

vrijednosti protoka izračunate duljine slanog klina značajno nadmašuju izmjerene vrijednosti, što upućuje na činjenicu kako bi slani klin propagirao i uzvodnije da nema realnog nagiba dna korita. Do sličnih zaključaka došao je i Ibanez proučavajući slani klin na ušću rijeka Rhone i Ebro [15].

Kako je dno korita Rječine nepravilnog oblika i pod relativno velikim nagibom ($I=0,5\%$), Keuleganov izraz je djelomično modificiran i primijenjen na način detaljnije obrazložen u nastavku rada.



Slika 13. Shematski prikaz slanog klina

Osnovni Keuleganov izraz za duljinu slanog klina glasi [7]

$$\frac{L_s}{h} = K \cdot Re_\rho^{1/4} \cdot Fr_\rho^{-5/2} \tag{5}$$

gdje je L_s duljina slanog klina, h konstantna dubina vode, K Keuleganov koeficijent, Re_ρ Reynoldsov broj gustoće, Fr_ρ Froudeov broj gustoće.

Froudeov broj gustoće je definiran kao

$$Fr_\rho = \frac{v}{\sqrt{gh}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta\rho}} \tag{6}$$

gdje je v – brzina vode, g – ubrzanje sile teže, h – dubina vode, $\rho = \frac{\rho_s + \rho_r}{2}$ srednja gustoća, $\Delta\rho = \rho_s - \rho_r$ razlika između gustoća (ρ_s je gustoća morske vode, ρ_r je gustoća slatke vode). Reynoldsov broj gustoće definiran je izrazom

$$Re_\rho = \frac{1}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{gh^3 \Delta\rho}{\rho}} \tag{7}$$

gdje je ν kinematička viskoznost slatke vode, ostali parametri su prethodno opisani.

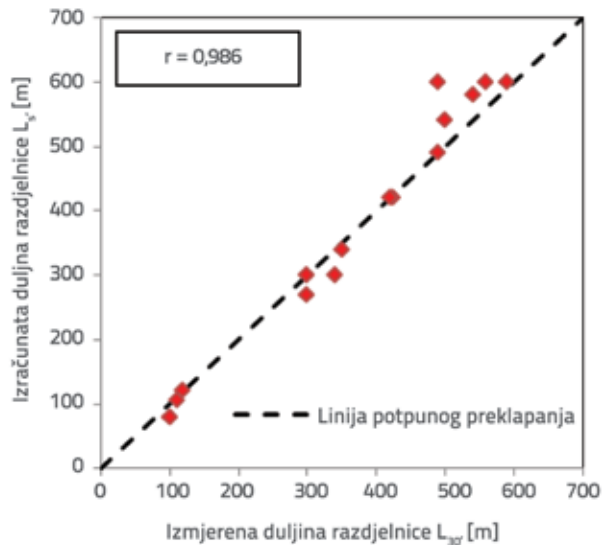
Za slučaj kada se dubina vode na ušću h' razlikuje od dubine vode h uzvodno od slanog klina (slika 13.), Keuleganov izraz (5) modificiran je na način da je duljina klina L_s' u funkciji dubine vode na ušću h' i ograničena je točkom presjeka s linijom dna korita,

$$\frac{L_s'}{h'} = K \cdot Re_\rho^{1/4} \cdot Fr_\rho^{-5/2} \tag{8}$$

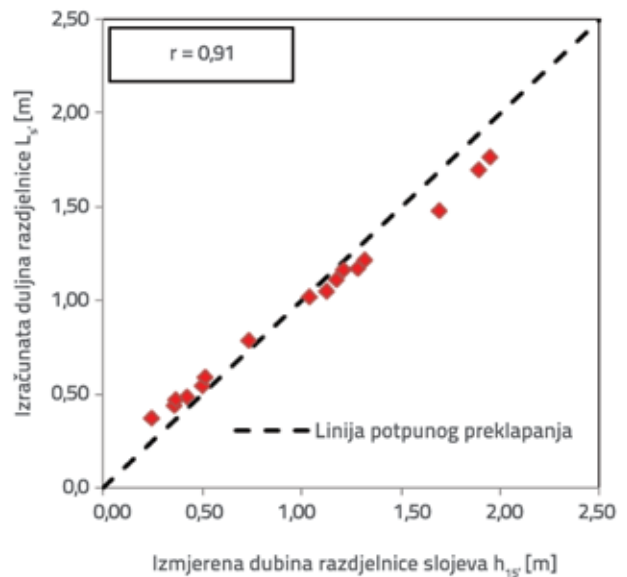
Debljinu sloja slatke vode na ušću h_c Keulegan [7] je izveo analitički kao funkciju Froudeovog broja gustoće i ona je neovisna o nagibu korita i dubini vode na ušću,

$$\frac{h_c}{h} = Fr_\rho^{2/3} \tag{9}$$

Usporedba izmjerenih vrijednosti duljine slanog klina L_{30} i izračunatih vrijednosti prema modificiranom Keuleganovom izrazu L_s' također je prikazana u tablici 1. Modificirani izraz prema Keuleganu pokazao je izvrsno preklapanje s izmjerenim vrijednostima duljine i dubine slanog klina na Rječini. Pearsonov koeficijent korelacije izmjerenih i izračunatih vrijednosti duljine slanog klina iznosi $r=0,986$ (slika 14.), dok za vrijednosti dubine razdjelnice slojeva na ušću iznosi $r=0,991$ (slika 15.).

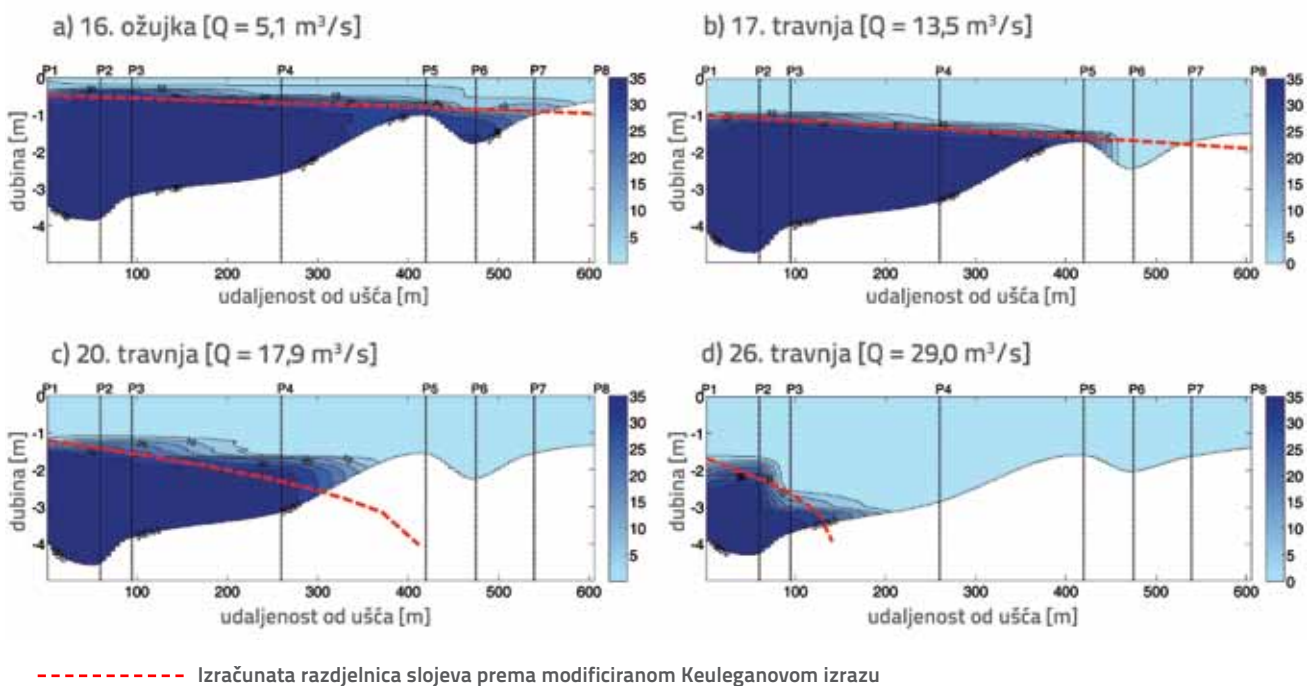


Slika 14. Korelacija izmjerene L_{30} i izračunate L_s' (8) duljine slanog klina



Slika 15. Korelacija izmjerene h_{15} i izračunate h_c (9) dubine razdjelnice slojeva na ušću

Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti slanog klina i izračunate granične linije saliniteta 15 PSU prema modificiranom Keuleganovom izrazu dan je na slikama 16. a, b, c i d. Oblik granične linije aproksimiran je kvadratnom funkcijom.



Slika 16. Uzdužni presjek ušća Rječine s prikazom izmjerenih vrijednosti saliniteta (PSU) i izračunate razdjelnice slojeva vrijednosti 15 PSU

6. Zaključak

Dinamika slanog klina na ušćima rijeka je vrlo kompleksan proces, na koji podjednako utječu morski i riječni parametri. Iako se hidrodinamički numerički modeli intenzivno razvijaju posljednjih godina i postaju sve dostupniji, bez terenskih mjerenja još uvijek nije moguće dovoljno pouzdano opisati ponašanje uzvodne intruzije slanog klina.

Ušće Rječine vrlo je specifično područje, zbog vrlo kratkog poteza izmjene slane i slatke vode (maksimalna duljina slanog klina manja je od 1 km), izraženih sezonskih, ali i dnevnih oscilacija protoka te zbog nejednolikog i relativno velikog nagiba dna na tom potezu.

Mjerenjima saliniteta u donjem toku Rječine u razdoblju od veljače do kolovoza 2012. godine, zabilježena je intruzija slane morske vode u korito Rječine uzvodno od ušća te je potvrđena prisutnost slanog klina pri svim hidrološkim prilikama. Razvidno je kako dominantan utjecaj na formiranje slanog klina ima protok Rječine, dok je utjecaj plime i oseke nešto manji, ali ipak postoji. Najveća duljina slanog klina u iznosu od 710 m zabilježena je tijekom plime i protoka 2,9 m³/s. Slučaj potpunog istiskivanja slanog klina izvan ušća nije zabilježen u promatranom razdoblju, ali mjerenja upućuju na to da bi se on trebao dogoditi pri protoku od 27,5 m³/s u slučaju oseke, odnosno 38,1 m³/s u slučaju plime.

Regresijskom analizom izvedeni su vrlo realni prognostički izrazi koji povezuju protok Rječine s duljinom slanog klina

(zasebno za plimu i za oseku), odnosno s dubinom razdjelnice slojeva na ušću. Također je pokazano kako Keuleganov izraz, uz manje modifikacije, može zadovoljavajuće precizno poslužiti za proračun duljine slanog klina uz uvjet poznatih hidrauličkih parametara (Froudeovog i Reynoldsovog broja gustoće).

Daljnja istraživanja na ovom području ići će u smjeru razvoja numeričkog modela koji bi uz detaljnija višekratna dnevna mjerenja mogao poslužiti pri analizi dinamike slanog klina i u nestacionarnim uvjetima.

Iako bi upotreba nekog od postojećih numeričkih modela mogla detaljnije opisati ponašanje slanog klina na ušću Rječine, regresijski izrazi izvedeni u ovom radu dovoljno su precizni za preliminarna i planska razmatranja o mogućnostima korištenja voda Rječine za komunalne potrebe. Prije donošenja takve odluke svakako bi trebalo proučiti i ostale fizikalne i biokemijske parametre koji mogu utjecati na kvalitetu vode.

Zahvala

Istraživanja prezentirana u ovom radu dio su znanstvenog projekta "Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu" (114-0982709-2549), koji podržava Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. Također dio istraživanja proveden je u sklopu međunarodnog hrvatsko-japanskoga znanstvenog projekta "Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj".

LITERATURA

- [1] Odluka o donošenju Detaljnog uređenja središnjeg gradskog parka Delta, SN PGŽ 06/12.
- [2] Van der Tuin, H.: *Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers*, UNESCO, Paris, 1991.
- [3] Haralambidou, K.I., Sylaios, G.K., Tsihrintzis, V.A.: Testing alternatives for salt wedge management in an estuary with the use of monitoring and mathematical model, *Global Nest: the International Journal*, 2, pp. 107-118, 2003.
- [4] Kurup, G.R., Hamilton, D.P., Patterson, J.C.: Modeling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in a Microtidal Estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, pp. 191-208, 1998.
- [5] Zhang, Y., Baptista, A.M., Myers, E.P. III: A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment, *Continental Shelf Research*, 24, pp. 2178-2214, 2004.
- [6] Schijf, J.B., Schonfeld, J.C.: Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, *Proceedings of Minnesota International Hydraulics Convention*, pp. 321-333, 1953.
- [7] Keulegan, G.H.: The mechanism of an arrested saline wedge, *Estuaries and coastline hydrodynamics*, McGraw-Hill, pp. 546-574, 1966.
- [8] Rubinić, J., Ožanić, N.: *Prirodne hidrološke značajke površinskih vodnih pojava Županije primorsko-goranske*, Hrvatske vode – VGO Rijeka, 1997.
- [9] Hrvatski hidrografski institut, Morske mijene i razina Jadrana on-line, <http://www.hhi.hr/projects/viewproject/11>, 16.07.2012.
- [10] Rubinić, J., Sarić, M.: Hidrologija vodnih resursa u slivu Rječine, *Prošlost, sadašnjost i budućnost vodoopskrbe i odvodnje*, Opatija, pp. 199-207, 2005.
- [11] Fofonoff, N.P., Millard, R.C. Jr.: *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*, UNESCO, Paris, 1983.
- [12] Arita M., Jirka G.H.: Two-layer model of saline wedge. I: Entrainment and interfacial friction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 13, pp. 1229-1248, 1987.
- [13] Haralambidou, K.I., Sylaios, G.K., Tsihrintzis, V.A.: Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90, pp. 174-184, 2010.

- [14] Hansen, D.V., Rattray, M.: New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, 3, pp. 319-3261, 1966.
- [15] Ibanez, C., Pont, D., Prat, N.: Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries, *Limnology and Oceanography*, 1, pp. 89-101, 1997.
- [16] Nelson, B.W.: Hydrography, sediment dispersal, and recent historical development of the Po river delta, Italy, *Soc. Econ. Palcontol. Mineral. Spec. Publ.*, 15, pp. 152-184, 1970.
- [17] Kušpilić, G., Precali, R., Dadić, V., Šurmanović, D., Marjanović-Rajčić, M.: Preliminarni rezultati nadzornog monitoringa prijelaznih i priobalnih voda Republike Hrvatske prema Okvirnoj direktivi o vodama EU, 5. *Hrvatska konferencija o vodama*, Zbornik radova, Opatija, pp. 601-608, 2011.
- [18] Ljubenković, I., Vranješ, M.: Numerički model uslojenog tečenja – primjer zaslanjivanja korita rijeke Neretve, *Građevinar*, 2, pp. 101-112, 2012.