

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.12>

MODELIRANJE PRODORA MORSKE VODE U OBALNI VODONOSNIK RIJEKE NERETVE

MODELING OF SEAWATER INTRUSION INTO RIVER NERETVA COASTAL AQUIFER

Iva Matić¹, Veljko Srzić²

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, iva.matic@gradst.hr

(2) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, veljko.srzic@gradst.hr

Sažetak

Iako su istraživanja na području donjega toka rijeke Neretva započeta prije više od 50 godina, do danas nije uspostavljen model kojim bi se pouzdano simulirala dinamička svojstva slanosti u ovome obuhvatu. Ovaj rad prikazuje teorijsku osnovu i implementaciju lokalnih uvjeta u 3D numeričkome modelu SEAWAT kojim se simuliraju nestacionarna piezometarska stanja i karakteristike slanosti podzemnih voda u obuhvatu. Modelom je obuhvaćen donji tok rijeke Neretve, implementirane su karakteristike geoloških slojeva te rubni i početni uvjeti u skladu s raspoloživim *in situ* podacima monitoringa. Kalibracija parametara modela provedena je pomoću terenskih mjerenja i raspoloživih vremenskih serija s postojećih piezometara. Rezultati dobiveni modeliranjem u sušnome razdoblju hidrološke godine pokazuju bitnu korelaciju s mjerenim podacima.

Ključne riječi: SEAWAT, Neretva, prodor soli

Abstract

Even though river Neretva valley aquifer has been objective of different research groups more than 50 years, a model that would reliably simulate the dynamic salinity properties on this site has not been established. This paper presents the theoretical basis and implementation of local conditions in the 3D numerical model of SEAWAT, which simulates non-stationary piezometric states and groundwater salinity characteristics on the site. The model covers the lower course of the Neretva River. The characteristics of geological layers, boundary and initial conditions were implemented in accordance with the available *in situ* monitoring data. Calibration of model parameters was performed using field measurements and available time series from existing piezometers. The results obtained by modelling in the dry period of the hydrological year show a significant correlation with the measured data.

Keywords: SEAWAT, Neretva coastal system, seawater intrusion

1. Uvod

U većini obalnih područja postoji veza između morske i podzemne vode koja negativno utječe na produktivnost usjeva. Za analizu i prevenciju štetnoga djelovanja uzrokovana prodorom slane vode u vodonosnik potrebno je napraviti model koji će biti u mogućnosti uspješno prikazati trenutačno stanje na terenu i definirati parametre koji dominantno utječu na prodor slane vode. Na temelju modela postojećega stanja moguće je definirati promjene na području domene koje bi dale uvid u moguće promjene polja slanosti. Za potrebe izrade takva modela razvijen je MODFLOW, 3D model konačnih razlika (McDonald, Harbaugh, 1988.) i MT3DMS (Zheng, 1990). Zhu i dr. (2020) u svome radu prikazuju primjenu SEAWAT-a na modelu koji pokriva domenu od 170 km² u Kini. Zghini i dr. (2019) i Pappa i dr. (2017) definiraju parametre za MODFLOW i SEAWAT za područje Sredozemnoga mora, odnosno za područje Tunisa i Grčke, te predviđaju promjene u polju slanosti uslijed povećanja crpljenja na području zahvata. Slična koncepcija modela u Jadranskomu moru prikazana je u [6]. Područja obuhvata modela prikazanoga u ovome radu jesu dolina i donji tok rijeke Neretve. Prikazan je konceptualni model koji definira postojeće stanje na terenu za dva scenarija, ljetno i zimsko razdoblje, te su definirana polja slanosti koja utječu na kvalitetu vode za navodnjavanje.

2. Metodologija

2.1. Teorijske postavke modela

Za modeliranja pronosa slane vode u vodonosnik na području donjega toka rijeke Neretve korišten je SEAWAT [7]. SEAWAT je trodimenzionalni numerički model koji se koristi za simulacije prodora slane vode, a temelji se na spajanju MODFLOW-a za izračun tečenja podzemne vode promjenjive gustoće u vodonosniku i MT3DMS-a za izračun transporta otopljenih tvari. Osnovne jednadžbe koje rješava SEAWAT dane su izrazima (1) i (2). Jednadžba (1) rješava problem protoka podzemne vode promjenjive gustoće, dok jednadžba (2) rješava problem pronosa otopljenih tvari.

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

ρ_0 – gustoća fluida za određenu koncentraciju i temperaturu [kg m⁻³]
 μ – dinamička viskoznost [kg m⁻¹ s⁻¹]
 \mathbf{K}_0 – tenzor hidrauličke vodljivosti materijala zasićenoga 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 zapremine 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]

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

ρ_b – gustoća obujma (masa krutih tvari podijeljena s ukupnim volumenom) [kg m⁻³]

K_d^k – distribucija koeficijenta otopljene tvari k [m³ kg⁻¹]

C^k – koncentracija otopljene tvari k [kg m⁻³]

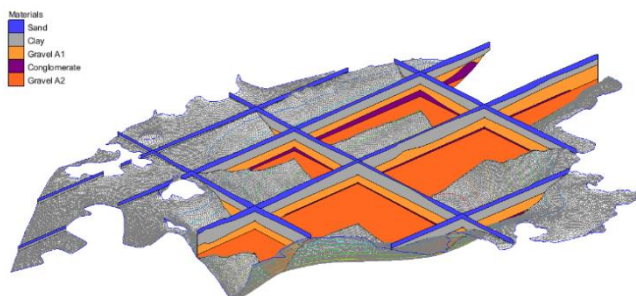
D – tenzor koeficijenta hidrodinamičke disperzije [m² s⁻¹]

q – specifično otpuštanje [m s⁻¹]

C_s^k – koncentracija izvora ili ponora [kg m⁻³] otopljene tvari k

2.2. Postavke modela i geološka definicija

Područje modela omeđeno je morskom linijom na zapadu, granicom stijenske mase na jugu i sjeveru te područjem Opuzena na istoku. Horizontalna diskretizacija modela iznosi 50 x 50 m. Vertikalna diskretizacija modela u svezi je s rasporedom geoloških slojeva u modelu. U korištenome modelu usvojena je vertikalna diskretizacija s jedanaest slojeva od kojih prva dva predstavljaju sloj pijeska, dva sloja predstavljaju glinu, dva sloja plići sloj šljunka, jedan sloj konglomerat, a pet slojeva dublji sloj šljunka. Slojevi modela predstavljaju geološke slojeve, a Slika 1 prikazuje raspored navedenih geoloških slojeva u modelu.



Slika 1. Raspored geoloških slojeva modela

Od 1962. do 2019. godine na području donjega toka rijeke Neretve izvedeni su geoelektrično sondiranje, 138 istražnih bušotina te geoelektrična tomografija. Karakteristike geoloških slojeva modela i njihov prostorni raspored dobiveni su na temelju tih podataka te na temelju istražnih radova u laboratoriju. Tablica 1 prikazuje vrijednosti parametara korištenih u modelu.

Tablica 1. Karakteristike geoloških slojeva korištene u modelu

Geološki sloj	Max. dubina (m)	Min. dubina (m)	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Ss	Sy	Poroznost
Pijesak	10,0	- 10,0	1e ⁻⁴	1e ⁻⁵	0,00004	0,25	0,3
Glina	- 10,0	- 30,0	1e ⁻⁸	1e ⁻⁹	0,0055	0,02	0,45
Šljunak	- 30,0	- 45,0	1e ⁻³	1e ⁻⁴	1e ⁻⁶	0,25	0,3
Konglomerat	- 45,0	- 48,0	1e ⁻¹⁵	1e ⁻¹⁶	1e ⁻¹⁵	1e ⁻¹⁵	0
Šljunak	- 48,0	- 150,0	1e ⁻³	1e ⁻⁴	1e ⁻⁶	0,25	0,3

2.3. Rubni i početni uvjeti modela

Za postavljeni model bilo je potrebno definirati rubne uvjete za tečenje i rubne uvjete za transport. Prvo su definirani rubni uvjeti za tečenje. Stijena koja se rasprostire na cijelome području donjega toka rijeke Neretve na dubini od 5 do -165 m definira nepropustan rubni uvjet. Morski rubni uvjet, za koji su korištena očitavanja razine mora s mareografa, definiran je na području morske linije koju obuhvaća model. Rubni uvjet na području Opuzena, istočne granica modela, definiran je određenim protokom procjeđivanja podzemnih voda. Razina vodnoga lica rijeke Neretve definirana je rubnim uvjetom na dvjema lokacijama. Istočni rubni uvjet rijeke Neretve odgovara očitavanju limnigrafa postavljenoga kod Opuzena, dok je zapadni rubni uvjet očitavanje s mareografa. Rubni uvjeti za Malu Neretvu i veće kanale koji su obuhvaćeni modelom definirani su geodetskim očitanjima s terena i režimom rada crpnih stanica Modrič i Vidrice.

Rubni uvjet za transport za morski rubni uvjet zadana je vrijednost koncentracije koja iznosi 36 g/l i ravnomjerno je raspodijeljena na cijelome zapadnom rubu modela. Rubni uvjet za transport na istočnome rubu domene modela za Malu Neretvu i kanale jest $\frac{dc}{dx} \neq 0$ i $\frac{dc}{dz} \neq 0$. Za rijeku Neretvu definirane su dvije grupe rubnih uvjeta za transport, jedna za zimsko, a druga za ljetno razdoblje. Za ljetno razdoblje rubni uvjet transporta zadana je vrijednost koncentracije koja iznosi 36 g/l, dok ta vrijednost u zimskome razdoblju iznosi 0 g/l.



Slika 2. Rubni uvjeta tečenja u modelu



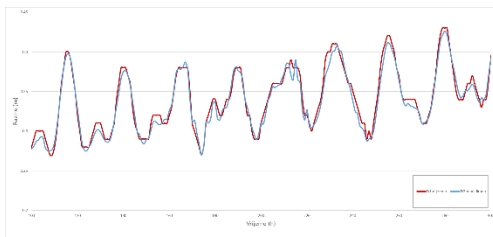
Slika 3. Rubni uvjeti transporta u modelu

Početni uvjeti modela za tečenje odgovaraju rasporedu piezometarskih visina dobivenih za stacionarno stanje modela na području domene modela. Početni uvjet modela za transport odgovara vrijednosti koncentracije dobivene za stacionarno stanje modela.

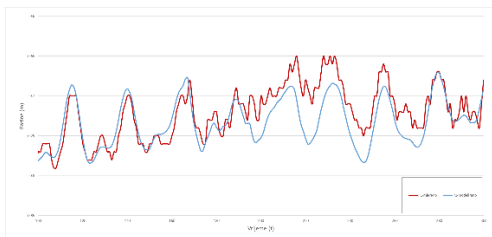
3. Rezultati

3.1. Rezultati tečenja u modelu

Slike 4 i 5 prikazuju mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokacijama D2 i P1, dobivene navedenom postavkom modela. Uočava se bolja podudarnost mjerene i modelirane vrijednosti u dubokome piezometru. Srednja vrijednost, visina amplitude i kašnjenje signala jako dobro opisuju stanja u dubokim piezometrima. Razlike koje se javljaju na plitkim piezometrima moguće je pripisati utjecaju vanjskih čimbenika, kao što je rad crpnih stanica, i utjecaju evapotranspiracije, koji nisu dio trenutačno razvijenoga modela.

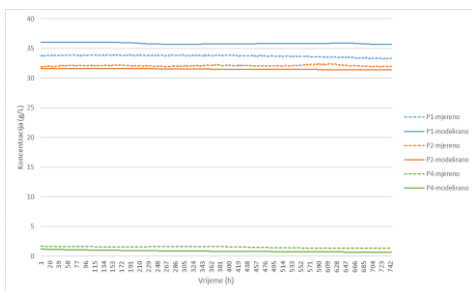


Slika 4. Prikaz mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokaciji D2

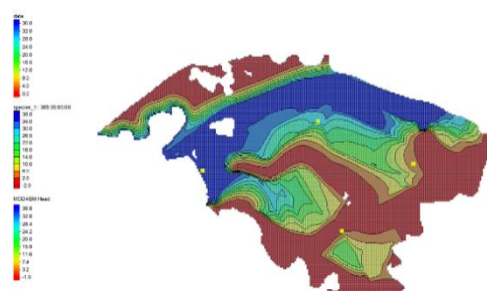


Slika 5. Prikaz mjerene i modelirane vrijednosti piezometarske visine na lokaciji P1

Slika 6 prikazuje odnos mjerene i modelirane koncentracije slanosti u plitkim piezometrima. Modelirane vrijednosti slanosti na plitkim piezometrima u skladu su s mjerenim vrijednostima. Modelirana vrijednost slanosti na piezometrima P1 i P4 nešto je veća od mjerene vrijednosti, dok je u P2 ta vrijednost nešto manja od mjerene vrijednosti. Slika 7 prikazuje raspored koncentracije soli u površinskom sloju modela za ljetno razdoblje. Početni uvjet za stacionarno stanje ovoga modela jest koncentracija soli u rijeci Neretvi od 36 g/l. U ljetnome razdoblju uočava se kako se povećana koncentracija soli može zabilježiti na gotovo cijelome području domene. Područja Male Neretve i melioracijskoga podsustava Jasenska, koji imaju veće vrijednosti piezometarske visine, ne bilježe povećanje koncentracije soli. Uzimajući u obzir dobivene vrijednosti piezometarskih visina i vrijednosti koncentracija, moguće je zaključiti kako model uspješno simulira postojeće stanje.



Slika 6. Prikaz mjerene i modelirane koncentracije soli u plitkim piezometrima



Slika 7. Raspored koncentracije soli u površinskom sloju modela za ljetni period

4. Rasprava i zaključci

Nakon usporedbe vrijednosti dobivenih rezultata iz modela s vrijednostima mjerenja s terena moguće je definirati kapacitet modela za opis piezometarskih stanja i polja slanosti. Na opis piezometarskih stanja u modelu veliku ulogu igra definiranje karakteristika geoloških slojeva te su se u procesu kalibracije i verifikacije te vrijednosti prilagodile kako bi se postiglo bitnije podudaranje s mjerenim vrijednostima. Utjecaj modela na opis polja slanosti očituje se u definiranju veličine ćelije modela, a naročito u definiranju vertikalne diskretizacije modela. S odabranim slojevima modela i veličinom ćelija nije bilo moguće definirati prijelazni sloj slanosti te je za detaljniji opis polja slanosti potrebno redefinirati vertikalnu diskretizaciju slojeva modela i prilagoditi je skali polja

slanosti. Dodavanjem dodatnih parametara u model, kao što je rad crpnih stanica, proces evapotranspiracije i režima rada kanala, moguće je doći do pouzdanijega konceptualnog modela i dodatne sličnosti mjerenih i modeliranih vrijednosti. Nakon definiranja postojećega stanja u modelu potrebno je analizirati scenarije kojima se predviđaju klimatske promjene i budući zahvati u obuhvatu. Analizom takvih scenarija moguće je odrediti njihovu učinkovitost kada je riječ o zaštiti od zaslanjivanja te predvidjeti mjere kojima bi se očuvala kvaliteta vode za navodnjavanje.

Literatura

- [1] McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W.: A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, 1988, 10.3133
- [2] Zheng, C.: MT3D, A modular three-dimensional transport model for
- [3] simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 1990
- [4] Zhu, S.; Zhou, Z.; Guo, Q.; Ma, J.: A Study on the Cause of Layered Seawater Intrusion in the Daqing River Estuary of Liaodong Bay, China. *Sustainability* 2020, 12, 2842. <https://doi.org/10.3390/su12072842>
- [5] Zghibi, A., Mirchi, A., Zouhri, L. et al. Implications of groundwater development and seawater intrusion for sustainability of a Mediterranean coastal aquifer in Tunisia. *Environ Monit Assess* 191, 696 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7866-5>
- [6] Pappa, A., Dokou, Z. and Karatzas, G.: Saltwater intrusion management using the SWI2 model: application in the coastal aquifer of Hersonissos, Crete, Greece. *DESALINATION AND WATER TREATMENT.*, 2017., 99. 49-58. 10.5004/dwt.2017.21550.
- [7] Colombani, N., Osti, A., Volta, G. et al.: Impact of Climate Change on Salinization of Coastal Water Resources. *Water Resour Manage* 30, 2483–2496 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1292-z>
- [8] Langevin, C.D., Thorne, D.T., Jr., Dausman, A.M., Sukop, M.C., and Guo, Weixing, 2007, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22