

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.1>

Sezonska dinamika intruzije morske vode u rijeci Neretvi: integracija monitoring aktivnosti i numeričkog modeliranja

Seasonal dynamics of seawater intrusion in the River Neretva: integration of monitoring activities and numerical modeling

Iva Aljinović¹, Veljko Srzić¹, Jadran Čarija¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, iva.matic@gradst.hr

Sažetak

Područje doline rijeke Neretve suočava se s izraženom intruzijom morske vode, osobito tijekom sušnog perioda godine. Ova pojava predstavlja značajnu prijetnju za poljoprivrednu proizvodnju, opskrbu pitkom vodom i očuvanje ekološke ravnoteže područja. Sustavno praćenje hidroloških parametara i parametara stanja voda na području vodonosnog sustava delte rijeke Neretve te na profilima duž rijeke, ukazuje na intezivan prodor morske vode kroz samo korito rijeke. Uspostava numeričkog modela postojećeg stanja naglašava sezonske razlike režima slanosti i intezitet intruzije morske vode kroz korito rijeke Neretve. Ovaj rad prikazuje rezultate podataka prikupljenih monitoring aktivnostima i korištenih u analizirama numeričkim modelom te predlaže tehnička i operativna poboljšanja za unaprjeđenje upravljanja vodnim resursima u području delte.

Ključne riječi: intruzija, zaslanjivanje, SEAWAT, klimatske promjene

Abstract

The Neretva River delta is under significant influence of seawater intrusion, especially during the dry season. This phenomenon poses a serious threat to agricultural production, water supply, and the preservation of the area's ecological balance. Systematic monitoring of hydrological parameters and water quality indicators in the River Neretva aquifer and at profiles along the river, reveals a enhanced intrusion of seawater through the riverbed itself. The establishment of a numerical model of the current state highlights seasonal variations in salinity regimes and the intensity of seawater intrusion through the River Neretva riverbed. This paper highlights results of data observed through monitoring activities, analyzed by using a numerical model, and proposes improvements for the improvement of water resources management in the delta.

Keywords: intrusion, salinization, SEAWAT, climate change

1. Uvod i definiranje problema istraživanja

Prodor morske vode u obalne vodonosnike složen je proces koji ima dugoročne posljedice na kvalitetu podzemnih i površinskih voda. Negativni utjecaji posebno su izraženi u područjima s naglašenom poljoprivrednom proizvodnjom, složenom ekološkom mrežom te područjima pod velikim utjecajem klimatskih promjena. Proučavanje intruzije morske vode zahtijeva multidisciplinarni pristup koji obuhvaća terenska mjerenja, laboratorijske analize, statističku obradu podataka te primjenu numeričkih modela. Terenska mjerenja, poput praćenja razine vode, električne vodljivosti, saliniteta i temperature, pružaju izravne informacije o dinamici intruzije. Numerički modeli omogućavaju predviđanje ponašanja sustava u različitim uvjetima, dok analiza prostornih i vremenskih trendova doprinosi razumijevanju dugoročnih promjena u vodonosniku. [1]

Delta rijeke Neretve nizom je infrastrukturnih mjera od 1960-ih godina na ovamo iz močvarnog područja pretvorena u područje intenzivne poljoprivredne proizvodnje. Spuštanjem razine podzemnih voda ispod pedološkog sloja sustavnom melioracijom, došlo je do povećanja gradijenta između podzemnih voda i razine mora te su stvoreni uvjet za aktivnu intruziju morske vode [2]. Istraživanjem prodora intruzije morske vode u područje delte rijeke Neretve definirani su glavni smjerovi intruzije, kroz nasip Digu, razdjelnicu Jadranskog mora i područja doline te kroz korito rijeke Neretve [3]. Intruzija morske vode kroz korito rijeke Neretve definirana je na profilu Metković most za protoke svježije vode od cca $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, što je česta pojava u sušnom dijelu godine [4]. Kako prisustvo slanoga klina u rijeci Neretvi značajno doprinosi ukupnoj količini morske vode koja prodire u područje doline, unaprijeđenje monitoring aktivnosti koje bi preciznije definirale poziciju i dinamiku slanoga klina unutar korita rijeke Neretve od velike su važnosti za definiranje učinkovitih mjera upravljanja vodnim resursima cijelog područja.

2. Metodologija

2.1. Monitoring aktivnosti

Za bolje razumijevanje dinamičke prirode intruzije morske vode u područje doline rijeke Neretve, uspostavljen je monitoring stanja voda na području doline. Monitoring aktivnosti koje se provode moguće je podijeliti na sustav kontinuiranog i povremenog monitoringa stanja voda. Sustav kontinuiranog monitoringa implementiran je za podzemne i površinske vode te mjeri razinu vodnog lica [m], električnu vodljivost [mS cm^{-1}] i temperaturu [$^{\circ}\text{C}$]. Podzemne vode kontinuirano se prate u piezometrima u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem te u vodonosniku pod tlakom. Površinske vode se prate u kanalu Jasenska te bazenima crpne stanice Modrič i crpne stanice Prag.

Razina Jadranskog mora kontinuirano se prati na mareografu postavljenom pokraj ušća Male Neretve, dok se razina rijeke, u sklopu ovoga rada, Neretve prati na limnigrafu u Opuzenu. Protok rijeke Neretve procjenjuje se na temelju brzine mjerene pomoću tri horizontalna ADCP uređaja, poprečnog presjeka definiranog iz geometrije korita te razine vode promatrane na limnografskoj postaji na Metković mostu.

Sustav povremenog monitoringa stanja voda uključuje profiliranje i uzorkovanje voda na lokacijama dubokih i plitkih piezometara, u rijeci Neretvi te na Maloj Neretvi. Lokalno

profiliranje vodnog stupca provodi se nekoliko puta godišnje, uglavnom tijekom sušnog razdoblja, na profilima Komin i Opuzen, 9 i 12 km uzvodno od ušća Neretve. Profiliranjem se prikupljaju podaci o električnoj vodljivosti [mS cm^{-1}], temperaturi [$^{\circ}\text{C}$], salinitetu [g l^{-1}], gustoći [kg m^{-3}] i pH po visini vodnog stupca te se definira položaj tranzicijske zone slanog klina i svježje vode.

2.2. Numeričko modeliranje

Dinamička svojstva slanosti na području doline rijeke Neretve simulirana su SEAWAT numeričkim modelom [4]. SEAWAT je 3D numerički model koji koristi MODFLOW za izračun tečenja podzemne vode promjenjive gustoće u vodonosniku i MT3DMS za izračun transporta otopljenih tvari. Osnovne jednadžbe dane su izrazima (1) i (2).

$$\nabla \cdot \left[\rho \frac{\mu_0}{\mu} \mathbf{K}_0 \left(\nabla h_0 + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \nabla z \right) \right] = \rho S_{s,0} \frac{\partial h_0}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q'_s \quad (1)$$

ρ_0 – gustoća fluida za određenu koncentraciju i temperaturu [kg m^{-3}],
 μ – dinamička viskoznost [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$],
 $\mathbf{K}_0$ – tenzor hidrauličke vodljivosti materijala zasićenog referentnom tekućinom [kg s^{-1}],
 h_0 – hidraulički tlak mjeren u odnosu na referentni fluid određene koncentracije i temperature [m]

$S_{s,0}$ – specifična zapremina, definirana kao količina vode koja se ispušta iz zapremnine po jedinici volumena po padu h_0 [m^{-1}],
 t – vrijeme [s],
 θ – poroznost [-],
 C – koncentracija soli [kg m^{-3}],
 q'_s – izvor ili ponor fluida s gustoćom ρ_s [s^{-1}]

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d^k}{\theta} \right) \frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C^k) - \nabla \cdot (q C^k) - q'_s C_s^k \quad (2)$$

ρ_b – gustoća obujma (masa krutih tvari podijeljena s ukupnim volumenom) [kg m^{-3}],
 K_d^k – distribucija koeficijenta otopljene tvari k [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$],
 C^k – koncentracija otopljene tvari k [kg m^{-3}],

$\mathbf{D}$ – tenzor koeficijenta hidrodinamičke disperzije [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],
 q – specifično otpuštanje [m s^{-1}],
 C_s^k – koncentracija izvora ili ponora [kg m^{-3}] otopljene tvari k.

Numeričkim modelom obuhvaćeno je područje ušća rijeke Neretve, podsustavi Opuzen ušće, Luke i Vidrice. Karakteristike geoloških slojeva definirane su temeljem rezultata raspoloživih i provedenih istražnih radova [5]. Početni i rubni uvjeti implementirani su u skladu sa stanjem na terenu te zasebno definirani za tečenje i za transport otopljenih tvari.

Osnovna stijena predstavlja nepropusni rubni uvjet na cijeloj domeni modela. Duž obalne linije, morski rubni uvjet definiran je očitanjem mareografa te konstantnom vrijednosti koncentracije mora od 36 g l^{-1} . Razina vodnog lica na limnigrafu u Opuzenu definira rubni uvjet tečenja u rijeci Neretvi dok je rubni uvjet transporta definiran odvojeno za sušni (36 g l^{-1} po cijeloj visini vodnoga stupca) i kišni period (0 g l^{-1} po cijeloj visini vodnoga stupca). Rubni uvjeti tečenja za Malu Neretvu i kanale obuhvaćene modelom definirani su režimom rada crpnih stanica Modrič i Prag. Rubni uvjet tečenja na području Opuzena koji predstavlja granicu modela, definiran je protokom procjeđivanja podzemnih voda. Rubni uvjet transporta na rubu domene modela, Male Neretve i implementiranih kanala je $dC/dx \neq 0$ i $dC/dz \neq 0$. Početni uvjeti modela za tečenje i transport tvari odgovaraju rasporedu piezometarskih stanja i vrijednostima koncentracije dobivenim za stacionarno stanje modela.

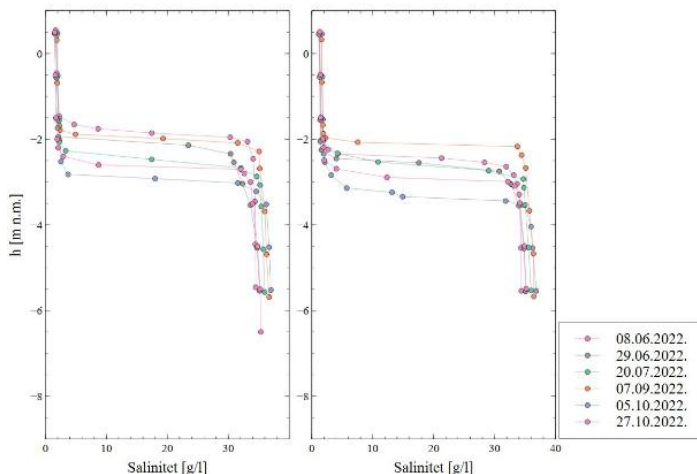
Modelskim simulacijama odvojeno su obrađeni sušni i kišni period godine. Nakon kalibracije i verifikacije modela postojećeg stanja, modelom su simulirane promjene u režimu slanosti podzemnih voda uslijed očekivanih klimatskih promjena. Modelom su simulirani scenariji porasta srednje razine mora (SLR) za 0.43 i 0.84 m i pad kumulativne godišnje količine oborina za 10% i 20%, sve prema [5].

3. Rezultati

3.1. Monitoring aktivnosti

Kontinuiranim monitoringom stanja voda prikupljeni su podaci za definiranje rubnih uvijeta te kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela. Vremenske serije razine i saliniteta korištene su pri definiranju rubnih uvijeta za nestacionarno stanje dok su srednje vrijednosti navedenih podataka korištene za stacionarna stanja.

Profiliranja provedena na rijeci Neretvi u sušnom dijelu godine ukazuju na značajnu stratifikaciju vodnog stupca te prisustvo slanoga klina. Vrijednosti saliniteta u površinskom sloju su do 5.0 g l^{-1} dok su vrijednosti u pridnenom sloju između 32.0 i 37.0 g l^{-1} , s jako uskom tranzicijskom zonom (Slika 1.).



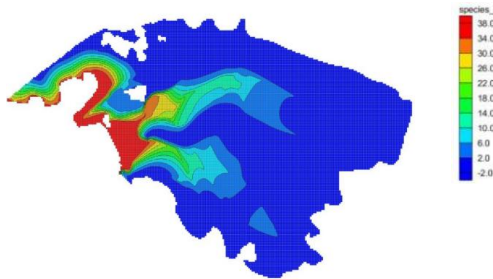
Slika 1. Raspodjela saliniteta po vodnom stupcu na profilima Komin (lijevo) i Opuzen (desno) za profiliranja u 2022. godini

Profiliranjima provedenim u 2022. godini slani klin na profilu Komin pozicioniran je na dubini od 1.7-3.0 m n.m., dok je slani klin na profilu Opuzen na dubini od 2.0-3.2 m n.m..

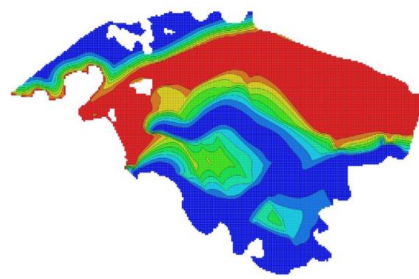
3.2. Numeričko modeliranje

Prva faza numeričkog modeliranja je uspostava modela postojećeg stanja. Procesom kalibracije i validacije utvrđeno je značajna podudarnost modelskih vrijednosti piezometarske razine i saliniteta na lokacijama piezometara, kako u vodonosniku sa slobodnim vodnim licem tako i u vodonosniku pod tlakom. Slike 3 i 4 prikazuju raspored koncentracije soli u površinskom sloju za kišni i sušni period godine. Razlike u vrijednostima

i rasporedu koncentracije soli ukazuju na značajnu razliku u intezitetu intruzije morske vode u dva navedena scenarija.



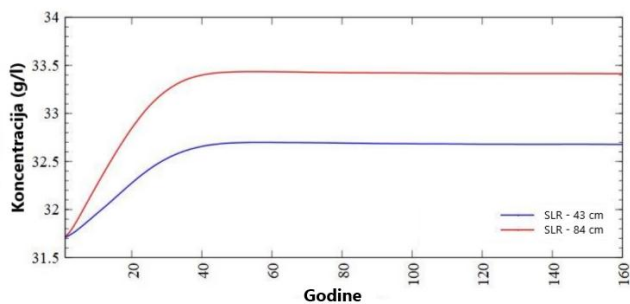
Slika 2. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju za kišni period



Slika 3. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju za sušni period

U kišnom periodu, protok rijeke Neretve eliminira intruziju morske vode u područje delte te se zaslanjenje odvija kroz obalni nasip Diga. U sušnom periodu, prisustvo slanoga klina detektirano je do profila Metković most te sama rijeka Neretva doprinosi salinizaciji područja. Rezultati numeričkog modela pokazuju opsežnije zaslanjenje cijelog područja doline. Kanali Crepina i Mala Neretva pružaju osvježanje melioracijskim podpodručjima Vidrice i dijelu Opuzen ušća.

Po provedbi kalibracije modela postojećeg stanja, testirani su scenariji klimatskih promjena. Rezultati numeričkog modela ukazuju na povećanje slanosti za sve analizirane scenarije klimatskih promjena i dodatno zaslanjenje cijelog područja delte Neretve. Predviđeni porast koncentracije slanosti na područje lijeve obale rijeke Neretve do kanala Jasenska prikazan je na Slici 4.



Slika 4. Promjena vrijednosti koncentracije uslijed porasta srednje razine mora na lokaciji piezometra P2 (kanal Jasenska)

4. Diskusija i zaključci

Rezultati uspostavljenog modela potvrđuju dominantne smjerove intruzije morske vode u vodonosnik rijeke Neretve. Značajna varijacija intruzije morske vode u kišnom i sušnom

periodu naglašava ulogu rijeke Neretve kao izvora zaslanjenja. Analiza rezultata dobivenih za testirane scenarije klimatskih promjena ukazuje na potrebu za mjerama koje bi smanjile intezitet intruzije morske vode te sačuvale kvalitetu površinskih i podzemnih voda.

Za detaljniju analizu prodora slanosti iz rijeke Neretve u vodonosnik doline potrebna je definicija rubnih uvijeta koja će implementirati stratifikaciju vodnog stupca rijeke. Stratifikaciju vodnog stupca moguće je definirati dodatnim monitoring aktivnostima koje bi osigurale kontinuirani uvid u promjenu indikatora slanosti na profilu Metković most.

Dodatni piezometar na području lijeve obale rijeke Neretve, na području između postojećeg piezometra P2 i obalne linije, dao bi uvid u odgovor vodonosnika na promjenu dinamike slanoga klina u rijeci Neretvi. S piezometrom postavljenim na ovoj lokaciji bilo bi moguće definirati i promjene slanosti u vodonosniku u prijelaznom periodu godine, u kojem slani klin iščezava iz rijeke Neretve. Detaljnija razrada scenarija klimatskih promjena jedan je od nužnih smjerova budućeg istraživanja salinizacije ovoga područja.

Navedene mjere unaprijeđenja monitoring sustava detaljnije bi definirale dinamiku i intezitet intruzije morske vode u područje delte rijeke Neretve te bi dale potpuniji uvid za definiranje mjera obrane od zaslanjenja i cjelovito upravljanje vodnim resursima ovoga područja.

Literatura

- [1] Werner, A. et al.: Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges, *Advances in Water Resources*, 51, 2013, 3-26, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- [2] Badaruddin, S., Werner, A.D., Morgan, L.K.: Characteristics of active seawater intrusion, *Journal of Hydrology*, 551, 2017, 632-647, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.031>
- [3] Lovrinović, I., et al: Groundwater Monitoring Systems to Understand SeaWater Intrusion Dynamics in the Mediterranean: The Neretva Valley and the Southern Venice Coastal Aquifers Case Studies, *Water*, 2021, <https://doi.org/10.3390/w13040561>
- [4] Ljubenkov, I., Vranješ, M.: Numerical model of stratified flow – case study of the Neretva riverbed salination (2004), *Građevinar*, 2, 2012, <https://doi.org/10.14256/JCE.639.2011>
- [5] Geokon-Zagreb d.d, 2022. Field and laboratory research service in the Lower Neretva area for the needs of the Project „Monitoring Sea-water intrusion in coastal aquifers and Testing pilot projects for its mitigation. Zagreb.
- [6] Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W.: SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, 2007, <https://doi.org/10.3133/tm6A22>
- [7] IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647