



Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Marko Reljić

**Modeliranje pojavnosti i intenziteta
zaslanjivanja voda unutar
hidromeliorirane riječne delte senzorskim
monitoringom**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF AGRICULTURE

Marko Reljić

**Modeling the occurrence and intensity of
water salinity in a hydromeliorated river
delta by sensor monitoring**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Marko Reljić

**Modeliranje pojavnosti i intenziteta
zaslanjivanja voda unutar
hidromeliorirane riječne delte senzorskim
monitoringom**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof.dr.sc. Davor Romić

Izv.prof.dr.sc. Marina Bagić Babac

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF AGRICULTURE

Marko Reljić

**Modeling the occurrence and intensity of
water salinity in a hydromeliorated river
delta by sensor monitoring**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:
Prof. Davor Romić, PhD
Prof. Marina Bagić Babac, PhD

Zagreb, 2024

Bibliografski podaci:

- Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
- Znanstveno polje: Poljoprivreda (agronomija)
- Znanstvena grana: Ekologija i zaštita okoliša
- Institucija: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zavod za melioracije
- Voditelji doktorskog rada: prof.dr.sc. Davor Romić i izv.prof.dr.sc. Marina Bačić Babac
- Broj stranica: 184
- Broj slika: 57
- Broj tablica: 54
- Broj priloga: 14
- Broj literaturnih referenci: 293
- Datum obrane doktorskog rada: dd.mm.gggg.
- Sastav povjerenstva za obranu doktorskog rada:
 - Predsjednik: izv.prof.dr.sc. Monika Zovko
 - Član: prof.dr.sc. Gabrijel Ondrašek
 - Član: prof.dr.sc. Vedran Mornar

Rad je pohranjen u:

Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Ulica Hrvatske bratske zajednice 4 p.p. 550, 10 000 Zagreb, Knjižnici Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta, Svetošimunska cesta 25, 10 000 Zagreb

Tema rada prihvaćena je na sjednici Fakultetskog vijeća Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu održanoj 8. studenog 2022. te odobrena na sjednici Senata Sveučilišta u Zagrebu, održanoj 14. veljače 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA O IZVORNOSTI

Ja, Marko Reljić, izjavljujem da sam samostalno izradio doktorski rad pod naslovom:

**MODELIRANJE POJAVNOSTI I INTENZITETA ZASLANJIVANJA VODA UNUTAR
HIDROMELIORIRANE RIJEČNE DELTE SENZORSKIM MONITORINGOM**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovog dokorskog rada
- da je doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da u izradi nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dd.mm.gggg.

Potpis doktoranda

Ovu doktorsku disertaciju ocijenilo je povjerenstvo u sastavu:

1. prof.dr.sc. Monika Zovko

izvanredna profesorica Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

2. prof.dr.sc. Gabrijel Ondrašek

redoviti profesor Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

3. prof.dr.sc. Vedran Mornar

redoviti profesor u trajnom zvanju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

Disertacija je obranjena na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, dd.mm.gggg.
pred povjerenstvo u sastavu:

1. prof.dr.sc. Monika Zovko

izvanredna profesorica Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

2. prof.dr.sc. Gabrijel Ondrašek

redoviti profesor Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

3. prof.dr.sc. Vedran Mornar

redoviti profesor u trajnom zvanju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu

MENTORI

Prof. dr. sc. Davor Romić

Prof. dr. sc. Davor Romić rođen je 4. siječnja 1958. godine u Metkoviću. Redoviti je profesor u trajnom zvanju na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je i doktorirao na Agronomskom fakultetu gdje je obnašao dužnosti prodekana (1999.-2001.), predstojnika Zavoda za melioracije (2001.-2006.), a u dva je mandata bio dekan (2006.-2012.). Kao član istraživačkog tima proveo je šest mjeseci (1985.) na međunarodnom projektu Horo-Aleltu u Etiopiji. Završio je poslijediplomsku specijalizaciju u Bariju, Italija (1990.-1991.), specijalizaciju na Wageningen University, Nizozemska (1997.), specijalizaciju u Haifi, Izrael (1999.), usavršavanje na Utah State University, Logan, SAD (2000.). U nastavi na Agronomskom fakultetu sudjeluje od 1983. godine u svim razinama obrazovanja. Pokrenuo je i aktivno sudjelovao u razvijanju diplomskog sveučilišnog studija na engleskom jeziku Environment, agriculture and resource management – InterEnAgro. Autor je više od 160 znanstvenih radova, od toga je 77 radova zastupljeno i citirano u relevantnim bazama podataka. Njegovi radovi objavljeni su u prestižnim časopisima iz kategorije Environmental sciences, Water resources, Soil Science, Engineering Environmental visokog faktora odjeka. Autor je pet knjiga od kojih su tri sveučilišna udžbenika, četiri poglavlja u knjizi stranog izdavača te deset priručnika i četiri monografije. Voditelj je i suradnik na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim projektima uključujući i one iz kategorije FP-6, FP-7, Erasmus+, HORIZON, Interreg. Voditelj je „Nacionalnog projekta navodnjavanja i gospodarenja poljoprivrednim zemljištem i vodama u RH (2005.)” kao i Novelacije istog dokumenta (2021.), najvećeg infrastrukturnog projekta u poljoprivredi u Hrvatskoj. Voditelj je projekta od nacionalnog značenja „Utjecaj poljoprivrede na onečišćenje površinskih i podzemnih voda u RH – SAGRA” (2014.) i „Preispitivanje područja podložna eutrofikaciji i područja ranjiva na nitrate” - SAGRA-3“ (2023.). Obnašao je mnoge javne funkcije: bio je član Senata Sveučilišta u Zagrebu (2006. – 2012.) te član Rektorskog kolegija u širem sastavu. Bio je ministar poljoprivrede u 13. Vladi RH (2016.), zastupnik u Hrvatskom saboru (2016. – 2017.), predsjednik Odbora za poljoprivredu Hrvatskog sabora (2016. – 2017.). Bio je suradnik na izradi Strategije obrazovanja, znanosti i tehnologije. Dobitnik je mnogih priznanja između ostalih i nagrade Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti za 2013. godinu u području tehničkih znanosti za biotehnoška postignuća u području melioracija i gospodarenja vodom.

Izv.prof.dr.sc. Marina Bagić Babac

Izv.prof.dr.sc. Marina Bagić Babac rođena je u Kninu 1978. godine. Diplomirala je (2001.), magistrirala (2004.) i doktorirala (2009.) u polju elektrotehnike (smjer Telekomunikacije i informatika) na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER). Na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu političkih znanosti diplomirala je novinarstvo 2008. (smjerovi Tisak i Odnosi s javnošću). Od listopada 2017. godine radi na Zavodu za primijenjeno računarstvo FER-a, a od rujna 2001. do rujna 2017. radila je na Zavodu za telekomunikacije FER-a. Tijekom dokorskog studija bila je gostujući istraživač na Sveučilištu u Ljubljani Fakultetu za računarstvo i informatiku (2006./2007.) i na Sveučilištu u Mariboru Fakultetu za elektrotehniku, računarstvo i informatiku (2005./2006.), Republika Slovenija. Sudjelovala je na tri znanstveno - istraživačka projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH i jednom projektu HRZZ. Bila je voditeljica bilateralnog međunarodnog projekta s Republikom Slovenijom. Trenutno je članica upravnog odbora projekta COST Action CA19134 Distributed Knowledge Graphs te suradnica na Horizon Europe projektu AI4SoilHealth: Accelerating collection and use of soil health information using AI technology to support the Soil Deal for Europe and EU Soil Observatory. Objavila je više od pedeset radova u znanstvenim časopisima i zbornicima konferencija s međunarodnom recenzijom u području društvenog računarstva i softverskog inženjerstva. Članica je uredničkog odbora časopisa International Journal of Information Management Data Insights i International Journal of Student Project Reporting, sudjeluje u međunarodnim programskim odborima znanstvenih konferencija (KES-AMSTA, ASTEC), te djeluje kao recenzentica u brojnim inozemnim časopisima. Aktivno sudjeluje u nastavnom procesu na FER-u. Redovito drži predavanja i laboratorijske vježbe iz predmeta preddiplomskog (Uvod u programiranje), diplomskog (Operacijska istraživanja, Obrada prirodnog jezika) i dokorskog studija računarstva (Društveno umrežavanje i društveno računarstvo, Operacijska istraživanja) FER-a. Prije izbora u docenta imala je povjeru predavanja i laboratorijskih vježbe iz niza predmeta preddiplomskog (Algoritmi i strukture podataka, Digitalna logika, Komunikacijske mreže, Informacija, logika i jezici) i diplomskog studija FER-a (Društvene mreže, Automati sa svojstvom učenja, Formalne metode za verifikaciju i sintezu programskih sustava). Bila je mentorica ukupno 64 završna i diplomatska rada iz kojih je objavljeno 20 znanstvenih radova u znanstvenim časopisima i zbornicima konferencija. Bila je mentorica studentu dobitniku Rektorove nagrade za ak. god. 2021./2022. Obavljala je funkciju ECTS koordinatora za Erasmus studentsku razmjenu na FER-u u razdoblju od travnja 2018. do svibnja 2021. Članica je stručne udruge IEEE.

Zahvala

Prvo se želim zahvaliti mentorima, prof.dr.sc. Davoru Romiću i izv.prof.dr.sc. Marini Bagić Babac na podršci, strpljenju, na svakom savjetu i poticaju na kritičko razmišljanje te bezuvjetnoj stručnoj pomoći koju su mi pružili prilikom izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva, izv.prof.dr.sc. Moniki Zovko, prof.dr.sc. Gabrijelu Ondrašeku i prof.dr.sc. Vedranu Mornaru na vremenu i trudu uloženom u čitanje doktorskog rada. Posebno hvala na svim sugestijama i komentarima koji su ovaj rad učinili boljim i kvalitetnijim.

Veliku zahvalu dugujem svim djelatnicima Zavoda za melioracije koji su u nekom trenutku sudjelovali u izradi disertacije, bilo savjetom, kritikom ili jednostavno riječima podrške. Hvala doc.dr.sc. Marini Bubalo Kovačić, Filip Kranjčecu, mag.ing.agr. i Jeleni Horvatinec, mag.ing.agr. na pomoći, beskrajnom strpljenju i ohrabrenju u ključnim trenucima.

Posebnu zahvalu dugujem ljudima u dolini rijeke Neretve. Hvala Vjeki i Niki bez čije savjesne brige o opremi i pomoći na terenu ovo istraživanje ne bi bilo moguće. Hvala g. Jošku Ercegu, dipl.ing.građ., voditelju VGO za mali sliv „Neretva-Korčula“ čije su stručnost i znanje u velikoj mjeri doprinijeli ovoj disertaciji.

Beskrajno hvala mojoj obitelji na pruženoj ljubavi i podršci.

Na kraju, najveće hvala Hani i Vidu.

Istraživanje u okviru doktorske disertacije podržano je sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj kroz projekt „Napredni sustav motrenja agroekosustava u riziku od zasljanjavanja i onečišćenja“ – DELTASAL (KK.05.1.1.02.0011), sredstvima Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost Republike Hrvatske te kroz projekt „Monitoring zasljanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve“ financiran od strane Hrvatskih voda.

SAŽETAK

Klimatske promjene, u prvom redu globalni porast prosječne razine mora uvjetuje intenzifikaciju intruzije morske vode u priobalne vodonosnike i površinske vodene tokove čime su posebno ugrožena nizinska područja riječnih delti. Za donošenje pravovremenih odluka i gospodarenje vodama i tlima u osjetljivim agroekosustavima riječnih delti nužna je uspostava sustava monitoringa. Klasični sustavi monitoringa koji podrazumijevaju uzorkovanje vode i laboratorijska ispitivanja sve češće se unaprjeđuju kontinuiranim *in-situ* sustavima primjenom različitih senzora. Za razliku od klasičnog monitoringa koji je važan za karakterizaciju kakvoće voda i detekciju dugoročnih trendova i sezonalnosti, *in-situ* kontinuirani monitoring visoke vremenske rezolucije omogućava kvantifikaciju ekstrema, kratkoročnih trendova i unutar dnevne varijabilnosti. Stoga su ciljevi istraživanja bili : i) usporediti pokazatelje zasljenjenosti izmjerene *in-situ* sensorima i klasičnim metodama monitoringa te ii) na temelju podataka dobivenih *in-situ* kontinuiranim monitoringom visoke vremenske frekvencije procijeniti utjecaj prirodnih i antropogenih čimbenika na zasljenjivanje površinskih i podzemnih voda riječne delte. Istraživanje je provedeno u dolini rijeke Neretve na dvije lokacije, Vidrice i Luke. Na obje lokacije instalirane su višeparametarske sonde za mjerenje električne vodljivosti EC_w u površinskim i podzemnim vodama. Za monitoring vlažnosti i EC tla instalirani su FDR senzori do dubine 1 m na svakih 25 cm. Prikupljanje meteoroloških podataka omogućeno je automatskom agrometeorološkom stanicom instaliranom na lokaciji Vidrice. Svi podaci prikupljeni su u visokoj vremenskoj rezoluciji (15 min-60 min ovisno o pokazatelju). Analizom višegodišnjeg seta podataka o kakvoći voda prikupljenih klasičnim monitoringom te jednogodišnjeg seta *in-situ* kontinuiranih mjerenja utvrđene su statistički značajne razlike u EC_w površinskih i podzemnih voda na i između pojedinih lokacija. Utvrđene razlike posljedica su prirodnih i antropogenih čimbenika specifičnih za pojedinu lokaciju, a koji su detektirani *in-situ* kontinuiranim monitoringom. Usporedbom provedenih mjerenja nisu utvrđene statistički značajne razlike vrijednosti EC_w dobivene klasičnim i *in-situ* monitoringom, a visoka razina točnosti utvrđena je u površinskoj i podzemnoj vodi na lokaciji Luke te površinskoj vodi na lokaciji Vidrice. Prikupljeni podaci u satnoj i dnevnoj vremenskoj rezoluciji korišteni su za razvoj prognostičkih modela strojnog učenja i vremenskih serija. Korištenjem satnih ulaznih podataka bolje performanse pokazao je model XGB u odnosu na model MLR. Pouzdane tjedne prognoze s niskim vrijednostima pogrešaka (MAE i RMSE) postignute su u površinskoj vodi na lokaciji Vidrice, dok su pouzdane prognoze do mjesec dana unaprijed postignute u površinskoj vodi na lokaciji Luke i podzemnim vodama na lokacijama Vidrice i Luke. Primjenom dnevnih ulaznih podataka najbolje prognostičke performanse pokazao je ARIMA model, a najmanje pogreške utvrđene kod tjedne prognoze. Razvijeni i testirani predikcijski modeli satnih i dnevnih vrijednosti EC_w mogu se koristiti za pouzdano kratkoročno predviđanje stupnja zasljenjenosti površinskih i podzemnih voda na odabranim lokacijama u hidromelioriranoj riječnoj delti. Rezultati provedenog istraživanja mogu poslužiti kao smjernice u planiranju načina gospodarenja vodama i tlima u ugroženim agroekosustavima kao što su riječne delte koje su pod izravnim i neprestanim pritiskom klimatskih promjena, u prvom redu podizanja razine mora i njegove intenzivnije intruzije u priobalna područja.

Ključne riječi: intruzija, zasljenjivanje, monitoring, senzori, modeliranje, strojno učenje, ARIMA

EXTENDED ABSTRACT

MODELING THE OCCURRENCE AND INTENSITY OF WATER SALINITY IN A HYDROMELIORATED RIVER DELTA BY SENSOR MONITORING

One of the most important consequences of climate change, which threatens both surface and groundwater resources in coastal areas, is sea level rise. Although global sea levels have been rising throughout the 20th century, these processes have intensified towards the end of the century. According to data from the 2013 IPCC report, the mean value of global sea level rise was 1.7 mm per year in the period from 1901 to 2010, while it rose to 3.2 mm per year in the period from 1993 to 2010. Despite the global nature of the problem of sea level rise, the Mediterranean region, including the Adriatic, is one of the hotspots and most vulnerable areas. Sea level rise can intensify the natural processes of seawater intrusion (SWI) into coastal aquifers and surface waters, which can be exacerbated by anthropogenic activities such as the regulation of watercourses, excessive groundwater abstraction, etc. These processes particularly endanger lowland coastal areas such as estuaries and deltaic plains, which play a crucial socio-economic role in addition to their wealth of natural resources and biodiversity. SWI and changes in salinity within river deltas are the result of interactions between morphology and topography, tidal regimes and the inflow of freshwater from the catchment area. In the long term, SWI can have serious consequences in terms of degrading the quality of surface and groundwater resources. Consequently, the salinization of water resources can lead to soil salinization. Worldwide, more than 900 Mha of soil are classified as salt affected. In the short term, soil salinization can lead to reduced crop yields, while the long-term consequences are more severe, including a reduction in soil fertility and productivity, which could ultimately lead to permanent loss through desertification. In order to control and evaluate changes in vulnerable areas such as river deltas, environmental monitoring systems should be introduced, particularly to monitor soil and water quality. Many countries have developed and implemented water quality monitoring systems, most of which are regulated by law. Although technological advances have led to the development of means for automated and continuous water quality monitoring, most water quality monitoring systems are still carried out in the traditional way, usually with monthly sampling and laboratory analyses. While sampling-based monitoring is useful for the general characterization of water quality and the detection of long-term trends and seasonal variations, high-frequency *in-situ* sensor monitoring enables quantification of extreme events, short-term trends and sub-day variations in water quality parameters. Although weekly or monthly sampling may be sufficient for some parameters, such as pH, continuous data for parameters such as nutrients and EC_w provide better opportunities for understanding hydrochemical processes in various water bodies. Continuous high-frequency sensor monitoring enables the collection of large amounts of data (big data) that can be used for advanced statistical modeling and the development of time series and machine learning models for long and short-term predictions of dynamic parameters such as EC_w . Based on the above, two research hypotheses were tested: (I) surface and groundwater salinity indicators can be measured as accurately with *in-situ* sensors as with traditional monitoring methods; (II) surface and groundwater salinity will change over time due to natural and anthropogenic influences. The objectives of the research were (I) to compare salinity indicators measured with *in-situ* sensors and traditional monitoring methods; (II) to assess the impact of anthropogenic and natural factors on salinization of surface and groundwater over time using data obtained from *in-situ* measurements.

The research was carried out in the Neretva River delta on the east coast of the Adriatic Sea in Croatia. Within the delta, locations Vidrice (42°59'13" S, 17°31'39" I) and Luke (43°1'37" S, 17°33'39" I) were selected, which are characterized by a different spatial position and distance from the main watercourses, different soil properties and different land use and agricultural management practices. At both locations multiparameter probes measuring water temperature, depth, pH, EC_w and ORP were installed in drainage canals for monitoring surface water and shallow piezometers (4 m deep) for monitoring groundwater quality. In the immediate proximity of the piezometers, FDR soil sensors were installed at both locations to measure temperature, moisture and EC_b . In addition, sensors for soil water potential were installed at depths of 25 cm and 50 cm. Meteorological data was recorded using the automatic station installed at the Vidrice. Data loggers and modems were used to record and transmit real-time data in high temporal resolution. The collected *in-situ* data on water salinity were evaluated against the data from traditional monthly monitoring at the same locations. Descriptive statistics and ANOVA were performed for both long-term monthly monitoring (2010-2022) and continuous *in-situ* monitoring (2021-2022). High temporal frequency data collected through the established *in-situ* monitoring, in addition to water level data at the main watercourses, were used for the development of time series (ARIMA) and two machine learning models (MLR and XGB). The developed models were used to predict EC_w seven, 14 and 30 days ahead and the predictions were evaluated using MAE and RMSE.

The results of the long-term traditional monthly monitoring showed that the average EC_w of surface water at location Vidrice was 2.4 dS m^{-1} , while a higher average EC_w value (8.9 dS m^{-1}) was measured in the groundwater, both with high variability. At location Luke, a higher salinity was found in the surface water (8.3 dS m^{-1}) than in the groundwater (2.9 dS m^{-1}). Analysis of the major ions showed that in both water bodies and at both locations the dominant cation was Na^+ and the dominant anion was Cl^- , with the exception of the groundwater at location Luke location the dominant anion was SO_4^{2-} . The correlation analysis showed a positive, strongly significant correlation between EC_w and Na^+ and Cl^- at both locations and for both water bodies. The ANOVA and the Tukey HSD post-hoc test showed that EC_w differed significantly between the same water bodies at different sites as well as between different water bodies at each site. When analyzing the results of continuous *in-situ* water monitoring, no differences were determined between hourly and daily temporal frequency for any of the analyzed parameters at both locations in surface and groundwater. As with the traditional methods, higher average values of EC_w were found in groundwater (12 dS m^{-1}) compared to surface water (2.1 dS m^{-1}) in the continuous *in-situ* monitoring at location Vidrice. *In-situ* continuous data showed clear differences in dynamics of EC_w between surface water and groundwater. Intense precipitation events during non-growing periods resulted in highly dynamic changes in EC_w in surface water, with hourly values ranging from 0.17 to 11 dS m^{-1} . At the same time, each precipitation event in the groundwater led to a rapid decrease in EC_w values. The less dynamic and slower changes in groundwater salinity compared to surface water are the result of the interaction of several parameters, such as pedological characteristics, aquifer recharge, distance to major watercourses and possible anthropogenic influences, such as the operation of pumping stations. At location Luke, a higher average EC_w value was determined in the surface water (7.0 dS m^{-1}) compared to the groundwater (3.7 dS m^{-1}). The hourly time series of the EC_w value in the surface water, where more dynamic changes were observed, show that precipitation had no direct influence on the EC_w dynamics. The sudden and pronounced changes in the hourly data indicate that the salinity in the surface waters is predominantly subject to anthropogenic influences, namely the pumping regime. Similar to location Vidrice, the changes in EC_w in the groundwater were less dynamic and slower. The ANOVA

revealed significant differences in EC_w between surface water and groundwater at both locations and between the two study locations. The results indicate that the salinization of surface and groundwater at the selected locations are influenced by various natural and anthropogenic factors. The salinization of surface and groundwater at location Vidrice is mainly the result of the direct SWI into the coastal aquifer through the karstic coast in the southwest in combination with the permanent regulation of the water level (drainage canals, sluices, pumping stations, etc.). The changes in salinity of surface and groundwater at location Luke are primarily influenced by the stratified flow of the Neretva River and the SWI through the main riverbed. Evaluation of the *in-situ* measurements against the results of traditional monitoring showed a high correlation (0.97) and R^2 value (0.94) for the surface water at location Vidrice with very low MAE (0.13 dS m^{-1}) and RMSE (0.18 dS m^{-1}) values, indicating a high degree of accuracy. At the same location, more significant deviations were observed for groundwater, with an R^2 value of 0.28, together with errors of 2 dS m^{-1} for MAE and 3.16 dS m^{-1} for RMSE. The low accuracy and more significant differences in groundwater could be due to the different sampling depths in non-growing period when heavy rainfall occurred, leading to rapid changes in the water table. At location Luke, high correlation and R^2 values were found between the two monitoring approaches for both surface water and groundwater. Lower error values were observed in the groundwater (MAE= 0.32 dS m^{-1} and RMSE= 0.39 dS m^{-1}) compared to surface water (MAE= 0.48 dS m^{-1} and RMSE= 0.71 dS m^{-1}). The changes in soil moisture and EC_b up to 75 cm were influenced by precipitation and the associated rise in groundwater water table during the non-growing period as well as by precipitation and irrigation during the growing season at location Vidrice. The almost constant moisture in the deepest layer was mainly influenced by groundwater, which was within 1.5 m below the soil surface during most of the study period. A similar pattern was observed for EC_b , where precipitation and the rise in groundwater water table during the non-growing period influenced the changes in EC_b throughout the profile. The highest values were found in the deepest layer, which was also influenced by saline groundwater. During the growing season, when the water table was below 1.5 m and the orchard was irrigated, changes in EC_b were observed in the top 75 cm of the soil profile. At location Luke, a higher average soil moisture was found in the upper half of the soil profile (0-50 cm), with the highest average value found in the 25-50 cm layer. The analysis of the changes in the dynamics of soil moisture and EC_b showed that during the growing season in 2021 and 2022, irrigation measures had the greatest influence on the changes up to a depth of 75 cm. During the non-growing period, the changes in soil moisture and EC_b were influenced by precipitation and the associated rise in the groundwater table. The data collected at hourly and daily temporal resolution was used to develop machine learning and time series for predicting EC_w . The XGB model performed better than the MLR model on hourly input data. Satisfactory results with low MAE and RMSE were obtained for the prediction of seven days ahead in surface water at location Vidrice and up to 30 days ahead in surface and groundwater at location Luke as well as in groundwater at location Vidrice. Using daily input data, the ARIMA model showed the best performance, with the lowest errors observed for the seven-day-ahead prediction. The developed and tested models can be used for reliable short-term prediction of EC_w in surface and groundwater at selected locations in the hydro-meliorated river delta. The results of this research can guide the planning of future water and soil management practices in vulnerable agro-ecosystems such as river deltas that are under pressure from climate change, especially sea level rise, and increased SWI.

Key words: intrusion, salinization, monitoring, sensors, modeling, machine learning, ARIMA

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	4
2.1. Zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda i tla u priobalnim područjima.....	4
2.1.1. Zaslanjivanje površinskih voda	5
2.1.2. Zaslanjivanje podzemnih voda	10
2.1.3. Zaslanjivanje tla	13
2.2. Monitoring kakvoće površinskih i podzemnih voda	15
2.2.1. <i>In-situ</i> kontinuirani monitoring kakvoće voda	17
2.3. Modeli predviđanja kakvoće voda	19
2.3.1. Modeli vremenskih serija	20
2.3.2. Modeli strojnog učenja.....	22
2.4. Problem zaslanjivanja u Republici Hrvatskoj – slučaj doline rijeke Neretve.....	25
3. MATERIJALI I METODE	30
3.1. Lokacije istraživanja.....	30
3.2. Instalirana istraživačka oprema i prikupljanje podataka	34
3.3. Povijesni hidrološki i kemijski pokazatelji za potrebe modeliranja	38
3.4. Laboratorijska istraživanja	38
3.5. Kontrola i vrednovanje <i>in-situ</i> monitoringa.....	39
3.6. Statistička obrada podataka i modeliranje	40
3.6.1. Vizualni prikaz kemijskog sastava površinskih i podzemnih voda	41
3.6.3. Ocjena pouzdanosti predikcijskih modela	45
4. REZULTATI	46
4.1. Rezultati istraživačkog monitoringa površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje 2010.-2022.....	46
4.2. Rezultati istraživačkog monitoringa površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021.- kolovoz 2022.	51
4.3. <i>In-situ</i> kontinuirani monitoring površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.	54
4.4. Vrednovanje mjerenja stupnja zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda <i>in-situ</i> kontinuiranim monitoringom na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.	63
4.5. <i>In-situ</i> kontinuirani monitoring tla na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.	65

4.6.	Modeli predviđanja stupnja zasljenosti površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke	78
4.6.1.	Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice	78
4.6.2.	Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice	82
4.6.3.	Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice	89
4.6.4.	Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice	93
4.6.5.	Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke	99
4.6.6.	Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke	103
4.6.7.	Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke	109
4.6.8.	Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke	114
5.	RASPRAVA	120
5.1.	Klasični mjesečni monitoring stupanja zasljenosti površinskih i podzemnih voda	121
5.2.	<i>In-situ</i> kontinuirani monitoring stupnja zasljenosti površinskih i podzemnih voda	127
5.2.1.	Vrednovanje <i>in-situ</i> kontinuiranog monitoringa	132
5.3.	Monitoring stupnja zasljenosti tla	134
5.4.	Modeli predviđanja stupnja zasljenosti površinskih i podzemnih voda	137
6.	ZAKLJUČCI	141
7.	LITERATURA	143
8.	PRILOZI	172

Popis kratica:

ACF – korelogram autokorelacije

ADF - *Augmented Dickey-Fuller*

AIC – *Akaike information criterion*

ANFIS - *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*

ANN - *Artificial Neural Network*

ANOVA – analiza varijance

ARIMA – *Autoregressive Integrated Moving Average*

BIC – *Bayesian information criterion*

BiH – Bosna i Hercegovina

CS – crpna stanica

CV – koeficijent varijacije

DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod

DPSIR - *driver-pressure-state-impact-response*

EC_b – električna vodljivost tla

EC_w – električna vodljivost vode

EU – Europska unija

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FDR - *frequency domain reflectometry*

HE – hidroelektrana

HSD - *honestly significant difference*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO - *International Organization for Standardization*

KJ – kartirana jedinica

LI – lokacija istraživanja

LSTM - *Long Short-Term Memory*

MAE – *mean absolute error*

MAPE – *mean absolute percetage error*

MLR - *Multiple Linear Regression*

MP – melioracijsko područje

MSE – *mean square error*

ORP – oksidacijsko reduksijski potencijal

PACF - korelogram parcijalne autokorelacije

r – koeficijent korelacije

R² – koeficijent determinacije

RF - *Random Forest*

RH – Republika Hrvatska

RMSE – *root mean square error*

SSG – *seawater specific gravity*

SVM - *Support Vector Machine*

SWI – *seawater intrusion*

TDR – *time domain reflectometry*

TDS - *total dissolved solids*

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*

VIF – *variance inflation factor*

VPS – višeparametarska sonda

WFD – *Water Framework Directive*

XGB - *Extreme Gradient Boosting*

Popis tablica:

Tablica 2.1. Klase pogodnosti vode za navodnjavanje na temelju vrijednosti EC_w (prema Rhoades i sur., 1992)

Tablica 3.1 Varijable korištene za izradu predikcijskih modela

Tablica 4.1 Deskriptivna statistika EC_w , pH i ionskog sastava površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje 2010.-2022.

Tablica 4.2 Deskriptivna statistika EC_w , pH i ionskog sastava površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Tablica 4.3 Deskriptivna statistika fizikalno-kemijskih pokazatelja površinske i podzemne vode na LI Vidrice za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Tablica 4.4 Deskriptivna statistika fizikalno-kemijskih pokazatelja površinske i podzemne vode na LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Tablica 4.5 Deskriptivna statistika vlažnosti tla, EC_b , temperature tla i matričnog potencijala u tlu na LI Vidrice u satnoj i dnevnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021.-kolovoz 2022.

Tablica 4.6 Deskriptivna statistika i korelacijska matrica pokazatelja vlažnosti tla i EC_b u razdoblju provođenja mjere navodnjavanja mandarine na LI Vidrice

Tablica 4.7 Deskriptivna statistika vlažnosti tla, EC_b , temperature tla i matričnog potencijala u tlu na LI Luke u satnoj i dnevnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021.-kolovoz 2022.

Tablica 4.8 Deskriptivna statistika i korelacijska matrica pokazatelja vlažnosti tla i EC_b u razdoblju provođenja mjere navodnjavanja kupusa na LI Luke

Tablica 4.9 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.10 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.11 Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.12 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u površinskoj vodi na LI Vidrice

Tablica 4.13 Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.14 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.15 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.16 Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.17 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u površinskoj vodi na LI Vidrice

Tablica 4.18 ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.19 Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.20 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.21 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.22 Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.23 Procjenitelji modela MLR i XGB na validacijskom setu satnih podataka u podzemnoj vodi na LI Vidrice

Tablica 4.24 Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.25 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.26 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.27 Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.28 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u podzemnoj vodi na LI Vidrice

Tablica 4.29 ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.30 Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Tablica 4.31 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.32 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.33 Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.34 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u površinskoj vodi na LI Luke

Tablica 4.35 Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.36 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.37 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.38 Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.39 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u površinskoj vodi na LI Luke

Tablica 4.40 ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.41 Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.42 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.43 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.44 Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.45 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u podzemnoj vodi na LI Luke

Tablica 4.46 Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.47 Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.48 Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.49 Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.50 Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u podzemnoj vodi na LI Luke

Tablica 4.51 ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.52 Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 8.1 Legenda pedološke karte prikazane na Slici 3.3.

Tablica 8.2 Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u površinskoj vodi na LI Vidrice

Tablica 8.3 Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u podzemnoj vodi na LI Vidrice

Tablica 8.4 Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u površinskoj vodi na LI Luke

Tablica 8.5 Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u podzemnoj vodi na LI Luke

Tablica 8.6 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Tablica 8.7 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Tablica 8.8 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Tablica 8.9 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Tablica 8.10 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Tablica 8.11 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Tablica 8.12 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Tablica 8.13 Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Popis slika:

Slika 2.1 Tipovi riječnih ušća prema načinu miješanja slatke i slane vode (Prilagođeno prema AMAP, 1998)

Slika 2.2 Intruzija morske vode u priobalni vodonosnik u (A) stacionarnim uvjetima i (B) uvjetima miješanja (prilagođeno prema Oude Essink, 2003)

Slika 2.3 Hidrogeološka karta šireg područja delte rijeke Neretve (prema Biondić i sur., 1996; Kuhta i Brkić, 2020)

Slika 2.4 Područje doline Neretve podijeljeno na melioracijska područja (Vranješ i sur., 2013)

Slika 3.1 Prosječne mjesečne temperature zraka i ukupne oborine za postaju Ploče (1988.-2020.) i automatsku meteorološku stanicu Vidrice (2021.-2022.)

Slika 3.2 Odabrane lokacije istraživanja unutar hidromeliorirane delte rijeke Neretve (Izvor: projekt DELTASAL)

Slika 3.3 Priprema lokacija istraživanja (Izvor: D. Romić)

Slika 3.4 Automatska agrometeorološka stanica (Izvor: D. Romić)

Slika 3.5 Instalirani senzori za monitoring tla (Izvor: D. Romić)

Slika 3.6 Uspostavljeni *in-situ* kontinuirani monitoring površinskih (A) i podzemnih (B) voda (Izvor: M. Reljić)

Slika 3.7 Održavanje (A) i kalibracija (B) VPS (Izvor: M. Reljić; projekt DELTASAL)

Slika 4.1 Prikaz kemijskog sastava površinske (A) i podzemne (B) vode piperovim dijagramom na LI Vidrice

Slika 4.2 Prikaz kemijskog sastava površinske (A) i podzemne vode (B) piperovim dijagramom na LI Luke

Slika 4.3 Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom monitoringu za 2010.–2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

Slika 4.4 Dinamika vrijednosti EC_w površinske i podzemne vode na LI Vidrice (A) i LI Luke (B) u istraživačkom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Slika 4.5 Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

Slika 4.6 Dinamika oborina i EC_w površinske (A) i podzemne vode (B) na LI Vidrice u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Slika 4.7 Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske (A) i podzemne vode (B) u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja na LI Vidrice

Slika 4.8 Dinamika oborina i EC_w površinske (A) i podzemne vode (B) na LI Luke u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Slika 4.9 Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske (A) i podzemne vode (B) u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja na LI Luke

Slika 4.10. Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u *in-situ* kontinuiranom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

Slika 4.11. Dinamika EC_w površinskih (A) i podzemnih voda (B) izmjerenih *in-situ* i istraživačkim monitoringom za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na LI Vidrice

Slika 4.12 Dinamika EC_w površinskih (A) i podzemnih voda (B) izmjerenih *in-situ* i istraživačkim monitoringom za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na LI Luke

Slika 4.13 Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom i *in-situ* kontinuiranom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

Slika 4.14 Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode, vlažnosti tla i EC_b na LI Vidrice u dnevnoj vremenskoj rezoluciji u razdoblju rujan 2021. – kolovoz 2022.

Slika 4.15 Dinamika oborina, navodnjavanja, vlažnosti tla i EC_b u dnevnoj vremenskoj rezoluciji na LI Vidrice u razdoblju 15.7.2022. - 27.8.2022.

Slika 4.16 Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode, vlažnosti tla i EC_b na LI Luke u dnevnoj vremenskoj rezoluciji u razdoblju rujan 2021. – kolovoz 2022.

Slika 4.17 Dinamika oborina, navodnjavanja, vlažnosti tla i EC_b u dnevnoj vremenskoj rezoluciji na LI Luke u razdoblju od 1.3.2022. - 25.5.2022.

Slika 4.18 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu satnih podataka

Slika 4.19 Predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice

Slika 4.20 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu dnevnih podataka

Slika 4.21 Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w površinske vode na LI Vidrice

Slika 4.22 Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w površinske vode na LI Vidrice

Slika 4.23 Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Vidrice

Slika 4.24 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu satnih podataka

Slika 4.25 Predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice

Slika 4.26 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu dnevnih podataka

Slika 4.27 Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Slika 4.28 Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Slika 4.29 Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Vidrice

Slika 4.30 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu satnih podataka

Slika 4.31 Predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke

Slika 4.32 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu dnevnih podataka

Slika 4.33 Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w površinske vode na LI Luke

Slika 4.34 Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w površinske vode na LI Luke

Slika 4.35 Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Luke

Slika 4.36 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu satnih podataka

Slika 4.37 Predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke

Slika 4.38 Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu dnevnih podataka

Slika 4.39 Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w podzemne vode na LI Luke

Slika 4.40 Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w podzemne vode na LI Luke

Slika 4.41 Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Luke

Slika 5.1 Propust na odvodnom kanalu na LI Vidrice

Slika 5.2 Vremenska serija satnih vrijednosti dubine površinske vode na LI Vidrice u odnosu na dnevnu količinu oborina u razdoblju 1.10.2021. - 8.10.2021.

Slika 5.3 Hidromorfološki pritisci na području doline rijeke Neretve 1:150000. Izvor: Vranješ i sur. (2019)

Slika 5.4 Vremenska serija satnih vrijednosti dubine i EC_w površinske vode na LI Luke u razdoblju 30.3.2022. - 6.4.2022.

Slika 5.5 Pukotine na površini tla na LI Luke

Slika 8.1 Pedološka karta doline rijeke Neretve. Mjerilo 1:25000. Legenda u Prilogu, Tablica 8.1. Izvor: projekt DELTASAL

1. UVOD

Voda ima ključnu ulogu u funkcioniranju svih ekosustava. Korištenje vode kao resursa za ljudske potrebe (piće, higijena, poljoprivreda, industrija, turizam i rekreacija) podrazumijeva pravovremeno osiguravanje dovoljnih količina vode adekvatne kakvoće (Carvalho-Santos i sur., 2016). Međutim, vodni resursi sve su ugroženiji uslijed izraženijih klimatskih promjena, osobito u priobalnim područjima. Značajna posljedica toga je podizanje razine mora, što predstavlja rizik za površinske i podzemne vodne resurse priobalnih područja (Bindoff i sur., 2007). Porast globalne razine mora se bilježi tijekom cijelog 20. stoljeća, a posebice prema kraju stoljeća (Domazetović i sur., 2017). Prema podacima izvješća Međuvladinog panela za klimatske promjene IPCC, u razdoblju od 1901. do 2010. prosječna godišnja vrijednost porasta globalne razine mora je iznosila 1,7 mm, a u razdoblju od 1993. do 2010. je iznosila 3,2 mm (Church i sur., 2013). Iako je porast razine mora globalni problem, jedno od najugroženijih područja je prostor mediteranskog bazena uključujući i Jadranko more (Marcos i Tsimplis, 2008). Analizirajući dugogodišnji set podatka s većeg broja mareografa u Jadranskom moru, Tsimplis i sur. (2012) detektirali su porast prosječne razine mora između 2,0 i 3,4 mm godišnje uz pogrešku od 1,0 mm koja se može pripisati slijeganju kopna Jadranske obale. Jedna od posljedica porasta prosječne razine mora svakako je intenzifikacija prirodnih procesa intruzije morske vode u priobalne vodonosnike i površinske vodene tokove, a koji mogu biti značajno pojačani antropogenim aktivnostima, kao što su pojačano crpljenje podzemnih voda, regulacija vodenih tokova, različiti melioracijski zahvati i sl. (Khaska i sur., 2013). Spomenuti procesi posebno ugrožavaju nizinska obalna područja kao što su estuarijske i deltne ravnice koji uz bogatstvo prirodnih resursa i bioraznolikost imaju vrlo važnu socioekonomsku ulogu. Naime ova područja nastanjuje više od 500 milijuna ljudi sa sedam puta većom gustoćom naseljenosti od globalnog prosjeka (Vineis i sur., 2011; Rahman i sur., 2019). Intruzija morske vode i promjene stupnja zaslanjenosti unutar riječnih delti rezultat su interakcija morfologije i topografije, plimnih režima unutar ušća, ali i dotoka svježje vode sa sliva, a dugoročno mogu imati ozbiljne posljedice u smislu degradacije kakvoće površinskih i podzemnih voda (Mohammed i Scholz, 2018). Posljedično, zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda dovodi do zaslanjivanja tala koja globalno zauzimaju više od 900 milijuna ha (Rengasamy, 2006). Kratkoročno, zaslanjivanje tla može dovesti do smanjenja prinosa poljoprivrednih kultura, dok dugoročne posljedice mogu biti smanjenje plodnosti i proizvodnog potencijala tla, što u konačnici može dovesti i do trajnog gubitka uslijed procesa dezertifikacije (Amezket, 2006).

Sedmo nacionalno i treće dvogodišnje izvješće RH prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime UNFCCC kao posebno ranjivi sektor izdvaja Upravljanje vodama i morskim resursima (Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2018). Također, naglašava se da će promjene klime u budućnosti imati značajne utjecaje i na poljoprivrednu proizvodnju uslijed trenda podizanja razine mora i zaslanjivanja površinskih i podzemnih voda i tla u priobalnom području. Iako se procesi intruzije mora i zaslanjivanja voda i tla javljaju u cijelom priobalnom području RH, ti procesi posebno su izraženi u aluvijalnoj dolini rijeke Neretve, koja se smatra jednim od najranjivijih područja na klimatske promjene, a čiji se prostor ujedno koristi za poljoprivrednu proizvodnju, dominantno citrusa i povrća (Zovko i sur., 2018). Od prvih zabilježenih sustavnih melioracija krajem 17. stoljeća do danas izvedeni su brojni zahvati i izgrađene hidrotehničke građevine kojima je vizura doline rijeke Neretve u potpunosti promijenjena. Isušivanjem močvarnog područja i regulacijom donjeg toka rijeke Neretve stvoren je krajolik polderskog tipa čija se funkcionalnost održava kompleksnom mrežom hidrotehničkih građevina kao što su obrambeni nasipi, melioracijski kanali, crpne stanice i ustave (Romić i sur., 2020a). Time su ostvareni preduvjeti za intenzifikaciju poljoprivredne proizvodnje koja je danas moguća na više od 5000 ha obradivih poljoprivrednih površina. Zbog svojih geomorfoloških i hidrogeoloških karakteristika, ali i kao posljedica antropogenih intervencija i aktivnosti, dolina rijeke Neretve pod neprestanim je utjecajem mora. Zaslanjivanje voda i tla odvija se iz dva dominantna smjera (Vranješ i sur., 2007b). Ascendentni tok gotovo morske vode detektirane u dubokom vodonosniku može dovest do zaslanjivanja plitkih podzemnih voda i tala. Osim kroz podzemlje, zaslanjivanje se događa i intruzijom morske vode koritom rijeke Neretve, a propagacija slanog klina izražena je i do nekoliko desetaka kilometara uzvodno (Ljubenković i Vranješ, 2012; Krvavica i sur., 2021).

Zbog ograničenosti i iznimne osjetljivost vodenih resursa, osobito unutar riječnih ušća, važna je uspostava sustava motrenja kakvoće površinskih i podzemnih voda. Brojne zemlje su zakonski definirale uspostavu i načine provođenja monitoringa voda. Implementacijom odredbi Okvirne direktive o vodama (Vijeće Europske unije, 2000) u nacionalnu legislativu RH (NN 66/19; NN 96/19) definirana je uspostava mreže i načina provođenja tri kategorije monitoringa: operativnog, nadzornog i istraživačkog. Istraživački klasični monitoring površinskih i podzemnih voda u mjesečnom intervalu s velikim brojem analiziranih parametara u dolini Neretve uspostavljen je 2009. godine (Romić i sur., 2014). Iako provođenje klasičnog monitoringa omogućava dobivanje preciznih, točnih i pouzdanih rezultata, ova vrsta monitoringa ima određena ograničenja. Klasični monitoring zahtjevan je u pogledu vremenskih, financijskih i ljudskih resursa, a jedan od glavnih nedostataka je nemogućnost dobivanja rezultata u realnom

vremenu (Pasika i Gandla, 2020). Za razliku od klasičnog monitoringa koji je važan za karakterizaciju kakvoće voda i detekciju dugoročnih trendova i sezonalnosti, *in-situ* senzorski kontinuirani monitoring visoke vremenske frekvencije, omogućava kvantifikaciju ekstrema, kratkoročnih trendova i unutar dnevne varijabilnosti pokazatelja kakvoće voda (Halliday i sur., 2012). Premda za neke parametre, poput pH vrijednosti, tjedno ili mjesečno uzorkovanje može biti dovoljno (Skeffington i sur., 2015), za parametre kao što su fosfor (Cassidy i sur., 2011) i nitrati (Wade i sur., 2012) i EC_w (Kirchner i sur., 2004), kontinuirani podaci pružaju veće mogućnosti u razumijevanju hidroloških i hidrokemijskih procesa različitih vodnih tijela. Velika količina prikupljenih podataka dobra su podloga i preduvjet za primjenu naprednih statističkih metoda i razvoja prognostičkih modela kojima se mogu predviđati kratkoročne i dugoročne promjene u ekosustavima. Pored analiza i modela vremenskih serija kao važnog pristupa u statističkoj obradi i modeliranju hidroloških pojava, posljednjih godina sve širu primjenu nalaze i modeli strojnog učenja (Zounemat-Kermani i sur., 2021). Modeli strojnog učenja koji uključuju klasične modele kao što su linearna regresija pa sve do kompleksnih modela neuronskih mreža imaju veliki potencijal u području hidrologije s naglaskom na monitoring kakvoće voda (El Bilali i Taleb, 2020). Razvijeni prognostički modeli mogu poslužiti kao podloga i smjernice za planiranje budućeg načina gospodarenja vodama unutar ugroženih ekosustava kao što su riječne delte, a koji su pod izravnim utjecajem klimatskih promjena, u prvom redu podizanja razine mora.

1.1. Hipoteze i ciljevi istraživanja

Istraživanjem u okviru ove doktorske disertacije bit će testirane sljedeće hipoteze:

1. Pokazatelji zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda mogu se mjeriti *in-situ* sensorima jednako točno kao klasičnim metodama monitoringa
2. Prirodnim i antropogenim utjecajem mijenjat će se stupanj zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda tijekom vremena

Temeljem hipoteza postavljeni su dva cilja istraživanja:

1. Usporediti pokazatelje zaslanjenosti izmjerene *in-situ* sensorima i klasičnim metodama monitoringa
2. Iz podataka dobivenih *in-situ* mjerenjima procijeniti utjecaj antropogenih i prirodnih čimbenika na zaslanjivanja površinskih i podzemnih voda tijekom vremena

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda i tla u priobalnim područjima

Veći dio zemljine površine, ≈ 361 milijun km^2 (71 %) prekriveno je vodom čiji se volumen procjenjuje na približno 1,39 milijardi km^3 od čega je više od 97 % zaslanjeno. Preostalih 2,5 % čini svježa, slatka voda koja je uglavnom zarobljena u obliku ledenjaka i ledenih polarnih kapa (68,7 %) ili se nalazi u podzemlju (30,1 %), dok svega 1,2 % čine površinski izvori vode (Zeman i sur., 2006). Voda i tlo prirodni su resursi koji uz povoljne atmosferske uvjete čine život na Zemlji mogućim stoga je od ključne važnosti njihova zaštita i odgovorno korištenje. Jedan od važnih procesa koji dovodi do degradacije sastavnica okoliša, u prvom redu tla i voda, je zaslanjivanje koji predstavlja skup fizikalno-kemijskih procesa koji rezultiraju nakupljanjem vodotopivih soli u vodi ili tlu (Salama i sur., 1999) što može imati brojne negativne posljedice za žive organizme (Riaz, 2019). Iako je zaslanjivanje voda prirodni fenomen, antropogeni zahvati i intervencije u okolišu kao što su prekomjerno crpljenje podzemnih voda, regulacija površinskih vodenih tokova, ali i poljoprivredna proizvodnja (Tosi i sur., 2021; Suarez, 1989) dovele su do višestrukog ubrzavanja procesa (Rengasamy, 2002). Kao indikatori stupnja zaslanjenosti najčešće se koriste električna vodljivost (EC) i ukupno otopljene tvari TDS, a ovisno o području primjene razvijene su brojne klasifikacije zaslanjenih površinskih i podzemnih voda (Zaman i sur., 2018; Hasan Omer, 2020; Rusydi, 2018). U pogledu poljoprivredne proizvodnje, jedna od najčešće korištenih klasifikacija je na temelju vrijednosti EC_w koju su predložili Rhoades i sur. (1992) (Tablica 2.1).

Tablica 2.1. Klase pogodnosti vode za navodnjavanje na temelju vrijednosti EC_w (prema Rhoades i sur., 1992)

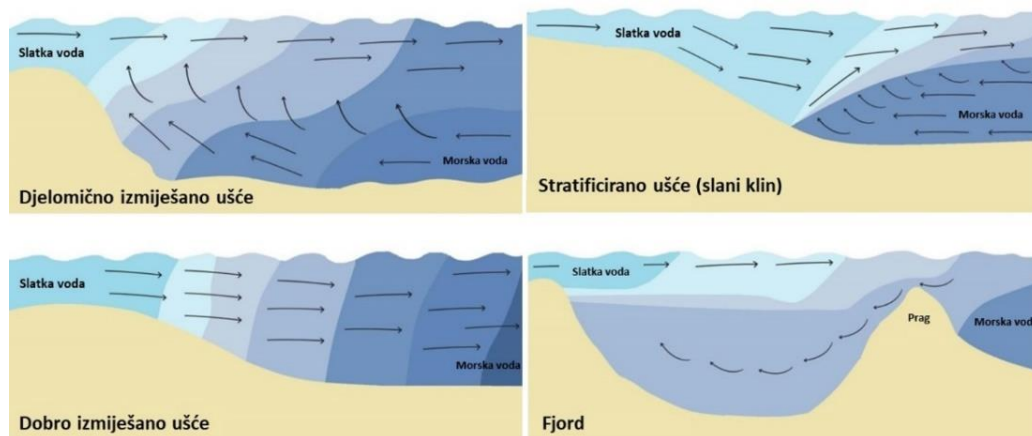
Klasa vode	EC_w (dS m^{-1})	Klasa pogodnosti
Nezaslanjena voda	$< 0,70$	Voda za piće i navodnjavanje
Malo zaslanjena voda	$0,70 - 2,00$	Voda za navodnjavanje
Srednje zaslanjena voda	$2,00 - 10,0$	Primarna drenažna voda i podzemna voda
Jako zaslanjena voda	$10,0 - 25,0$	Sekundarna drenažna voda i podzemna voda
Vrlo jako zaslanjena voda	$25,0 - 45,0$	Vrlo zaslanjena podzemna voda
Slana voda	$> 45,0$	Morska voda

Od kopnenog dijela zemljine površine (149 milijuna km²) prema nekim autorima čak 932 milijuna ha (7 % površine kopna) čine zaslanjena i alkalna tla (Rengasamy, 2006), a posebno su ugrožena aridna i semi-aridna te obalna područja (Ondrasek i Rengel, 2021). Od ukupne površine zaslanjenih i alkalnih tala, 30 milijuna ha nalazi se u Europi i to uglavnom na području Mediterana (Geeson i sur., 2003).

2.1.1. Zaslanjivanje površinskih voda

Zaslanjivanje površinskih voda u najvećoj je mjeri rezultat procesa intruzije morske vode kroz korita prirodnih i umjetno stvorenih vodenih tokova koji su u hidrauličkoj vezi s obalom i morem (Franceschini i Signorini, 2016). Pored intruzije kao glavnog pokretača zaslanjivanja površinskih voda u priobalnim područjima, zaslanjivanje površinskih voda, kako priobalnih tako i kopnenih, može biti posljedica antropogenih aktivnosti uključujući zahvate u poljoprivredi (pr. navodnjavanje, gnojidba), posipanje cesta solju, crpljenje resursa kao što su plin i nafta, rudarenje slično (Cañedo-Argüelles, 2020). Najugroženija mjesta na kojima dolazi do procesa zaslanjivanja su riječna ušća koja predstavljaju prijelaznu zonu između slatkih kopnenih voda (najčešće rijeka) i mora (Savenije, 2005). Jednu od najčešće korištenih definicija ušća u znanstvenoj literaturi dao je Pritchard (1955) prema kojem je ušće „polu zatvoreno obalno vodno tijelo koje ima slobodnu vezu s otvorenim morem i unutar kojeg se morska voda razrjeđuje svježom vodom dreniranom s kopna“.

Postoje različite klasifikacija ušća, a jedna od osnovnih je klasifikacija prema geomorfologiji u pet osnovnih grupa: obalni dolinski estuariji, deltni estuarij, lagune, fjordovi i tektonski estuariji (Dyer, 1973; Snedden i sur., 2012). Obzirom da predstavljaju prijelazni okoliš, distribucija zaslanjenosti unutar ušća proizlazi iz međusobnih interakcija morfologije i topografije ušća, plime i oseke, valova, ali i dotoka slatke vode sa sliva što uvjetuje mehanizme miješanja slatke i slane vode (Perillo i Piccolo, 2011; Mohammed i Scholz, 2018). Stoga je jedna od najvažnijih i vrlo često korištenih klasifikacija riječnih ušća upravo na temelju stratifikacije i distribucije slanosti, a koje su klasificirali Pritchard (1955), Cameron i Pritchard (1963) te kasnije Dyer (1973). Ovom klasifikacijom definirana su četiri glavna tipa ušća: (i) stratificirano ušće, (ii) djelomično izmiješano ušće, (iii) dobro izmiješano ušće i (iv) fjord (Slika 2.1).



Slika 2.1. Tipovi riječnih ušća prema načinu miješanja slatke i slane vode (Prilagođeno prema AMAP, 1998)

Kod djelomično izmiješanog ušća vertikalni gradijent slanosti ima oblik kotangensoide, a ušće karakterizira umjerena do jaka amplituda plime i oseke te umjeren dotok svježje vode sa sliva (Snedden i sur., 2012). Primjer ovog tipa estuarija su rijeka Hudson (Geyer i sur., 2000) i zaljev Chesapeake (Li i Li, 2011). Jači utjecaj plime i oseke, odnosno veća amplituda te vrlo mali dotok slatke vode sa sliva karakteristike su dobro izmiješanih ušća u kojima se ne javlja vertikalni gradijent gustoće, odnosno zaslanjenosti, dok su izohaline gotovo vertikalne (Gregor i sur., 1998; Snedden i sur., 2012). Neki od dobro izmiješanih estuarija uključuju Swartkops estuarij u Južnoj Africi (Adams i sur., 2019) i Guadalquivir u Španjolskoj (Díez-Minguito i sur., 2014). Fjordovi su duboka ušća nastala glacijalnim procesima koja na ulazu imaju prag i karakterizira ih vrlo slabo miješanje uslijed plime i oseke (Gregor i sur., 1998), moguće ih je pronaći na obalama Čilea, Aljaske, Norveške, Grenlanda, Norveške i Antartike.

Stratificirano ušće karakterizira uslojeno tečenje, odnosno pojava slanog klina morske vode koji teče ispod slatke vode s vrlo izraženo piknoklinom i haloklinom. Ovaj tip ušća karakterizira mala amplituda plime i oseke koja nema utjecaj na vertikalnu stratifikaciju i srednji do jak dotok svježje vode sa sliva (Snedden i sur., 2012). Uslojenost se može izraziti pomoću parametra stratifikacije S_p koji predstavlja omjer između razlike u slanosti ΔS od površine prema dnu i srednje slanosti poprečnog presjeka S_0 . Vrijednost S_p stoga može varirati od gotovo 0 za dobro izmiješano ušće do gotovo 1 za izraženo stratificirano ušće (Valle-Levison, 2011). Ipak, obuhvatniji pristup bio bi karakterizacija ušća na temelju svojstava kao što su amplituda plime i oseke i brzina vode u rijeci, a koji su razvili Prandle (2009) i Geyer (2010) koji predviđa

uslojenost ušća ΔS , normalizirano referentnom slanošću S_0 , kao funkciju plime i oseke U_T i brzine tečenja U_r izrazom:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = 10 \frac{U_r^{4/5}}{U_T^{2/5} (\beta g S_0 h)^{1/5}} \quad (2.1)$$

gdje je β koeficijent ($7,7 \cdot 10^{-4}$), g je akceleracija sile teže, a h je dubina vodenog stupca (Valle-Levison, 2011). Dotok sa sliva dominantni je faktor koji utječe na procese miješanja i propagaciju slanog klina u unutrašnjost gdje u uvjetima malih protoka klin može dosezati i do nekoliko desetaka kilometara uzvodno od ušća, a u uvjetima velikih protoka on može biti u potpunosti istisnut iz korita vodotoka (Kurup i sur., 1998; Ljubenković i Vranješ, 2012; Krvavica i sur., 2021). Tipična stratificirana ušća u kojima dolazi do pojave slanog klina uključuju ušće rijeke Mississippi u SAD-u (Ayres, 2015), rijeke Swan u Australiji (Thompson, 1998), Rone i Ebro u Europi (Ibañez i sur., 1997), ali i ušće rijeke Neretve u Hrvatskoj (Ljubenković i Vranješ, 2012).

2.1.1.1. Zaslanjivanje riječnih delti

Riječne delte kao jedan od oblika ušća predstavljaju područja iznimnog prirodnog bogatstva, ali i socioekonomskog značaja zbog razvijenih gospodarskih djelatnosti uključujući ribolov, poljoprivredu, promet, razne vrste industrije, turizam i slično. Brojni gradovi razvijeni su oko velikih riječnih delti kao što su delta rijeka Yangtze, Ganges, Mekong, Mississippi, Nil, Po, a procjenjuje se da svaka 14 osoba na svijetu, odnosno više od 500 milijuna ljudi živi u blizini neke od riječnih delti (Rahman i sur., 2019; Day i sur., 2019). Iako riječne delte pronalazimo u priobalju gotovo svih mora, kako bi se delta formirala moraju biti ispunjeni određeni specifični uvjeti. Osnovni preduvjet svakako je postojanje riječnog toka koji u sebi nosi značajnu količinu sedimentata, a da bi se takav prinos sedimentata mogao održavati, slivno područje mora biti dovoljno veliko (Wright, 1978). Riječni tok bogat sedimentima nastavlja svoj put prema obali kroz aluvijalnu dolinu gdje naglo usporava pri čemu dolazi do taloženja erodiranog materijala i formiranja delte.

Prema Syvitskom (2008) delte se mogu definirati (i) kao kopnena područja koja se šire prema moru nastala prije oko 6000 godina kada se globalna razina mora stabilizirala na razini sličnoj današnjoj; (ii) područje riječne doline koje se širi prema moru nakon grananja glavnog vodotoka na više rukavaca; (iii) područje riječne doline prekriveno holocenskim marinskim sedimentima; (iv) područja akumuliranog riječnog sedimenta koji je različito podložan fluvijalnim, valnim i plimnim utjecajima; (v) područje koje je drenirano riječnim rukavcima koji su pod utjecajem

plime i oseke ili (vi) kao kombinacija dvije ili više definicija. Obzirom na dominantni utjecaj razlikujemo delte dominirane morskim mijenama, dominirane valovima ili dominirane rijekom (Galloway, 1975; Syvitski i Saito, 2007; Vinković, 2017). U odnosu na prirodno stanje, vizure današnjih riječnih delti značajno su izmijenjene kao posljedica intenzivnih ljudskih aktivnosti u posljednjih nekoliko stotina godina uključujući melioracijske zahvate isušivanja močvara, promjenu prirodnih vodenih tokova, gradnju obrambenih nasipa, brana i drugih hidrotehničkih građevina, kao i eksploataciju prirodnih materijala kao što su pijesak i šljunak (Da Lio i Tosi, 2019). Uz bogatstvo flore i faune, plodna poljoprivredna tla i gospodarski značaj, zbog svojih geomorfoloških značajki, delte karakterizira i iznimna ranjivost uslijed globalnih promjena klime, osobito porasta razine mora čime se intenziviraju procesi intruzije morske vode.

U svom istraživanju Day i sur. (2012) su pokazali da su procesi zaslanjivanja rijeke Yangtze i intruzija morske vode u deltu pod dominantnim utjecajem s jedne strane porastom globalne razine mora koja je neizbježna i s druge strane ljudskim aktivnostima u prvom redu regulacije toka rijeke i gradnje brane i hidroelektrane Tri klanca. Da postoji negativna korelacija između protoka i zaslanjivanja delte rijeke Yangtze zaključili su Li i Chen (2019). Istraživanjem su dokazali izraženu sezonalnost pri čemu su procesi zaslanjivanja bili izraženiji u sušnom razdoblju kada bi se protok smanjio na $15000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ u odnosu na prosječan dugogodišnji protok koji iznosi $25500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Na području delte rijeke Mekong Eslami i sur. (2019) pokazali su da unatoč povećanju dotoka svježje vode sa sliva postoji rastući trend intruzije morske vode. Pojačana intruzija može se povezati sa smanjenjem nanosa sedimenta kao posljedice hidrotehničkih zahvata i izgradnji brana uzvodno od ušća, ali i pojačane eksploatacije pijeska na samom ušću. Dodatno, događaji kao što su monsuni mogu lokalno dovesti do porasta razine mora, a vrijednosti uobičajenog porasta od 20 do 40 cm za vrijeme ovakvih ekstremnih događaja preko kontinentalnog šelfa mogu dovesti i do povećanja intruzije i za 10 km (Eslami i sur., 2021).

Ljubenkov i Vranješ (2012) su, koristeći matematički model utvrdili da u dolini rijeke Neretve pojava slanog klina u rijeci Neretve ovisi o protoku. Prosječan višegodišnji protok procjenjuje se na oko $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s vrlo izraženom sezonalnošću. U sušnom, ljetnom razdoblju, kada su potrebe za vodom najveće, zbog niskog protoka, slani klin nerijetko propagira i nekoliko desetaka kilometara od ušća. Rezultati istraživanja su pokazali da se kod protoka nižih od $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ slani klin javlja kod grada Metkovića (22 km uzvodno od ušća) dok je kod protoka od $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ klin u potpunosti istisnut iz korita rijeke.

Uz porast razine mora, neophodno je u obzir uzeti i pojavu slijeganja riječnih delti koja se prirodno odvija, ali može biti i višestruko ubrzana ljudskim aktivnostima kao što su prekomjerno crpljenje pitke podzemne vode ili ekstrakcija ugljikovodika, bilo da se radi o plinu ili nafti (Syvitski, 2008). Tako je ekstrakcija metana koja je svoj vrhunac imala u 60-tim godinama prošlog stoljeća dovela do ubrzavanja slijeganja delte rijeke Po i to do stope od 60 mm godišnje (Caputo i sur., 1970). Iako se sa proizvodnjom metana prestalo, slijeganje delte rijeke Po se nastavilo, ali po stopi od oko 15 mm godišnje kao posljedica zbijanja mlađih slojeva tla uslijed procesa oksidacije treseta (Teatini i sur., 2011).

2.1.1.2. Zaslanjivanje poldera

Polder predstavlja uređeno ravničarsko područje koje je bilo pod trajnim ili sezonskim utjecajem visoke razine podzemne ili površinske vode, a koje je nasipavanjem odvojeno od okolnog hidrološkog režima kako bi se postigla određena razina neovisnosti u kontroli razine vode (Segeren, 1983). Svrha im je bila privesti neplodne močvare ili plavljene površine poljoprivrednoj proizvodnji. Nastali su na niskim nadmorskim visinama, nerijetko ispod razine mora, a povoljan vodni režim održava se izgradnjom nasipa, kanalskom mrežom, crpnim stanicama i drugim hidrotehničkim građevinama (Schultz, 1982; Schultz i Wandee, 2003; Delsman, 2015). Iako se uglavnom povezuju s Nizozemskom, poldere možemo naći i u drugim europskim državama (Njemačka, Belgija, Poljska, Italija, Hrvatska), ali i Bangladešu, Indiji, Koreji, Japanu, Kanadi i SAD-u (Delsman, 2015).

Kao i kod riječnih delti, intruzija morske vode može dovesti do zaslanjivanja površinskih i podzemnih voda unutar poldera što može imati značajne negativne posljedice u vidu zaslanjivanja poljoprivrednih tala i smanjenja prinosa poljoprivrednih kultura. Ako su podzemne vode zaslanjene, kapilarnim dizanjem može doći do zaslanivanja površinskih voda čineći ih nepovoljnim za navodnjavanje poljoprivrednih kultura što su na području dubokih poldera u Nizozemskoj pokazali Wesseling (1980) i de Louw i sur. (2000). U istraživanju provedenom unutar poldera Noordplaat u Nizozemskoj, De Louw i sur. (2010) identificirali su tri glavna procesa kojima dolazi do zaslanjivanja površinskih voda, a to su: (i) difuzno prodiranje kroz nepropusni holocenski sloj, (ii) prodiranje kroz paleokanale u holocenskom sloju i (iii) intenzivno zaslanjivanje putem slanosti izvora koji se lokalno javljaju unutar poldera.

Na polderima koji su na nadmorskoj visini od 2,5 m.n.m do -1,5 m.n.m. u dolini rijeke Arno Franceschini i Signorini (2016) proveli su istraživanje kojim su dokazali odvijanje intenzivnih procesa zaslanjivanja intruzijom morske vode kroz umjetni vodotok (kanal Navicelli) i njegovu

hidrografsku mrežu. Za vrijeme sušnog, ljetnog razdoblja kada je dotok svježje vode nizak, slani klin zabilježen je kod grada Pise, 7 km uzvodno od obale. Posljedično, zaslanjena voda u kanalu rezultirala je zaslanjivanjem plitkog vodonosnika izravnim procjeđivanjem kroz korito ili pak kroz hidrografsku mrežu drenažnih kanala čime je ugrožena kvaliteta vode u plitkom vodonosniku.

Na području četiri poldera u dolini rijeke Neretve Romić i sur. (2020a) su korištenjem mjesečnih podataka o kakvoći površinskih i podzemnih voda (2009.-2017.) testirali linearni mješoviti model LME (eng. *Linear Mixed Effect*) za predviđanje prostorne i vremenske varijabilnosti kakvoće površinskih i podzemnih voda. Dobivenim rezultatima pokazali su da se razvijeni LME modeli mogu koristiti za predviđanje EC_w i koncentracije nitrata površinskih i podzemnih voda pri čemu su se predloženi modeli pokazali učinkovitima u adekvatnom repliciranju heterogenosti i kompleksnosti istraživanog područja.

2.1.2. Zaslanjivanje podzemnih voda

Zaslanjene podzemne vode predstavljaju globalan ekološki i socioekonomski problem jer se procjenjuje da više od 24 milijuna km^2 , odnosno 16% Zemljine kopnene površine ima plitke i srednje duboke zaslanjene podzemne vode (Li i sur., 2020). Podrijetlo zaslanjenih podzemnih voda može biti različito, a van Weert i sur. (2009) razlikuju zaslanjene podzemne vode marinskog, prirodnog kopnenog i antropogenog kopnenog podrijetla. U zaslanjene podzemne vode marinskog podrijetla pripadaju vode zarobljene u stijenama (najčešće sedimentnim) nastale u vremenu formiranja stijena, zaslanjene vode zaostale u stijenama nakon snižavanja razine mora kroz geološku povijest, vode zaslanjene uslijed poplavlivanja obala te vode zaslanjene uslijed procesa lateralne intruzije morske vode. Zaslanjene podzemne vode prirodnog kopnenog podrijetla posljedica su otapanja minerala kao što su gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ili halit (NaCl), procesa membranske filtracije u sedimentima siromašnim evaporitima i geotermalne aktivnosti (Li i sur., 2020). Zaslanjene podzemne vode mogu biti i rezultat ljudskih aktivnosti, u prvom redu prekomjernog crpljenja svježje podzemne vode pri čemu su ugroženi duboki vodonosnici (posebice u priobalju) te navodnjavanja pri čemu su uglavnom ugroženi plitki vodonosnici, ali i drugih aktivnosti kao što su gnojidba, posipanje cesta solju, neadekvatno zbrinjavanje i gospodarenje otpadnim vodama i slično (van Weert i sur., 2009).

Ipak, priobalni vodonosnici najugroženiji su zbog zaslanjivanja uslijed procesa intruzije morske vode (Khaska i sur., 2013;). Lateralna intruzija morske vode predstavlja prirodan proces kretanja slane, morske vode u svježji, priobalni vodonosnik (van Dam, 1999). U uvjetima kada

postoji hidraulička povezanost između vodonosnika i obalnog mora, dijelovi vodonosnika mogu sadržavati slanu vodu dok drugi dijelovi sadrže svježiju, slatku vodu. Obzirom da je gustoća slatke vode manja od gustoće mora, ona ima tendenciju plutanja na površini slane vode u uvjetima kada su oba fluida prisutna u vodonosniku (Kelly, 2006). Sam oblik linije koja razdvaja slatku i slanu vodu su za stacionarno stanje definirali Badon-Ghyben (1889) i Herzberg (1901) (Slika 2.2.A), a jednadžba se zasniva na hidrostatskom zakonu i odnosu gustoće slane i slatke vode. Ghyben-Herzberg-ov zakon pretpostavlja da leća slatke vode stoji iznad morske, a dan je jednadžbom:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (2.2)$$

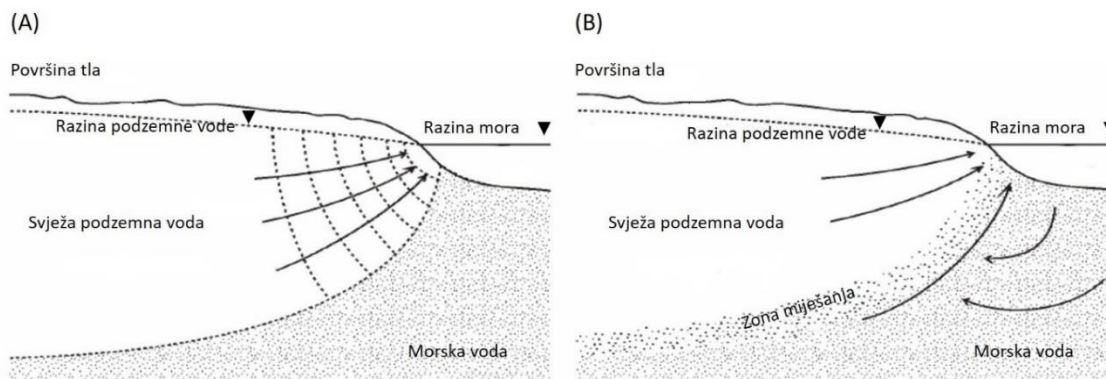
gdje je

h_1 dubina slatke vode ispod razine mora

h_2 dubina slatke vode iznad razine mora

ρ_f gustoća slatke vode ($\approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$)

ρ_s gustoća morske vode ($\approx 1025 \text{ kg m}^{-3}$)

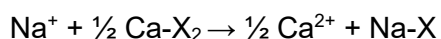


Slika 2.2. Intruzija morske vode u priobalni vodonosnik u (A) stacionarnim uvjetima i (B) uvjetima miješanja (prilagođeno prema Oude Essink, 2003)

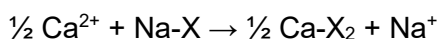
Međutim, načelo pretpostavlja stanje hidrostatskog ekvilibrija koje je vrlo rijetko u stvarnim uvjetima priobalnih vodonosnika, stoga linija razdvajanja slatke i slane vode nije oštro definirana, već predstavlja postupnu promjenu na ograničenoj udaljenosti, poznatu kao zonu miješanja (Oude Essink, 2003; Kelly, 2006) (Slika 2.2.B). Miješanje voda različite gustoće odvija se uslijed dva procesa, disperzije i difuzije. Disperzija se javlja zbog prostornih heterogenosti u geološkoj strukturi, hidrauličkim svojstvima vodonosnika i dinamičnim silama

koje djeluju na različitim vremenskim skalama uključujući dnevne fluktuacije plime i oseke, sezonske i godišnje varijacije uslijed punjenja vodonosnika, ali i dugoročne promjene prosječne razine mora (Krešić, 2023). Debljina ove zone ovisi o brojnim faktorima kao što su geološke i hidrogeološke značajke vodonosnika, režim morskih mijena, miješanje slatke i slane vode uslijed dispresije, ali i ljudskih aktivnosti kao što su crpljenje vode iz podzemlja (Oude Essink, 2003).

Intruzijom morske vode u priobalne vodonosnike dolazi do kationske izmjene. Naime, slatka podzemna voda priobalnih područja obično pripada Ca-HCO₃ hidrokemijskom facijesu kao posljedica otapanja vapnenca pri čemu ionski izmjenjivači u vodonosnicima na svojoj površini pretežito imaju adsorbirane Ca²⁺ ione (Jiao i Post, 2019). U morskoj vodi dominantni ioni su Na⁺ i Cl⁻, stoga će sedimenti u kontaktu s morskom vodom uglavnom adsorbirati Na⁺ ione (Halle, 2004). Ulaskom morske vode u priobalni vodonosnik dogodit će se ionska izmjena:



gdje X označava mjesto izmjene na česticama tla. Natrij iz morske vode veže se na izmjenjivač, a oslobađa se kalcij te se morska voda iz Na-Cl facijesa mijenja u Ca-Cl (Halle, 2004). Obrnuti proces se događa kod intruzije slatke vode u slani vodonosnik:



pri čemu dolazi do vezanja Ca²⁺ iona iz slatke vode i otpuštanja Na⁺ iona pri čemu se događa promjena hidrokemijskog facijesa iz Ca-HCO₃ prema Na-HCO₃ (Halle, 2004).

Iako intruzija morske vode u priobalne vodonosnike predstavlja globalni problem (Lassiter, 2021; Barlow i Reichard, 2010; Sarker i sur., 2021, Wen i sur., 2019), ona je posebno izražena na mediteranskoj obali (Giambastiani i sur., 2007; Telahigue i sur., 2020; Ferchichi i sur., 2018; Mastrocicco i Colombani, 2021).

Jedan od najopsežnijih literaturnih pregleda koji objedinjuje brojna istraživanja intruzije morske vode u otvorene priobalne vodonosnike napravili su Ketabchi i sur. (2016) te su utvrdili da postoje dva glavna čimbenika koji utječu na stupanj intruzije: (i) intenzitet pražnjenja vodonosnika koji je pod utjecajem oborina, lokalnih geoloških značajki vodonosnika te hidrauličke vodljivosti, (ii) stopa ponovnog punjenja vodonosnika koja je pod utjecajem pokrova na površini tla, načina korištenja zemljišta i propusnosti tla (Lassiter, 2021).

Istražujući podrijetlo zaslanjene podzemne vode u priobalnom vodonosniku La Clape masiva na zapadnoj mediteranskoj obali (Francuska) Khaska i sur. (2013) identificirali su tri različite

grupe podzemnih voda na temelju hidrogeoloških značajki i koncentracija Cl⁻: i) mineraliziranu izvorsku vodu, ii) umjereno mineraliziranu podzemnu vodu i iii) boćatu podzemnu vodu. Promjena hidrokemijskog facijesa od Ca-HCO₃ prema Na-Cl tipu upućuje na procese miješanja slatke podzemne vode i slane vode, a analizom izotopa Sr i Cl utvrđeno je da je došlo do miješanja slatke vode s dubokom, reliktnom slanom vodom.

Slično istraživanje proveli su Frollini i sur. (2022) u vodonosniku Murgia u regiji Apulija (Italija) na obali Jadranskog mora, utvrdivši istom metodologijom da je do zaslanjivanja došlo uslijed intruzije morske vode, a ne intruzijom reliktnne slane vode.

Osim prirodnih procesa intruzije, zaslanjivanje može biti pojačano antropogenim utjecajima. Primjerice, Mabrouk i sur. (2018) u priobalnom vodonosniku rijeke Nil (Egipat) su koristeći 3-D model tečenja i zaslanjivanja utvrdili da je glavni pokretač intruzije morske vode ljudska aktivnost, odnosno prekomjerno crpljenje podzemne vode. Nadalje, Giambastiani i sur. (2007), koristeći matematički model i bazu povijesnih podataka (1920.-2006.) su identificirali intenzivne melioracijske zahvate odvodnje, industrijski razvoj i prekomjerno crpljenje podzemne vode u proteklom stoljeću, kao glavne pokretače procesa zaslanjivanja otvorenog priobalnog vodonosnika u gradu Raveni (Italija).

2.1.3. Zaslanjivanje tla

Zaslanjivanje predstavlja globalan problem i uz eroziju jedan je od vodećih uzroka degradacije tala, a javlja se uglavnom u aridnim i semi aridnim područjima (Shahid i sur., 2018). Zaslanjivanje tla podrazumijeva akumulaciju vodotopivih soli u profilu tla, a dominantni ioni u otopini tla uključuju Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻ i NO₃⁻ (Corwin i Yemoto, 2020). Obzirom na podrijetlo soli, razlikujemo primarno (prirodno) i sekundarno (antropogeno) zaslanjivanje. Primarni izvor soli u tlu je geokemijsko trošenje stijena, dok su ostali prirodni izvori zaslanjivanja atmosfersko taloženje oborinama i vjetrom, intruzija morske vode, periodično plavljenje obalnih dolina zaslanjenim vodama te kapilarni uspon zaslanjene podzemne vode osobito u nižim, priobalnim područjima (Zovko, 2015; Corwin i Scuderio, 2019). Sekundarni izvori zaslanjivanja tla posljedica su ljudskih aktivnosti uključujući: navodnjavanje (osobito ako se radi o vodi nepovoljnih kemijskih značajki), primjenu mineralnih gnojiva i poboljšivača tla, primjenu organskih gnojiva te korištenje raznih vrsta muljeva i otpadnih voda (Tanji, 2002; Hassani i sur., 2021). Aplikacijom zaslanjene vode s vremenom dolazi do akumulacije soli u rizosferi uslijed procesa evaporacije i/ili evapotranspiracije čime voda isparava, a soli se talože u tlu. Ova pojava osobito dolazi do izražaja u aridnim i semi

aridnim područjima gdje količina oborina, ali i količina vode dodana navodnjavanjem obično nije dovoljna da bi se soli iz rizosfere isprale u dublje slojeve tla (Corwin i Scuderio, 2019; Romić i sur., 2008). Da je zaslanjivanje tla pod dominantnim utjecajem navodnjavanja pokazali su Ramos i sur. (2023) u istraživanju provedenom na 9 komercijalnih trajnih nasada u regiji Alentejo u Portugalu. Dobiveni rezultati upućuju da strategija provođenja navodnjavanja, sezonska distribucija oborina i dubina procjeđivanja oborinske vode uz pedološke značajke tla i kakvoću vode za navodnjavanje, direktno utječu na procese akumulacije soli u tlu.

Zaslanjivanje tla s aspekta poljoprivredne proizvodnje može imati brojne negativne posljedice, prvenstveno na tlo kao rezultat zamjene iona Ca^{2+} sa ionima Na^+ na adsorpcijskom kompleksu tla što dugoročno može dovesti do degradacije strukture tla kao posljedica disperzije čestica gline, smanjenja infiltracijske sposobnosti i propusnosti tla za vodu (Zovko, 2015), a u konačnici i dezertifikacije tla (Haj-Amor i sur., 2022). Negativne posljedice i promjene u fizikalno kemijskim značajkama tla utvrdili su Wang i sur. (2023) u višegodišnjem istraživanju (2006.-2019.) provedenom na području velike kineske nizine. Primjenom zaslanjene podzemne ($\text{EC}_w > 3,4 \text{ dS m}^{-1}$) dolazi do značajne akumulacije soli u profile tla, te povećanja vrijednosti EC, SAR, pH i volumne gustoće na dubini 0-30 cm, uz istovremeno smanjenje organske tvari, poroznosti, sadržaja strukturnih makroagregata i enzimatske aktivnosti (katalaze, urease i fosfataze).

Uz negativne posljedice na tlo, zaslanjivanje negativno utječe i na poljoprivredne kulture u obliku stresa soli, poput smetnje u rastu i razvoju biljaka, inhibiciji fizioloških procesa, smanjene produktivnosti i uvenuća (Filipović, 2016). Zaslanjenost tla obično se izražava kao vrijednost električne vodljivosti saturacijskog vodnog ekstrakta (EC_e u dS m^{-1}) (De Pascale i sur., 2005). Korištenje vrijednosti EC_e za kvantifikaciju stupnja zaslanjenosti tla zasniva se na pretpostavci da biljke prije reagiraju na ukupnu koncentraciju soli u tlu nego na koncentracije pojedinačnih iona (Zovko 2015). Zbog linearne povezanosti stupnja zaslanjenosti tla izraženog s EC_e i prinosa poljoprivrednih kultura (Nicolas i sur., 2023), relativni prinos (Y_r) moguće je procijeniti pomoću jednadžbe:

$$Y_r = 100 - b(\text{EC}_e - a) \quad (2.3)$$

gdje je EC_e električna vodljivost saturacijskog ekstrakta tla u zoni rizosfere, a je granična vrijednost EC_e izražena u dS m^{-1} za pojedinu kulturu kod koje dolazi do smanjenja prinosa, b je nagib izražen u postotku po dS m^{-1} (Nicolas i sur., 2023). Već na niske koncentracije soli u otopini tla (do $1,5 \text{ dS m}^{-1}$) osjetljive su brojne poljoprivredne kulture: grah (*Phaseolus vulgaris* L.), mrkva (*Daucus carota* L.), zelena salata (*Lactuca sativa* L.), dinja (*Cucumis melo* L.),

paprika (*Capsicum annuum* L.), jagoda (*Fragaria x Ananassa* Duch), ali i drvenaste kulture kao što su badem (*Prunus dulcis* Mill.), vinova loza (*Vitis vinifera* L) i kulture iz porodice citrusa (*Citrus spp*) (Zörb i sur. 2019). U uvjetima navodnjavanja zaslanjenom vodom u dolini rijeke Neretve, Romić i sur. (2008) su utvrdili da primjena različitih sustava navodnjavanja može imati različite utjecaje na proizvodnju i prinos lubenice (*Citrullus lanatus* L.) koja se smatra umjereno tolerantnom na soli. U uvjetima navodnjavanja sustavom kap po kap, značajno smanjenje prinosa utvrđeno je kod primjene zaslanjene vode s vrijednošću $EC_w > 5 \text{ dS m}^{-1}$ dok je primjena sustava kišenja kod vrijednosti $EC_w > 3 \text{ dS m}^{-1}$ rezultirala uginućem biljaka i potpunim gubitkom prinosa.

2.2. Monitoring kakvoće površinskih i podzemnih voda

Prema Međunarodnoj organizaciji za standardizaciju ISO monitoring se može definirati kao: “programirani proces uzorkovanja, mjerenja te bilježenja različitih svojstava, često s ciljem procjene usklađenosti s postavljenim ciljevima“ (Bartram i Ballance, 1996). Kakvoća vode je termin koji se koristi za opisivanje fizikalnih, kemijskih i bioloških karakteristika vode, vrlo često u kontekstu ljudske potrošnje, bilo da se radi o vodi za piće ili o vodi za različite namjene kao što su rekreacija, industrija ili poljoprivreda (Ritchie i Schiebe, 2000). Uvažavajući prethodno, može se reći da monitoring kakvoće vode podrazumijeva praćenje i analizu fizikalnih (temperatura, mutnoća, boja, okus, miris, sedimenti, električna vodljivost), kemijskih (pH, tvrdoća, otopljeni kisik, biološka potrošnja kisika, hranjiva, anorganski i organski spojevi) i bioloških (alge, bakterije, virusi) svojstava vode u rijekama, jezerima, ušćima, obalnim i podzemnim vodama u skladu s postavljenim standardima te pružanje informacija o prikladnosti te iste vode za specifične namjene (Li i Migliaccio, 2010; Postolache i sur., 2012; Hassan Omer, 2020). Sastav i kakvoća površinskih i podzemnih voda pod utjecajem su brojnih prirodnih (geoloških, topografskih, meteoroloških, hidroloških i bioloških) i antropogenih čimbenika na slivu (izgradanja brana, regulacija vodotoka, isušivanje močvara, poljoprivreda) te su često sezonski varijabilni, uvjetovani razlikama u vodostajima, protocima i meteorološkim prilikama (Chapman, 1996; Meybeck i sur., 2004; Yang i Moyer, 2020). Prirodna i antropogena degradacija vodnih resursa glavni su razlozi povećanja potrebe za određivanjem statusa kakvoće vode uspostavom sustava praćenja, odnosno monitoringa (Strobl i Robillard, 2008). Zbog važnosti vodnih resursa za svaku državu, monitoring površinskih i podzemnih voda od lokalnog je i globalnog značaja, te je u većini država zakonski definiran i reguliran. Da je uspostava sustava monitoringa nužna za detekciju prirodnih, odnosno antropogenih čimbenika koji mogu utjecati na promjene u kakvoći voda pokazali su Obeidat i sur. (2012). Faktorskom

analizom višegodišnjeg seta podataka (1969.-2009.) o kakvoći podzemnih voda u slivu rijeke Yarmouk (Jordan), autori su izdvojili tri faktora kojima je objašnjeno 76,78 % varijabilnosti podataka. Faktor kojim je objašnjen najveći udio varijabilnosti (47,05 %) bio je zaslanjivanje kao posljedica intruzije uslijed prekomjernog crpljenja. Drugi faktor kojim je objašnjeno 16,27 % varijabilnosti odnosio se na antropogena onečišćenja iz poljoprivrede (u prvom redu nitrata i kalij) dok se treći faktor odnosio na prirodne procese punjenja vodonosnika i interakciju između vode i geoloških slojeva. Gudas i Povilaitis (2013) su korištenjem višegodišnjeg nacionalnog monitoringa kakvoće površinskih voda sa 108 lokacija u Litvi (1999.-2004.) primjenom multivarijantnih statističkih analiza utvrdili postojanje prostorne heterogenosti faktora koji utječu na kakvoću voda. Primjerice, faktor „otpadne vode“ kojega karakteriziraju povećane koncentracije iona $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, Na^+ , Cl^- i K^+ , je potvrđen kao dominantan u manjim rijekama nizvodno od većih gradova, dok je „agro-geološki“ faktor s povišenim koncentracijama Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- i SO_4^{2-} dominantan u rijekama sjeverne Litve koju karakteriziraju karbonatna tla.

Kako bi se mogle detektirati dinamične promjene koje se događaju unutar nekog slivnog područja neophodna je dobro dizajnirana i uspostavljena mreža postaja ili lokacija monitoringa (Postolache i sur., 2012). Prilikom uspostave mreže monitoringa, najvažnije je definirati svrhu i cilj provođenja monitoringa, a o čemu će ovisiti i ostali faktori kao što su prostorna distribucija postaja, vremenski interval uzorkovanja i odabir parametara koji će se pratiti (Strobl i Robillard, 2008). Lokacije postaja monitoringa i frekvencija uzorkovanja u prvom redu će ovisiti o varijablama od interesa, a za karakterizaciju dugoročnih promjena kakvoće voda obično se prihvatljivim smatra mjesečni vremenski interval uzorkovanja (Mäkelä i Meybeck, 2004). Klasični monitoring s mjesečnim vremenskim intervalom uzorkovanja i laboratorijskim ispitivanjima uzoraka vode i dalje je jedan od najčešće korištenih pristupa u znanstvenim istraživanjima i uspostavljenim nacionalnim sustavima monitoringa (O'Grady i sur., 2021). Međutim, klasičnim mjesečnim uzorkovanjem, kojim se uzima određeni manji volumen vode (uglavnom do 1 L) ponekad je teško dobiti pouzdane i reprezentativne podatke o statusu određenog vodnog tijela (Piniewski i sur., 2019). Također, klasični sustavi monitoringa često su vrlo zahtjevni u pogledu ljudskih, vremenskih i osobito financijskih resursa, a njihovim provođenjem nije moguće dobiti podatke u realnom vremenu jer od trenutka uzorkovanja do trenutka dobivanja rezultata laboratorijskih ispitivanja može proći i do nekoliko dana (Pasika i Gandla, 2020; Zainurin i sur., 2022). Stoga se danas, uz klasične sustave vrlo često koriste i sustavi automatskog, *in-situ* kontinuiranog monitoringa (Randhawa i sur., 2016).

2.2.1. *In-situ* kontinuirani monitoring kakvoće voda

Razvoj kontinuiranog monitoringa kakvoće voda započeo je 1950-tih godina prošloga stoljeća, a jedan od najranijih sustava bio je prototip za kontinuirano mjerenje EC_w i temperature vode koji je implementiran u mjernu stanicu za mjerenje razine i protoka u estuariju rijeke Delaware nedaleko Philadelphije (Myers, 2019). Od sustava na rijeci Delaware koji je bio dimenzija 2,5m*1,2m*2m do danas prošlo je nešto manje od 70 godina, a tehnološki napredak, osobito u posljednja dva desetljeća omogućio je i razvoj novih tehnologija za monitoring kakvoće voda. Danas se za *in-situ* kontinuirani monitoring voda najčešće primjenjuju razni senzori koji se mogu koristiti pojedinačno ili su implementirani u višeparametarske sonde koje omogućuju istovremeno praćenje većeg broja fizikalno-kemijskih pokazatelja uključujući temperaturu, pH, otopljeni kisik, EC_w , mutnoću, ali i koncentracije pojedinih iona (Struve i Zhou, 2010; Linklater i Örmeci, 2013). Senzori i sonde uz to što omogućuju *in-situ* trenutna mjerenja u laboratoriju ili na terenu, pružaju mogućnost trajnog postavljanja na terenu i kontinuirano prikupljanje podataka, a ukoliko se kombiniraju s nekom vrstom telemetrijskog rješenja poput modema, prikupljanje i prijenos podataka mogu se obavljati putem GPRS, 3G, 4G ili pak 5G mreže, bez potrebe za čestim odlascima na teren (O'Grady i sur., 2021; Myers, 2019). U slučaju trajne instalacije na određenoj lokaciji, sustav kontinuiranog monitoringa mora imati nisku potrošnju energije i adekvatan izvor napajanja, najčešću u obliku Li-ion baterija kombiniranih sa solarnim panelima (Li i Liu, 2019). Automatski sustavi monitoringa voda imaju veliki potencijal jer omogućuju prikupljanje relativno pouzdanih podataka visoke vremenske frekvencije kojima je moguće detektirati promjene u okolišu, a koje bi klasičnim monitoringom s većim vremenskim intervalima prošle nezamijećeno, pod uvjetom da se osigura određeni sustav kontrole kvalitete prikupljenih mjerenja u vidu kalibracije mjerne opreme i validacije dobivenih rezultata (Piniewski i sur., 2019). Zemlje poput SAD-a i Njemačke počele su transformirati vlastite sustave klasičnog monitoringa implementacijom automatskih senzora (Rode i sur., 2016). Također, znanstvena istraživanja u domeni monitoringa kakvoće voda sve češće se baziraju na primjeni suvremenih tehnoloških rješenja kao što su komercijalno dostupne višeparametarske sonde i senzori (Park i sur., 2020; Abdul Wahid i Arunbabu, 2022; Vander Woude i sur., 2019; McGrane i sur., 2017; Konde i Deosarkar, 2020; Chowdury i sur., 2019).

Kao i prilikom uspostave klasičnog monitoringa, kod *in-situ* kontinuiranog monitoringa samoj uspostavi sustava prethodi definiranje ciljeva monitoringa na temelju kojih će se odabrati vodna tijela, varijable i potrebni senzori (Nord i sur., 2020). Tako je primjerice cilj istraživanja koje su proveli Hosen i sur. (2019) bio istražiti utjecaj suše na procese bruto primarne proizvodnje i

respiracije u otvorenim vodotocima. Istraživanje je provedeno na slivu rijeke Connecticut (SAD) na ukupno 13 lokacija površinskih voda korištenjem višeparametarske sonde s instaliranim senzorima za mjerenje temperature, EC_w i otopljenog kisika u 15-minutnom intervalu. Pouzdanost dobivenih rezultata osigurana je provođenjem kalibracije u mjesečnom vremenskom intervalu, a bruto primarna proizvodnja i respiracija modelirane su na temelju prikupljenih *in-situ* kontinuiranih mjerenja otopljenog kisika. Rezultati su pokazali da za vrijeme sušnih uvjeta dolazi do povećanja bruto primarne proizvodnje i respiracije, ali su povećanja veća u većim vodotocima, primjerice rijekama.

Jedna od važnih prednosti takvog monitoringa je veliki broj podataka te mogućnost analiziranja vremenskih serija. Analizom vremenskih serija mogu se donijeti važni zaključci o dominantnim procesima koji dovode do zaslanjivanja priobalnih vodnosnika. Tako su Perriquet i sur. (2012) koristeći višeparametarsku sondu Aqua TROLL 200 za kontinuirana mjerenja temperature vode, razine vode i EC_w u 15-minutnim vremenskim intervalima u 5 piezometara u krškom vodonosniku nedaleko mjesta Burren u Irskoj zaključili da razina vode i EC_w u piezometrima uglavnom fluktuiraju ovisno o plimi i oseki.

Slično istraživanje provedeno je u dolini rijeke Neretve gdje su Lovrinović i sur. (2021) koristili višeparametarske sonde Manta 2 za mjerenje temperature i EC_w te sonde OTT ORPHEUS MINI za mjerenje razine vode u plitkim piezometrima. Analizom vremenskih serija prikupljenih kontinuiranih mjerenja u satnoj vremenskoj rezoluciji utvrdili su da je razina vode i stupanj zaslanjenosti u zatvorenom, dubljem vodonosniku pod dominantnim utjecajem mora, dok je stanje u plitkom, otvorenom vodonosniku pod utjecajem kombinacije različitih čimbenika uključujući međusobne interakcije mora, rijeke Neretva, Male Neretve, mreže drenažnih kanal, režima rada crpnih stanica i oborina.

Kontinuirani monitoring može se koristiti za motrenje i karakterizaciju drugih varijabli osim onih koje se koriste za opis kakvoće vode. Primjerice, Nord i sur. (2019) su razvili kompleksan višesenzorski sustav za monitoring većeg broja parametara nazvan RIPLE (eng. *River Platform for Monitoring Erosion*) instaliran na dvije rijeke (Romanche i Galabre) u Francuskim Alpama. Razvijeni sustav sastoji se od senzora spojenih na uređaj za prikupljanje podataka u 10-minutnom vremenskom intervalu, a čine ga: radar za mjerenje razine vode i površinske brzine, sonde za mjerenje temperature vode i EC_w , turbidimetra, automatskog uređaja za uzorkovanje vode uključujući uređaj za mjerenje brzine sedimentacije, sonara i nekoliko različitih kamera. Rezultati preliminarnih mjerenja ukazuju na mogućnost korištenja razvijene platforme za dobivanje pouzdanih, kontinuiranih mjerenja visoke vremenske frekvencije.

Osim kontinuiranog monitoringa varijabli povezanih s hidrosferom, sustavi *in-situ* kontinuiranih monitoringa mogu obuhvaćati i ostale sastavnice okoliša kao što su tlo i atmosfera. Kotamäki i sur. (2009) razvili su i implementirali sustav *in-situ* monitoringa koji obuhvaća praćenje klimatskih prilika, varijabli kakvoće vode i vlažnosti tla u visokoj vremenskoj rezoluciji i realnom vremenu na području sliva rijeke Karjaanjoki (Finska) koji se prostire na više od 2000 km². Sustav se sastoji od 55 meteoroloških stanica s integriranim sensorima za mjerenje vlažnosti tla te 15 postaja za mjerenje kakvoće voda (mjerenje temperature, razine vode, mutnoće i koncentracije nitrata). Prikupljeni preliminarni podaci pokazali su da je kontinuirani monitoring vodenih ekosustava znatno zahtjevniji u odnosu na monitoring vlažnosti tla i klimatskih prilika. Razlozi su: veća osjetljivost senzora, dinamičnije promjene u vodenim ekosustavima, ali i potreba za češćim odlascima na teren zbog održavanja i kalibracije jer su senzori koji se nalaze u vodi skloni biološkim utjecajima osobito u ljetnim mjesecima. Nadalje, autori navode da je jedan od problema implementiranog sustava velika količina podataka koja se kontinuirano prikuplja, a koja može predstavljati izazov u pogledu spremanja i procesiranja. Međutim, prednost velike količine prikupljenih podataka (eng. *big data*) svakako je mogućnost njihovog korištenja u boljem i sveobuhvatnijem razumijevanju procesa koji se događaju unutar određenih ekosustava. Također, *big data* pružaju mogućnost izrade različitih prognostičkih modela kojima se mogu predviđati kratkoročne i dugoročne promjene u ekosustavima, osobito u vodenim okolišima. Uz klasične modele vremenskih serija u posljednje vrijeme u hidrologiji sve češće se koriste modeli strojnog učenja (Kang i sur., 2017; Nair i Vijaya, 2021).

2.3. Modeli predviđanja kakvoće voda

Prema autorima Li i Liu (2019) modeli predviđanja pojedinih parametara kakvoće vode mogu se svrstati u: (i) mehanističke modele; (ii) stohastičke modele i (iii) regresijske modele. Mehanistički modeli ili modeli zasnovani na procesima temelje se na detaljnom razumijevanju ključnih procesa i mehanizama u ekosustavima i njihovoj točnoj matematičkoj reprezentaciji (Diener i sur., 2017). Drugim riječima, ovi modeli predstavljaju pojednostavljenu matematičku aproksimaciju nekog fizičkog sustava (primjerice hidrosfere), a primjenjivost i sama točnost modela uvelike će ovisiti o tome koliko razvijene matematičke jednadžbe mogu aproksimirati fizički sustav koji se modelirao (Wang i sur., 2019; Mustać, 2015). Jedan od glavnih nedostataka i ograničavajućih čimbenika primjene mehanističkih modela za modeliranje hidroloških procesa je količina različitih podataka neophodna za izradu modela (meteorološki, topografski, hidrološki, ljudske aktivnost i sl.) i složenost strukture samog modela. Unatoč tome, ovi modeli imaju široku primjenu u hidrologiji, a najčešće korišteni modeli u znanstvenim

istraživanjima uključuju SWAT (eng. *Soil and Water Assessment Tool*) (Ullrich i sur., 2009; Abbaspour i sur., 2015; Gassman i sur., 2014), WASP (eng. *Water Quality Analysis Simulation Program*) (Wool i sur., 2020; Mbuh i sur., 2019; Obin i sur., 2021) i MIKE11 model (Havnø i sur., 1995; Liang i sur., 2015; Thu Minh i sur., 2022). Suprotno, stohastički i regresijski modeli temelje se na statističkim tehnikama, a pokazatelje kakvoće vode predviđaju analizom karakteristika i strukture vremenskih serija podataka te obično zahtijevaju znatno manje ulaznih podataka od mehanističkih modela (Li i Liu, 2019).

2.3.1. Modeli vremenskih serija

Vremenska serija predstavlja niz opažanja, podataka ili mjerenja prikupljenih obično u jednakim vremenskim razmacima (Montgomery 2015; Box i sur., 2008). Razlikujemo dvije vrste vremenskih serija, (i) determinističke na temelju čijih se članova mogu egzaktno predviđati određene pojave i (ii) stohastički na temelju čijih se članova buduće pojave mogu samo procijeniti (Bubalo, 2016). Prema Hrvatskoj enciklopediji (2021) stohastički proces u sebi sadržava elemente neuređenosti ili slučajnosti, a Kovačić (1995) ga definira kao funkciju ishoda statističkog eksperimenta i vremena. Može se reći da je stohastički proces skupina slučajnih varijabli indeksiranih varijablom t koja predstavlja vrijeme (Gabbiani i Cox, 2010). Jedna od temeljnih razlika između klasične statističke analize i analize vremenskih serija je da su kod klasičnih statističkih analiza elementi slučajnog uzorka međusobno nezavisni, dok kod analize vremenskih serija opažanja u uzorku nisu međusobno nezavisne, samim time što se pri analizi uzima njihov vremenski poredak (Kovačić, 1995). Upravo se navedena zavisnost opažanja koristi u analizi u svrhu formiranja modela koji se koristi da bi se na temelju prošlih prognozirale buduće vrijednosti (Kovačić, 1995). Četiri su osnovna cilja analize vremenskih serija: *deskripcija* – pri čemu se opisuju osnovne karakteristike serije koristeći se grafičkim prikazom i deskriptivnom statistikom; *objašnjenje* – u slučaju više vremenskih serija, varijabilnost u jednoj može se koristiti u cilju objašnjavanja varijabilnosti u drugoj vremenskoj seriji; *prognoziranje* – na temelju prošlih opažanja identificira se i razvija model koji se koristi za predviđanje budućih vrijednosti; *kontrola* – vremenske serije moguće je koristiti za kontrolu ili poboljšanje nekog procesa ili sustava, a usko je povezana sa prognoziranjem, npr. u statističkoj kontroli kvalitete (Chatfield, 2003; Kovačić, 1995). Analiza neke pojave u vremenu obično započinje s analitičkim izrazom koji opisuje stohastički proces koji uzrokuje analiziranu pojavu, odnosno započinje s modelom stohastičkog procesa (Bubalo, 2016). Važnu skupinu modela čine linearni modeli stacionarnih stohastičkih procesa u vremenu, od kojih su najvažniji: autoregresijski model reda p , $AR(p)$; model pomičnih prosjeka reda q , $MA(q)$; mješoviti model reda p i q , $ARMA(p,q)$ te

integrirani autoregresijski model i model pomičnih prosjeka ARIMA (p,d,q) (Šošić, 2004). U hidrološkim istraživanjima za predviđanje kvantitativnih (npr. razina vode) i kvalitativnih (npr. električna vodljivost) promjena voda najčešće se koristi ARIMA model ili neka od njegovih varijacija (SARIMA, ARIMAX, FARIMA) (Machiwal i sur., 2012; Qiu i Wan, 2013).

Analizirajući vremensku seriju (1974.-2010.) razina podzemnih voda u okrugu Karnal (Indija), Patle i sur. (2015) razvili su dugoročne modele predviđanja razine podzemne vode u pred-monsunskoj i post-monsunskoj sezoni. Kao najbolji model na temelju većeg broja procjenitelja uključujući R^2 , MAE i RMSE, odabran je ARIMA (0,1,2) model. Model je validiran na setu podataka 2000.-2010., a vrijednosti R^2 iznosile su 0,87 za pred-monsunsku i 0,86 za post-monsunsku sezonu ukazujući na visoku pouzdanost razvijenog modela.

Istraživanje koje je uključivalo analizu vremenskih serija većeg broj varijabli povezanih s kakvoćom vode uključujući EC_w , TDS, pH i ione Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} i HCO_3^- proveli su Taheri Tizro i sur. (2014) na području rijeke Karkheh (Iran). Analizom je utvrđen uzlazni trend za sve analizirane varijable, a korištenjem ARIMA modela moguće je izraditi pouzdane prognoze za većinu analiziranih parametara. Tako je primjerice za prognoziranje vrijednosti EC_w najbolji bio model ARIMA (2,1,3) koji je imao $R^2=0,81$ i $RMSE=0,06$. Jedini model koji je imao vrijednost R^2 manju od 0,5 bio je ARIMA (1,1,3) model za prognoziranje vrijednosti koncentracije SO_4^{2-} iona.

Koristeći kombinaciju *in-situ* podataka prikupljenih višeparametarskom sondom (temperatura, otopljeni kisik, EC_w , Chl-a) i LANDSAT 8 OLI satelitskih snimki u razdoblju od listopada 2019. do veljače 2020., na području retencije Krishnagiri (koja služi kao glavni izvor vode za navodnjavanje pokrajine Tamil Nadu u Indiji), Abdul Wahid i Arunbabu (2022) razvili su regresijske modele koji su korišteni za dobivanje vrijednosti Chl-a i EC_w iz spektralnih vrpca LANDSAT 8 OLI za razdoblje 2014.-2021. Dobivene vremenske serije tromjesečnih vrijednosti Chl-a i EC_w korištene su za razvoj sezonskog ARIMA (SARIMA) modela predviđanja Chl-a i EC_w . Na temelju Bayesovog informacijskog kriterija (BIC) kao najbolji model za predviđanje vrijednosti Chl-a odabran je SARIMA (1,1,0) model na temelju kojeg je izraženo predviđanje za 2022. i 2023. godinu. Isto je napravljeno za EC_w , a najbolji model na temelju BIC kriterija bio je SARIMA (2,1,0).

Sun i Koch (2001) su primjenom ARIMA modela, auto i kros korelacije, te Box-Jenkins transfer modela identificirali najvažnije hidrološke parametre koji utječu na varijabilnost stupnja zaslanjenosti zaljeva rijeke Apalachicola (SAD). Jedan od zaključaka provedenog istraživanja

bio je da fluktuacija morske razine uslijed plime rezultira kratkoročnim periodičnim promjenama u stupnju zaslanjenosti. Također, kroz korelacijskom analizom utvrđeno je da rijeka Apalachicola, kao glavni izvor svježe vode u zaljevu ima snažan utjecaj na struje i stupanj zaslanjenosti ukoliko se promatra dugoročno razdoblje.

2.3.2. Modeli strojnog učenja

Strojno učenje je termin koji se pojavio prije više od 60 godina, a koji se danas sve češće koristi u znanosti, gotovo svim granama industrije, ali i svakodnevnom životu. Može se definirati kao programiranje računala na način da optimiziraju neki kriterij uspješnosti temeljem podatkovnih primjera ili prethodnog iskustava (Alpaydin, 2014). Općenito, strojno učenje može se podijeliti na: i) nadzirano učenje (eng. *supervised learning*) kojim se mogu rješavati problemi regresije i klasifikacije, ii) nenadzirano učenje (eng. *unsupervised learning*) koje se izvršava grupiranjem, procjenom gustoće ili smanjenjem dimenzionalnosti (npr. klaster analiza) i iii) učenje uz podršku (eng. *reinforcement learning*). Osnovna zadaća nadziranog strojnog učenja je generiranje funkcije koja preslikava ulaze na željene izlaze u svrhu previđanja (regresija) ili klasifikacije. Dok su kod prediktivnih modela izlazne vrijednosti kontinuirane, kod klasifikacijskih modela one su diskretne (Črnčec i Andročec, 2020). Proces samog učenja općenito se sastoji od dvije faze, treniranja i testiranja, a skup podataka potrebno je podijeliti u dvije zasebne cjeline, pri čemu se veći dio podataka koristi za treniranje modela. Tijekom faze treniranja, podaci za trening se uzimaju kao ulazni, a njihove karakteristike se uče uz pomoć odgovarajućeg algoritma čiji je glavni zadatak predvidjeti izlazni podataka na temelju naučenih karakteristika ulaznih podataka nakon čega se predviđena vrijednost uspoređuje sa stvarnim izlaznim podatke i izračunava se vrijednost pogreške. Na temelju dobivene vrijednosti pogreške, model se modificira kako bi buduća predviđanja bila preciznija i točnija (Črnčec i Andročec, 2020). Neki od najčešće korištenih modela nadziranog učenja uključuju linearnu regresiju, stroj potpornih vektora, stabla odlučivanja (regresijska ili klasifikacijska), slučajnu šumu, umjetne neuronske mreže i brojne druge.

Jedan od najjednostavnijih, ali i najčešće korištenih algoritama strojnog učenja je linearna regresija. Svrha linearne regresije je modelirati odnos između jedne zavisne i jedne ili više nezavisnih varijabli koristeći linearnu funkciju. Ukoliko se radi o više nezavisnih varijabli tada govorimo o višestrukoj ili multiploj linearnoj regresiji MLR. Modelom MLR analitički se predočuje statistička kovarijacija jedne numeričke varijable pomoću dvije ili više drugih numeričkih varijabli (Šošić, 2004). Također često korišten model strojnog učenja koji je dominirao 1990-tih godina prošloga stoljeća je stroj potpornih vektora SVM koji se temelji na teoriji statističkog

učenja i principu strukturne minimizacije rizika koji je uspješno korišten za rješavanje klasifikacijskih i regresijskih problema u modeliranju nelinearnih sustava (Vapnik i sur., 1996). Teorija statističkog učenja proučava matematička svojstva učećih strojeva, odnosno svojstva klasa funkcija koje ti strojevi mogu implementirati, a koja im omogućuju dobru generalizaciju na neviđenim podacima (Schölkopf i Smola, 2018). Cilj SVM je maksimizirati udaljenost između različitih klasa koje se nalaze u skupu podataka, odnosno pronalazak ravnine razdvajanja dviju klasa koja maksimizira margine razdvajanja (Botunac, 2018). Još jedan vrlo važan algoritam nadziranog strojnog učenja je stablo odlučivanja koja se češće koristi za rješavanje problema klasifikacije (klasifikacijsko stablo), ali vrlo uspješno rješava i probleme regresije (regresijsko stablo). Ideja stabla odlučivanja temelji se na raščlanjivanju klasifikacije na niz odabira za svaku značajku (Marsland, 2015). Prvo, stablo odlučivanja odabire značajku koja će biti korijenski čvor nakon čega stvara granu za svaku mogućnost vrijednosti tog atributa. Na kraju grana se nalaze listovi koji ujedno predstavljaju vrijednost ciljane (izlazne) varijable ako su dane vrijednosti ulaznih varijabli predstavljene putem od korijena stabla do tog lista (Zekić-Sušac i sur., 2009). Stablo odlučivanja se dobiva učenjem nad podacima na način da se vrši grananje izvornog skupa podataka na temelju testiranja vrijednosti varijabli, a proces završava kada podskup određenog čvora ima sve iste vrijednosti izlazne varijable ili kada daljnje grananje ne pridonosi poboljšanju modela (Zekić-Sušac i sur., 2009; Witten i Frank, 2000). Jedna od karakteristika stabla odlučivanja je njihova osjetljivost na prenaučенost, osobito ako ulazni skup podataka za treniranje modela ne sadrži sve značajke koje se mogu pojaviti u cjelokupnom skupu. Općenito je prihvaćeno da s povećanjem dubine stabla odlučivanja dolazi do prenaučенosti jer duboka stabla imaju tendenciju učiti izrazito nepravilne obrasce ponašanja (Lange i Sippel, 2020). Ovaj nedostatak se u određenoj mjeri može prevladati stvaranjem više stabala istovremeno koja se generiraju slučajnim odabirom skupa podataka za trening, a ovakav ansambl naziva se slučajna šuma RF (Breiman, 2001). Svako pojedinačno stablo daje predikciju ciljane varijable, a prosjek svih predviđanja je rezultat konačne predikcije modela slučajne šume. RF stoga predstavlja jednu vrstu ansambla. Osnovna ideja ansambla je da kombinirajući veći broj osnovnih klasifikatora od kojih svaki daje nešto drugačije rezultate, konačni rezultat bude znatno bolji od rezultata koje bi dao svaki klasifikator pojedinačno (Marsland, 2015). Za razliku od modela RF koji se oslanja na jednostavno uprosječivanje dobivenih vrijednosti modela u ansamblu, skupina algoritama pojačanja (eng. *boosting*) temelji se na konstruktivnoj strategiji formiranja ansambla. Glavna ideja je postupno dodavanje novih modela u ansambl, a u svakoj iteraciji novi, slabi model se trenira obzirom na pogrešku cijelog ansambla (Natekin i Knoll, 2013). Jedan od takvih algoritama je algoritam pojačanja stabala

odlučivanja koji se temelji na iterativnom učenju algoritma na temelju grešaka prethodnih algoritama, što znači da se stabla ne grade zasebno, nego slijedno pri čemu svako stablo uči na greškama prethodnih stabala. Učeći na ovaj način, algoritmu je potrebno manje vremena (iteracija) da bi predvidio rezultat u usporedbi s pojedinačnim stablom odlučivanja (Hrastić, 2019). Postoji više vrsta algoritama pojačanja, a najčešće korišteni su adaptivno pojačanje (eng. *AdaBoost*), algoritam pojačanja gradijenta (eng. *Gradient Boosting*) i ekstremno pojačanje gradijenta (eng. *Extreme Gradient Boosting*). Ipak, možda i najpoznatiji algoritmi, kada se općenito govori o strojnom učenju, su umjetne neuronske mreže ANN. ANN predstavlja skup međusobno povezanih jednostavnih procesnih elemenata (čvorova), čija se funkcionalnost temelji na biološkom neuronu (Dalbelo Bašić i sur., 2008). Sastoje se od nekoliko slojeva (ulazni, izlazni i skriveni sloj), a sama struktura mreže bazirana je na rasporedu i povezanosti neurona (Nair i Vijaya, 2021). Obradbeno moć neuronske mreže pohranjena je u snazi veza između pojedinačnih neurona (težinama) do kojih se dolazi postupkom prilagodbe, odnosno učenjem iz skupa podataka za treniranje modela (Dalbelo Bašić i sur., 2008). Mogu rješavati probleme klasifikacije i regresije, a našle su široku primjenu u brojnim granama znanosti i industrije za rješavanje zadataka kao što su: raspoznavanje uzoraka, obrada slika i govora, rješavanje problema optimizacije, obrada nepreciznih i nepotpunih podataka, simulacije i previđanja i sl. Ipak, postoje određeni nedostaci ANN uključujući to da su obično znatno kompleksnije od nekih drugih algoritama strojnog učenja, često je potrebna velika računalna i obradbeno moć, učenje može biti sporo i dugotrajno i sklone su prenaučenosti (Lange i Sippel, 2020). Ubrzanim tehnološkim razvojem neprestano se razvijaju novi, poboljšani algoritmi strojnog učenja od kojih su brojni našli svoju primjenu u hidrologiji, osobito u području praćenja, predviđanja i upravljanja vodama (Tiyasha i sur., 2020).

Tako su Abba i sur. (2017) testirali tri različita modela strojnog učenja (i) model multiple linearne regresije MLR, umjetnu neuronsku mrežu ANN i prilagodljivi neizraziti (eng. *neuro-fuzzy*) ANFIS model za predviđanje koncentracije otopljenog kisika koristeći mjesečne podatke o otopljenom kisiku, pH, biološkoj potrošnji kisika i temperaturi vode na tri lokacije na rijeci Yamuna (Agra, Indija). Najbolji model odabran je na temelju procjenitelja R^2 i RMSE. Dobiveni rezultati pokazuju da su ANFIS i ANN modeli na setu podataka za trening imali najviše vrijednosti R^2 (0,99 i 0,94) i najmanje pogreške RMSE, međutim na setu podataka za testiranje model MLR imao je najvišu vrijednost $R^2=0,88$ i niže pogreške i od ANN ($R^2=0,81$) i ANFIS ($R^2=0,66$) modela.

Lu i Ma (2020) testirali su primjenu dva modela strojnog učenja, model slučajnih šuma RF i model ekstremnog pojačanja gradijenta XGB u koje je implementirana napredna tehnika smanjenja šuma CEEMDAN (eng. *complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise*), za predviđanje šest parametara kakvoće vode pritoka (Gales Creek) jedne od najzagađenijih rijeka na svijetu, rijeke Tualatin u Oregonu (SAD). Korišteni su satni podaci temperature vode, električne vodljivosti, pH, otopljenog kisika, mutnoće i otopljene organske tvari u razdoblju 1.5.2019.-20.7.2019. Rezultati su pokazali da je za predviđanje temperature, otopljenog kisika i električne vodljivosti bolje rezultate dao model CEEMDAN-RF, a za ostale parametre model CEEMDAN-XGB. Također, uspoređujući predložene modele s drugim modelima strojnog učenja kao što su model potpornih vektora SVM, duga kratkoročna memorija LSTM i nekoliko drugih, predloženi modeli pokazali su najbolje performanse.

Važnost monitoringa intruzije morske vode i korištenje prikupljenih podataka u svrhu izrade prognostičkih modela u delti rijeke Mekong demonstrirali su Nguyen i sur. (2021). Koristeći podatke EC_w s 39 automatskih monitoring postaja i satelitske snimke LANDSA 8 OLI iz 2016., 2019. i 2020. godine autori su testirali više različitih samostalnih i hibridnih modela strojnog učenja za predviđanje stupnja zasljenosti tla uključujući duboku neuronsku mrežu, Gaussov proces, metodu potpornih vektora, optimizacijski algoritam Grasshopper i model ekstremnog pojačanja gradijenta. Iz satelitskih snimki izvučen je ukupno 31 različiti indeks koji su korišteni kao nezavisne varijable u modelima. Set podataka podijeljen je u omjeru 70:30 na set za trening i set za validaciju. Temeljem rezultata procjene modela, najbolji se pokazao hibridni model koji je kombinacija optimizacijskog algoritma Grasshopper i model ekstremnog pojačanja gradijenta koji je na validacijskom setu podataka imao vrijednost $R^2=0,86$ i $RMSE=0,161$. Od pojedinačnih modela najbolje performanse pokazao je model ekstremnog pojačanja gradijenta s izračunatom vrijednošću $R^2=0,76$ i $RMSE=0,101$ također na validacijskom setu podataka.

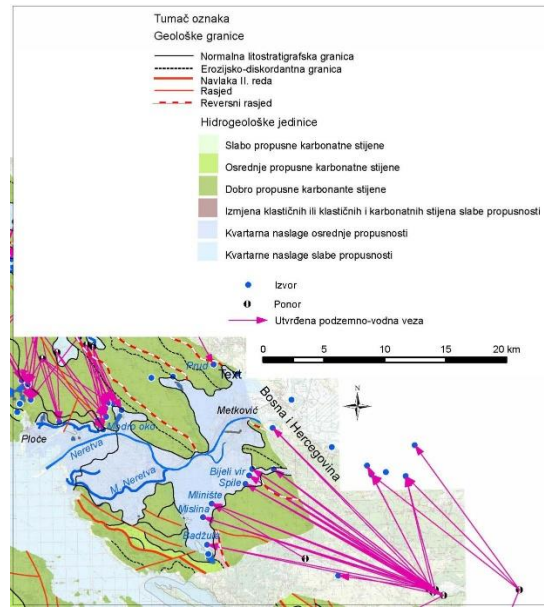
2.4. Problem zasljenjivanja u Republici Hrvatskoj – slučaj doline rijeke Neretve

Problemi zasljenjivanja površinski voda, podzemnih voda i tla javljaju se u cijelom priobalnom području RH gdje je krška obala Jadranskog mora duga 1777 km i zauzima najveći dio istočne jadranske obale. Važan dio obalnog područja su i riječna ušća, a prema Planu upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (Hrvatske vode, 2015) značajnije rijeke kod kojih je prisutan utjecaj mora su Dragonja, Raša i Mirna u Istri, Rječina u Kvarneru te Zrmanja, Krka, Jadro, Cetina, Neretva i Ombla u Dalmaciji. Zbog svog prirodnog, socioekonomskog i gospodarskog

značaja, aluvijalna dolina rijeke Neretve predstavlja jedno od najranjivijih područja u RH, ne samo u kontekstu zaslanjivanja, nego klimatskih promjena općenito.

Rijeka Neretva izvire u BiH jugoistočno od Zelengore na nadmorskoj visini od 1095 m.n.m. Sliv rijeke Neretve procjenjuje se na preko 10500 km², od čega se samo 280 km² nalazi u RH (Vranješ i sur., 2013). Sama rijeka duga je oko 225 km pri čemu se veći dio toka nalazi na teritoriju BiH dok se zadnja 22 km nalaze u RH. U gornjem dijelu toka rijeka Neretva je tipična krška rijeka (Ljubenković i Vranješ, 2012), a režim otjecanja sa sliva u potpunosti je izmijenjen izgradnjom većeg broja HE u susjednoj BiH. U svom donjem toku, nizvodno od Počitelja (BiH), Neretva usporava i tvori aluvijalnu dolinu prije ulijevanja u Jadransko more. Protok u donjem toku uglavnom ovisi o dva procesa, količini oborina koja padne na području sliva i režimu rada HE pri čemu je za dolinu rijeke Neretve najznačajnija HE Mostar. Od izvornih 12 rukavaca rijeke Neretve danas su preostala samo tri (Romić i sur., 2008), što je posljedica intenzivnih melioracijskih zahvata koji su se na ovom području provodili kroz povijest. Posljednje melioracije provedene su od kraja 1950-ih do 1980-tih godina prošloga stoljeća. Spomenutim zahvatima dolina rijeke Neretve na teritoriju RH ograničena je na oko 12000 ha od kojih je oko 5000 ha pretvoreno u obradivo poljoprivredno zemljište uglavnom polderskog tip (Zovko i sur., 2018). Danas se regulirani riječni tok grana u nekoliko riječnih rukavaca koji otječu u pravcu mora formirajući tako šire područje riječne delte (Margeta i Fistančić, 2000). Prema izrađenom digitalnom modelu reljefa (Romić i sur., 2012) nadmorska visina središnjeg dijela doline kreće se između -2,35 m.n.m. i +2,5 m.n.m. Zbog svog položaja, reljefnih, geoloških i hidrogeloških značajki dolina rijeke Neretve pod snažnim je utjecajem Jadranskog mora (Kralj i sur., 2016), a intruzija morske vode u obliku slanog klina kroz korito rijeke Neretve, ali i podzemlje prodire nekoliko desetaka km uzvodno od ušća (Ljubenković i Vranješ, 2012). Posljedica toga su privremeno ili trajno zaslanjeni izvori vode koji se koriste za navodnjavanje poljoprivrednih kultura (Romić i sur., 2019a).

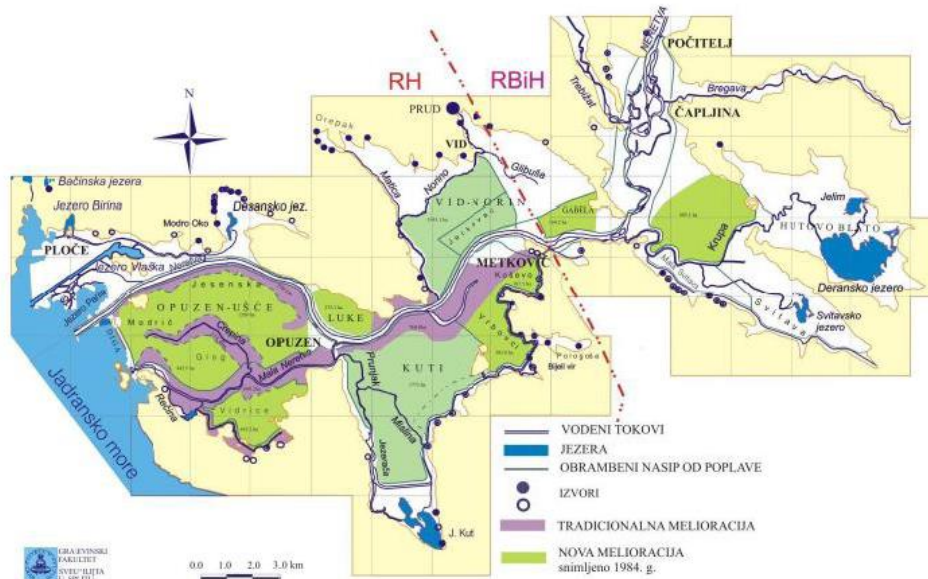
Područje sliva rijeke Neretve pretežito je izgrađeno od intenzivno okršanih, a time i dobro propusnih mezozojskih vapnenaca (Slišković, 2014). Dolina donjeg toka Neretve veže se uz rasjednu zonu okomitu na pružanje Dinarida, a koja je nastala kao posljedica tektonskih pokreta (Juračić, 1998, Romić i sur., 2012). Dolina je izgrađena od nevezanih kvartarnih naslaga u čijem litološkom sastavu dominiraju pijesci, šljunci, prah, glina i njihovi varijeteti (Brkić, 2022). Brojni krški izvori pojavljuju se uz desnu (Prud, Modro Oko) te lijevu (Doljani, Bijeli Vir, Spile, Mlinište, Mislina, Badžula) obalu rijeke Neretve (Slika 2.3).



Slika 2.3. Hidrogeološka karta šireg područja doline rijeke Neretve (prema Biondić i sur., 1996; Kuhta i Brkić, 2020)

U nevezanim kvartarnim naslagama koje izgrađuju dolinu rijeke Neretve formiran je vodonosni sustav sa zaslanjenom podzemnom vodom unutar kojeg je moguće izdvojiti tri glavna sloja: (I) prvi vodonosni sloj sastavljen od slojeva sitnog pijeska i slojeva mjestimice pjeskovitog i/ili zaglinjenog praha dubine 1 m-10 m, (II) sloj gline i prašinasto-glinastih naslaga čija se debljina povećava prema moru gdje doseže 25 m, (III) duboki kvartarni vodonosnik istaložen ispod slabo propusnih glinovito-prašinstih naslaga koji se sastoji od šljunka i pijeska i čija dubina iznosi oko 130 m ispod kojeg se nalaze karstificirani vapnenci (Brkić, 2022; Srzić i sur., 2020).

Deltu rijeke Neretve karakteriziraju kompleksne interakcije površinskih i podzemnih voda te mora. Najvažniji površinski hidrološki elementi na području doline su rijeka Neretva i njezini pritoci (Zovko, 2015). Nizvodno od Metkovića uobičajeni višegodišnji protok Neretve kreće se u rasponu od $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $1800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ s dugogodišnjim prosjekom od $290\text{-}330 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Srzić i sur., 2020; Lovrinović i sur. 2021). Protok od $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ predstavlja biološki minimum koji se osigurava na HE Mostar (Krvavica i sur., 2021). Posebno je izražena sezonalnost s protocima od $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ u suhom, ljetnom razdoblju (svibanj-listopad) i protocima između $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $1800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ u vlažnom, zimskom razdoblju (studenj-travanj) (Lovrinović i sur., 2023). Provedenim melioracijskim zahvatima prostor aluvijalne doline podijeljen je na šest MP: Opuzen ušće, Vidrice, Luke, Kuti, Koševo-Vrbovci i Vid-Norin (Slika 2.4) pri čemu su stvorene poljoprivredne parcele polderskog tipa, a povoljni uvjeti za poljoprivrednu proizvodnju osigurani su kompleksnom mrežom nasipa, kanala, ustava i crpnih stanica (Romić i sur., 2020a).



Slika 2.4. Područje doline Neretve podijeljeno na melioracijska područja (Vranješ i sur., 2013)

Zbog svojih specifičnosti i iznimne važnosti za RH, dolina rijeke Neretve kroz posljednjih nekoliko desetljeća predmet je brojnih istraživanja, od koji se značajan dio fokusirao na problematiku zaslanjivanja voda i tla. U četverogodišnjem istraživanju (1999.-2002.) koje su proveli Romić i sur. (2008) mjesečni uzorci površinskih voda s pet lokacija (kanal Modrič, rijeka Neretva kod Opuzena, vodotok Crepina, kanal Jasenska i kanal Vidrice) analiziran su na pokazatelje povezane sa zaslanjivanjem (pH, EC_w i ionski sastav). Rezultati istraživanja pokazali su prostornu, ali i vremensku varijabilnost stupnja zaslanjenosti površinskih voda u dolini Neretve, pri čemu su najviše koncentracije soli utvrđene u ljetnim mjesecima. Analizirajući lokacije, najviše prosječne vrijednosti EC_w utvrđene su na lokacijama Vidrice ($7,23 \text{ dS m}^{-1}$) i Modrič ($5,53 \text{ dS m}^{-1}$).

Vranješ i sur. (2013) utvrdili su da je vodni režim otjecanja sa sliva rijeke Neretve u potpunosti izmijenjen gradnjom hidroenergetskih sustava u BiH od sredine prošlog stoljeća. Detaljnom analizom protoka na izvoru Bijeli Vir (područje Kuti) utvrđeno je smanjenje protoka za 60 do 80 %. Također, zbog smanjenog dotoka svježje vode sa sliva pojačani su procesi intruzije morske vode koji dovode do zaslanjivanja površinskih voda, naročito rijeke Neretve, ali i podzemnih voda. Dodatno, smanjena je i količina sedimenata koji dolaze sa sliva što dovodi do ispiranja i produblivanja korita rijeke Neretve.

Primjenom Vis-NIR spektroskopije i geostatističkih tehnika, Zovko i sur. (2018) su na temelju rezultata laboratorijske i spektralne analize 246 površinskih uzorka tla pokazali da povećanje

stupnja zaslanjenosti tla rezultira promjenama u refleksiji tla i to kod valnih duljina 1400-1900 nm. Također, autori su predložili metodologiju koja koristi sintetizirani spektralni indeks za kvantifikaciju i kartiranje prostorne varijabilnosti zaslanjenosti tla.

Kralj i sur. (2016) proveli su istraživanje u okviru kojeg su uzorkovali sedimente s pet lokacija u dolini rijeke Neretve (Neretva vodozahvat, Mala Neretva, Crna Rika, Bočina i Norin) čijom se analizom pokazalo da iako se radi o relativno malom području, svaka lokacija odražava potpuno različite učinke antropogenih aktivnosti kao što su regulacija vodnog režima na slivnom području koje su rezultirale promjenama u količini i kvaliteti sedimenata.

Koristeći podatke kontinuiranih mjerenja protoka (2015.-2018.) i primjenom numeričkog modela Krvavica i sur. (2021) potvrdili su rezultate koje su ranije objavili Ljubenković i Vranješ (2012). Modelom je utvrđeno da protok u rijeci Neretvi ima dominantan utjecaj na pojavu slanog klina u odnosu na razinu mora te plimu i oseku čiji je utjecaj znatno manji. Rezultati mjerenja zaslanjenosti pokazali su vrlo snažnu stratifikaciju uspostavljenu u rijeci Neretvi, a mjerenja i razvijeni numerički model pokazali su da slani klin propagira 22 km uzvodno od ušća kod niskih protoka koji se javljaju od kasnog proljeća do rane jeseni.

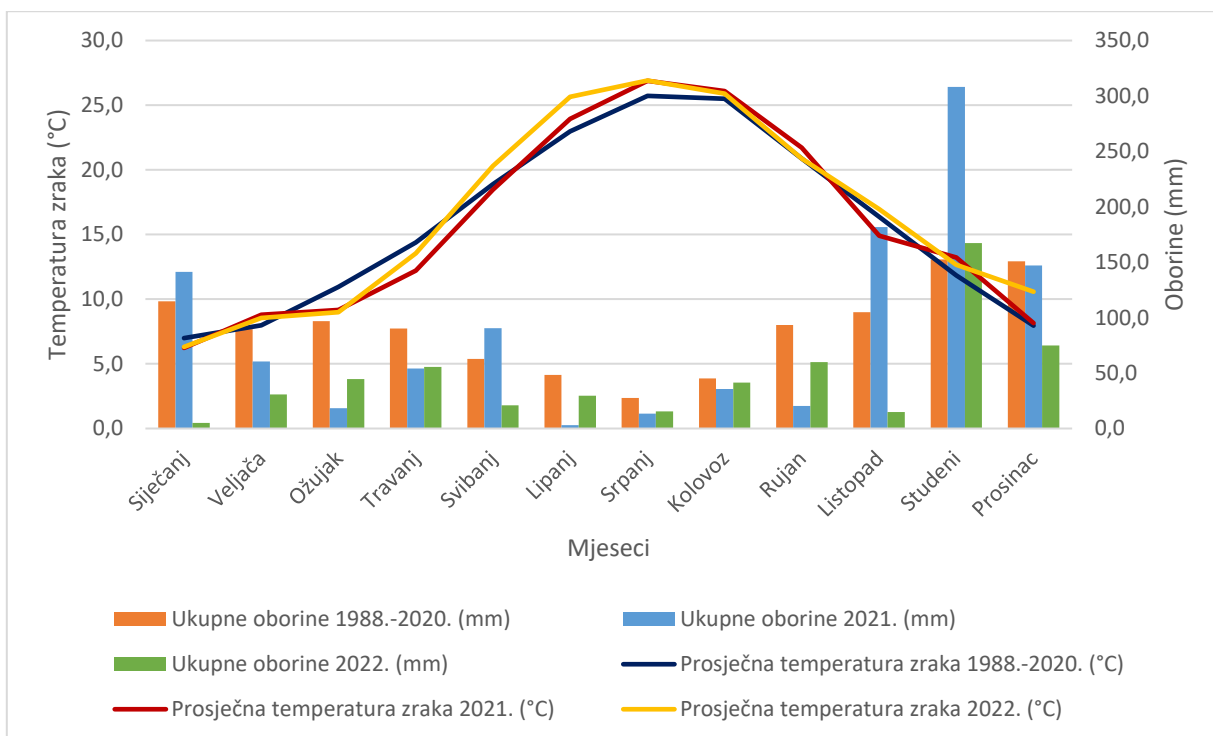
Romić i sur. (2020a) su koristeći mjesečne podatke o kakvoći površinskih i podzemnih voda razvili dva linearna mješovita modela (eng. *Linear Mixed Effect*) koji predviđaju vrijednosti stupnja zaslanjenosti i koncentracije nitrata pri čemu su se predloženi modeli pokazali učinkovitima u adekvatnom repliciranju heterogenosti i kompleksnosti istraživanog područja, osobito prostorne i vremenske varijabilnosti stupnja zaslanjenosti voda.

Također, koristeći dugogodišnji (2010.-2020.) set mjesečnih podataka o kakvoći površinskih i podzemnih voda, Romić i sur. (2023a) primijenili su analizu vremenskih serija za razvoj modela predviđanja stupnja zaslanjenosti površinskih voda. Provedenim Grangerovim testom utvrđena je snažna uzročno-posljedična veza između razine mora i vrijednosti EC_w na dvije lokacije, vodotoku Maloj Neretvi i lateralnom kanalu Vidrice. Za navedene lokacije razvijen je vektor autoregresijski model (VAR) predviđanja stupnja zaslanjenosti godinu dana unaprijed (2021.), a validacijom dobivenih rezultata na setu podataka iz 2021. godine utvrđeno je da se razvijeni modeli mogu koristiti za pouzdano predviđanje vrijednosti EC_w na odabranim lokacijama godinu dana unaprijed.

3. MATERIJALI I METODE

3.1. Lokacije istraživanja

Istraživanja za potrebe ovog rada provedena su na području doline rijeke Neretve (2021.-2022). Prema Köppenovoj klasifikaciji dolina rijeke Neretve ima sredozemnu (mediteransku) klimu s vrućim ljetom oznake C_{sa} koju karakterizira prosječna temperatura najhladnijeg mjeseca $> -3^{\circ}\text{C}$ te prosječna temperatura najtoplijeg mjeseca $\geq 22^{\circ}\text{C}$ (Šegota i Filipčić, 2003). Prosječna temperatura zraka (1988.-2020.) za glavnu meteorološku postaju područja Ploče iznosila je $15,9^{\circ}\text{C}$. Najhladniji mjesec bio je siječanj ($7,0^{\circ}\text{C}$), a najtopliji srpanj ($25,7^{\circ}\text{C}$). Prosječna godišnja količina oborina u istom razdoblju iznosila je $1077,3\text{ mm}$, a kretala se u rasponu od $673,5\text{ mm}$ (1989.) do $1514,8\text{ mm}$ (1995.). Najviše oborina padne u studenom i prosincu, a najmanje u srpnju i kolovozu. Za vrijeme trajanja istraživanja meteorološki podaci prikupljeni su s automatske meteorološke stanice instalirane u MP Vidrice. Prosječna godišnja temperatura u 2021. iznosila je 16°C , a u 2022. godini $16,5^{\circ}\text{C}$. Ukupna količina oborina u 2021. godini iznosila je $1074,4\text{ mm}$, dok je u 2022. iznosila svega $560,5\text{ mm}$ (Slika 3.1).



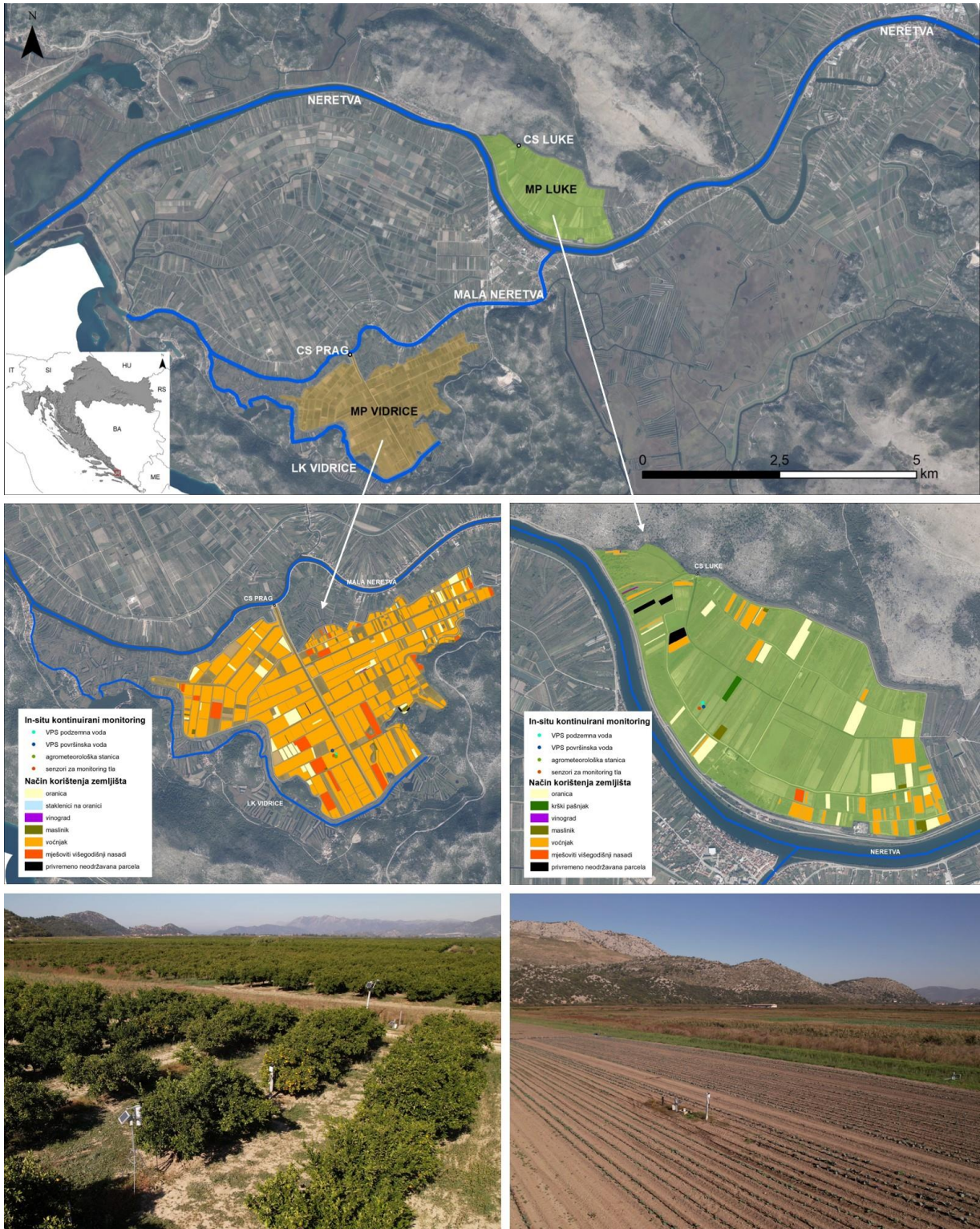
Slika 3.1. Prosječne mjesečne temperature zraka i ukupne oborine za postaju Ploče (1988.-2020.) i automatsku meteorološku stanicu Vidrice (2021.-2022.)

Postanak tala na području doline rijeke Neretve vezan je uz procese taloženja riječnih nanosa i zemljišnih materijala ispranih s krškog područja unutar sliva (Zovko, 2015). Prema pedološkoj karti (1:25000) (Prilog, Slika 8.1) na području doline rijeke Neretve izdvojeno je 16 KJ koje zauzimaju površinu od 5093,2 ha (Prilog, Tablica 8.1). Dolinom dominiraju tri tipa tla od kojih humofluvisol zauzima 37 % (1883,65 ha), aluvijalno tlo 35 % (1779,1 ha) i močvarno-glejno tlo 28 % (1430,45 ha) poljoprivrednih površina.

Lokacije istraživanja (LI) odabrane su temeljem rezultata istraživačkog monitoringa voda i tla u dolini Neretve koji se provodi od 2009. godine (Romić i sur., 2014; Romić i sur., 2019b; Romić i sur., 2020b, Romić i sur., 2021; Romić i sur., 2022b; Romić i sur., 2023b). Istraživački monitoring uspostavljen je na 15 lokacija površinskih voda, 7 lokacija podzemnih voda i 7 lokacija tala. Odabrane su lokacije unutar MP Vidrice i MP Luke koje karakterizira različit prostorni položaj i udaljenost od glavnih vodotoka, različite pedološke značajke kao i način korištenja poljoprivrednog zemljišta (Slika 3.2). Rezultatima višegodišnjeg monitoringa stupnja zaslanjenosti voda i tla, upravo su MP Vidrice i MP Luke izdvojene kao jedne od najugroženijih lokacija od zaslanjivanja unutar doline rijeke Neretve. LI Vidrice (42°59'13" S, 17°31'39" I) nalazi se unutar istoimenog MP smještenog na lijevoj obali Male Neretve. MP Vidrice ima prosječnu nadmorsku visinu -0,44 m.n.m. (Romić i sur., 2023a) te obuhvaća prostor od oko 500 ha na lijevoj obali Male Neretve, jugozapadno od grada Opuzena gdje se poljoprivredne površine dominantno koriste za uzgoj citrusa, uglavnom mandarine (*Citrus reticulata* L.). Granicu područja čine korito Male Neretve na sjeveru te obronci krških grebena Šibenice s južne strane i Tmor, Glavica s istočne strane. Za obranu od vlastitih, ali i vanjskih suvišnih voda u MP implementirana je kompleksna mreža hidrotehničkih rješenja i građevina. Po obodu s južne strane, MP je od izvorskih i slivnih voda s reljefno višeg krškog dijela zaštićeno lateralnim kanalom (dio vodotoka Rečina) i obrambenim nasipom dužine 5 km. Razina vode ispod rizosfernog sloja i povoljni uvjeti za uzgoj poljoprivrednih kultura omogućeni su mrežom kanala I (9,4 km) i II (20,64 km) reda. Na sjevernom kraju glavnog odvodnog kanala nalazi se centralna hidrotehnička građevina MP Vidrice, CS Prag kojom se suvišne vode kontinuirano prepumpavaju u korito Male Neretve (Gilja i sur., 2023). CS Prag vrši se odvodnja s oko 500 ha što uključuje odvodnju suvišnih oborinskih voda MP Vidrice, ali i procjednih voda lijevog zaobalja Male Neretve nizvodno od Opuzena (Hrvatske vode, 2014). Crpke se pale ručno i uglavnom rade svakodnevno u noćnom režimu (22:00-7:00), međutim režim rada je promjenjiv i ovisi o meteorološkim i hidrološkim prilikama na MP (Lovrinović i sur., 2023). Za uspostavu istraživanja odabrana je parcela veličine 1,95 ha na kojoj se nalazi intenzivni nasad mandarine starosti 27 godina. Nasad je navodnjavan sustavom kap po kap s instaliranim kapaljkama

protoka 3 L h^{-1} i razmakom između kapaljki 30 cm. Na temelju duljine cijevi, razmaka i broja kapaljki te njihovog kapaciteta procijenjeno je da je kroz jedan sat navodnjavanja dodano $\approx 2,5$ mm. Voda za navodnjavanje zahvaća se iz odvodnog melioracijskog kanala pumpom kapaciteta 1000 L min^{-1} . Za vrijeme trajanja istraživanja na parceli su se provodile sve agrotehničke mjere koje se inače provode u intenzivnom uzgoju mandarina uključujući obradu tla (freziranje), gnojidbu i zaštitu.

Druga odabrana LI ($43^{\circ}1'37'' \text{ S}$, $17^{\circ}33'39'' \text{ I}$) nalazi se unutar MP Luke koje je smješteno na desnoj obali rijeke Neretve nizvodno od grada Opuzena i obuhvaća prostor od oko 290 ha. Luke su ujedno i prvi polder na kojem se počelo s melioracijskim zahvatima 1948. godine (Švonja i Barbarić, 1999). Područje se od suvišnih voda brani mrežom kanala II (22,58 km) i I reda (7,00 km) na čijem se kraju nalazi CS Luke kapaciteta $2,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Švonja i Barbarić, 1999). Mreža prihvaća i dio brdskih voda sa sjevera. Održavanje povoljnog režima tečenja u odvodnim melioracijskim kanalima u izravnoj je vezi s režimom podzemnih voda, a niske kote terena koje su posebno izražene unutar MP Luke zahtijevaju kontinuirano crpljenje radi zaštite voda i tla od zaslanjivanja. Rad CS Luke nije automatiziran, a uobičajeni režim rada je u noćnim satima, ali ovisi i o hidrološkim i meteorološkim prilikama područja. Nadmorska visina MP Luke kreće se od 0,64 m.n.m. do čak -3,04 m.n.m., a izraženo slijeganje terena uslijed razgradnje organske tvari ubrzava procese procjeđivanja podzemne vode i zaslanjivanja površinskih voda i tla (Ondrašek i sur., 2019; Romić i sur., 2023a). Za provedbu istraživanja odabrana je parcela površine 0,8 ha na kojoj se uzgajaju povrtnarske kulture, a gdje se u plodoredu izmjenjuju uglavnom kupusnjače i plodonošno povrće. U 2021. godini na parceli se uzgajala dinja (*Cucumis melo* L.), a u 2022. godini kupus (*Brassica oleracea* L.var.*capitata*). Obje kulture su navodnjavanje sustavom kap po kap s kapaljkama protoka $1,2 \text{ L h}^{-1}$ i razmakom između kapaljki 20 cm. Na temelju ulaznih parametara (duljine cijevi, razmaka i broja kapaljki te njihovog kapaciteta) procijenjeno je da je kroz jedan sat navodnjavanja dodano oko 6 mm vode. Voda za navodnjavanje zahvaćala se iz odvodnog melioracijskog kanala pumpom kapaciteta 800 L min^{-1} . Agrotehničke mjere obrade tla, prihrane i zaštite provodile su se prema zahtjevima pojedine kulture.



Slika 3.2. Odabrane lokacije istraživanja unutar hidromeliorirane delte rijeke Neretve (Izvor: projekt DELTASAL)

3.2. Instalirana istraživačka oprema i prikupljanje podataka

Na odabranim parcelama instalirani su piezometri dubine 4 m i profila 110 mm. Odvodni melioracijski kanali uz parcele pripremljeni su za instalaciju opreme postavljanjem pristupne platforme na pokosu kanala i aluminijskih nosača s perforiranom PVC cijevi unutar kanala (Slika 3.3).



Slika 3.3. Priprema lokacija istraživanja (Izvor: D. Romić)

Za prikupljanje meteoroloških podataka na LI Vidrice instalirana je agrometeorološka stanica (Pinova, 2022) koja u 10-minutnoj vremenskoj rezoluciji prikuplja podatke o temperaturi zraka ($^{\circ}\text{C}$), vlažnosti zraka (%), brzini vjetra (m s^{-1}), globalnoj radijaciji (W m^2) i oborinama (mm). Stanica je automatska, a napajanje je osigurano AA 1,2 V Ni-MH baterijama (5 komada) koje su pune preko solarnog panela (Slika 3.4). Od prikupljenih podataka za potrebe istraživanja korišteni su podaci o temperaturi zraka i količini oborina koji su uprosječeni u satne i dnevne vrijednosti.



Slika 3.4. Automatska agrometeorološka stanica (Izvor: D. Romić)

U neposrednoj blizini piezometara instalirani su FDR senzori za monitoring tla (Meter Group, 2022). Senzori su instalirani na svakih 25 cm od površine tla do ukupne dubine od 1 m. Senzori se sastoje od 3 igle izrađene od nehrđajućeg čelika (Slika 3.5) koje omogućuju mjerenja volumetrijskog sadržaj vlage u tlu ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), električne vodljivost tla EC_b (dS m^{-1}) i temperature tla ($^{\circ}\text{C}$). Dodatno su na dvije dubine (25 cm i 50 cm) instalirani senzor za mjerenje matričnog potencijala tla (kPa) u istoj vremenskoj rezoluciji (Slika 3.5). Svi senzori su spojeni na uređaj za prikupljanje i slanje podataka (eng. *data logger*) koji je autonoman i napaja se putem 6 AA 1,2 V Ni-MH baterija koje se pune putem solarnog panela (Slika 3.5). Instalirani senzori su tvornički kalibrirani. Podaci su prikupljeni u 15-minutnoj vremenskoj rezoluciji te su uprosječeni kako bi se dobile satne i dnevne vrijednosti.



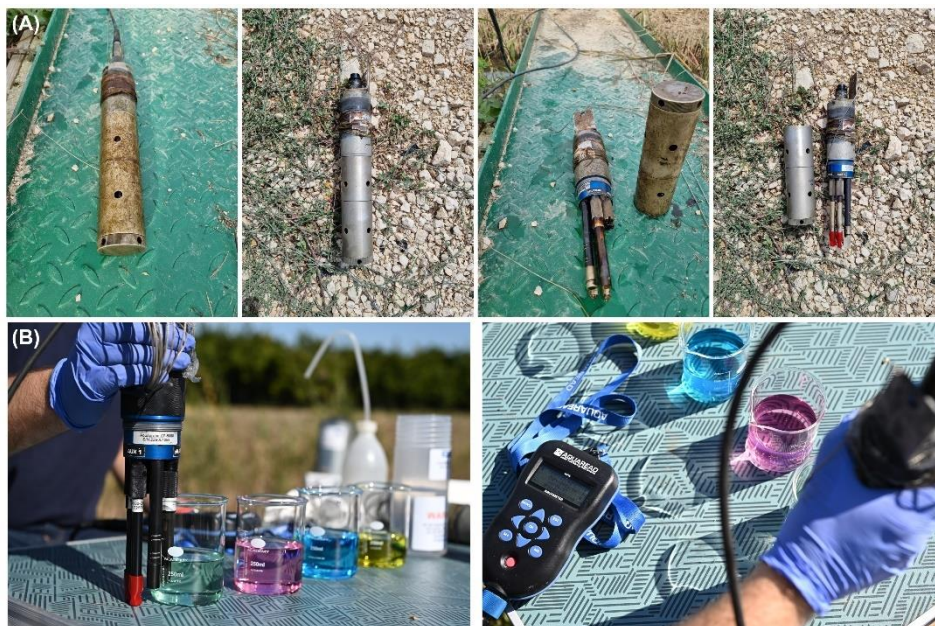
Slika 3.5. Instalirani senzori za monitoring tla (Izvor: D.Romić)

Za monitoring fizikalno-kemijskih pokazatelja površinskih i podzemnih voda uspostavljen je senzorski *in-situ* kontinuirani monitoring sustav koji se sastoji od VPS, modema za prikupljanje i prijenos podataka te sustava za napajanje. Sonde AP5000 (Aquaread, 2021) su instalirane u PVC cijev u melioracijskom kanalu za monitoring površinskih, odnosno u piezometre za monitoring podzemnih voda (Slika 3.6). Pomoću čeličnog užeta sonde su fiksirane na određenoj dubini. U odvodnim kanalima na LI Vidrice i LI Luke VPS su postavljene na način da se dno sonde nalazi nekoliko centimetara iznad dna kanala. U piezometru na LI Vidrice dno sonde nalazi se na 272,5 cm od površine tla, a na LI Luke 245,5 cm od površine tla. Kućište sonde izrađeno je od specijalnog aluminijskog aluminija i vodonepropusno je prema standardu IP68 čime je omogućena primjena u morskom okolišu. Sonde su opremljene sensorima i elektrodama za mjerenje: temperature vode ($^{\circ}\text{C}$), dubine vode (m), pH, ORP (mV) i električne vodljivosti – EC_w (dS m^{-1}). Također, VPS prikuplja podatke o ukupno otopljenim tvarima (mg L^{-1}) ili TDS, salinitetu (PSU), otpornosti (Ωcm) i specifičnoj gustoći morske vode (σ_T) ili SSG, ali obzirom da su to mjerenja koja su izvedena iz EC_w i visoko su korelirana, ona nisu korištena u statističkoj obradi i izradi modela. Dubinu vode VPS mjere na temelju razlike u barometarskom tlaku između senzora koji se nalazi unutar sonde koja je pod vodom i senzora koji se nalazi na površini tla unutar modema. Stoga vrijednost dubine vode ne odgovara stvarnoj vrijednosti dubine, nego vrijednosti razine vode od površine vodnog lica do senzora koji se nalazi na sredini sonde (15 cm od dna sonde). Iako je podatke moguće prikupljati u minimalno 10-minutnoj vremenskoj rezoluciji zbog produljenja životnog vijeka elektroda interval mjerenja postavljen je na satnu vremensku rezoluciju koja su uprosječena da bi se dobile i dnevne vrijednosti. Kako bi se osiguralo kontinuirano prikupljanje i slanje podataka, svaka VPS je spojena na vlastiti modem (Eijkelkamp GDT Prime Plus), a prikupljeni podaci su slani putem e-maila svakih 6 sati. Modem i VPS su autonomni i njihov rad osiguran je napajanjem putem baterije (12 V 20 Ah) koja se puni solarnim panelom. Baterija je od vanjskih nepovoljnih prilika zaštićena plastičnim kućištem dok je modem zaštićen unutar metalnog kućišta koje je instalirano pored kanala (Slika 3.6.A), odnosno piezometra (Slika 3.6.B), a na čijem se vrhu nalazi antena za prijenos podataka.



Slika 3.6. Uspostavljeni *in-situ* kontinuirani monitoring površinskih (A) i podzemnih (B) voda
(Izvor: M.Reljić)

Premda VPS omogućuju automatsko kontinuirano prikupljanje podataka, kako bi se osigurala pouzdanost mjerenja, neophodno je redovito čišćenje i kalibracija opreme sukladno uputama proizvođača. U vegetacijskom razdoblju (1. travanj – 30. rujn) sonde su kalibrirane jednom mjesečno dok su u izvanvegetacijskom razdoblju (1. listopad – 31. ožujak) kalibrirane jednom u dva mjeseca. Učestalije čišćenje i kalibracija u vegetacijskom razdoblju provedeni su zbog viših temperatura i intenzivnijeg biološkog utjecaja na površini sonde i elektroda (Slika 3.7.A). Elektroda za mjerenje pH kalibrirala se u 3 točke (7,00, 4,01 i 10,00), a ORP u jednoj točki (+250 mV) kao i EC_w ($1413 \mu S cm^{-1}$). Prilikom kalibracije, ali i mjerenja, VPS radi korekciju izmjerene vrijednosti EC_w na EC_w pri $25^\circ C$. Postupak kalibracije na terenu započinje spajanjem VPS na uređaj za očitavanje podataka i kalibraciju (Slika 3.7.B). Nakon provedene kalibracije, svaka VPS vraća se na svoje mjesto vodeći računa da su spojevi sonde i kabela dobro zategnuti kako ne bi došlo do ulaska vode i oštećenja same sonde.



Slika 3.7. Održavanje (A) i kalibracija (B) VPS (Izvor: M.Reljić; projekt DELTASAL)

Obzirom da su instalirani senzori i mjerna oprema od različitih proizvođača i svaki od njih ima jedinstven način prikupljanja i slanja podataka, razvijena je jedinstvena baza podataka (Reljić i sur., 2023). Podaci su prikupljeni od 1.9.2021. godine do 30.9.2022., a prije statističke obrade prikupljeni podaci su uprosječeni kako bi se dobile satne i dnevne vrijednosti.

3.3. Povijesni hidrološki i kemijski pokazatelji za potrebe modeliranja

Hrvatske vode dostavile su sirove podatke o satnim i dnevnim vodostajima rijeke Neretve na profilima Opuzen i Metković, vodostajima Male Neretve na ustavi Opuzen i ustavi ušće uzvodno te vodostaji na mareografu (ustava ušće nizvodno) za razdoblje rujan 2021.-kolovoz 2022. Uz vodostaje korišteni su podaci o EC_w rijeke Neretve na profilu Metković koji su prikupljeni VPS instalirane blizu površine vodnog lica.

3.4. Laboratorijska istraživanja

Sva ispitivanja su provedena u laboratoriju Zavoda za melioracije akreditiranom prema međunarodnoj normi 17025 za uzorkovanje i ispitivanje vode (HRN EN ISO/IEC 17021-1:2017). Analizirani su uzorci površinskih i podzemnih voda uzeti s istih lokacija na kojima su postavljene VPS u mjesečnim vremenskim intervalima (Romić i sur., 2014; Romić i sur., 2019b; Romić i sur., 2020b, Romić i sur., 2021; Romić i sur., 2022b; Romić i sur., 2023b). Uzorkovanje, transport i rukovanje uzorcima provedeno je sukladno normi HRN ISO 5667-6 (2016) za

površinske i HRN ISO 5667-11 (2011) za podzemne vode. Prema normi HRN EN 27888 (2008) određena je EC_w pomoću Mettler Toledo MPC konduktometra. Zakiseljenost (pH) je određena pomoću Schott Lab 870 pH metra (HRN ISO 10523:2012). Koncentracije Cl^- i SO_4^{2-} određene su metodom protočne analize uz spektrometrijsku detekciju korištenjem ionskog analizatora Skalar San++ Analyzer (HRN EN ISO 15682:2008). Koncentracije Ca^{2+} i Mg^{2+} određene su optičkom emisijskom spektrometrijom induktivno vezane plazme (ISO 11885:2007; EN ISO 11885:2009) korištenjem uređaja Varian VISTA-MPX CCD Simultaneous ICP-OES, dok su koncentracije Na^+ i K^+ određene metodom atomske apsorpcijske spektrometrije (HRN ISO 9964-3, 1998) uređajem AAS/AES PerkinElmer 3110. Mjere kontrole kvalitete su se provodile na unutarnjoj i vanjskoj razini. Unutarnja kontrola kvalitete ostvarena je korištenjem referentnih materijala, ponavljanjem mjerenja i upotrebom slijepih probi. Vanjska kontrola kvalitete ostvarena je sudjelovanjem u programu međulaboratorijske usporedbi za ispitivanje kakvoće voda u organizaciji koji IFA-Tullin, Center for Analytical Chemistry University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Department for Agrobiotechnology, Beč, Austrija.

3.5. Kontrola i vrednovanje *in-situ* monitoringa

Kako bi se proveo postupak vrednovanja mjerenja EC_w dobivenih klasičnim metodama monitoringa i *in-situ* kontinuiranim monitoringom provedene su usporedbe rezultata laboratorijskih ispitivanja i mjerenja dobivenih VPS u trenutku uzorkovanja vode. Uzorkovanje površinskih voda u mjesečnom intervalu provedeno je akreditiranim normiranim postupkom (HRN ISO 5667-6:2016), a podzemnih voda u mjesečnom intervalu normiranim postupkom (HRN ISO 5667-11:2011). U istom trenutku klasičnog uzorkovanja izdvojene su vrijednosti EC_w dobivene VPS. Na opisan način uspoređeno je 12 mjesečnih (rujan 2021.-kolovoz 2022) vrijednosti EC_w dobivenih s dva različita pristupa monitoringu. Kako bi se utvrdilo postoji li statistički značajna razlika između vrijednosti EC_w koja je dobivena istraživačkim monitoringom u odnosu na vrijednosti dobivene *in-situ* kontinuiranim monitoringom provedena je ANOVA. Pretpostavka ANOVA-e je da grupe pripadaju istom uzorku, odnosno da se njihove prosječne vrijednosti ne razlikuju značajno ($H_0: \bar{x}_A = \bar{x}_B$). Ukoliko je *F test* signifikantan, odbacuje se nulta hipoteza H_0 te se zaključuje da grupe ne pripadaju istom uzorku, odnosno da se statistički značajno razlikuju. Postavljena je razina značajnosti $p=0,05$. Nakon provedene ANOVA u kojoj je *F test* bio signifikantan sljedeći korak bio je testiranje značajnosti razlika aritmetičkih sredina Tukey HSD *post-hoc* testom višestruke usporedbe s razinom značajnosti $p<0,05$. Prihvatljivost metode mjerenja ocjenjena je na temelju procjenitelja R^2 , MAE i RMSE.

3.6. Statistička obrada podataka i modeliranje

Statistička obrada provedena je nad podacima prikupljenim klasičnim istraživačkim monitoringom u razdoblju 2010.-2022. te *in-situ* kontinuiranim monitoringom u razdoblju 1.9.2021.-31.8.2022. Sve statističke analize provedene su korištenjem softwera XLSTAT (Lumivero, 2023). Nad rezultatima koji su dobiveni laboratorijskim ispitivanjima provedena je deskriptivna statistika i korelacijska analiza. Od podataka koji su prikupljeni terenskim istraživanjima odabrana je 21 varijabla koja je korištena za deskriptivnu statistiku, korelacijsku analizu i izradu prognostičkih modela, te šest varijabli iz seta povijesnih podataka (Tablica 3.1).

Tablica 3.1. Varijable korištene za izradu predikcijskih modela

Izvor podataka	Varijabla	Mjerna jedinica
VPS	Dubina vode	(m)
	Temperatura vode	°C
	pH (25°C)	-
	ORP	mV
	EC _w (25°C)	dS m ⁻¹
Senzori u tlu	Vlažnost tla: 0-25cm; 25-50cm; 50-75cm; 75-100cm	m ³ m ⁻³
	EC _b : 0-25 cm; 25-50 cm; 50-75 cm;75-100cm	dS m ⁻¹
	Temperatura tla: 0-25cm; 25-50cm; 50-75cm; 75-100cm	°C
	Matrični potencijal:25 cm; 50 cm	kPa
Agrometeorološka stanica	Temperatura zraka	°C
	Oborine	mm
Povijesni podaci	Vodostaj Opuzen Neretva	cm
	Vodostaj Metković Neretva	cm
	Vodostaj Opuzen ustava nizvodno Mala Neretva	cm
	Vodostaj ustava ušće nizvodno Mala Neretva	cm
	Vodostaj ustava ušće uzvodno Mala Neretva	cm
	EC _w površina Neretva Metković	μS cm ⁻¹

Kako bi se utvrdilo postojanje statistički značajnih razlika između vrijednosti EC_w površinskih i podzemnih voda na istoj lokaciji (LI Vidrice i LI Luke), ali i između vrijednosti EC_w istih vrsta voda na različitim lokacijama provedena je ANOVA prema proceduri opisanoj u prethodnom potpoglavlju.

3.6.1. Vizualni prikaz kemijskog sastava površinskih i podzemnih voda

Rezultati ionskog sastava vizualizirani su korištenjem troosnih Piperovih dijagramima (Piper, 1944). Troosni dijagram često se koristi za grafički prikaz kemijskog sastava voda u hidrogeologiji jer omogućava prikaz kationskog i anionskog sastava na istom grafikonu. Ovisno o koncentraciji iona, vodu je moguće svrstati u jedan od četiri hidrokemijska tipa (facijesa) obzirom na katione i četiri tipa obzirom na anion. Rezultati ionskog sastava pojedinačnih uzoraka površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke u višegodišnjem monitoringu grupirani su prema vrijednostima EC_w u klase pogodnosti vode za navodnjavanje (Rhoades u sur., 1992).

3.6.2. Modeli kratkoročnog predviđanja stupnja zaslanjenosti

Za razvoj modela i predviđanje stupnja zaslanjenosti (EC_w) površinskih i podzemnih voda korištene su varijable prikupljene *in-situ* kontinuiranim monitoringom te povijesni podaci o vodostajima i EC_w rijeke Neretve (Tablica 3.1) za razdoblje 1.9.2021.-31.8.2022. Izrađena su dva predikcija modela strojnog učenja te jedan stohastički model vremenskih serija. Testirani su model višestruke (multiple) linearne regresije MLR i model ekstremnog pojačanja gradijenta XGB kao predstavnici modela strojnog učenja te integrirani autoregresijski model i model pomičnih prosjeka ARIMA kao predstavnik stohastičkog modela vremenskih serija. Predikcijski modeli MLR i XGB izrađeni su korištenjem podataka u satnoj i dnevnoj vremenskoj rezoluciji, dok su za ARIMA model korišteni samo podaci prikupljeni u dnevnoj vremenskoj rezoluciji. Svaka varijabla imala je 8760 satnih i 365 dnevnih podataka. Svi modeli korišteni su za predviđanje vrijednosti EC_w sedam, 14 i 30 dana unaprijed. Vrijednosti predviđanja validirane su stvarno izmjerenim mjerenjima EC_w koja su također dobivena korištenjem VPS u razdoblju 1.9.2022.-30.9.2022. Prije razvoja modela, nad prikupljenim vremenskim nizom podataka provedena je detaljna vizualna provjera kako bi se detektirale neuobičajene vrijednosti (eng. *outlieri*) i vrijednosti koje nedostaju, a koje se mogu javiti kao posljedica smetnji u prijenosu podataka zbog oštećenja opreme (Danielson, 2020), uklanjanja opreme radi održavanja i kalibracije (Reljić i sur., 2023) i slično (vidi poglavlje 3.2). Kako su za izradu predikcijskih modela neophodna kontinuirana mjerenja, vrijednosti koje nedostaju popunjene su postupkom linearne interpolacije između dva postojeća mjerenja. Razvijeni predikcijski modeli grafički su prikazani te su za svaki model izračunati procjenitelji MAE i RMSE.

3.6.2.1. Model MLR

Prvi je testiran model MLR kojim se utvrđuje odgovarajuća funkcionalna veza između jedne zavisne (y) i više nezavisnih varijabli (x), a može se opisati modelom:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (3.1)$$

gdje su:

y – zavisna varijabla

$x_1 \dots x_m$ – nezavisne varijable

$\beta_0 \dots \beta_m$ – regresijski koeficijenti

ε – rezidualna varijabla (slučajna pogreška).

Set podataka za izradu modela nasumično je podijeljen u omjeru 80:20 na set za treniranje modela i set za testiranje modela. Nezavisne varijable (prediktori) za model MLR odabrane su na temelju dva kriterija. Prvi kriterij bio je na temelju korelacijske analize isključiti jako korelirane varijable ($r \geq 0,7$) (Asuero et al., 2006). Drugi kriterij bio je odabir na temelju provedenog testa multikolinearnosti i vrijednosti faktora inflacije varijance VIF koji se izračunava prema formuli:

$$VIF_j = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (3.2)$$

gdje R^2 predstavlja koeficijent determinacije. Iz daljnje analize isključeni su oni prediktori koji su imali VIF veći od 10 (Forthofer i sur., 2007), a koji ukazuje na visok stupanj multikolinearnosti između prediktora. Cilj MLR je predviđanje promjene zavisne varijable (EC_w) kao reakcije na promjene u više nezavisnih varijabli, a koji je postignut metodom najmanjih kvadrata (*ordinary least square* – OLS). Najbolji model odabran je na temelju Akaikeovog informacijskog kriterija koji se računa prema formuli:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (3.3)$$

gdje je k broj parametara u modelu, a L maksimizirana vrijednost funkcije vjerodostojnosti za promatrani model. Vrijednost AIC sama po sebi nije značajna, ali je dobivena vrijednost korisna za usporedbu modela, pri čemu je poželjno je da model ima što nižu vrijednost AIC. Prognoze prema odabranom modelu grafički su prikazane te su izračunati procjenitelji MAE i RMSE.

3.6.2.2. Model XGB

Model XGB često je korišten model strojnog učenja kojim se mogu rješavati problemi i klasifikacije i regresije, a izgrađen je na temelju stabala odlučivanja. Algoritam pojačanja gradijenta predstavlja ansambl koji kombinira više slabijih osnovnih klasifikatora u jedan meta-klasifikator (Hrastić, 2019) kako bi se u konačnici dobio bolji model (Burkov, 2019). U ovom pristupu stabla se ne grade zasebno već slijedno pri čemu svako novo stablo uči na pogreškama koje su napravila prethodna stabla i pokušava minimizirati pogrešku. Kako bi pronašao optimalnu kombinaciju stabala, odnosno optimalnu vrijednost grananja, model koristi pohlepni algoritam (eng. *greedy algorithm*) pri čemu prvo sortira podatke prema vrijednostima značajki, a zatim prema tom redoslijedu posjećuje vrijednosti kako bi prikupio podatke o gradijentnoj statistici za ocjenu strukture prema jednadžbi (Chen i Guestrin, 2016):

$$G_{split} = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sum_{i \in I_L} g_i)^2}{\sum_{i \in I_L} h_i + \lambda} + \frac{(\sum_{i \in I_R} g_i)^2}{\sum_{i \in I_R} h_i + \lambda} - \frac{(\sum_{i \in I} g_i)^2}{\sum_{i \in I} h_i + \lambda} \right] - \gamma \quad (3.4)$$

Gdje g_i i h_i predstavljaju prvi i drugi redoslijed gradijenta na funkciji gubitka, I_L i I_R predstavljaju skupove uzoraka lijeve i desne strane stabla, λ je konstanta, a γ je parametar kompleksnosti. Algoritam se zaustavlja kada je $G < 0$, a najviša vrijednost G označava optimalno grananje na čvoru (Ferlatti, 2019). Kod razvoja modela XGB korištene su iste nezavisne varijable kao u najboljem modelu MLR i isti nasumično odabrani set podataka za trening i testiranje modela (80:20) kako bi dobiveni rezultati i predikcije bili usporedivi. Kako bi se odabrao optimalan model, testirano je nekoliko hiperparametara koje je moguće prilagođavati prilikom izrade modela XGB. Broj stabala je u svim testiranim modelima bio jednak i postavljen na uobičajenu (eng. *default*) vrijednost od 100. Od ostalih hiperparametara testirane su vrijednosti maksimalne dubine stabla (eng. *max depth*) 2, 4, 6 i 8; vrijednosti stope učenja (eng. *learning rate*) 0,1; 0,3; 0,5 i 1; minimalna veličina djeteta (eng. *minimum son size*) 1, 2, 5 i 10 te vrijednosti lambda (L_2) 0; 0,1; 0,5 i 1. Prvo je testirana dubina stabla koja od odabranih hiperparametara ima najveći utjecaj na poboljšanje modela, a zatim ostali hiperparametri. Kao najbolji model odabran je onaj koji je imao najmanje vrijednosti pogrešaka MAE i RMSE u predviđanju vrijednosti EC_w .

3.6.2.3. ARIMA model

Za predviđanje vrijednosti EC_w stohastičkim modelom vremenskih serija odabran je ARIMA model kao jedan od najčešće korištenih modela vremenskih serija za prognoziranje budućih vrijednosti. Model se temelji na kombinaciji dvaju stohastičkih modela (autoregresijski model –

AR i model pomičnih prosjeka – MA) te postupku diferenciranja kojim se osigurava stacionarnost vremenske serije (Bošnjak, 2019). Stoga su hiperparametri modela upravo red autoregresijskog modela (p), red diferenciranja (d) i red modela pomičnih prosjeka (q). ARIMA model sastoji se od:

1. AR model reda (p) dan je izrazom:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (3.5)$$

Modelom se tekući član Y_t izražava kao linearna kombinacija članova $\{Y_{t_j}, j=1,2,\dots,p\}$, nepoznatih parametara $\phi_j, j=1,2,\dots,p$ i tekućeg člana čistog stacionarnog stohastičkog procesa $\{e_j\}$ (Šošić, 2004).

2. MA model reda (q) dan je izrazom:

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (3.6)$$

Modelom je tekući član procesa Y_t izražen kao linearna kombinacija tekućeg člana čistog stohastičkog procesa $\{e_j\}$ i njegovih (parametrima) ponderiranih proteklih članova (Šošić, 2004).

Stacionarnost kao jedan od osnovnih preuvjeta izrade ARIMA modela testirana je proširenim Dickey-Fullerovim testom ADF. Nulta hipoteza H_0 testa je da postoji jedinični korijen u autoregresijskom modelu ukazujući na to da je serija nestacionarna. Ukoliko je izračunata p vrijednost niža od postavljene razine signifikantnosti od 0,05 H_0 se odbacuje i prihvaća se alternativna hipoteza H_a da je vremenska serija stacionarna. Nestacionarne vremenske serije transformirane su u stacionarne metodom diferenciranja prvog reda koja se provodi prema izrazu:

$$y'_t = y_t - y_{t-1} \quad (3.7)$$

gdje je diferencirana vrijednost y'_t jednaka razlici dvije uzastopne vrijednosti. Nakon diferenciranja ponovno je proveden ADF test te se nakon potvrde stacionarnosti serije pristupilo odabiru modela. Ovisno o izgledu ACF i PACF odabran je red AR i MA modela, odnosno hiperparametri p i q . Testirani su modeli čije vrijednosti ACF i PACF prelaze liniju intervala pouzdanosti (95 %) pri čemu je promatrano razdoblje do maksimalno 5 pomaka unatrag. Najbolji model odabran je na temelju najniže vrijednosti AIC kriterija, a potvrda odabira najboljeg modela napravljena je u R 4.2.3. programskom jeziku (R Core, Team, 2023) korištenjem paketa *forecast* i *auto.arima* funkcije (Hyndman i sur., 2023). Za odabrani model

izrađena je prognoza koja je grafički prikazana te su izračunati procjenitelji modela MAE i RMSE.

3.6.3. Ocjena pouzdanosti predikcijskih modela

Za ocjenu pouzdanosti razvijenih modela korišteni su R^2 , MAE i RMSE.

Koeficijent determinacije predstavlja proporciju varijance kriterijske varijable koju je moguće objasniti prediktorskom varijablom (Di Bucchianico, 2007), a izračunava se prema izrazu:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (3.8)$$

gdje su \bar{y} prosjek svih mjerenja, y_i je vrijednost individualnog mjerenja, a \hat{y}_i predviđena vrijednost y_i dobivena modelom.

Srednja apsolutna pogreška predstavljaju prosječnu apsolutnu razliku između izmjerene i predviđene vrijednosti (Nguyen i sur., 2021), a računaju se prema izrazima:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3.9)$$

gdje su y_i izmjerena vrijednost, a \hat{y}_i predviđena vrijednost.

Korijen srednje kvadratne pogreške označava standardno odstupanje razlike između izmjerene i predviđene vrijednosti (Cihan, 2021), a računa se prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.10)$$

4. REZULTATI

4.1. Rezultati istraživačkog monitoringa površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje 2010.-2022.

Rezultati deskriptivne statistike kemijskog sastava površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke prikazani su u Tablici 4.1. Prosječna vrijednost EC_w površinske vode na LI Vidrice iznosila je $2,4 \text{ dS m}^{-1}$ dok je u podzemnoj iznosila $8,9 \text{ dS m}^{-1}$ s visokom koeficijentom varijabilnosti u površinskoj ($CV=0,50$) i podzemnoj vodi ($CV=0,40$). Prema prosječno utvrđenim koncentracijama kationa dominantan je bio Na^+ u površinskoj (322 mg L^{-1}) i podzemnoj vodi (1393 mg L^{-1}), a isti redoslijed kationa ($Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$) utvrđen je u površinskoj i podzemnoj vodi. U anionskom sastavu dominirali su ioni Cl^- s 4,1 puta većom prosječnom koncentracijom u podzemnoj (2492 mg L^{-1}) u odnosu na površinsku vodu (610 mg L^{-1}).

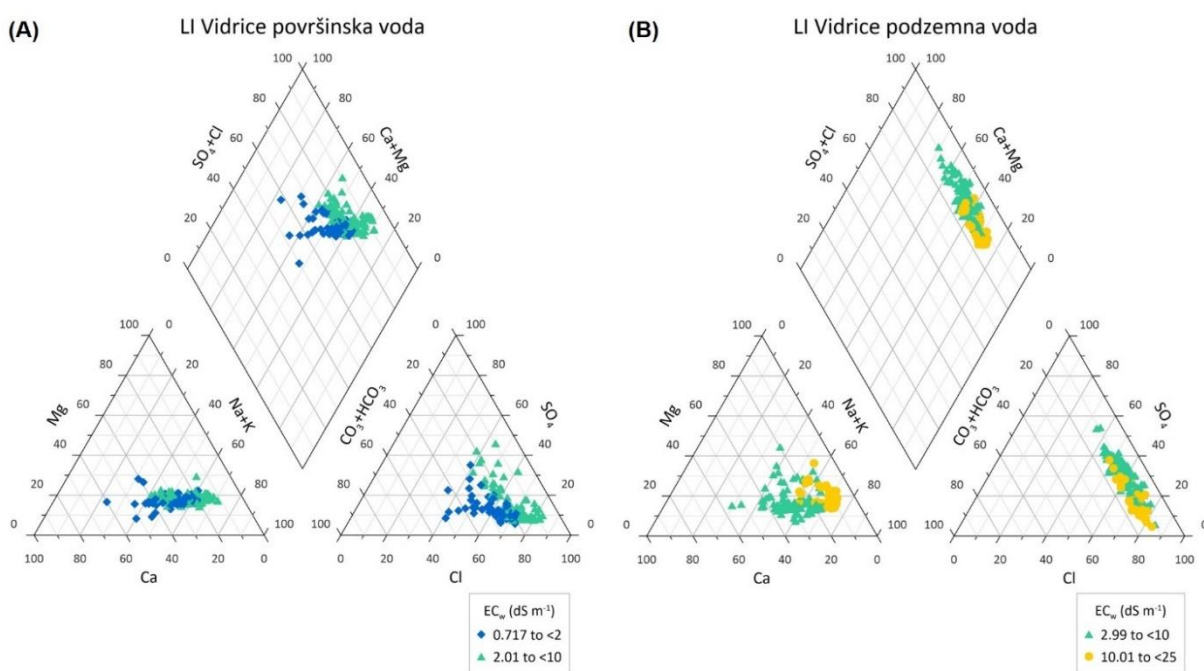
Na LI Luke viša prosječna vrijednost EC_w utvrđena je u površinskoj vodi ($8,3 \text{ dS m}^{-1}$) s minimumom od svega $0,19 \text{ dS m}^{-1}$ i maksimumom od čak 36 dS m^{-1} (Tablica 4.1) te vrlo visokim stupnjem varijabilnosti ($CV=0,65$). U podzemnoj vodi prosječna vrijednost EC_w iznosila je $2,9 \text{ dS m}^{-1}$ također s utvrđenim visokim stupnjem varijabilnosti ($CV=0,52$). U kemijskom sastavu površinskih voda prema prosječnim koncentracijama dominantni kation bio je Na^+ s prosječno utvrđenom koncentracijom od 1372 mg L^{-1} , a redoslijed kationa bio je $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$. Prema prosječnoj koncentraciji najzastupljeniji anion u površinskoj vodi bio je Cl^- (2606 mg L^{-1}). U podzemnoj vodi utvrđene su niže koncentracije svih analiziranih kationa u odnosu na površinsku vodu, a najzastupljeniji bio je Ca^{2+} s prosječnom vrijednosti od 404 mg L^{-1} , a redoslijed kationa bio je $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$. Od analiziranih aniona u kemijskom sastavu podzemne vode na LI Luke prema prosječnim koncentracijama dominantni anion bio je SO_4^{2-} (821 mg L^{-1}).

Tablica 4.1. Deskriptivna statistika EC_w, pH i ionskog sastava površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje 2010.-2022.

Lokacija	Vrsta vode	Statistika	EC _w	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
			(25°C) dS m ⁻¹	(25°C)	mg L ⁻¹						
Vidrice	Površinska voda	N	156	156	156	156	156	156	156	156	156
		Prosjeak	2,4	7,7	123	57	15	322	300	610	190
		Medijan	2,1	7,8	101	46	12	275	287	505	114
		Minimum	0,72	7,3	67	14	4,8	50	214	126	46
		Maksimum	9,2	8,3	394	255	69	1596	543	2869	1357
		St. dev.	1,2	0,17	57	34	9,0	198	70	389	204
		CV	0,50	0,02	0,46	0,60	0,60	0,61	0,23	0,64	1,1
	Podzemna voda	N	156	156	156	156	156	156	156	156	156
		Prosjeak	8,9	7,5	440	233	123	1393	776	2492	1146
		Medijan	8,4	7,5	402	204	113	1329	613	2306	1101
		Minimum	3,0	7,0	200	51	27	353	232	678	245
		Maksimum	21	8,0	818	768	316	4010	2501	9040	2992
		St. dev.	3,6	0,20	127	129	60	707	431	1317	426
		CV	0,40	0,03	0,29	0,55	0,49	0,51	0,56	0,53	0,37
Luke	Površinska voda	N	156	156	156	156	156	156	156	156	156
		Prosjeak	8,3	7,5	287	198	49	1372	381	2606	709
		Medijan	7,3	7,5	217	167	42	1146	360	2226	514
		Minimum	0,19	6,7	45	12	6,0	12,0	107	11	171
		Maksimum	36	8,4	830	886	245	7469	775	13125	2674
		St. dev.	5,4	0,25	164	132	31	1030	106	1857	511
		CV	0,65	0,03	0,57	0,67	0,63	0,75	0,28	0,71	0,72
	Podzemna voda	N	126	126	126	126	126	126	126	126	126
		Prosjeak	2,9	7,4	404	72	24	213	319	505	821
		Medijan	3,2	7,5	465	67	18	183	329	395	946
		Minimum	0,29	6,4	34	5,8	5,1	7,6	38	14	0,50
		Maksimum	6,7	8,0	846	247	68,0	901	702	1742	2078
		St. dev.	1,5	0,32	216	42	14	141	153	344	542
		CV	0,52	0,04	0,53	0,58	0,58	0,66	0,48	0,68	0,66

CV–koeficijent varijacije

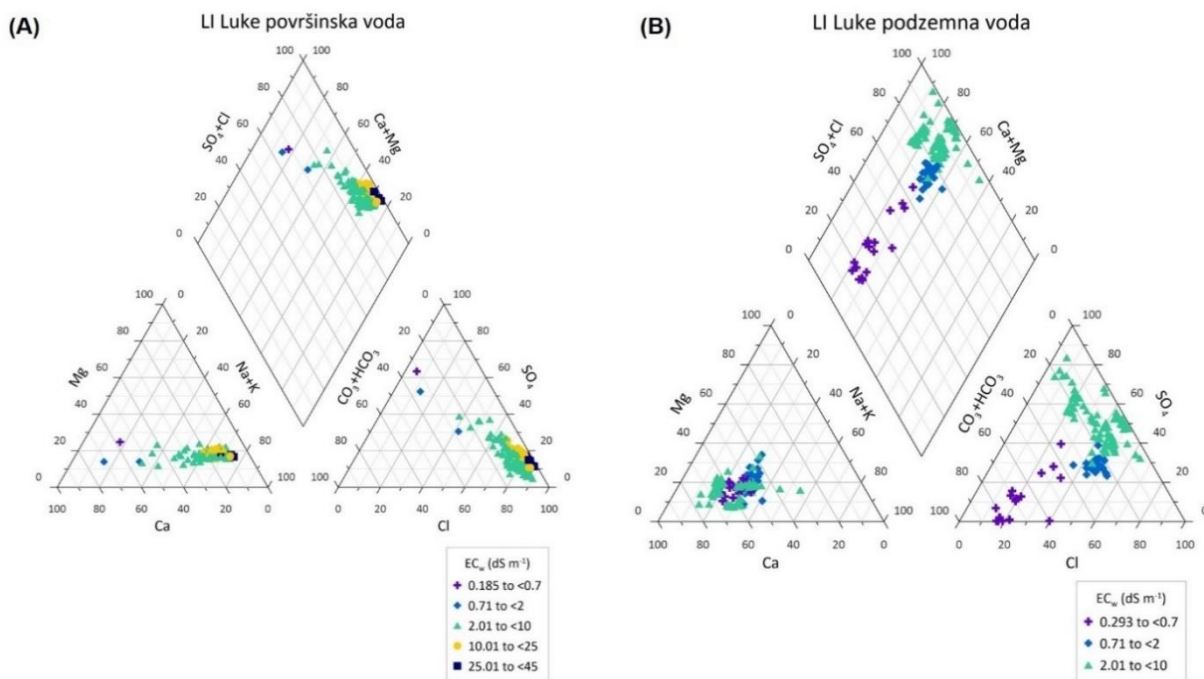
Većina uzoraka površinske vode na LI Vidrice je klasificirana kao malo zaslanjena, te prema koncentraciji glavnih aniona i kationa dominantno pripada Ca-Na-HCO₃-Cl i Ca-Na-Cl hidrokemijskom facijesu, dok srednje zaslanjeni uzorci pripadaju Ca-Na-Cl i Na-Cl facijesima (Slika 4.1.A). Uzorci podzemne vode srednje zaslanjenosti migriraju između Ca-Na-Cl i Na-Cl hidrokemijskih facijesa (Slika 4.1.B). Međuzavisnost između analiziranih parametara prikazana je pomoću korelacijske matrice (Prilog, Tablica 8.2). Svi parametri analizirani u površinskoj vodi su međusobno interkorelirani na razini značajnosti od 0,05. Važno je istaknuti da je između EC_w i iona Na⁺, Mg²⁺ i Cl⁻ utvrđena vrlo jaka korelacijska veza (r>0,9), a jaka korelacijska veza (r>0,7) između EC_w i K⁺. U podzemnoj vodi vrlo jaka korelacijska veza utvrđena je između EC_w i Na⁺ (0,949) te EC_w i Cl⁻ (0,923), a jaka korelacija između EC_w i Mg²⁺ (0,708) te EC_w i HCO₃⁻ (0,845) (Prilog, Tablica 8.3).



Slika 4.1. Prikaz kemijskog sastava površinske (A) i podzemne (B) vode Piperovim dijagramom na LI Vidrice

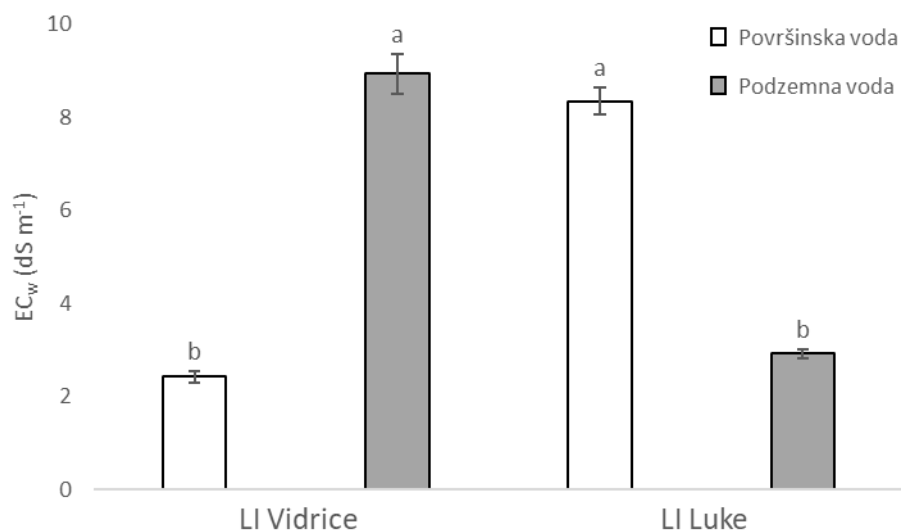
Iz Piperovog dijagrama vidljivo je kako većina uzoraka s utvrđenim vrijednostima EC_w > 2,0 dS m⁻¹ u površinskoj vodi na LI Luke pripada Na-Cl hidrokeokemijskom facijesu te su vrlo bliski točki koja predstavlja prosječni sastav morske vode (Slika 4.2.A). Podzemna voda na LI Luke mijenja se iz kalcij-karbonatnog facijesa prema facijesu u kojem su dominantni kloridni i sulfatni anioni koji potiskuju bikarbonatni ion (Slika 4.2.B).

Međusobna zavisnost između analiziranih parametara utvrđena je korelacijskom analizom, a rezultati su prikazani korelacijskom matricom (Prilog, Tablica 8.4). Pozitivna korelacijska veza utvrđena je između EC_w i svih analiziranih iona, a varirala je od slabe za HCO_3^- (0,279) do vrlo jake za Mg^{2+} (0,941), K^+ (0,958), Na^+ (0,975) te Cl^- (0,952). U podzemnoj vodi na LI Luke korelacijska povezanost između EC_w i svih iona osim K^+ bila je pozitivna i signifikantna na razini značajnosti 0,01 pri čemu je korelacijska veza bila vrlo jaka za Na^+ (0,949) i jaka za Ca^{2+} (0,845), Cl^- (0,880) i SO_4^{2-} (0,780) (Prilog, Tablica 8.5).



Slika 4.2. Prikaz kemijskog sastava površinske (A) i podzemne vode(B) Piperovim dijagramom na LI Luke

Rezultati provedene ANOVA-e i *post-hoc* Tukey HSD testa jasno pokazuju postojanje statistički značajne razlike u vrijednostima EC_w između površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice kao i na LI Luke (Slika 4.3). Također, statistički su se značajno razlikovale vrijednosti EC_w površinskih voda između dvije LI i podzemnih voda između dvije LI (Slika 4.3). Dobiveni rezultati sugeriraju na odvijanje različitih procesa koji rezultiraju zaslanjivanjem površinskih, odnosno podzemnih voda na odabranim lokacijama.



Slika 4.3. Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom monitoringu za 2010.–2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

4.2. Rezultati istraživačkog monitoringa površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021.- kolovoz 2022.

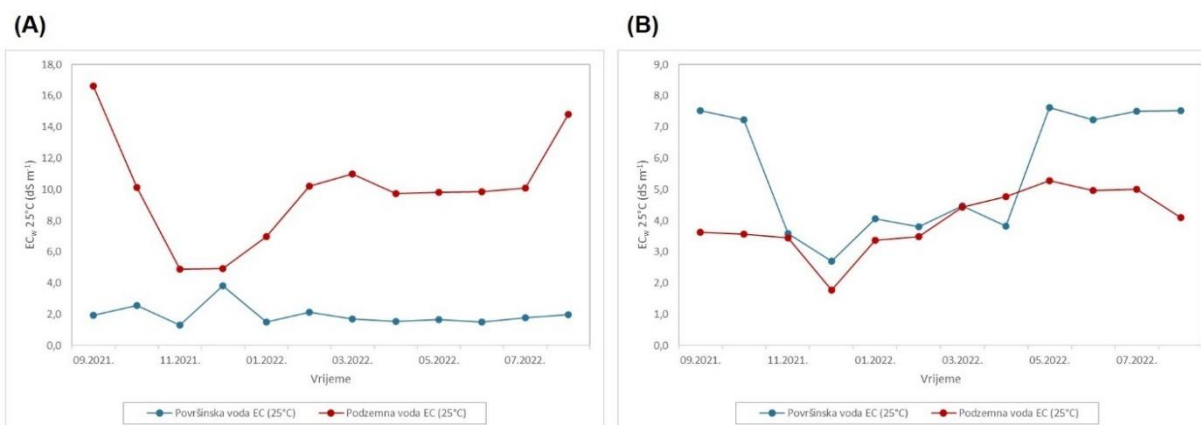
Iz ukupnog seta podataka istraživačkog monitoringa izdvojen je isječak koji odgovara razdoblju u kojem su provedena *in-situ* kontinuirana mjerenja stupnja zasljenosti površinskih i podzemnih voda. Rezultati deskriptivne statistike prikazani su u Tablici 4.2. U površinskoj vodi na LI Vidrice prosječna EC_w iznosila je $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ dok je gotovo pet puta veća vrijednost utvrđena u podzemnoj vodi ($9,9 \text{ dS m}^{-1}$). Prema prosječno utvrđenim koncentracijama dominantni kation bio je Na^+ u površinskoj (231 mg L^{-1}) i podzemnoj vodi (1383 mg L^{-1}) dok je Cl^- bio dominantni anion u površinskoj (425 mg L^{-1}) i podzemnoj vodi (2251 mg L^{-1}). Visoka varijabilnost parametara EC_w i koncentracije glavnih iona utvrđena je i u površinskoj i podzemnoj vodi na LI Vidrice. Na LI Luke prosječna vrijednost EC_w površinske vode bila je viša ($5,6 \text{ dS m}^{-1}$) u odnosu na EC_w podzemne vode ($4,0 \text{ dS m}^{-1}$) (Tablica 4.2). Također, u površinskoj vodi utvrđena je za 10 % veća varijabilnost parametra EC_w u odnosu na podzemnu vodu. U ionskom sastavu površinske vode na LI Luke dominantni ioni bili su Na^+ i Cl^- s prosječno utvrđenim koncentracijama od 825 mg L^{-1} odnosno 1578 mg L^{-1} . U kemijskom sastavu podzemne vode prema prosječno utvrđenim koncentracijama dominantni kation bio je Ca^{2+} (585 mg L^{-1}) iza kojeg slijedi Na^+ (311 mg L^{-1}). Dominantni anion bio je SO_4^{2-} (1040 mg L^{-1}), a slijedeći po zastupljenosti bio je Cl^- (650 mg L^{-1}).

Tablica 4.2. Deskriptivna statistika EC_w, pH i ionskog sastava površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Lokacija	Vrsta vode	Statistika	EC _w	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
			(25°C)	(25°C)							
			dS m ⁻¹		mg L ⁻¹						
Vidrice	Površinska voda	N	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		Prosjeak	2,0	7,8	105	39	10	231	272	425	152
		Medijan	1,7	7,8	91	31	8,6	214	259	404	86
		Minimum	1,3	7,3	73	27	6,8	121	214	226	67
		Maksimum	3,8	8,1	281	105	29	402	519	632	771
		St. dev.	0,68	0,24	57	22	6,0	79	82	126	197
		CV	0,35	0,03	0,55	0,56	0,59	0,34	0,30	0,30	1,30
	Podzemna voda	N	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		Prosjeak	9,9	7,6	460	337	86	1383	1023	2251	2022
		Medijan	10	7,6	410	384	85	1386	1068	2149	1907
		Minimum	4,9	7,2	365	106	49	353	336	678	1415
		Maksimum	17	7,9	635	535	141	2845	1891	4824	2992
		St. dev.	3,4	0,22	94	136	25	698	457	1169	541
		CV	0,34	0,03	0,20	0,40	0,29	0,50	0,45	0,52	0,27
Luke	Površinska voda	N	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		Prosjeak	5,6	7,5	179	109	31	825	302	1578	370
		Medijan	5,9	7,5	150	110	31	832	287	1630	376
		Minimum	2,7	7,3	129	47	12	218	250	370	208
		Maksimum	7,6	8,0	309	159	45	1196	390	2379	514
		St. dev.	2,0	0,19	57	40	12	357	40	720	103
		CV	0,35	0,03	0,32	0,37	0,38	0,43	0,13	0,46	0,28
	Podzemna voda	N	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		Prosjeak	4,0	7,3	585	48	8,8	311	405	660	1040
		Medijan	3,9	7,3	565	50	9,4	310	375	650	1087
		Minimum	1,8	6,9	213	20	5,1	138	305	197	212
		Maksimum	5,3	7,8	846	63	12	406	702	917	1580
		St. dev.	0,98	0,25	173	11	2,5	75	109	207	388
		CV	0,25	0,03	0,29	0,23	0,29	0,24	0,27	0,32	0,37

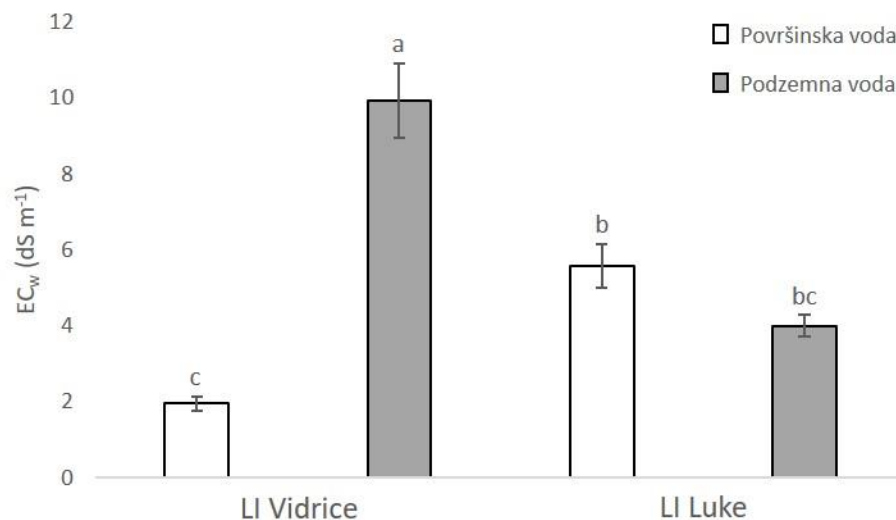
CV – koeficijent varijacije

U površinskoj vodi na LI Vidrice vrijednost EC_w (N=12) kretala se u uskom rasponu od $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ do $3,8 \text{ dS m}^{-1}$, dok se kod podzemne vode uočava izražena sezonska varijabilnost (Slika 4.4.A). U izvanvegetacijskom razdoblju vrijednost EC_w podzemne vode naglo opada s maksimalno utvrđenih 17 dS m^{-1} u rujnu do minimalnih $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ u studenom. Prema početku vegetacijskog razdoblja uočava se porast vrijednosti EC_w čija je vrijednost u vegetacijskom razdoblju uglavnom bila $> 10 \text{ dS m}^{-1}$. Na LI Luke slična sezonska dinamika uočava se u površinskoj i u podzemnoj vodi (Slika 4.4.B). Minimalne vrijednosti EC_w utvrđene su u izvanvegetacijskom razdoblju (prosincu 2021.) i iznosile su $2,7 \text{ dS m}^{-1}$ u površinskoj i $1,8 \text{ dS m}^{-1}$ u podzemnoj vodi. Vegetacijsko razdoblje karakterizirale su više vrijednosti EC_w s utvrđenim maksimumima od $7,6 \text{ dS m}^{-1}$ u površinskoj i $5,3 \text{ dS m}^{-1}$ u podzemnoj vodi.



Slika 4.4. Dinamika vrijednosti EC_w površinske i podzemne vode na LI Vidrice (A) i LI Luke (B) u istraživačkom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Rezultati provedene ANOVA-e i *post-hoc* Tukey HSD testa pokazuju da se vrijednosti EC_w u površinski i podzemnim vodama između lokacija statistički značajno razlikuju (Slika 4.5). Također, statistički značajne razlike utvrđene su između EC_w površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice. Međutim, na LI Luke prosječno utvrđene vrijednosti EC_w površinskih i podzemnih voda nisu se statistički značajno razlikovale.



Slika 4.5. Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

4.3. *In-situ* kontinuirani monitoring površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Rezultati deskriptivne statistike za pet pokazatelja (EC_w , dubina, temperatura, pH i ORP vode) prikupljeni *in-situ* kontinuiranim monitoringom u satnoj vremenskoj rezoluciji na LI Vidrice prikazani su u Tablici 4.3. Veća varijabilnost svih analiziranih pokazatelja utvrđena je u površinskoj u odnosu na podzemnu vodu. Kao i klasičnim, *in-situ* kontinuiranim monitoringom više prosječne vrijednosti EC_w utvrđene su u podzemnoj (12 dS m^{-1}) u odnosu na površinsku vodu ($2,1 \text{ dS m}^{-1}$). Vrijednosti ostalih pokazatelja korištenih u izradi modela u satnoj vremenskoj rezoluciji prikazani su u Tablici 4.3.

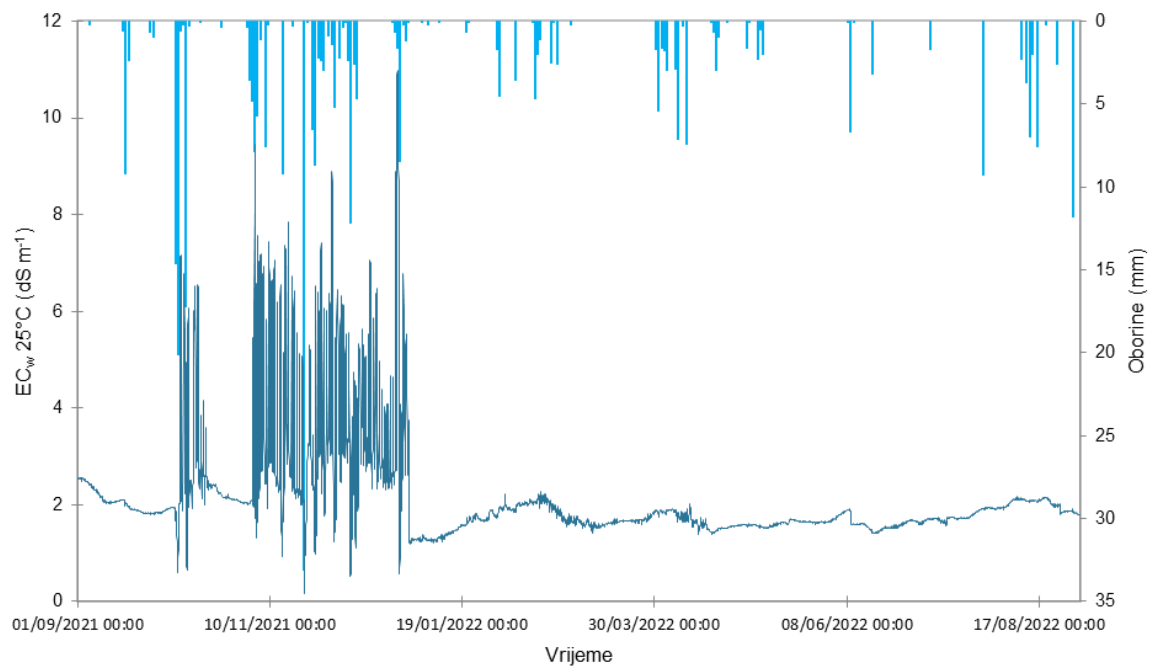
Tablica 4.3. Deskriptivna statistika fizikalno-kemijskih pokazatelja površinske i podzemne vode na LI Vidrice za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Lokacija	Vrsta vode	Statistika	Satna vremenska rezolucija				
			EC _w dS m ⁻¹	Dubina m	Temperatura °C	pH -	ORP mV
Vidrice	Površinska voda	N	8760	8760	8760	8760	8760
		Prosjeak	2,1	0,42	17	7,7	347
		Medijan	1,8	0,44	16	7,7	427
		Minimum	0,17	0,01	2,1	7,0	-410
		Maksimum	11	0,97	32	8,6	509
		St. dev.	1,1	0,19	7,7	0,34	227
		CV	0,52	0,45	0,45	0,04	0,65
	Podzemna voda	N	8760	8760	8760	8760	8760
		Prosjeak	12	1,5	16	7,2	-408
		Medijan	10	1,5	16	7,2	-407
		Minimum	6,3	0,74	13	6,2	-500
		Maksimum	18	2,5	20	7,9	-121
		St. dev.	2,6	0,44	2,5	0,27	39
		CV	0,22	0,29	0,16	0,04	-0,10

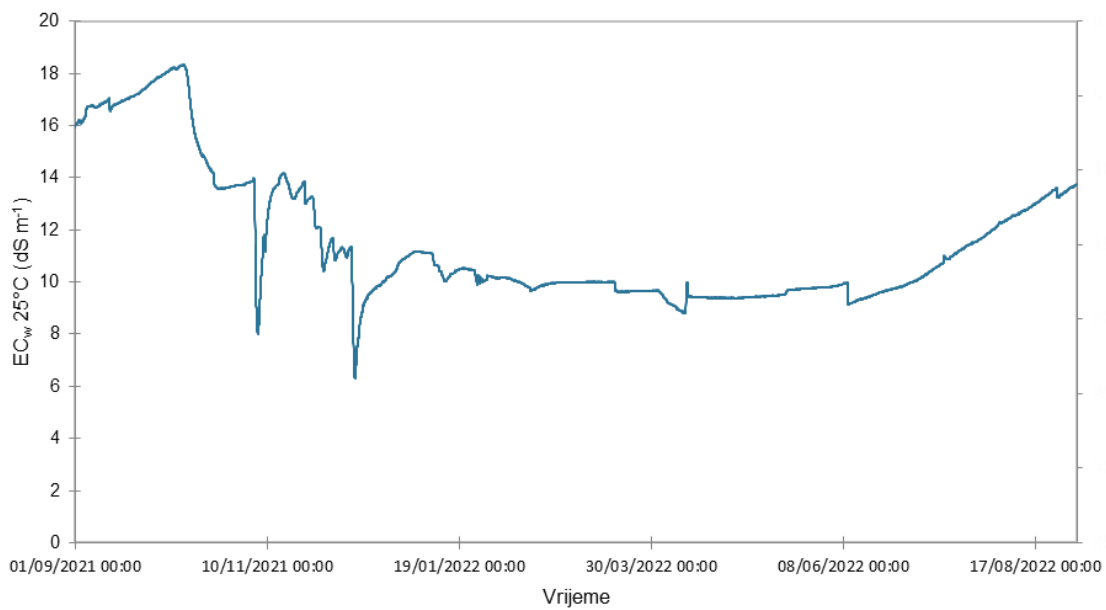
CV-koeficijent varijacije

Dinamika oborina i EC_w površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice u satnoj vremenskoj rezoluciji prikaza je na Slici 4.6. Tijekom analiziranog razdoblja na području je ukupno palo 916,7 mm oborina, od toga 79 % (721,3 mm) u izvanvegetacijskom razdoblju. Dinamika promjene EC_w razlikovala se u površinskoj i podzemnoj vodi. Obilne i intenzivne oborine u izvanvegetacijskom razdoblju rezultirale su vrlo dinamičnim promjenama EC_w u površinskoj vodi pri čemu su se satne vrijednosti mijenjale u rasponu od 0,17 do 11 dS m⁻¹ (Slika 4.6.A). U isto vrijeme u podzemnoj vodi svaki oborinski događaj rezultirao je naglim padom vrijednosti EC_w (Slika 4.6.B). Manje dinamične i sporije promjene stupnja zasljenosti podzemnih voda u odnosu na površinske vode rezultat su interakcije većeg broja parametara kao što su pedološke značajke, način prihranjivanja vodonosnika, udaljenost od glavnih vodotoka, ali i mogući antropogeni utjecaj kao što je rad CS.

(A)

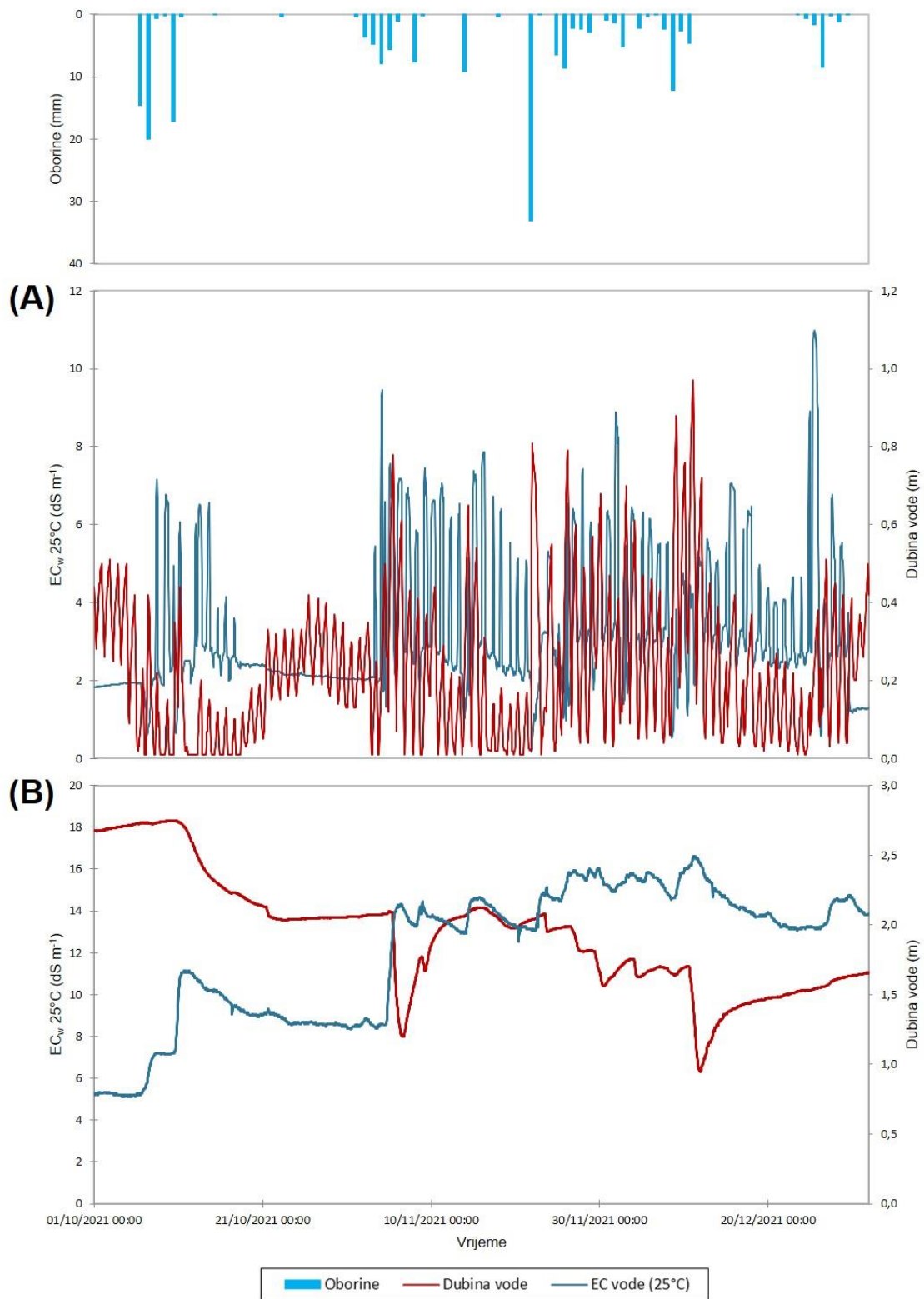


(B)



Slika 4.6. Dinamika oborina i EC_w površinske (A) i podzemne vode (B) na LI Vidrice u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Kako bi se procijenili utjecaji prirodnih i antropogenih čimbenika na zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda dio izvanvegetacijskog razdoblja u kojem su utvrđene najdinamičnije promjene EC_w (1.10.-31.12.2021.) izdvojeno je i analizirano. Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske vode prikazana je na Slici 4.7.A. Iz grafičkog prikaza jasno je vidljivo da se razina vode u kanalu mijenjala svakodnevno u gotovo pravilnom intervalu što odgovara režimu rada CS. Promjene amplitude u razdobljima intenzivnih i obilnih oborina mogu biti rezultat pojačanog crpljenja i promjene u režimu rada CS. Uz promjene u dubini vode u melioracijskom kanalu, *in-situ* kontinuiranim monitoringom površinskih voda utvrđene su i dinamične promjene EC_w . Vrijednosti EC_w mijenjale su se pod utjecajem oborina, međutim vrlo širok raspon EC_w (0,17 dS m⁻¹ - 11 dS m⁻¹) sugerira da su takve promjene bile pod utjecajem i nekih drugih čimbenika. U istom razdoblju, promjene u dubini i stupnju zaslanjenosti podzemne vode bile su manje dinamične (Slika 4.7.B). Svaki oborinski događaj rezultirao je prihranjivanjem piezometra i povećanjem razine vode. Međutim, vrlo brzi pad razine koji bi uslijedio sugerira na promjenu u režimu rada crpne stanice i pojačano crpljenje u svrhu zaštite područja od suvišnih voda. Dotokom svježije oborinske vode prema piezometru dolazi do osvježavanja plitke podzemne vode i snižavanja vrijednosti EC_w što je jasno vidljivo na izdvojenom segmentu (Slika 4.7.B).



Slika 4.7. Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske (A) i podzemne vode (B) u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja na LI Vidrice

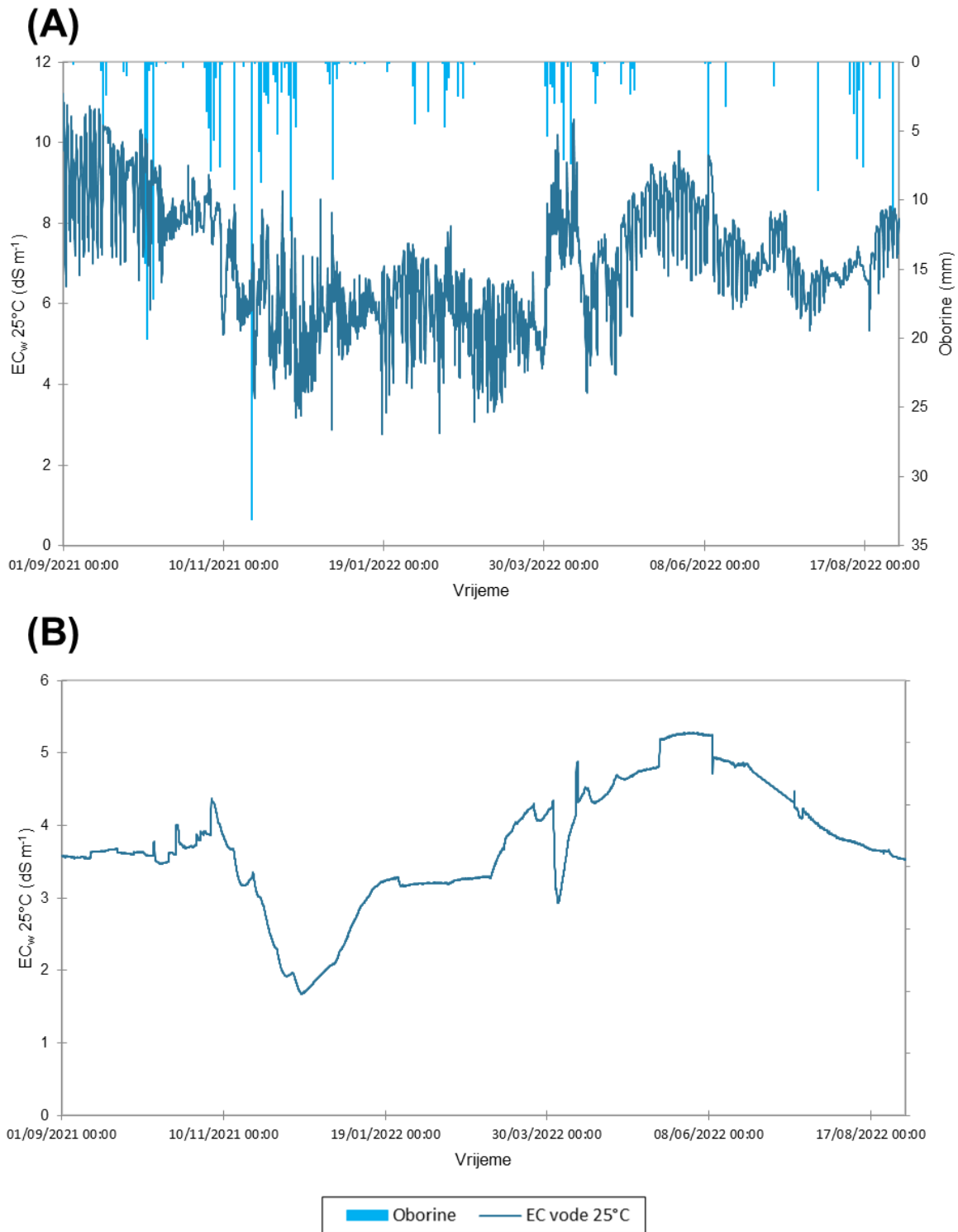
Rezultati deskriptivne statistike pet pokazatelja (EC_w , dubina, temperatura, pH i ORP vode) u podzemnoj i tri pokazatelja (EC_w , dubina i temperatura vode) u površinskoj vodi prikupljeni *in-situ* kontinuiranim monitoringom na LI Luke prikazani su u Tablici 4.4. Viša prosječna vrijednost EC_w utvrđena je u površinskoj ($7,0 \text{ dS m}^{-1}$) u odnosu na podzemnu vodu ($3,7 \text{ dS m}^{-1}$), a osnovni statistički pokazatelji ostalih mjerenih parametara korištenih u razvoju modela prikazani su u Tablici 4.4.

Tablica 4.4. Deskriptivna statistika fizikalno-kemijskih pokazatelja površinske i podzemne vode na LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Lokacija	Vrsta vode	Statistika	Satna vremenska rezolucija				
			EC_w dS m^{-1}	Dubina m	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	pH -	ORP mV
Luke	Površinska voda	N	8760	8760	8760	-	-
		Prosjek	7,0	0,60	17	-	-
		Medijan	6,9	0,61	16	-	-
		Minimum	2,8	0,16	2,8	-	-
		Maksimum	11	1,3	27	-	-
		St. dev.	1,5	0,14	6,4	-	-
		CV	0,21	0,23	0,38	-	-
	Podzemna voda	N	8760	8760	8760	8760	8760
		Prosjek	3,7	0,79	17	7,0	127
		Medijan	3,7	0,72	17	7,0	294
		Minimum	1,7	0,01	13	5,8	-450
		Maksimum	5,3	2,0	21	7,4	478
		St. dev.	0,84	0,42	2,4	0,15	315
		CV	0,23	0,53	0,14	0,02	2,5

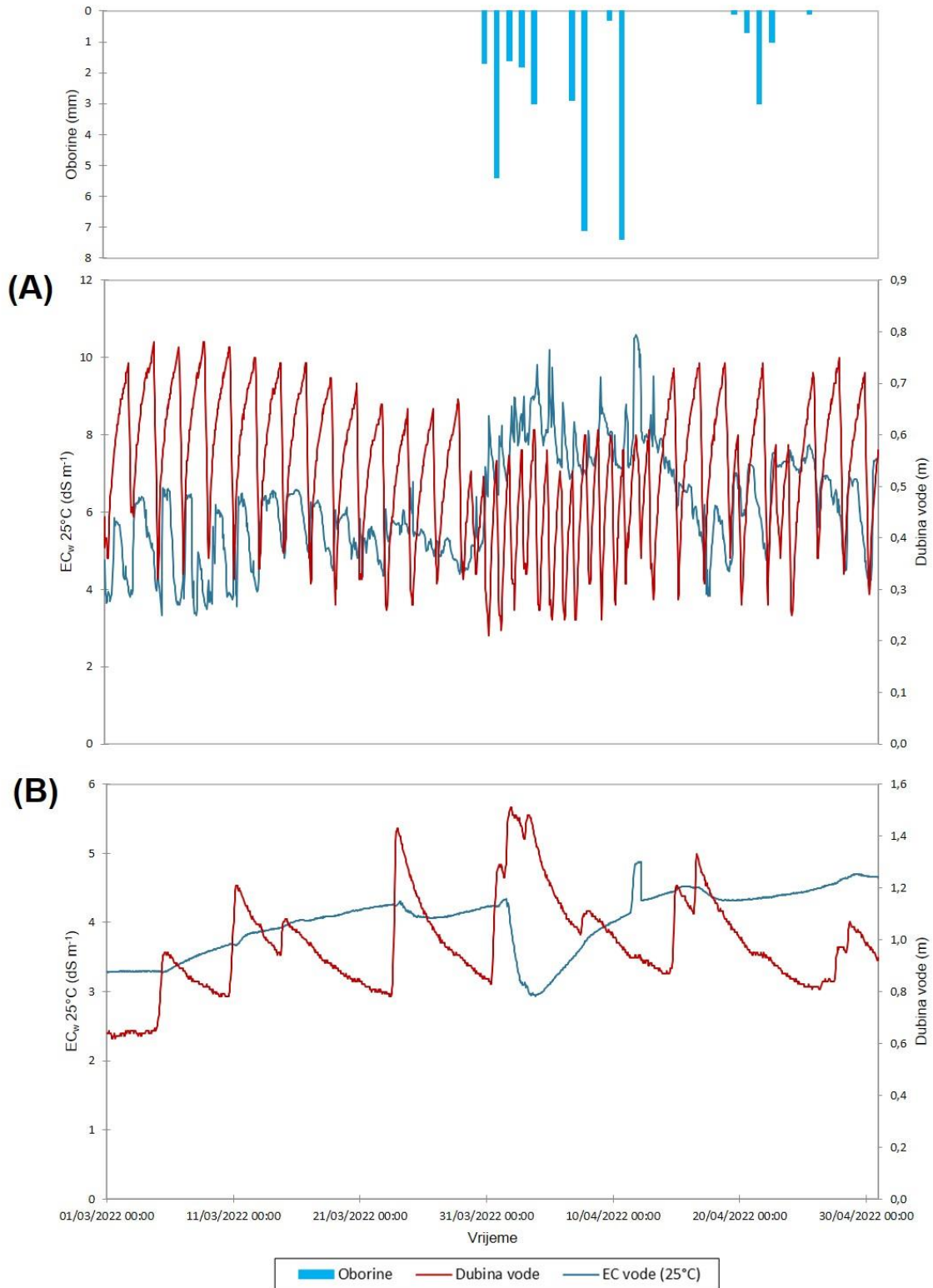
CV-koeficijent varijacije

Dinamika oborina i EC_w površinskih i podzemnih voda u satnoj vremenskoj rezoluciji na LI Luke prikazana je na Slici 4.8. Uspoređujući vremenske serije površinskih i podzemnih voda uočljiv je sličan generalni obrazac promjene EC_w kroz cijelo analizirano razdoblje, međutim dinamika promjene potpuno je različita. Iz satne vremenske serije EC_w površinskih voda vidljivo je da oborine nisu imale izravan utjecaj na dinamiku EC_w . Nagle i vrlo izražene promjene sugeriraju da je stupanj zaslanjenosti u površinskim vodama pod dominantnim antropogenim utjecajem, odnosno radom CS (Slika 4.8.A). Kao i na LI Vidrice, promjene u podzemnim vodama su manje dinamične i sporije te ovise o većem broju ranije spomenutih parametara (Slika 4.8.B). Važno je istaknuti da smanjenje vrijednosti EC_w u podzemlju uglavnom koincidira s obilnijim oborinama.



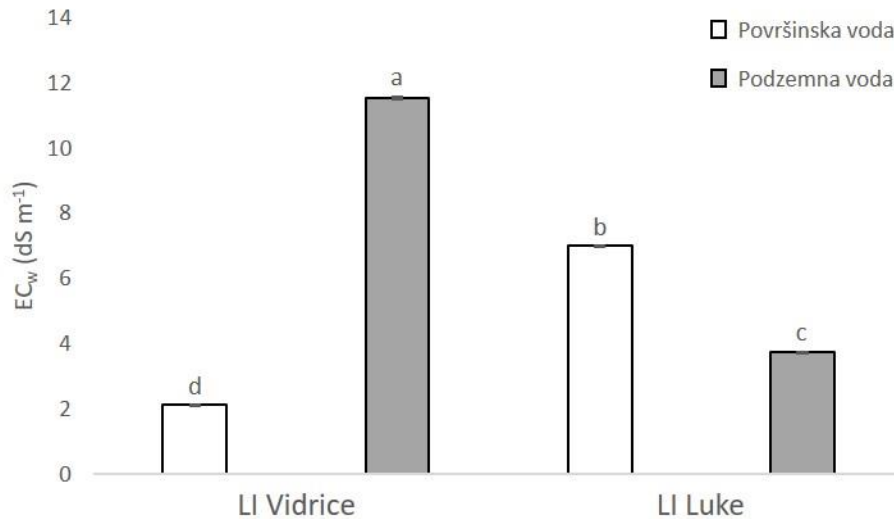
Slika 4.8. Dinamika oborina i EC_w površinske (A) i podzemne vode (B) na LI Luke u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Razdoblje od 1. ožujka do 1. svibnja u 2022. godini kada se na LI Luke uzgajao kupus (*Brassica oleracea* L.var.*capitata*) izdvojeno je i analizirano kako bi se procijenili utjecaji prirodnih i antropogenih čimbenika na zasljanjivanje površinskih i podzemnih voda. Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske vode prikazana je na Slici 4.9.A. Vizualnim pregledom segmenta vremenske serije dubine površinske vode uočava se pravilnost u amplitudi i frekvenciji u razdoblju bez oborina što je rezultat rada CS. Promjene dubine praćene su i promjenom EC_w , ali s određenim vremenskim odmakom. U kišnom razdoblju intenzivira se rad CS što izravno utječe na promjenu dubine vode u odvodnom kanalu, a što se jasno vidi iz grafičkog prikaza kao promjena u frekvenciji. U podzemnoj vodi u istom razdoblju obilne oborine i prihranjivanje piezometra u prvoj dekadi travnja rezultirali su smanjenjem vrijednosti EC_w . U ostalom razdoblju u kojem nije bilo oborina, promjena dubine podzemne vode uglavnom nije pratila promjene u EC_w (Slika 4.9.B).



Slika 4.9. Dinamika oborina, EC_w i dubine površinske (A) i podzemne vode (B) u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja na LI Luke

Provedenom analizom i *post-hoc* Tukey HSD testom utvrđeno je da se EC_w površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice kao i na LI Luke statistički značajno razlikuju (Slika 4.10). Također, statistički značajne razlike utvrđene su za iste vrste voda na dvije LI. Dobiveni rezultati sugeriraju da se zasljanjivanje površinskih i podzemnih voda na odabranim lokacijama odvija pod utjecajem različitih prirodnih, ali i antropogenih čimbenika.

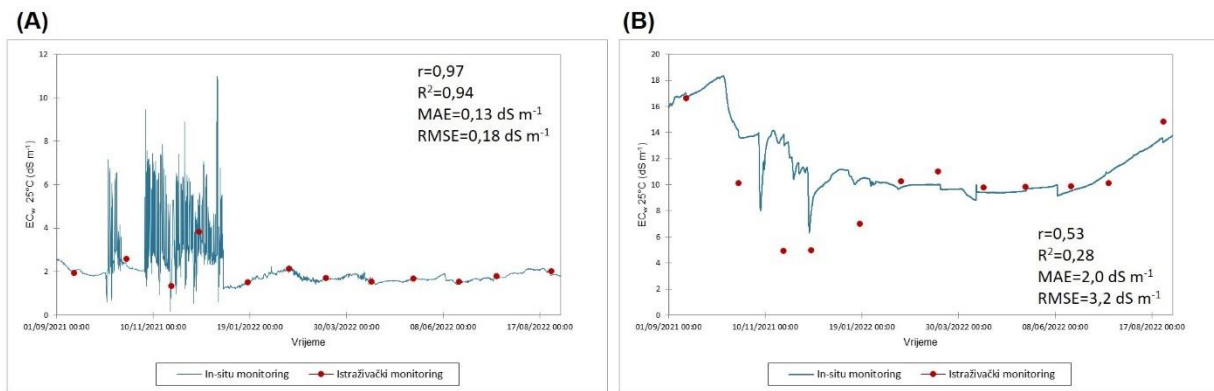


Slika 4.10. Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u *in-situ* kontinuiranom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

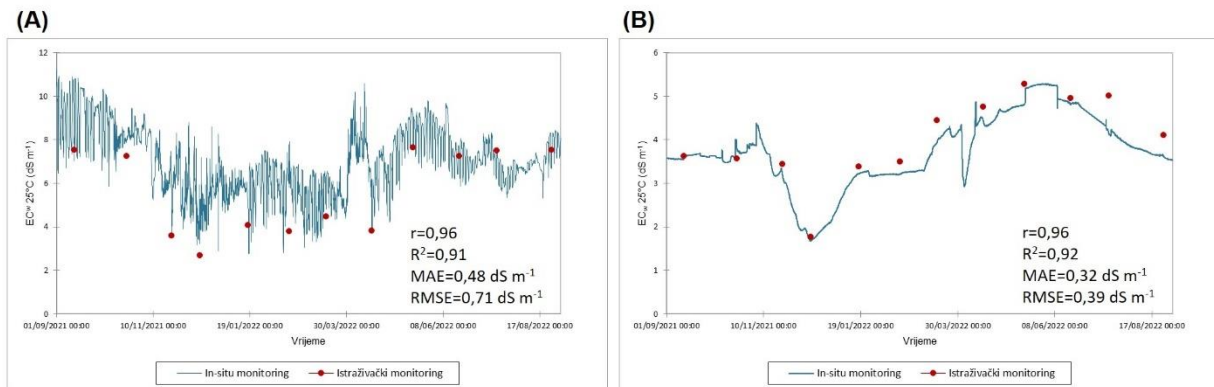
4.4. Vrednovanje mjerenja stupnja zasljanjenosti površinskih i podzemnih voda *in-situ* kontinuiranim monitoringom na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. - kolovoz 2022.

Da bi se odredila prihvatljivost metode mjerenja EC_w površinskih i podzemnih voda *in-situ* kontinuiranim monitoringom provedena je usporedba s podacima dobivenim istraživačkim monitoringom. Rezultati provedenog postupka usporedbe i procjenitelji prihvatljivosti grafički su prikazani na Slikama 4.11. i 4.12. Visoka korelacijska povezanost r (0,97) i vrijednost R^2 (0,94) utvrđeni su u površinskoj vodi na LI Vidrice uz vrlo niske vrijednosti pogrešaka MAE (0,13 dS m⁻¹) i RMSE (0,18 dS m⁻¹) što ukazuje na visoku razinu prihvatljivosti *in-situ* mjerenja u usporedbi s klasičnim monitoringom (Slika 4.11.A). Prosječna razlika vrijednosti EC_w između dva pristupa

monitoringu iznosila je 5,1 %. Na istoj lokaciji u podzemnoj vodi utvrđena su značajnija odstupanja pri čemu je vrijednost R^2 iznosila 0,28, uz pogreške od 2 dS m⁻¹ za MAE i 3,16 dS m⁻¹ za RMSE (Slika 4.11.B). Prosječno utvrđena razlika vrijednosti EC_w između in-situ i klasičnog monitoringa iznosila je 13,2 %. Na LI Luke visoka korelacijska povezanost kao i vrijednost R^2 između dva pristupa monitoringu utvrđena je i u površinskoj i u podzemnoj vodi (Slika 4.12). Niže vrijednosti pogrešaka utvrđene su u podzemnoj (MAE=0,32 dS m⁻¹ i RMSE=0,39 dS m⁻¹) u odnosu na površinsku vodu (MAE=0,48 dS m⁻¹ i RMSE=0,71 dS m⁻¹). Usporedbom prosječnih vrijednosti EC_w utvrđene su razlike od 6,9 % u površinskoj, odnosno 7,8 % u podzemnoj vodi.



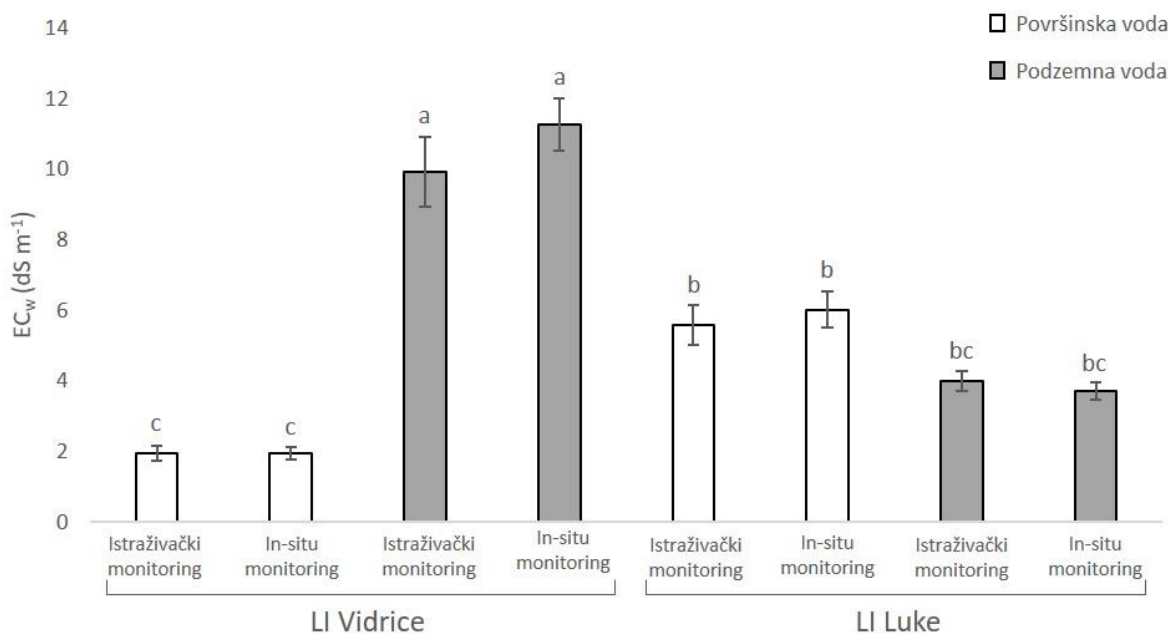
Slika 4.11. Dinamika EC_w površinskih (A) i podzemnih voda (B) izmjerenih *in-situ* i istraživačkim monitoringom za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na LI Vidrice



Slika 4.12. Dinamika EC_w površinskih (A) i podzemnih voda (B) izmjerenih *in-situ* i istraživačkim monitoringom za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na LI Luke

Kako bi se utvrdilo postoji li statistički značajna razlika u vrijednostima EC_w u dva pristupa monitoringu provedena je ANOVA i *post-hoc* Tukey HSD test. Iako su provedenom usporedbom utvrđene određene razlike u mjerenjima koje su bile najizraženije u podzemnoj vodi na LI Vidrice,

rezultati testa prikazani na Slici 4.13 pokazuju da se prosječne vrijednosti EC_w nisu statistički značajno razlikovale niti na jednoj od odabranih LI u površinskoj i podzemnoj vodi.



Slika 4.13. Prosječne vrijednosti električne vodljivosti vode (EC_w) \pm standardna pogreška u istraživačkom i *in-situ* kontinuiranom monitoringu za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022. na lokacijama istraživanja (LI). Stupci označeni različitim slovima statistički se statistički značajno razlikuju ($p < 0,05$)

4.5. *In-situ* kontinuirani monitoring tla na LI Vidrice i LI Luke za razdoblje rujan 2021. – kolovoz 2022.

Rezultati deskriptivne statistike četiri pokazatelja u tlu (vlažnost tla, EC_b , temperatura tla i matrični potencijal) prikupljeni s dvije vrste senzora na LI Vidrice u satnoj vremenskoj rezoluciji prikazani su u Tablici 4.5. Prosječna volumetrijska vlažnost tla povećavala se s povećanjem dubine, a kretala se u rasponu od $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ u sloju 0-25 cm do $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ u sloju 75-100 cm. Minimalna vrijednost od $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ izmjerena je u površinskom, a maksimalna vrijednost od $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ u najdubljem sloju tla. Najveći stupanj varijabilnosti utvrđen je u površinskom, a najmanji u najdubljem sloju tla što potvrđuje izračunata vrijednost koeficijenta varijacije. Prosječna vrijednost EC_b također se povećavala s dubinom pri čemu je u površinskom sloju tla iznosila $2,9 \text{ dS m}^{-1}$, a u sloju 75-100 cm $4,5 \text{ dS m}^{-1}$. Najveći stupanj varijabilnosti EC_b utvrđen je u sloju 25-50 cm, a najmanji kao kod vlažnosti tla, u sloju 75-100 cm. Prosječna temperatura tla bila je jednaka do

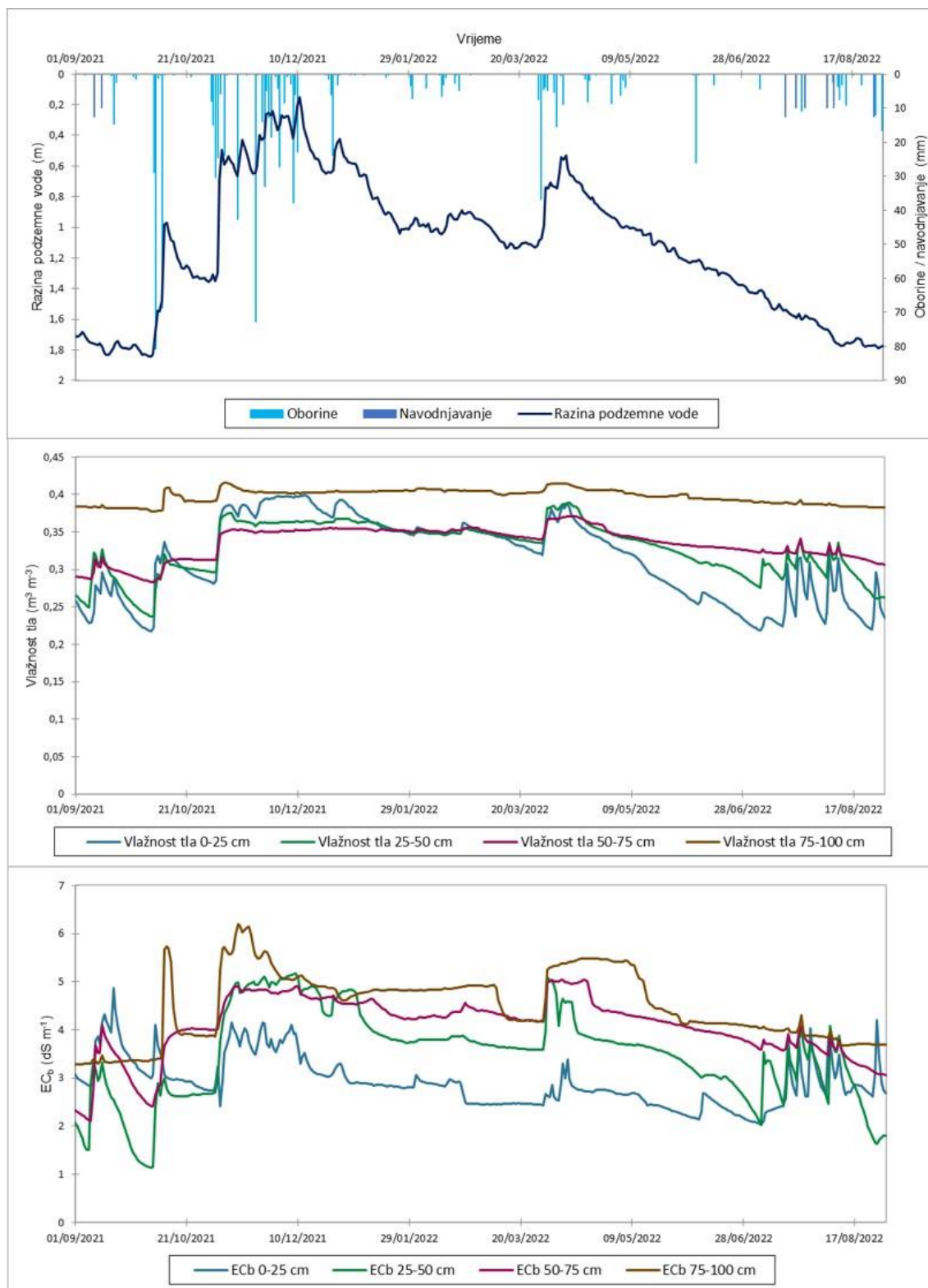
dubine 75 cm i iznosila je 17°C, a za 1°C niža bila je u sloju tla 75-100 cm. Izmjerene prosječne vrijednosti matičnog potencijala odgovarale su izmjerenim vrijednostima volumetrijske vlažnosti tla te su bile niže u sloju 25-50 cm koji je bio i prosječno vlažniji.

Tablica 4.5. Deskriptivna statistika vlažnosti tla, EC_b, temperature tla i matičnog potencijala u tlu na LI Vidrice u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021.-kolovoz 2022.

Lokacija	Dubina	Statistički pokazatelj	Satna vremenska rezolucija			
			Vlažnost tla m ³ m ⁻³	EC _b dS m ⁻¹	Temperatura tla °C	Matrični potencijal kPa
Vidrice	0-25 cm	N	8760	8760	8760	8760
		Prosjek	0,31	2,9	17	-94
		Medijan	0,32	2,8	15	-29
		Minimum	0,22	2,0	3,5	-310
		Maksimum	0,40	6,5	31	-8,8
		St. dev.	0,06	0,53	7,8	104
		CV	0,17	0,18	0,46	-1,1
	25-50 cm	N	8760	8760	8760	8760
		Prosjek	0,33	3,5	17	-50
		Medijan	0,34	3,6	16	-11
		Minimum	0,24	1,1	5,9	-221
		Maksimum	0,39	5,2	27	-8,4
		St. dev.	0,04	0,94	6,7	56
		CV	0,11	0,27	0,40	-1,1
	50-75 cm	N	8760	8760	8760	-
		Prosjek	0,34	4,1	17	-
		Medijan	0,34	4,2	16	-
		Minimum	0,28	2,1	7,3	-
		Maksimum	0,37	5,1	26	-
		St. dev.	0,02	0,62	6,0	-
		CV	0,06	0,15	0,36	-
	75-100 cm	N	8760	8760	8760	-
		Prosjek	0,40	4,5	16	-
		Medijan	0,40	4,4	16	-
Minimum		0,38	3,3	8,7	-	
Maksimum		0,42	6,3	24	-	
St. dev.		0,01	0,72	5,2	-	
CV		0,02	0,16	0,32	-	

CV – Koeficijent varijacije

Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode te vlažnosti tla i EC_b po dubinama u dnevnoj vremenskoj rezoluciji prikazani su na Slici 4.14. Razina podzemne vode u piezometru fluktuirala je između 0,15 m (u izvanvegetacijskom) i 1,84 m (u vegetacijskom razdoblju) od površine tla kao posljedica različitih čimbenika. U razdoblju rujan 2021. – kolovoz 2022. ukupno je palo 916,7 mm oborina od čega je u izvanvegetacijskom razdoblju palo 79 % oborina. Tri su razdoblja u kojima dolazi do znatnog porasta razine vode u podzemlju (prva dekada listopada u kojoj je palo 180,3 mm; razdoblje od 1.11.-10.12.2021. kada je palo 419,3 mm i razdoblje 29.3.-10.4.2022. u kojem je palo 88,2 mm), međutim nakon svakog oborinskog događaja vrlo brzo dolazi do spuštanja razine podzemne vode. Uz oborine, određena količina vode dodana je i kroz agrotehničku mjeru navodnjavanja sustavom kap po kap, a osam obroka navodnjavanja kojima je u prosjeku dodano 10 mm kroz 4 sata nije imalo utjecaj na promjenu razine vode u podzemlju. Analizirajući dinamiku vlažnosti tla vidljivo je da su do dubine od 75 cm promjene bile uvjetovane oborinama i posljedično porastom razine podzemne vode u izvanvegetacijskom, a oborinama i navodnjavanjem u vegetacijskom razdoblju (Slika 4.14). U najdubljem horizontu vlažnost tla konstantno je bila najviša, a kretala se u vrlo uskom rasponu od $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tablica 4.5). Na gotovo konstantnu vlažnost najdubljeg sloja dominantan utjecaj imala je podzemna voda koja je veći dio razdoblja istraživanja bila unutar 1,5 m od površine tla. Sličan obrazac utvrđen je i kod EC_b gdje su oborine i porast razine podzemne vode u izvanvegetacijskom razdoblju utjecale na promjene u EC_b tla u cijelom profilu. Najviše vrijednosti utvrđene su u najdubljem sloju koji je ujedno i pod najvećim utjecajem zaslanjenih podzemnih voda. U vegetacijskom razdoblju kada je razina podzemne vode bila ispod 1,5 m, a provodila se mjera navodnjavanja nasada mandarine, promjene u EC_b utvrđene su u prvih 75 cm profila tla.



Slika 4.14. Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode, vlažnosti tla i EC_b na LI Vidrice u dnevnoj vremenskoj rezoluciji u razdoblju rujan 2021. – kolovoz 2022.

Kako bi se procijenili utjecaji prirodnih i antropogenih čimbenika na vlažnost i stupanj zaslanjenosti tla razdoblje u kojem se provodila mjera navodnjavanja nasada mandarine (*Citrus reticulata* L.) u 2022. godini izdvojeno je i analizirano. Nasad je navodnjavan sa šest obroka navodnjavanja pri čemu je svakim obrokom u prosjeku dodano 10 mm vode kroz 4 sata, odnosno $\approx 2,5$ mm na sat. Osnovni statistički pokazatelji za vlažnost tla i EC_b prikazani su u Tablici 4.6. Najniža prosječna vlažnost tla utvrđena je u površinskom sloju ($0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), a kretala se u rasponu od minimalno izmjerenih $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do maksimalnih $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. U najdubljem sloju prosječna vlažnost tla iznosila je $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ i bila je gotovo konstantna. Najniža prosječna vrijednost EC_b utvrđena je u sloju 25-50 cm ($2,9 \text{ dS m}^{-1}$), a najviša u najdubljem sloju tla ($3,8 \text{ dS m}^{-1}$). Najveća varijabilnost vlažnosti tla i EC_b utvrđena je u prvih 50 cm soluma tla, a najmanja na dubini 75-100 cm. Analizirajući svaki sloj tla zasebno, statistički značajna srednje visoka korelacijska veza utvrđena je između vlažnosti tla i EC_b u sloju do 25 cm, a u ostalim slojevima korelacijska veza bila je vrlo jaka (Tablica 4.6).

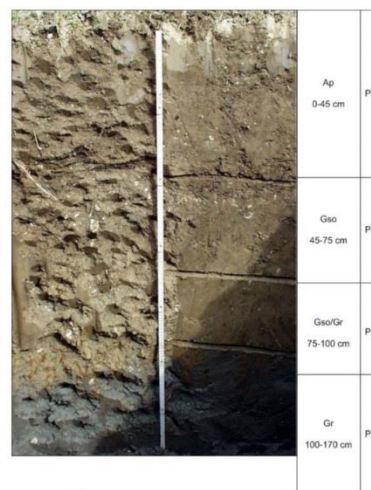
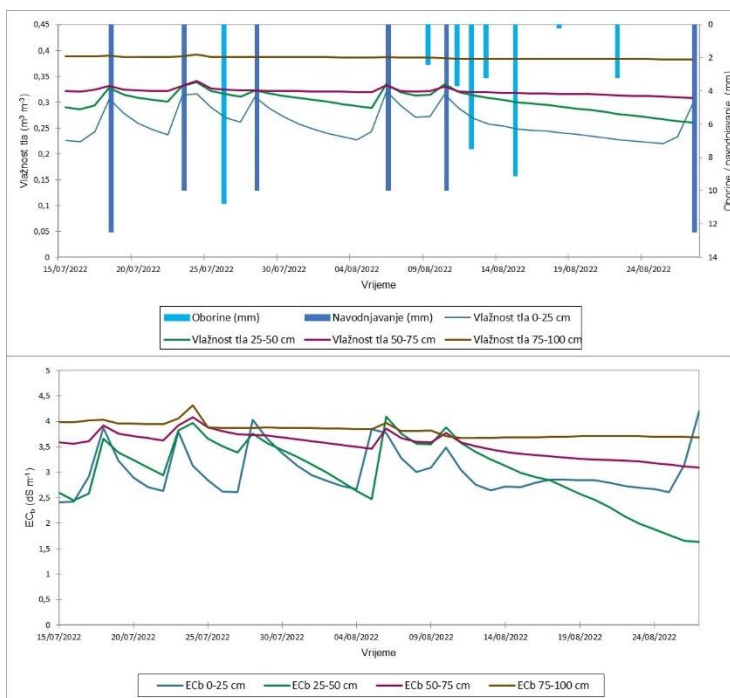
Tablica 4.6. Deskriptivna statistika i korelacijska matrica pokazatelja vlažnosti tla i EC_b u razdoblju provođenja mjere navodnjavanja mandarine na LI Vidrice

Statistički pokazatelj	VI. tla	VI. tla	VI. tla	VI. tla	EC_b	EC_b	EC_b	EC_b
	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$				dS m^{-1}			
Prosjek	0,26	0,30	0,32	0,39	3,0	2,9	3,5	3,8
Medijan	0,26	0,30	0,32	0,39	2,9	3,0	3,6	3,8
Minimum	0,22	0,26	0,31	0,38	2,4	1,6	3,1	3,7
Maksimum	0,32	0,34	0,34	0,39	4,2	4,1	4,1	4,3
St. dev	0,03	0,02	0,01	0,01	0,44	0,72	0,27	0,14
Korelacija								
VI. tla 0-25 cm	1							
VI. tla 25-50 cm	0,866**	1						
VI. tla 50-75 cm	0,695**	0,860**	1					
VI. tla 75-100 cm	0,393**	0,597**	0,878**	1				
EC_b 0-25 cm	0,691**	0,433**	0,336*	0,163 ^{ns}	1			
EC_b 25-50 cm	0,867**	0,993**	0,828**	0,553**	0,442**	1		
EC_b 50-75 cm	0,723**	0,889**	0,984**	0,851**	0,348*	0,865**	1	
EC_b 75-100 cm	0,265 ^{ns}	0,422**	0,784**	0,923**	0,189 ^{ns}	0,384**	0,759**	1

VI.- vlažnost

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Dnevna dinamika oborina, navodnjavanja te vlažnosti tla i EC_b prikazana je na Slici 4.15. *In-situ* kontinuiranim monitoringom detektirane su promjene vlažnosti tla i EC_b do dubine od 75 cm, a koje se podudaraju s terminima navodnjavanja (Slika 4.15). Povećanje sadržaja vlage u tlu i EC_b u terminima navodnjavanja bilo je najizraženije u površinskom sloju tla, a gotovo konstantna i nepromijenjena vrijednost vlažnosti tla i EC_b utvrđena je u najdubljem sloju tla. Dobiveni rezultati odgovaraju i stratigrafskoj građi i specifičnim pedogenetskim procesima koji se odvijaju u tlu (Slika 4.15). U granulometrijskom sastavu A_p horizonta (0-45 cm) najveći udio čine čestice praha (43 %) čiji se udio s dubinom smanjuje, a povećava se udio sitnog pijeska (45-75 cm) i krupnog pijeska (75-170 cm). Na dubini od 75-100 cm izdvaja se glejni genetski horizont u kojem se izmjenjuju oksidacijski i redukcijски procesi ($G_{so/r}$) ovisno o duljini trajanja prekomjernog vlaženja podzemnom vodom, dok se na dubini većoj od 100 cm izdvaja G_r horizont u kojem se odvijaju isključivo redukcijски procesi pod utjecajem stalnog prisustva podzemne vode (Slika 4.15).



Lokacija		Vidrice			
Tip tla		Močvarno glejnihoplejno			
Horizont		A_p	G_{so}	$G_{so/r}$	G_r
Dubina (cm)		0-45	45-75	75-100	100-170
Humus (%)		3,36	1,45	0,83	2,14
CEC (cmol _c kg ⁻¹)		21	17	11	6,3
Granulometrijski sastav (mm, %)	2-0,2	3	5	5	2
	0,2-0,05	16	27	34	46
	0,05-0,02	23	34	27	29
	0,02-0,002	43	25	24	17
	<0,002	15	9	10	6

Slika 4.15. Dinamika oborina, navodnjavanja, vlažnosti tla i EC_b u dnevnoj vremenskoj rezoluciji na LI Vidrice u razdoblju 15.7.2022. - 27.8.2022.

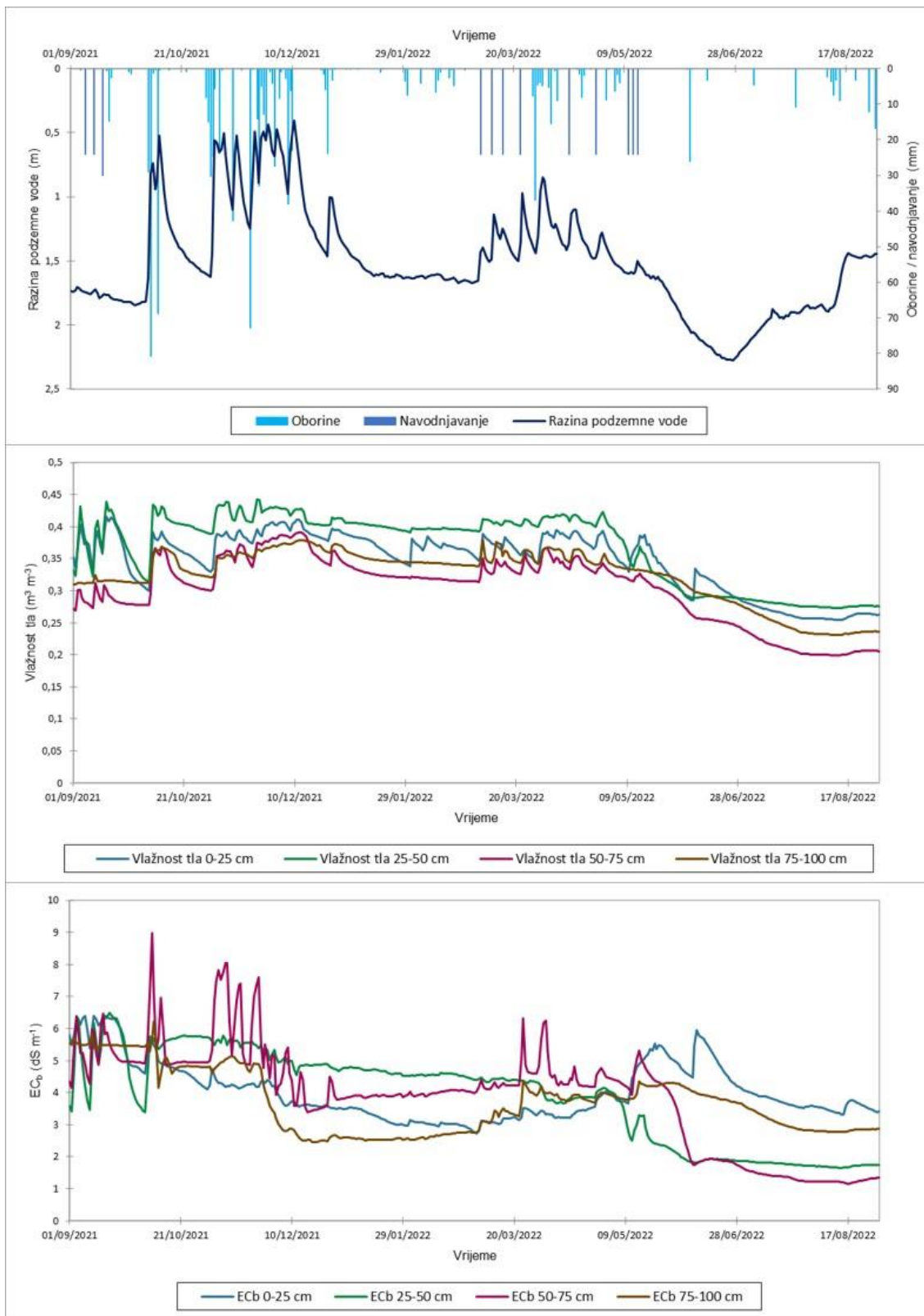
Rezultati deskriptivne statistike četiri pokazatelja u tlu (vlažnost tla, EC_b , temperatura tla i matrični potencijal) prikupljeni s dvije vrste senzora na LI Luke u satnoj vremenskoj rezoluciji prikazani su u Tablici 4.7. Viša prosječna vlažnost tla utvrđena je u gornjoj polovici profila tla (0-50 cm), pri čemu je najviša prosječna vrijednost utvrđena u sloju 25-50 cm ($0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Najniža prosječna vlažnosti tla utvrđena je u sloju tla 50-75 cm i iznosila je $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. U ovom sloju utvrđena je i najveća varijabilnost vlažnosti tla ($CV=0,18$). Prosječna vrijednost EC_b kretala se od minimalnih $3,7 \text{ dS m}^{-1}$ u najdubljem sloju do $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ u površinskom sloju tla. Kao i kod vlažnosti tla, najveća varijabilnost EC_b utvrđena je u sloju 50-75 cm ($CV=0,42$), ali je visoka varijabilnost utvrđena i u ostalim slojevima tla. Prosječna temperatura do dubine 75 cm iznosila je 16°C , dok je u sloju tla 75-100 cm bila za jedan stupanj viša. Izmjerene prosječne vrijednosti matričnog potencijala nisu se razlikovale između slojeva 0-25 cm i 25-50 cm.

Tablica 4.7. Deskriptivna statistika vlažnosti tla, EC_b , temperature tla i matričnog potencijala u tlu na LI Luke u satnoj vremenskoj rezoluciji za razdoblje rujan 2021.-kolovoz 2022.

Lokacija	Dubina	Statistički pokazatelj	Satna vremenska rezolucija			
			Vlažnost tla $m^3 m^{-3}$	EC_b $dS m^{-1}$	Temperatura tla $^{\circ}C$	Matrični potencijal kPa
Luke	0-25 cm	N	8760	8760	8760	8760
		Prosjek	0,35	4,0	16	-100
		Medijan	0,36	3,7	15	-39
		Minimum	0,25	2,7	3,0	-286
		Maksimum	0,43	6,9	31	-6,9
		St. dev.	0,05	0,91	7,3	98
		CV	0,14	0,22	0,45	-0,99
	25-50 cm	N	8760	8760	8760	8760
		Prosjek	0,37	3,9	16	-92
		Medijan	0,40	4,4	16	-10
		Minimum	0,27	1,6	6,0	-266
		Maksimum	0,46	6,5	28	-7,4
		St. dev.	0,06	1,5	6,3	102
		CV	0,15	0,37	0,39	-1,1
	50-75 cm	N	8760	8760	8760	-
		Prosjek	0,30	3,9	16	-
		Medijan	0,32	4,1	17	-
		Minimum	0,20	1,1	8,7	-
		Maksimum	0,39	9,3	26	-
		St. dev.	0,05	1,6	5,3	-
		CV	0,18	0,42	0,32	-
	75-100 cm	N	8760	8760	8760	-
		Prosjek	0,30	3,9	16	-
		Medijan	0,32	4,1	17	-
Minimum		0,20	1,1	8,7	-	
Maksimum		0,39	9,3	26	-	
St. dev.		0,05	1,6	5,3	-	
CV		0,13	0,27	0,28	-	

CV – koeficijent varijacije

Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode, vlažnosti tla i EC_b po slojevima tla u dnevnoj vremenskoj rezoluciji prikazani su na Slici 4.16. Razina podzemne vode kretala se između minimalno izmjerenih 0,40 m ispod površine tla u izvanvegetacijskom razdoblju i 2,28 m ispod površine tla u vegetacijskom razdoblju. Vidljivo je da je razina podzemne vode kao i na LI Vidrice bila pod utjecajem različitih čimbenika, a najveće fluktuacije u razini podzemne vode utvrđene su uslijed jakih oborina u izvanvegetacijskom razdoblju u kojem je palo ranije utvrđenih 721,3 mm. Analizirajući promjene dinamike vlažnost tla i EC_b utvrđeno je da je za vrijeme uzgoja dinje (*Cucumis melo* L.) najveći utjecaj na promjene imala mjera navodnjavanja i to do dubine od 75 cm, dok je u najdubljem sloju vrijednost vlažnosti tla kao i EC_b bila gotovo konstantna (Slika 4.16). U izvanvegetacijskom razdoblju promjene u vlažnosti tla i EC_b bile su uvjetovane oborinama i posljedično porastom razine podzemne vode. U razdoblju od početka ožujka do posljednje dekade svibnja kada se na parceli uzgajao kupus (*Brassica oleracea* L.var.*capitata*) promjene u vlažnosti tla koje su utvrđene u cijelom profilu odgovaraju terminima navodnjavanja. U istom razdoblju promjene u EC_b bile su manje izražene, osobito do dubine od 50 cm, a najizraženije su bile u sloju tla 50-75 cm gdje su se vrijednosti kretale u vrlo širokom rasponu s maksimalno izmjerenom dnevnom vrijednosti EC_b od 9,0 dS m⁻¹.



Slika 4.16. Dinamika oborina, navodnjavanja, razine podzemne vode, vlažnosti tla i EC_b na LI Luke u dnevnoj vremenskoj rezoluciji u razdoblju rujan 2021. – kolovoz 2022.

Razdoblje u kojem se na LI Luke uzgajao kupus (prva dekada ožujka-posljednja dekada svibnja) izdvojeno je i analizirano kako bi se procijenio utjecaj prirodnih i antropogenih čimbenika na promjene u vlažnosti i EC_b . Površina je navodnjavana lokaliziranim navodnjavanjem kap po kap kroz 9 obroka kojima je prosječno dodano ≈ 6 mm vode na sat uz prosječno trajanje navodnjavanja od 4 sata. Rezultati deskriptivne statistike za vlažnost tla i EC_b prikazani su u Tablici 4.8. Prosječna vlažnost u profilu tla kretala se u rasponu od $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (u sloju 50-75 cm) do $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (u sloju 25-50 cm). Maksimalna vrijednost utvrđena je u sloju 25-50 cm ($0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), a minimalna u sloju 50-75 cm ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Najviša prosječna vrijednost EC_b utvrđena je u sloju 50-75 cm ($4,5 \text{ dS m}^{-1}$) gdje je ujedno izmjerena i maksimalna vrijednost EC_b ($6,3 \text{ dS m}^{-1}$). U ostalim slojevima prosječna vrijednost EC_b kretala se u vrlo uskom rasponu od $3,7 \text{ dS m}^{-1}$ (0-25 cm) do $3,8 \text{ dS m}^{-1}$ (50-75 cm i 75-100 cm). Za razliku od LI Vidrice gdje su utvrđene dinamične promjene u vlažnosti i EC_b tla kao posljedica navodnjavanja, osobito u prvih 50 cm profila tla, promjene na LI Luke bile su manje izražene. Provedenom korelacijskom analizom signifikantna, ali slaba pozitivna korelacijska veza utvrđena je između vrijednosti vlažnosti tla i EC_b u slojevima 25-50 cm i 50-75 cm dok je u slojevima 0-25 cm i 75-100 cm koeficijent korelacije bio negativan, ali gotovo zanemariv (Tablica 4.8).

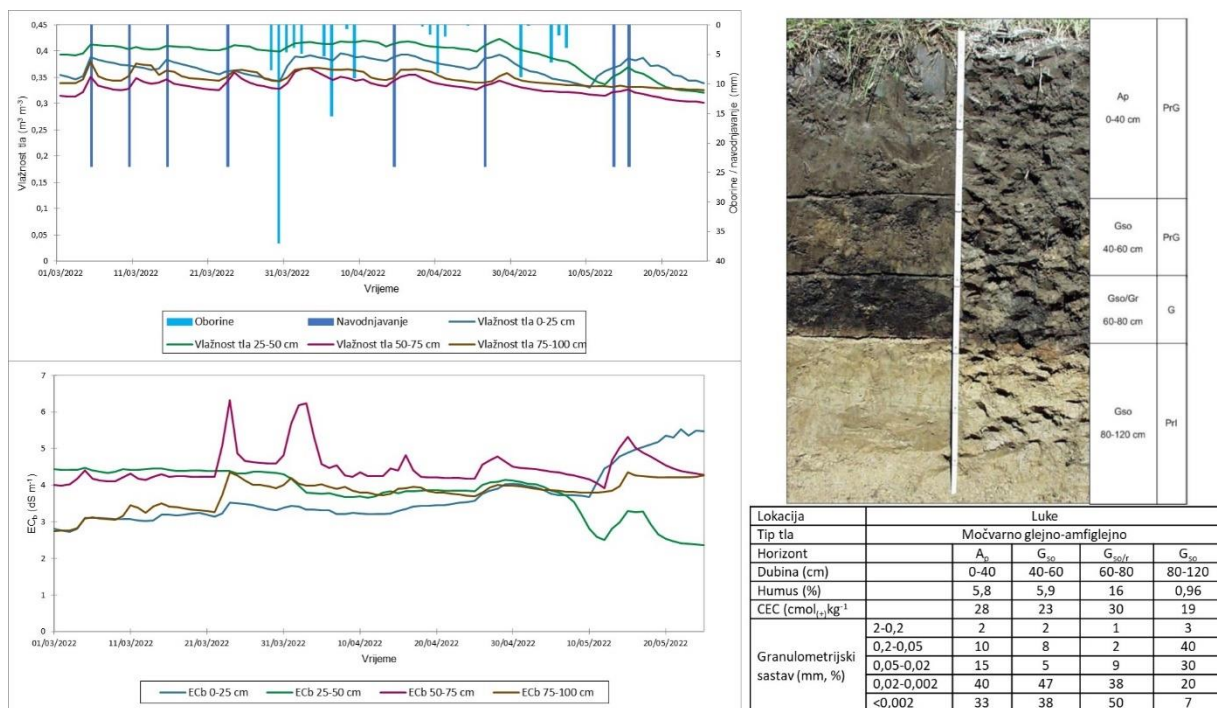
Tablica 4.8. Deskriptivna statistika i korelacijska matrica pokazatelja vlažnosti tla i EC_b u razdoblju provođenja mjere navodnjavanja kupusa na LI Luke

Stat. pokazatelj	VI. tla	VI. tla	VI. tla	VI. tla	EC _b	EC _b	EC _b	EC _b
	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm
	m ³ m ⁻³				dS m ⁻¹			
Prosjek	0,37	0,39	0,33	0,35	3,7	3,8	4,5	3,8
Medijan	0,37	0,40	0,33	0,35	3,4	3,9	4,3	3,8
Minimum	0,33	0,32	0,30	0,33	2,7	2,4	3,9	2,7
Maksimum	0,40	0,42	0,37	0,38	5,5	4,5	6,3	4,3
St. dev	0,02	0,03	0,02	0,01	0,71	0,62	0,46	0,39
Korelacija								
VI. tla 0-25 cm	1							
VI. tla 25-50 cm	0,780**	1						
VI. tla 50-75 cm	0,699**	0,903**	1					
VI. tla 75-100 cm	0,579**	0,844**	0,937**	1				
EC _b 0-25 cm	-0,194 ^{ns}	-0,484**	-0,402**	-0,594**	1			
EC _b 25-50 cm	-0,015 ^{ns}	0,300**	0,318**	0,490**	-0,717**	1		
EC _b 50-75 cm	0,287**	0,173 ^{ns}	0,321**	0,117 ^{ns}	0,422**	-0,228*	1	
EC _b 75-100 cm	0,063 ^{ns}	-0,114 ^{ns}	0,030 ^{ns}	-0,153 ^{ns}	0,758**	-0,583**	0,770**	1

VI.- vlažnost

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Dinamika oborina, navodnjavanja te vlažnosti tla i EC_b u izdvojenom segmentu koji odgovara razdoblju od 1.3.2022. do 25.5.2022. prikazana je na Slici 4.17.



Slika 4.17. Dinamika oborina, navodnjavanja, vlažnosti tla i EC_b u dnevnoj vremenskoj rezoluciji na LI Luke u razdoblju od 1.3.2022. - 25.5.2022.

Promjene u vlažnosti tla kao posljedica navodnjavanja i obilnijih oborina u prvoj dekadi travnja utvrđene su kroz cijeli profil tla (Slika 4.17). U prva dva sloja (0-50 cm) utvrđena je konstantno viša vrijednost vlažnosti tla što može biti posljedica granulometrijskog sastava u kojem dominiraju čestice sitnog praha i gline. Suprotno očekivanom, najdinamičnije promjene u vlažnosti tla utvrđene su na dubini 50-100 cm, a slična dinamika utvrđena je i kod EC_b . Dobiveni rezultati mogu se djelomično objasniti pozicijom senzora i stratigrafskom građom profila. Naime na dubini od 80 cm u profilu tla javlja se teksturni diskontinuitet te se izdvaja G_{so} horizont s dominantnim udjelom čestica pijeska (40 %).

4.6. Modeli predviđanja stupnja zasljenjenosti površinskih i podzemnih voda na LI Vidrice i LI Luke

4.6.1. Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Temeljem rezultata korelacijske analize odabrane su one nezavisne varijable koje su imale koeficijent korelacije $r < 0,7$, a to su: dubina vode, temperatura vode, pH i ORP, EC_b 0-25 cm, EC_b 25-50 cm, vodostaj Opuzen ustava nizvodno Mala Neretva, vodostaj Metković Neretva, EC_w površina Metković Neretva i količina oborina (Prilog, Tablica 8.6). Analizom multikolinearnosti odabranih nezavisnih varijabli (Tablica 4.9) utvrđeno je da niti jedan prediktor nije imao VIF veći od 10 te je svih deset varijabli odabrano za izradu modela MLR.

Tablica 4.9. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	2,268
Temperatura vode (°C)	4,851
pH (25°C)	3,065
ORP (mV)	1,441
EC_b 0-25 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,637
EC_b 25-50 cm ($dS\ m^{-1}$)	2,602
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	3,269
Vodostaj Metković Neretva (cm)	4,101
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S\ cm^{-1}$)	1,682
Oborine (mm)	1,028

Na temelju AIC kriterija odabran je najbolji model koji je sadržavao svih deset prediktora. Vrijednost R^2 odabranog modela iznosila je niskih 0,393. Rezultati odabira najboljeg modela prikazani su u Tablici 4.10. dok su parametri modela prikazani u Tablici 4.11.

Tablica 4.10. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	Vodostaj Metković Neretva	0,932	0,222	0,222	-494,559
2	Temperatura vode / pH	0,789	0,341	0,341	-1655,518
3	Temperatura vode / pH / Vodostaj Metković Neretva	0,763	0,363	0,363	-1889,605
4	Temperatura vode / pH / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,752	0,372	0,372	-1991,080
5	Temperatura vode / pH / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,742	0,381	0,381	-2087,494
6	Temperatura vode / pH / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / Oborine	0,733	0,388	0,388	-2166,135
7	Temperatura vode / pH / ORP / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / Oborine	0,731	0,391	0,390	-2192,161
8	Temperatura vode / pH (25°C) / ORP / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,729	0,392	0,391	-2204,213
9	Dubina vode / Temperatura vode / pH (25°C) / ORP / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,728	0,393	0,392	-2211,037
10	Dubina vode / Temperatura vode / pH (25°C) / ORP / EC_b 0-25 cm / EC_b 25-50 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,728	0,393	0,392	-2216,013

Podebljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

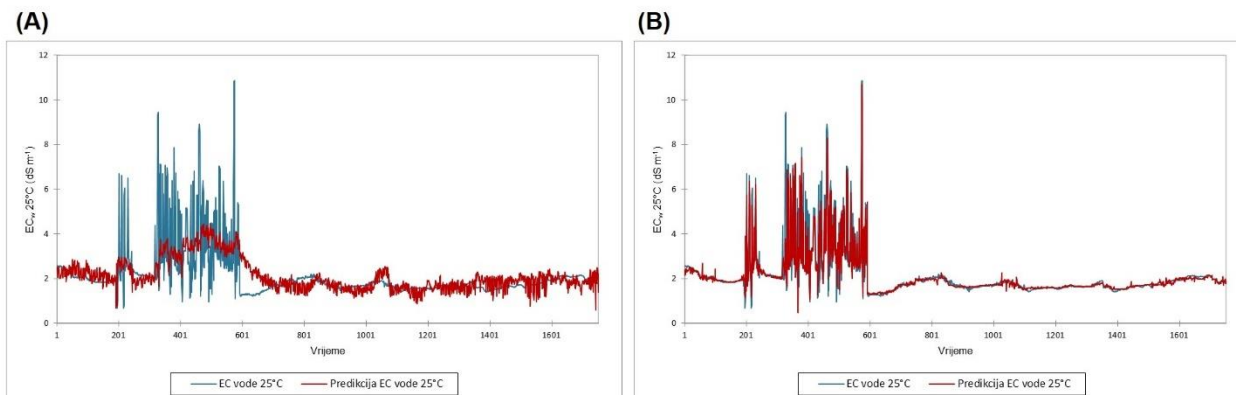
Tablica 4.11. Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	16,793	0,690	24,340	<0,0001
Dubina vode (m)	0,280	0,094	2,995	0,003
Temperatura vode (°C)	-0,059	0,003	-18,519	<0,0001
pH (25°C)	-1,835	0,077	-23,725	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000	7,626	<0,0001
EC_b 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,286	0,025	11,678	<0,0001
EC_b 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0,046	0,017	-2,721	0,007
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	-0,017	0,003	-5,438	<0,0001
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,008	0,001	10,098	<0,0001
EC_w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,000	0,000	-7,391	<0,0001
Oborine (mm)	-0,110	0,018	-6,165	<0,0001

Iste nezavisne varijable odabranog najboljeg modela MLR korištene su za razvoj modela XGB. Hiperparametri modela XGB bili su: *max depth*=8; *learning rate*=0,3; *minimum son size*=1; *L2*=1. Vrijednost R^2 trening modela bila je viša u odnosu na model MLR (Tablica 4.10) i iznosila je $R^2=0,98$. Na setu podataka za testiranje oba modela imala su niže vrijednosti R^2 u odnosu na trening model, međutim i dalje je model XGB imao višu vrijednost od modela MLR kao i niže vrijednosti pogrešaka (Tablica 4.12). Iz grafičkog prikaza vidljivo je da testni model XGB bolje predviđa vrijednosti EC_w , osobito u izvanvegetacijskom razdoblju kada je utvrđena i najveća varijabilnost u mjerenjima (Slika 4.18).

Tablica 4.12. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u površinskoj vodi na LI Vidrice

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,356	-361,678	0,500	0,804
XGB	0,829	-2685,3	0,163	0,462

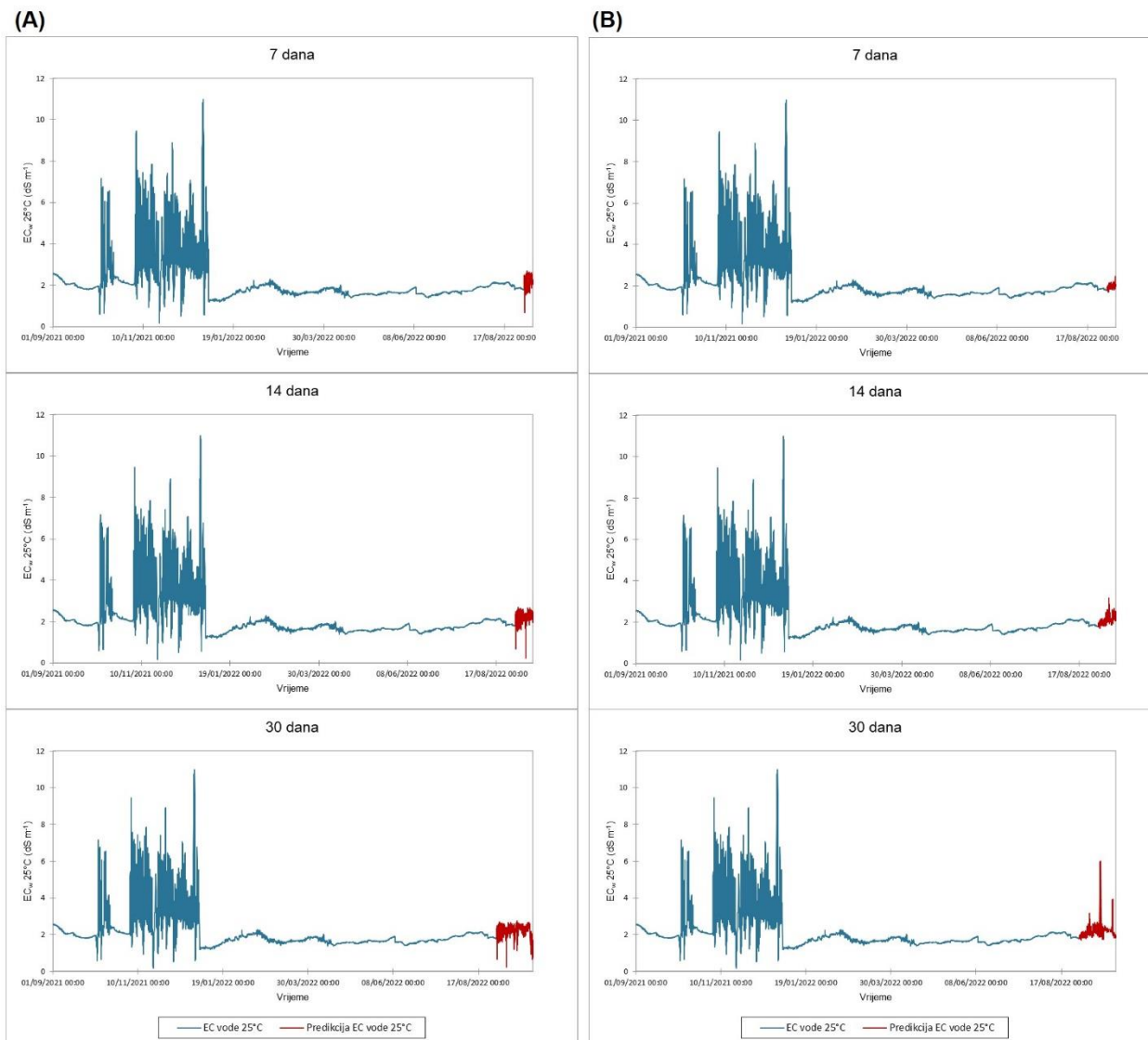


Slika 4.18. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu satnih podataka

Na temelju razvijenih modela napravljeno je predviđanje EC_w za tri različita vremenska razdoblja modelom MLR (Slika 4.19.A) i modelom XGB (Slika 4.19.B). Model MLR imao je više vrijednosti pogrešaka za sva tri razdoblja u odnosu na model XGB (Tablica 4.13), a vrijednost RMSE bila je viša od $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ neovisno o razdoblju za koji je izrađena predikcija. Najmanju vrijednost RMSE imao je model XGB predikcije 7 dana unaprijed koja je iznosila $0,25 \text{ dS m}^{-1}$ što predstavlja prihvatljivu pogrešku obzirom na raspon unutar kojeg su se kretale vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice. Kod predikcijskog modela XGB 14 i 30 dana unaprijed vrijednosti RMSE iznosile su $0,48 \text{ dS m}^{-1}$ i $0,52 \text{ dS m}^{-1}$.

Tablica 4.13. Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Predviđanje	MLR		XGB	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,518	0,572	0,220	0,253
14 dana	0,550	0,594	0,389	0,478
30 dana	0,437	0,514	0,353	0,517



Slika 4.19. Predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice

4.6.2. Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Model MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w imao je jednu nezavisnu varijablu manje u odnosu na model za predviđanje satnih vrijednosti, a to su: dubina vode, pH i ORP, EC_b 0-25 cm, EC_b 50-75 cm, vodostaj Opuzen ustava nizvodno Mala Neretva, vodostaj Metković Neretva, EC_w površina Metković Neretva i količina oborina. Rezultati korelacijske analize svih varijabli prikazani su u Prilogu, Tablica 8.7. Kao i kod model predviđanja satnih vrijednosti, svi prediktori su korišteni za daljnji razvoj modela MLR (Tablica 4.14).

Tablica 4.14. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	1,786
pH (25°C)	2,525
ORP (mV)	1,536
EC_b 0-25 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,691
EC_b 50-75 cm ($dS\ m^{-1}$)	2,880
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	4,829
Vodostaj Metković Neretva (cm)	6,264
EC_w površina Metković Neretva ($\mu\ cm^{-1}$)	2,151
Oborine (mm)	1,120

Na temelju AIC kriterija odabran je najbolji model koji je imao ukupno pet prediktora: dubina vode, pH, EC_b 0-25 cm, vodostaj Male Neretve na postaji Opuzen ustava nizvodno te vodostaj Neretve na profilu Metković (Tablica 4.15). Parametri odabranog modela prikazani su u Tablici 4.16.

Tablica 4.15. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	Vodostaj Metković Neretva	0,467	0,417	0,415	-220,219
2	Dubina vode / Vodostaj Metković Neretva	0,424	0,472	0,468	-247,254
3	Dubina vode / pH / Vodostaj Metković Neretva	0,351	0,566	0,561	-302,139
4	Dubina vode / pH / EC _b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,347	0,571	0,565	-304,114
5	Dubina vode / pH / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,344	0,576	0,569	-305,389
6	Dubina vode / pH / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,344	0,578	0,569	-304,564
7	Dubina vode / pH / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva	0,345	0,578	0,568	-302,930
8	Dubina vode / pH / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,346	0,579	0,567	-301,276
9	Dubina vode / pH / ORP / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,347	0,579	0,566	-299,330

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

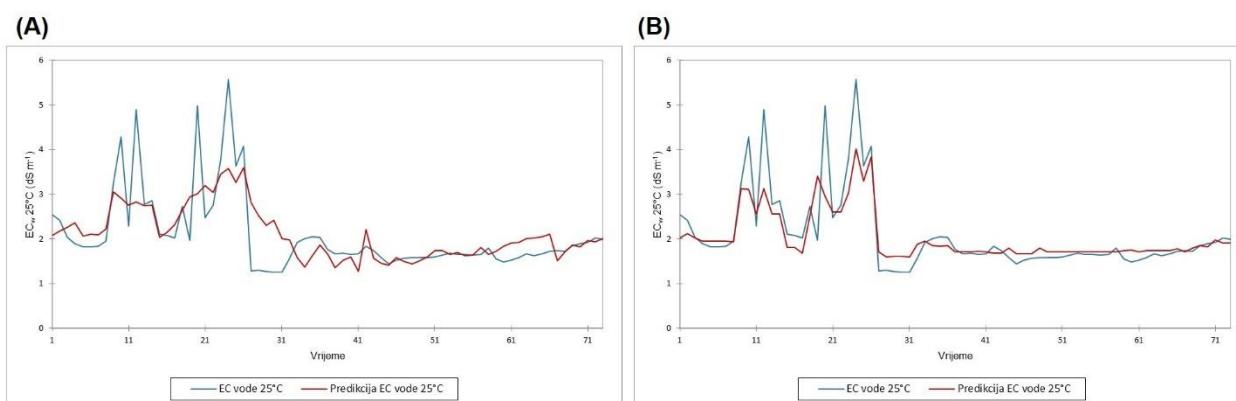
Tablica 4.16. Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	9,388	1,921	4,887	<0,0001
Dubina vode (m)	-1,710	0,245	-6,982	<0,0001
pH (25°C)	-0,958	0,182	-5,271	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000		
EC _b 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,169	0,068	2,478	0,014
EC _b 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,000	0,000		
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	-0,013	0,015	-0,869	0,385
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,012	0,004	2,985	0,003
EC _w površina Metković Neretva (μ cm ⁻¹)	0,000	0,000		
Oborine (mm)	0,000	0,000		

Isti prediktori korišteni su razvoj modela XGB sa sljedećim hiperparametrima: *max depth*=6; *learning rate*=0,2; *minimum son size*=1; *L2*=0,1. Vrijednost R^2 odabranog modela MLR iznosila je 0,576 dok je kod XGB modela vrijednost bila viša i iznosila je $R^2=0,924$. Kod modela razvijenih na setu podataka za testiranje vrijednost R^2 iznosila je 0,532 kod modela MLR te 0,716 kod modela XGB (Tablica 4.17). Rezultati predviđanja na testnom setu podataka prikazani su na Slici 4.20.A za model MLR i Slici 4.20.B za model XGB.

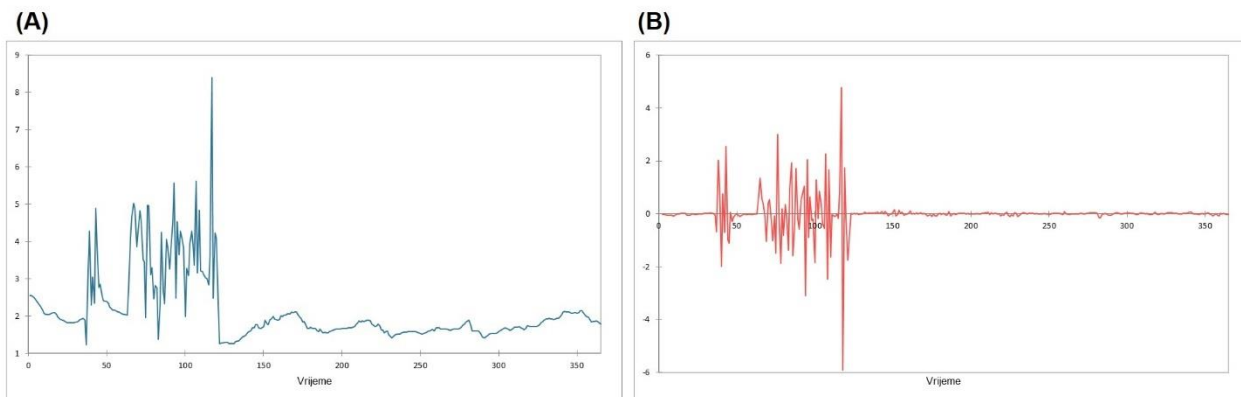
Tablica 4.17. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u površinskoj vodi na LI Vidrice

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,532	-63,609	0,383	0,604
XGB	0,716	-100,050	0,264	0,471

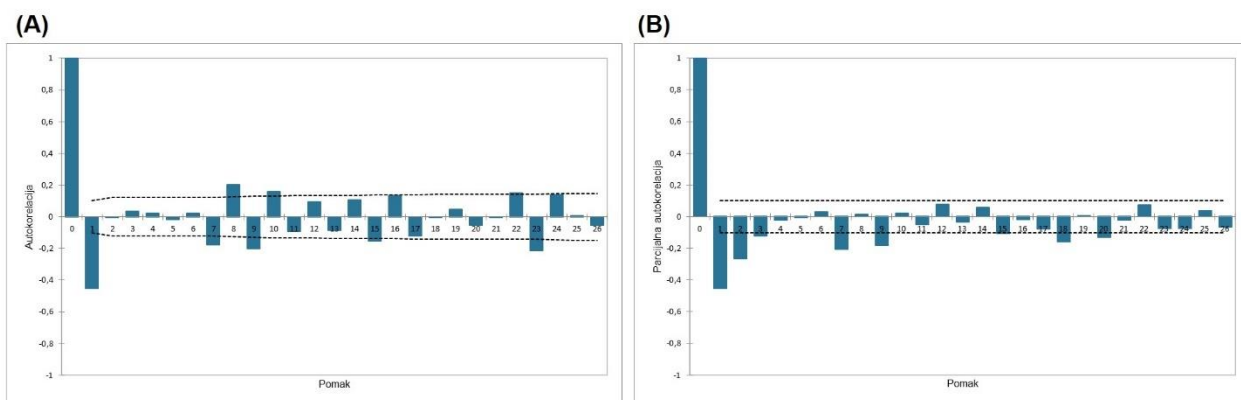


Slika 4.20. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu dnevnih podataka

Za razliku od modela strojnog učenja koji predviđaju vrijednost EC_w na temelju odabranih nezavisnih varijabli, ARIMA model koristi prošle vrijednosti EC_w s određenim pomakom za predviđanje budućih vrijednosti. Provedenim ADF testom utvrđeno je da je vremenska serija EC_w površinske vode nestacionarna ($p=0,068$) te je transformirana u stacionarnu diferenciranjem prvog reda (Slika 4.21). Na temelju izgleda korelograma autokorelacijske (Slika 4.22.A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (Slika 4.22.B) diferencirane vremenske serije odabrano je i testirano nekoliko ARIMA modela s različitim p i q hiperparametrima. Na temelju AIC kriterija kao najbolji odabran je model ARIMA (0,1,1) (Tablica 4.18).



Slika 4.21. Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w površinske vode na LI Vidrice



Slika 4.22. Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w površinske vode na LI Vidrice

Tablica 4.18. ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Model	AIC
ARIMA (0,1,1)	620,592
ARIMA (0,1,2)	622,414
ARIMA (1,1,0)	652,624
ARIMA (2,1,0)	628,026
ARIMA (1,1,1)	622,421
ARIMA (1,1,2)	624,476
ARIMA (2,1,1)	624,268
ARIMA (2,1,2)	626,180

Temeljem dobivenih rezultata razvijeni su modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice. Najniže vrijednosti pogreške predviđanja dnevne vrijednosti EC_w imao je ARIMA model za sva tri vremenska razdoblja (Tablica 4.19), pri čemu se razina pogreške povećavala s povećanjem vremenskog razdoblja za koje je izrađeno predviđanje. Najnepouzdanijim se pokazao model XGB, koji je kod dnevnih vrijednosti imao veću pogrešku i u odnosu na model MLR, usprkos boljim rezultatima procjenitelja na setu podataka za trening i testiranje modela. Predikcije za sve modele i vremenska razdoblja grafički su prikazani na Slici 4.23.A-C.

Tablica 4.19. Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice

Predviđanje	MLR		XGB		ARIMA (0,1,1)	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,117	0,125	0,187	0,190	0,054	0,055
14 dana	0,241	0,277	0,328	0,379	0,092	0,102
30 dana	0,410	0,284	0,319	0,375	0,220	0,282



Slika 4.23. Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Vidrice

4.6.3. Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Korelacijskom analizom odabrano je devet nezavisnih varijabli (Prilog, Tablica 8.8) za izradu modela MLR predviđanja EC_w podzemnih voda na LI Vidrice uključujući: dubinu vode, pH i ORP, temperaturu tla 0-25 cm, EC_b 0-25 cm, vodostaj Male Neretve na profilu Opuzen ustava nizvodno, vodostaj Neretve na profilu Metković, EC_w površina Metković Neretva i količina oborina. Provedenom analizom nije utvrđeno postojanje multikolinearnosti između nezavisnih varijabli te su sve korištene za izradu modela (Tablica 4.20).

Tablica 4.20. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	4,798
pH (25°C)	1,621
ORP (mV)	1,571
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	3,400
EC_b 0-25 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,528
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	3,573
Vodostaj Metković Neretva (cm)	4,266
EC_w površina Metković Neretva ($\mu\ cm^{-1}$)	1,649
Oborine (mm)	1,032

Najbolji model na temelju AIC kriterija imao je osam prediktora, a jedina varijabla koja je isključena iz modela bila je ORP vode. Vrijednost R^2 odabranog modela iznosila je 0,638. Rezultati odabira najboljeg modela prikazani su u Tablici 4.21 dok su parametri modela prikazani u Tablici 4.22.

Tablica 4.21. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	Dubina vode	4,718	0,279	0,279	10873,893
2	Dubina vode / EC_b 0-25 cm	2,585	0,605	0,605	6659,180
3	Dubina vode / pH / EC_b 0-25 cm	2,497	0,618	0,618	6417,291
4	Dubina vode / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva	2,427	0,629	0,629	6217,722
5	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva	2,384	0,636	0,636	6094,554
6	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / Oborine	2,378	0,637	0,636	6078,583
7	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,374	0,637	0,637	6066,995
8	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,372	0,638	0,637	6063,142
9	Dubina vode / pH / ORP / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,373	0,638	0,637	6065,058

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

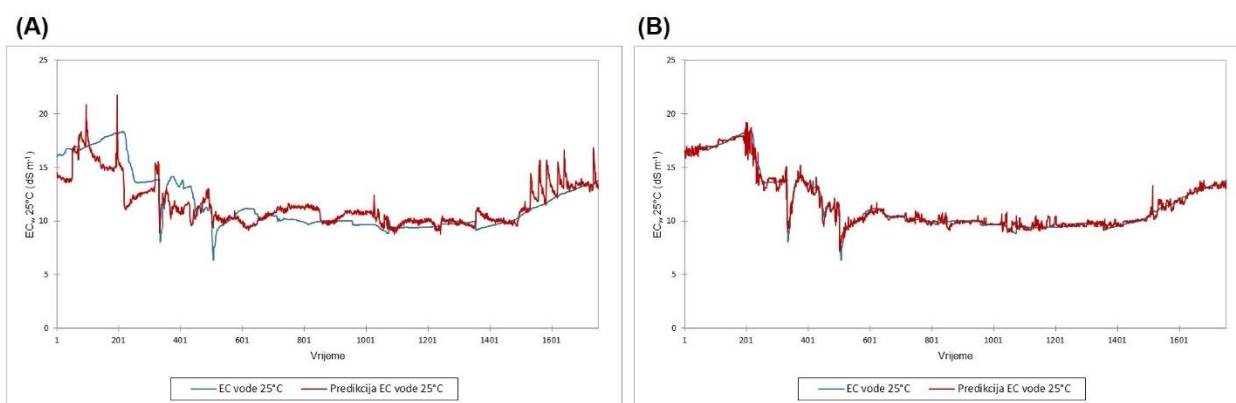
Tablica 4.22. Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	3,715	0,560	6,634	<0,0001
Dubina vode (m)	-4,971	0,116	-43,038	<0,0001
pH (25°C)	1,023	0,058	17,677	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000		
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,059	0,005	-12,368	<0,0001
EC_b 0-25 cm (dS m ⁻¹)	2,518	0,075	33,723	<0,0001
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,008	0,005	1,739	0,082
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,010	0,001	8,153	<0,0001
EC_w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,000	0,000	2,899	0,004
Oborine (mm)	0,088	0,035	2,511	0,012

Odabrani trening model XGB s hiperparametrima: $max\ depth=2$; $learning\ rate=0,3$; $minimum\ son\ size=2$; $L2=1$ imao je višu vrijednost R^2 (0,976) kao i manje pogreške od modela MLR. Sličnu vrijednost R^2 model XGB imao je i na setu podataka za testiranje (0,974), dok je model MLR imao višu vrijednost R^2 u odnosu na set podataka za treniranje modela (Tablica 4.23). Model XGB imao je manje vrijednosti pogrešaka (Tablica 4.23) i točnije je predviđao vrijednosti EC_w (Slika 4.24) podzemne vode.

Tablica 4.23. Procjenitelji modela MLR i XGB na validacijskom setu satnih podataka u podzemnoj vodi na LI Vidrice

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,690	1357,755	1,057	1,467
XGB	0,974	-3007,630	0,282	0,422

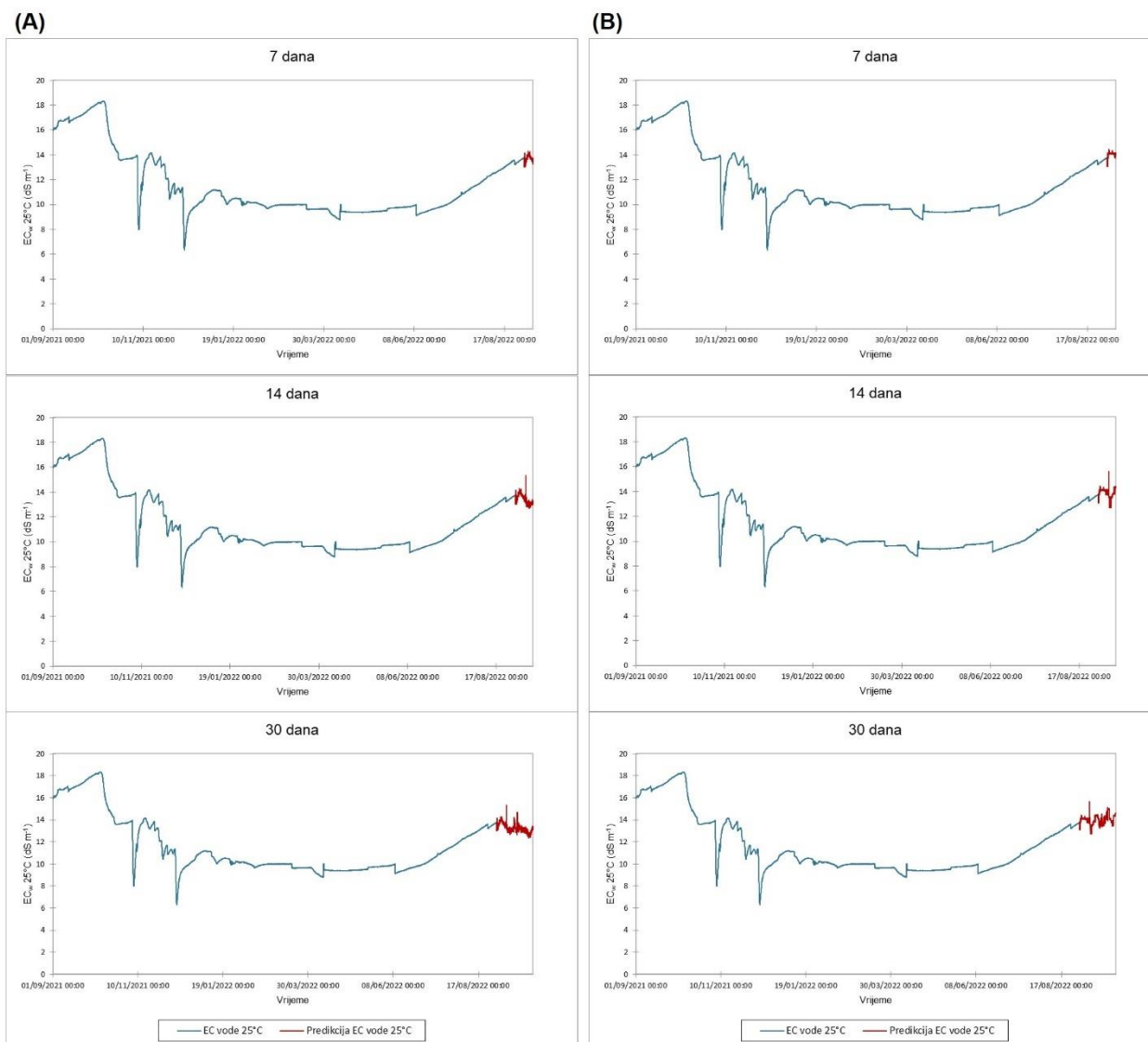


Slika 4.24. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu satnih podataka

Na temelju razvijenog modela izrađeno je predviđanje EC_w podzemne vode za tri različita vremenska razdoblja modelom MLR (Slika 4.25.A) i modelom XGB (Slika 4.25.B). Iako su se vrijednosti pogrešaka povećavale s povećanjem razdoblja predviđanja, najmanje pogreške za sva tri razdoblja imao je model XGB, s vrlo niskim vrijednostima MAE (0,19 dS m⁻¹) i RMSE (0,26 dS m⁻¹) za predviđanje sedam dana unaprijed (Tablica 4.24). Najviše vrijednosti pogrešaka bile su kod modela XGB predviđanja 30 dana unaprijed (MAE=0,88 dS m⁻¹ i RMSE=1,1 dS m⁻¹). Međutim, čak i pogreške predikcije 30 dana unaprijed su prihvatljive za razvoj pouzdanog modela obzirom da je prosječno izmjerena vrijednost EC_w bila visoka i iznosila je 12 dS m⁻¹.

Tablica 4.24. Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Predviđanje	MLR		XGB	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,368	0,440	0,187	0,255
14 dana	0,850	1,020	0,461	0,620
30 dana	1,600	1,844	0,879	1,066



Slika 4.25. Predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice

4.6.4. Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Model MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w imao je istih devet prediktora kao i model za predviđanje satnih vrijednosti (Prilog, Tablica 8.9), a na temelju rezultata provedenog testa multikolinearnosti niti jedna varijabla nije imala VIF vrijednosti višu od 10 te su sve nezavisne varijable odabrane za daljnju analizu i izradu modela (Tablica 4.25).

Tablica 4.25. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	7,151
pH (25°C)	1,918
ORP (mV)	1,755
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	4,046
EC_b 0-25 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,651
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	5,172
Vodostaj Metković Neretva (cm)	6,896
EC_w površina Metković Neretva ($\mu\ cm^{-1}$)	2,446
Oborine (mm)	1,139

U odnosu na model MLR za predviđanje satnih vrijednosti koji je koristio osam, najbolji model za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w imao je šest nezavisnih varijabli (Tablica 4.26), a isključene su varijable ORP vode, vodostaj Male Neretve na profilu Opuzen ustava nizvodno te količina oborina. Parametri odabranog modela prikazani su u Tablici 4.27.

Tablica 4.26. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	Dubina vode	4,358	0,295	0,292	431,796
2	Dubina vode / EC_b 0-25 cm	2,233	0,640	0,637	237,517
3	Dubina vode / pH / EC_b 0-25 cm	2,137	0,656	0,653	225,784
4	Dubina vode / pH / EC_b 0-25 cm / EC_w površina Metković Neretva	2,094	0,665	0,660	220,727
5	Dubina vode / pH / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva	2,076	0,669	0,663	219,192
6	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva	2,062	0,672	0,665	218,286
7	Dubina vode / pH / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,064	0,673	0,665	219,458
8	Dubina vode / pH / ORP / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,070	0,673	0,664	221,250
9	Dubina vode / pH / ORP / Temperatura tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	2,077	0,673	0,663	223,209

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

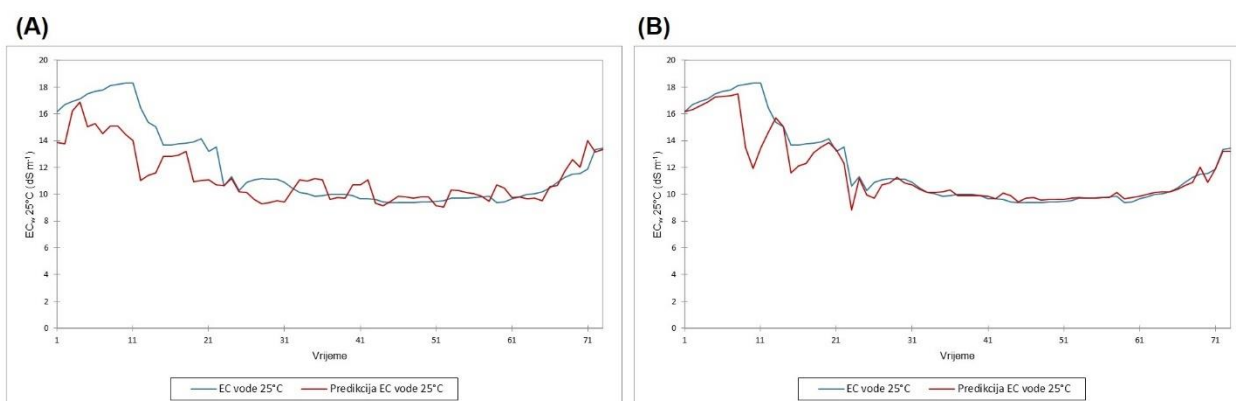
Tablica 4.27. Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	-0,966	2,784	-0,347	0,729
Dubina vode (m)	-4,379	0,625	-7,007	<0,0001
pH (25°C)	1,448	0,314	4,612	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000		
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,033	0,017	-1,904	0,058
EC_b 0-25 cm (dS m ⁻¹)	2,618	0,250	10,482	<0,0001
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,000	0,000		
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,010	0,005	1,995	0,047
EC_w površina Metković Neretva (μ cm ⁻¹)	0,001	0,001	1,678	0,094
Oborine (mm)	0,000	0,000		

Prilikom razvoja modela XGB s istim prediktorima odabrani su sljedeći hiperparametri modela: *max depth=6; learning rate=0,1; minimum son size=2; L2=1*. Model XGB razvijen na setu podataka za treniranje ($R^2=0,984$), ali i za testiranje imao je višu vrijednost R^2 (Tablica 4.28) i znatno manje vrijednosti pogrešaka u odnosu na model MLR (Tablica 4.28). Stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w na setu podataka za testiranje modela prikazane su na Slici 4.26.A za model MLR i 4.26.B za model XGB.

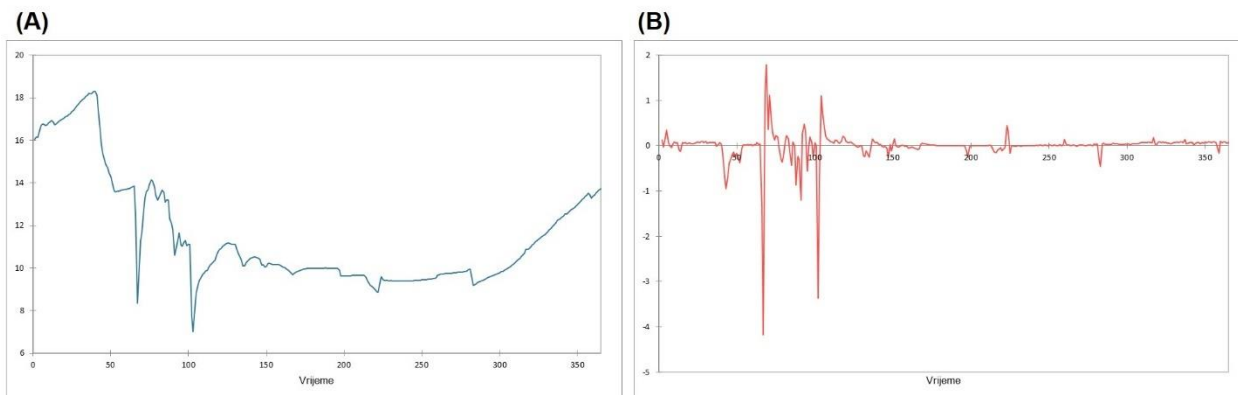
Tablica 4.28. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u podzemnoj vodi na LI Vidrice

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,644	90,623	1,201	1,713
XGB	0,818	41,870	0,569	1,227

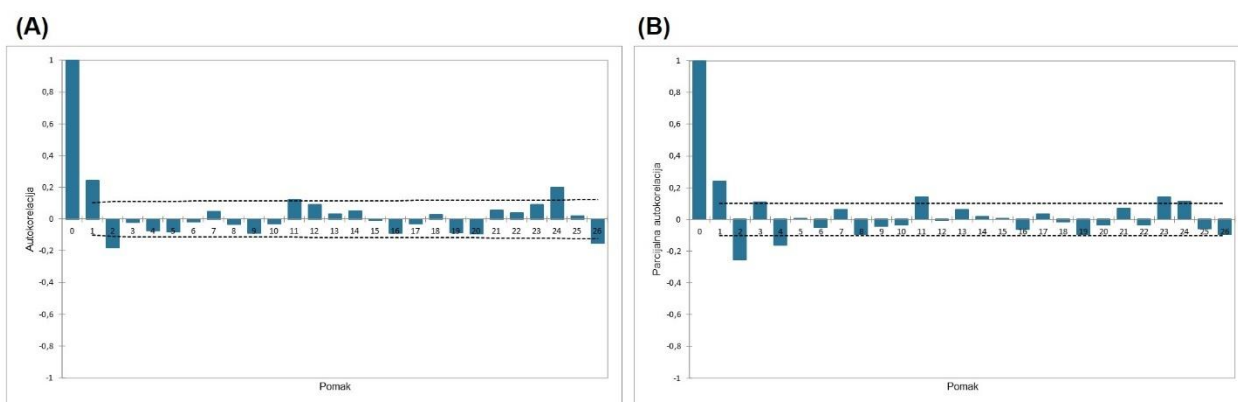


Slika 4.26. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Vidrice na testnom setu dnevnih podataka

Kod ARIMA modela provedenim ADF testom utvrđeno je da se radi o nestacionarnoj vremenskoj seriji ($p=0,934$) (Slika 4.27.A) koja je diferenciranjem prvog reda transformirana u stacionarnu (Slika 4.27.B). Pregledom korelograma (Slika 4.28) diferencirane vremenske serije odabrano je 14 ARMA modela s različitim hiperparametrima p (0-2) i q (0-4) koji su testirani. Najnižu vrijednost AIC kriterija imao je model ARIMA (0,1,2) te je odabran kao najbolji model koji je korišten za predviđanje stupnja zasljenosti podzemne vode na LI Vidrice (Tablica 4.29).



Slika 4.27. Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w podzemne vode na LI Vidrice



Slika 4.28. Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w podzemne vode na LI Vidrice

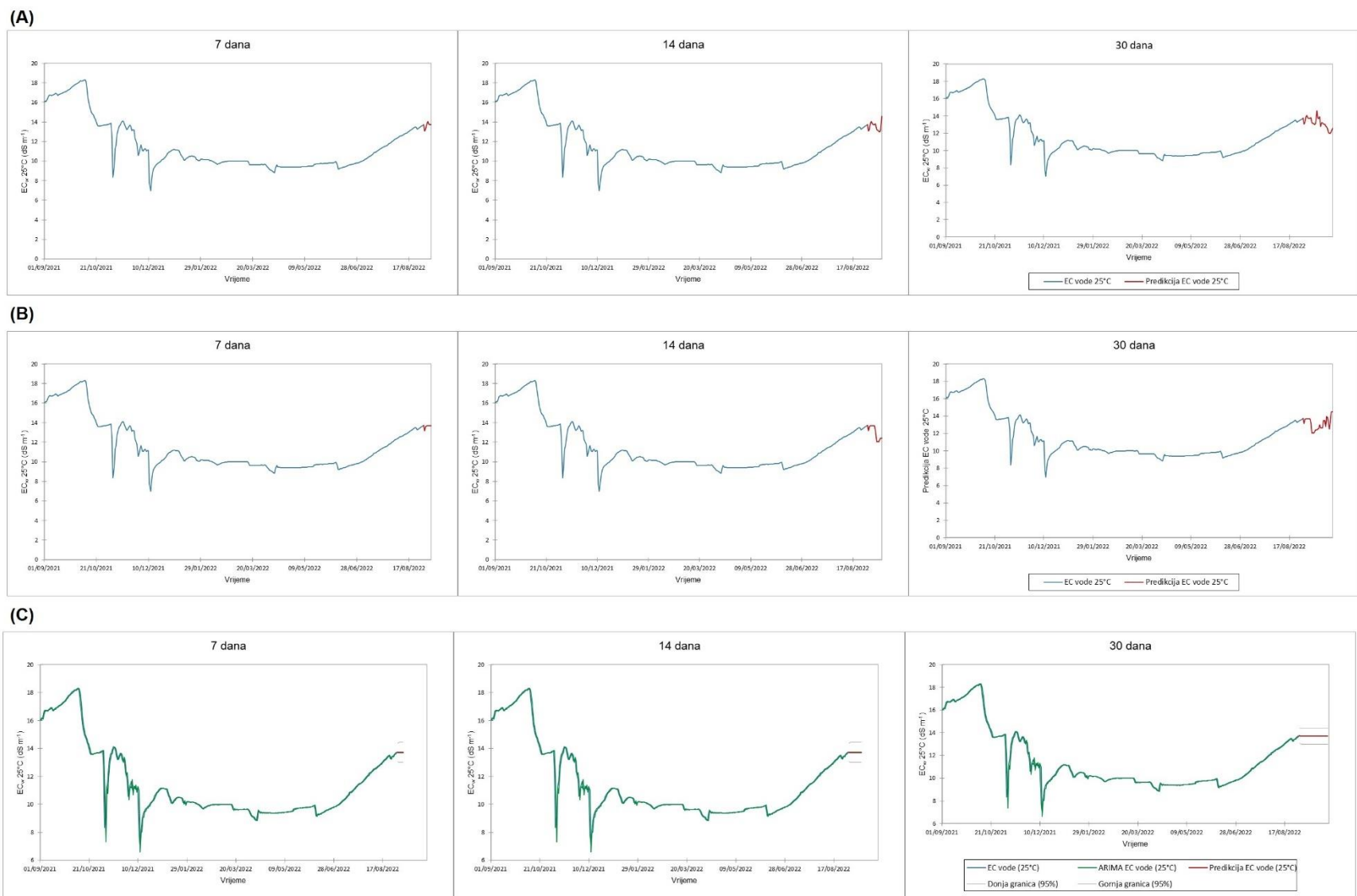
Tablica 4.29. ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Model	AIC	Model	AIC
ARIMA (0,1,1)	254,733	ARIMA (2,1,1)	240,307
ARIMA (0,1,2)	238,130	ARIMA (3,1,1)	248,883
ARIMA (1,1,0)	275,118	ARIMA (4,1,1)	242,142
ARIMA (2,1,0)	253,158	ARIMA (1,1,2)	240,287
ARIMA (3,1,0)	250,921	ARIMA (2,1,2)	239,193
ARIMA (4,1,0)	243,259	ARIMA (3,1,2)	240,416
ARIMA (1,1,1)	238,675	ARIMA (4,1,2)	242,428

Kod svih razvijenih modela vrijednosti pogrešaka povećavale su se s povećanjem razdoblja predviđanja (Tablica 4.30). Slično kao kod površinske vode, u previđanju vrijednosti EC_w neovisno o vremenskom razdoblju, najbolje performanse pokazao je ARIMA model u odnosu na oba modela strojnog učenja (Tablica 4.30). Predikcije razvijenih modela grafički su prikazane na Slici 4.29.A-C.

Tablica 4.30. Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Vidrice

Predviđanje	MLR		XGB		ARIMA (0,1,2)	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,392	0,463	0,430	0,449	0,306	0,336
14 dana	0,739	0,910	1,305	1,605	0,551	0,619
30 dana	1,681	2,047	1,752	1,947	1,132	1,296



Slika 4.29. Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Vidrice

4.6.5. Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Za predviđanja stupnja zasljenosti površinskih voda modelom MLR na lokaciji Luke odabrano je devet nezavisnih varijabli (Prilog, Tablica 8.10): dubina vode, temperatura vode, vlažnost tla tla 50-75 cm, EC_b 0-25 cm, EC_b 50-75 cm, vodostaj Opuzen ustava nizvodno Mala Neretva, vodostaj Metković Neretva, EC_w površina Metković Neretva i količina oborina. Testom multikolinearnosti niti jedan prediktor nije isključen iz daljnjeg razvoja modela (Tablica 4.31).

Tablica 4.31. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	1,204
Temperatura vode (°C)	4,985
Vlažnost tla 50-75 cm ($m^3 m^{-3}$)	8,755
EC_b 0-25 cm ($dS m^{-1}$)	2,448
EC_b 50-75 cm ($dS m^{-1}$)	4,602
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	3,380
Vodostaj Metković Neretva (cm)	3,644
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S cm^{-1}$)	1,384
Oborine (mm)	1,026

Najbolji model MLR odabran na temelju AIC kriterija imao je osam prediktora (Tablica 4.32), a jedina varijabla koja nije doprinijela nižoj vrijednosti AIC bila je vodostaj Male Neretve na profilu Opuzen ustava nizvodno. Vrijednost R^2 odabranog modela razvijenog na setu podataka za trening iznosila je 0,559, a parametri razvijenog modela prikazani su u Tablici 4.33.

Tablica 4.32. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	EC _b 0-25 cm	1,242	0,448	0,448	1519,076
2	Temperatura vode / EC _b 0-25 cm	1,107	0,508	0,508	715,357
3	Temperatura vode / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm	1,053	0,532	0,532	368,448
4	Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm	1,007	0,553	0,552	56,976
5	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm	1,000	0,556	0,556	7,202
6	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,997	0,558	0,557	-14,932
7	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva	0,995	0,558	0,558	-25,242
8	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,995	0,559	0,558	-27,905
9	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 50-75 cm / EC _b 0-25 cm / EC _b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,995	0,559	0,558	-26,162

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

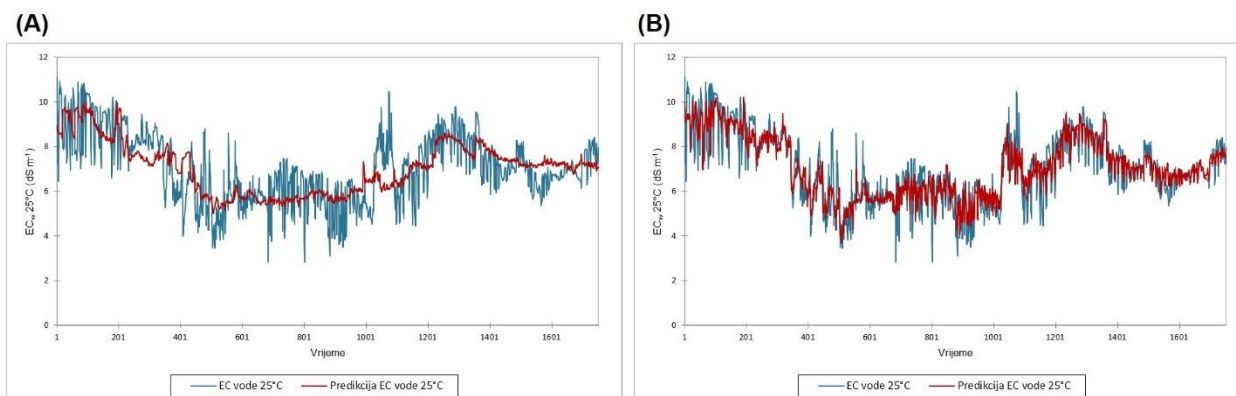
Tablica 4.33. Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	4,477	0,198	22,574	<0,0001
Dubina vode (m)	-0,593	0,098	-6,059	<0,0001
Temperatura vode (°C)	0,084	0,004	21,602	<0,0001
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	-7,417	0,662	-11,201	<0,0001
EC _b 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,577	0,023	25,429	<0,0001
EC _b 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,378	0,019	20,433	<0,0001
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,000	0,000		
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,002	0,000	-4,679	<0,0001
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,000	0,000	3,596	0,000
Oborine (mm)	0,031	0,015	2,058	0,040

Vrijednost R^2 testnog modela MLR bila je niža u odnosu na trening model i iznosila je 0,540. Rezultati ostalih procjenitelja prikazani su u Tablici 4.34, a grafički je predikcija prikazana na Slici 4.30.A. Razvijeni model XGB s istim prediktorima imao je hiperparametre: *max depth*=2; *learning rate*=0,3; *minimum son size*=2; *L2*=1. Kao kod modela MLR, vrijednosti R^2 između trening (0,843) i testnog modela (0,817) nisu se bitno razlikovale niti kod modela XGB, ali su ipak bile više nego kod regresijskog modela (Tablica 4.34). Iz grafičkog prikaza vidljivo je da model XGB na testnom setu podataka bolje predviđa vrlo dinamične satne promjene EC_w u površinskoj vodi na LI Luke (Slika 4.30.B).

Tablica 4.34. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u površinskoj vodi na LI Luke

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,540	151,532	0,840	1,039
XGB	0,817	-1461,000	0,488	0,656

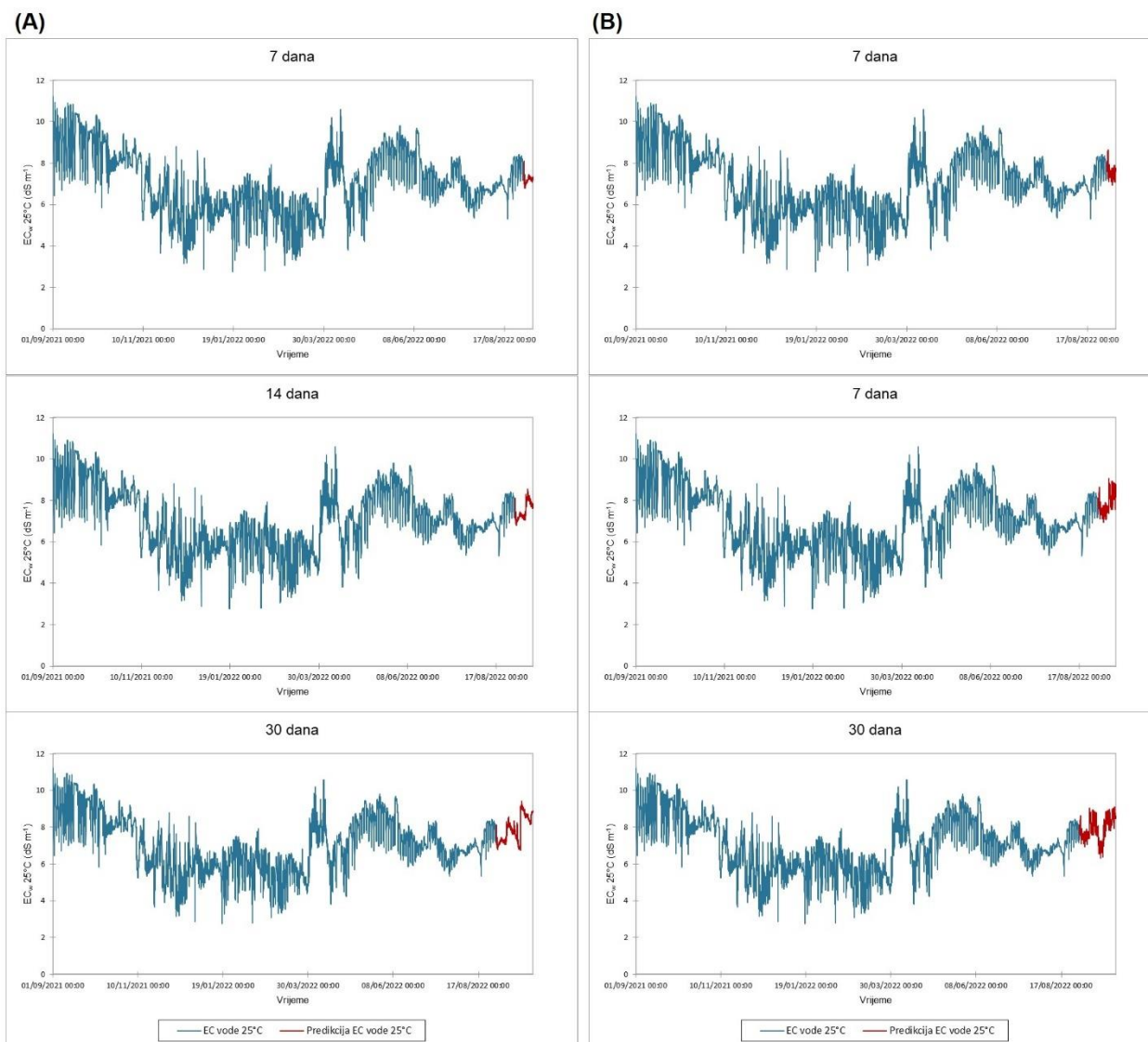


Slika 4.30. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu satnih podataka

Razvijenim modelima MLR (Slika 4.31.A) i XGB (Slika 4.31.B) predviđena je vrijednost EC_w površinske vode na lokaciji Luke. Niže vrijednosti pogrešaka kod predviđanja sedam i 14 dana unaprijed imao je model XGB, dok je neznatno niže vrijednosti pogreška kod predviđanja 30 dana unaprijed imao model MLR (Tablica 4.35). Vrijednost RMSE kod modela XGB bila je veća od 1 dS m^{-1} samo kod predviđanja 30 dana unaprijed.

Tablica 4.35. Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Predviđanje	MLR		XGB	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	1,034	1,173	0,754	0,873
14 dana	1,072	1,216	0,810	0,998
30 dana	0,990	1,171	1,007	1,219



Slika 4.31. Predviđanje satnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke

4.6.6. Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Model MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w imao je isti broj odabranih prediktora kao i model za predviđanje satnih vrijednosti, ali su se razlikovali u varijabli vlažnost tla gdje je kod modela za predviđanje dnevnih vrijednosti odabrana vlažnost tla na dubini 50-75 cm (Prilog, Tablica 8.11). Analizom multikolinearnosti odabranih nezavisnih varijabli (Tablica 4.36) utvrđeno je da se svi odabrani prediktori mogu koristiti za daljnji razvoj modela.

Tablica 4.36. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	1,295
Temperatura vode (°C)	6,033
Vlažnost tla 0-25 cm ($m^3 m^{-3}$)	7,434
EC_b 0-25 cm ($dS m^{-1}$)	3,159
EC_b 50-75 cm ($dS m^{-1}$)	3,748
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	4,995
Vodostaj Metković Neretva (cm)	5,658
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S cm^{-1}$)	1,479
Oborine (mm)	1,130

Na temelju AIC kriterija odabran je najbolji model koji je imao ukupno osam prediktora i vrijednost $R^2=0,646$, a jedina isključena varijabla bila je vodostaj Male Neretve na profilu Opuzen ustava nizvodno (Tablica 4.37). Parametri razvijenog modela prikazani su u Tablici 4.38.

Tablica 4.37. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	EC_b 0-25 cm	0,919	0,516	0,514	-22,704
2	Temperatura vode / EC_b 0-25 cm	0,796	0,582	0,579	-63,820
3	Temperatura vode / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm	0,753	0,606	0,602	-78,840
4	Temperatura vode / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,713	0,628	0,623	-93,758
5	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,705	0,634	0,627	-96,299
6	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,696	0,640	0,632	-98,856
7	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva / Oborine	0,690	0,644	0,635	-100,468
8	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,688	0,646	0,636	-100,545
9	Dubina vode / Temperatura vode / Vlažnost tla 0-25 cm / EC_b 0-25 cm / EC_b 50-75 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,690	0,647	0,635	-98,664

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

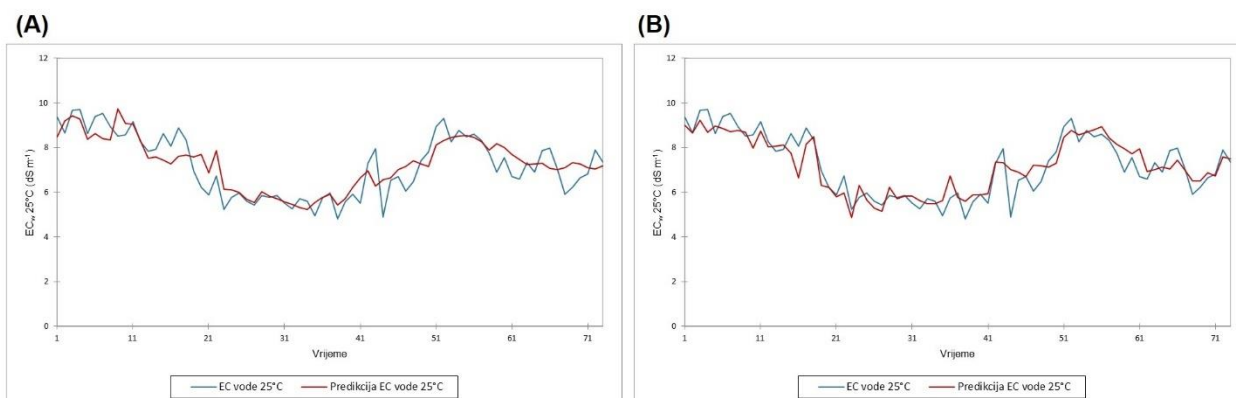
Tablica 4.38. Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	4,414	0,936	4,716	<0,0001
Dubina vode (m)	-1,221	0,497	-2,456	0,015
Temperatura vode (°C)	0,085	0,018	4,661	<0,0001
Vlažnost tla 0-25 cm ($m^3 m^{-3}$)	-5,204	3,013	-1,727	0,085
EC_b 0-25 cm ($dS m^{-1}$)	0,654	0,103	6,357	<0,0001
EC_b 50-75 cm ($dS m^{-1}$)	0,313	0,080	3,900	0,000
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,000	0,000		
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,004	0,002	-2,186	0,030
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S cm^{-1}$)	0,000	0,000	1,603	0,110
Oborine (mm)	0,010	0,006	1,745	0,082

Za predviđanje stupnja zaslanjenosti modelom XGB odabran je model sa sljedećim hiperparametrima: $max\ depth=6$; $learning\ rate=0,2$; $minimum\ son\ size=2$; $L2=1$. Vrijednost R^2 trening modela bila je viša kod modela XGB ($R^2=938$) u odnosu na model MLR (Tablica 4.37). Iako se udio objašnjene varijabilnosti razvijenim modelom MLR na testnom setu podataka povećao u odnosu na trening set i dalje je ta vrijednost bila niža u odnosu na model XGB (Tablica 4.39). Stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w prikazane su na Slici 4.32.A za model MLR i 4.32.B za model XGB.

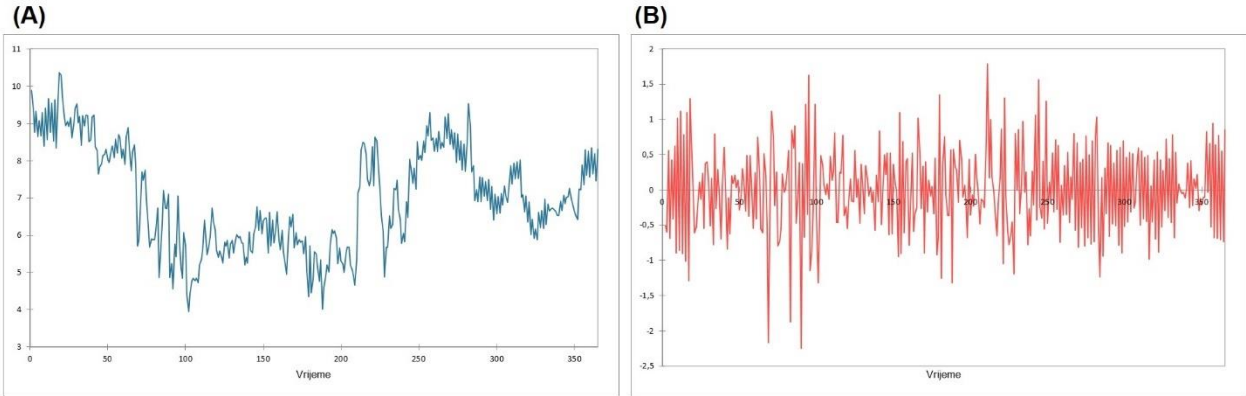
Tablica 4.39. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u površinskoj vodi na LI Luke

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,729	-33,794	0,558	0,711
XGB	0,825	-65,840	0,434	0,571

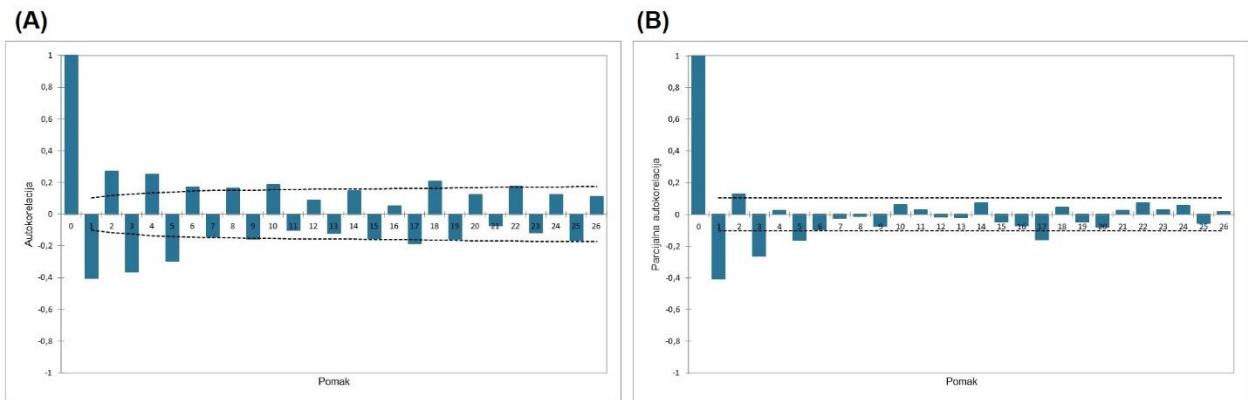


Slika 4.32. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu dnevnih podataka

Provedenim ADF testom utvrđeno je da je vremenska serija dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na lokacije Luke nestacionarna ($p=0,533$) (Slika 4.33.A) te je transformirana diferenciranjem prvog reda, pri čemu je dobivena p vrijednost u ADF testu iznosila $<0,0001$ ukazujući na stacionarnost transformirane vremenske serije (Slika 4.33.B). Analizom korelograma autokorelacije (Slika 4.34.A) i parcijalne autokorelacije (Slika 4.34.B) odabrana su 23 ARIMA modela koja su testirana, a na temelju AIC kriterija kao najbolji odabran je ARIMA (2,1,2) model (Tablica 4.40).



Slika 4.33. Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w površinske vode na LI Luke



Slika 4.34. Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w površinske vode na LI Luke

Tablica 4.40. ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Model	AIC	Model	AIC
ARIMA (0,1,1)	619,245	ARIMA (2,1,1)	584,960
ARIMA (0,1,2)	619,813	ARIMA (2,1,2)	571,223
ARIMA (0,1,3)	592,565	ARIMA (2,1,3)	571,870
ARIMA (0,1,4)	591,008	ARIMA (2,1,4)	573,837
ARIMA (0,1,5)	576,759	ARIMA (2,1,5)	575,864
ARIMA (1,1,0)	608,320	ARIMA (3,1,0)	579,770
ARIMA (1,1,1)	584,985	ARIMA (3,1,1)	581,025
ARIMA (1,1,2)	583,854	ARIMA (3,1,2)	571,807
ARIMA (1,1,3)	576,247	ARIMA (3,1,3)	573,846
ARIMA (1,1,4)	572,614	ARIMA (3,1,4)	576,137
ARIMA (1,1,5)	577,269	ARIMA (3,1,5)	577,529
ARIMA (2,1,0)	604,295		

Razvijenim modelima strojnog učenja (Slika 4.35.A-B) i vremenskih serija (Slika 4.35.C) izrađena je predikcija vrijednosti EC_w za tri vremenska razdoblja. Za predviđanje sedam i 14 dana unaprijed najmanje pogreške imao je ARIMA (2,1,2) model, dok je najnepouzdaniji bio model MLR s pogreškama MAE i RMSE većim od 1 dS m^{-1} za oba razdoblja (Tablica 4.41). Zbog dinamičnih promjena EC_w u površinskoj vodi na LI Luke, predviđanja s manjom pogreškom 30 dana unaprijed imali su modeli strojnog učenja koji za predviđanje koriste nezavisne varijable, pri čemu je bolje rezultate imao model XGB (Tablica 4.41).

Tablica 4.41. Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode na LI Luke

Predviđanje	MLR		XGB		ARIMA (2,1,2)	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	1,104	1,200	0,721	0,804	0,483	0,616
14 dana	1,091	1,274	0,801	0,984	0,628	0,716
30 dana	0,814	1,016	0,753	0,927	1,036	1,176



Slika 4.35. Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w površinske vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Luke

4.6.7. Modeli predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Na temelju rezultata provedene korelacijske analize odabrane su nezavisne varijable ($r < 0,7$): dubina vode, temperatura vode, ORP, EC_b 25-50 cm, EC_b 75-100 cm, vodostaj Opuzen ustava nizvodno Mala Neretva, vodostaj Metković Neretva, EC_w površina Metković Neretva i količina oborina. Rezultati korelacijske analize svih varijabli prikazani su u Prilogu, Tablica 8.12. Sve odabrane varijable nakon provedenog testa multikolinearnosti korištene su za razvoj modela MLR (Tablica 4.42).

Tablica 4.42. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	2,858
Temperatura vode (°C)	4,296
ORP (mV)	5,590
EC_b 25-50 cm ($dS\ m^{-1}$)	4,763
EC_b 75-100 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,659
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	3,503
Vodostaj Metković Neretva (cm)	3,895
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S\ cm^{-1}$)	1,509
Oborine (mm)	1,032

Kao najbolji, odabran je model s ukupno osam nezavisnih varijabli, a jedina varijabla koja je isključena iz modela bila je ORP vode. Vrijednost R^2 odabranog modela iznosila je visokih 0,824. Rezultati odabira najboljeg modela prikazani su u Tablici 4.43. dok su parametri modela prikazani u Tablici 4.44.

Tablica 4.43. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	EC_b 25-50 cm	0,491	0,297	0,296	-4976,546
2	EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm	0,281	0,599	0,598	-8904,688
3	Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm	0,171	0,755	0,755	-12366,521
4	Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,138	0,803	0,803	-13889,287
5	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,132	0,812	0,811	-14201,728
6	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,124	0,822	0,822	-14598,103
7	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva	0,123	0,824	0,824	-14670,609
8	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,123	0,824	0,824	-14673,237
9	Dubina vode / Temperatura vode / ORP / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva / Oborine	0,123	0,824	0,824	-14671,539

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

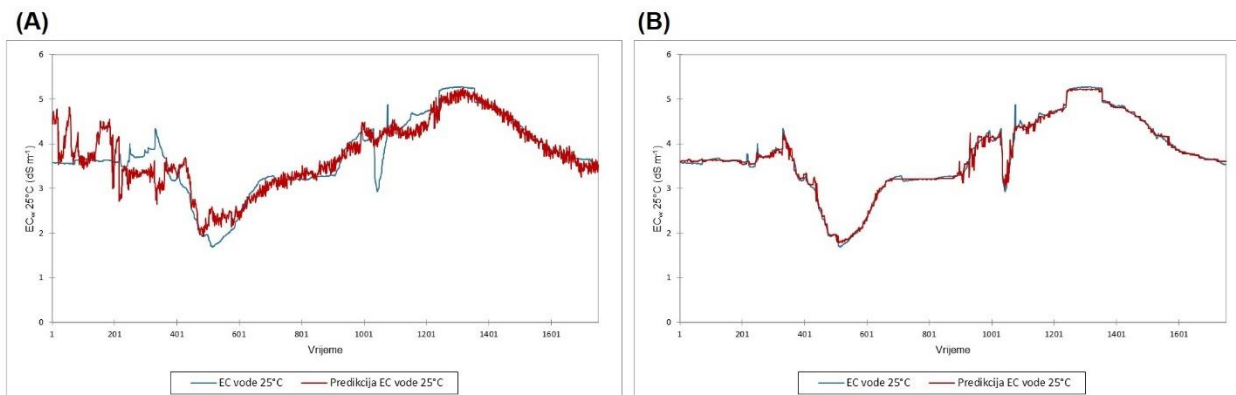
Tablica 4.44. Parametri modela MLR za predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	5,501	0,045	122,295	<0,0001
Dubina vode (m)	-0,379	0,016	-23,954	<0,0001
Temperatura vode (°C)	-0,167	0,003	-60,771	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000		
EC_b 25-50 cm ($dS\ m^{-1}$)	-0,290	0,004	-73,409	<0,0001
EC_b 75-100 cm ($dS\ m^{-1}$)	0,635	0,006	98,224	<0,0001
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,015	0,001	16,681	<0,0001
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,007	0,000	-26,210	<0,0001
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S\ cm^{-1}$)	0,000	0,000	-8,886	<0,0001
Oborine (mm)	0,011	0,007	1,580	0,114

Model XGB s istim prediktorima razvijen je sa sljedećim hiperparametrima: *max depth*=6; *learning rate*=0,2; *minimum son size*=2; *L2*=1. Vrijednost R^2 modela razvijenog na setu podataka za treniranje iznosila je čak 0,993. Iako su na setu podataka za testiranje oba modela imala visoke vrijednosti R^2 , model XGB (Slika 4.36.A) bolje je predviđao vrijednosti EC_w od modela MLR (Slika 4.36.B) uz niža odstupanja od stvarno izmjerenih vrijednosti (Tablica 4.45).

Tablica 4.45. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu satnih podataka u podzemnoj vodi na LI Luke

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,816	-3591,600	0,253	0,357
XGB	0,992	-9042,500	0,048	0,075

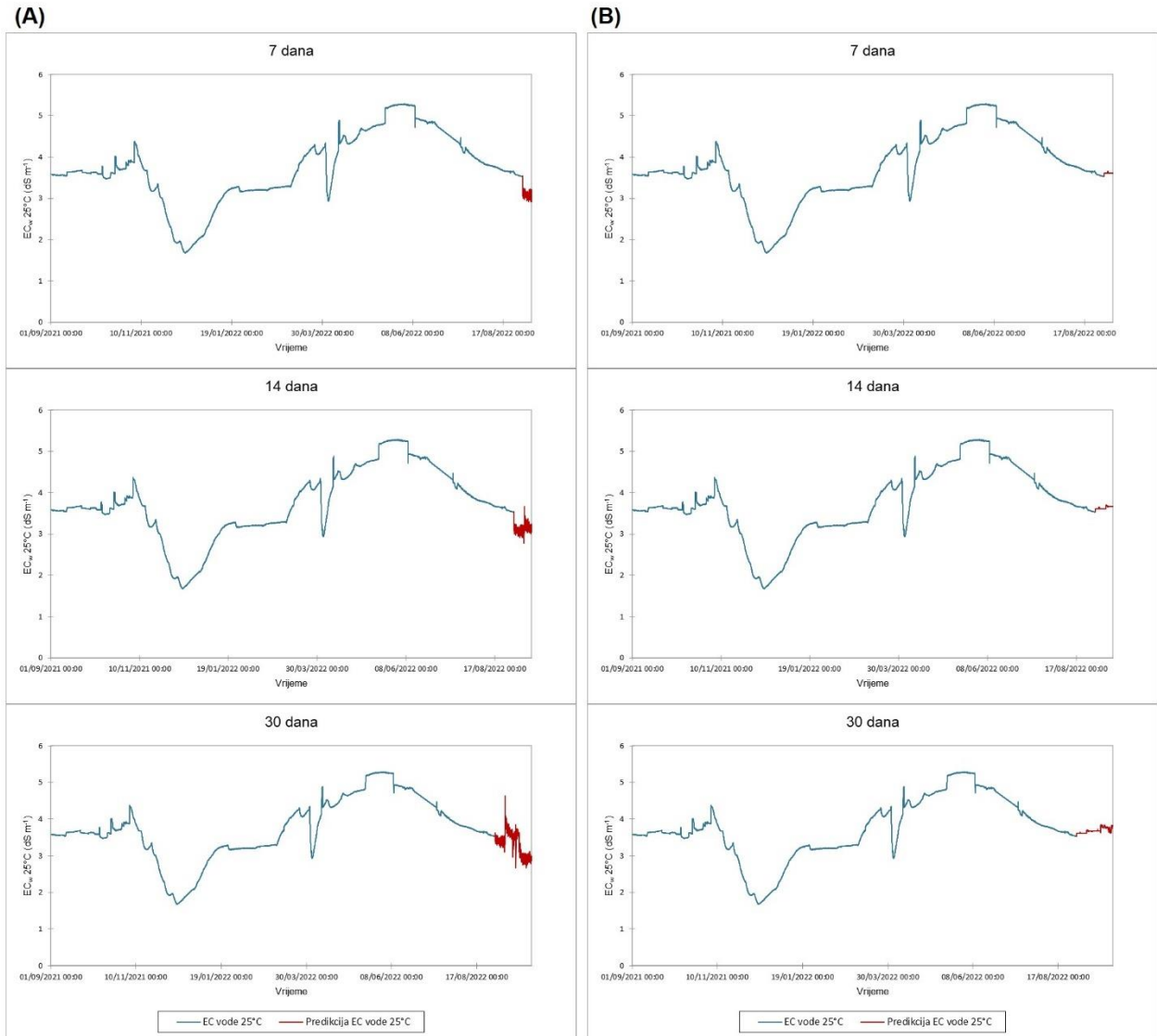


Slika 4.36. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu satnih podataka

Razvijenim modelima MLR (Slika 4.37.A) i XGB (Slika 4.37.B) izrađeno je predviđanje vrijednosti EC_w sedam, 14 i 30 dana unaprijed. Model XGB za sva tri vremenska razdoblja imao je niže vrijednosti pogrešaka od modela MLR, a kod oba modela vrijednosti pogrešaka povećavale su se s povećanjem vremenskog razdoblja predviđanja (Tablica 4.46). Najniža vrijednost RMSE kod modela XGB utvrđena je kod predikcije sedam dana unaprijed i iznosila je 0,08 dS m⁻¹, dok je kod modela predikcije 30 dana unaprijed iznosila je 0,18 dS m⁻¹ što i dalje predstavlja vrlo nisku vrijednost pogreške i omogućuje pouzdano predviđanje vrijednosti EC_w .

Tablica 4.46. Procjenitelji predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Predviđanje	MLR		XGB	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,114	0,134	0,082	0,083
14 dana	0,175	0,234	0,135	0,151
30 dana	0,310	0,399	0,164	0,179



Slika 4.37. Predviđanje satnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke

4.6.8. Modeli predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Za razvoj modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w odabrane su iste nezavisne varijable kao kod modela za predviđanje satnih vrijednosti (Prilog, Tablica 8.13), a daljnjom analizom multikolinearnosti utvrđeno je da je se sve odabrane varijable mogu koristiti za modeliranje (Tablica 4.47).

Tablica 4.47. Analiza multikolinearnosti prediktora modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Varijabla	VIF
Dubina vode (m)	3,243
Temperatura vode (°C)	4,490
ORP (mV)	6,162
EC_b 25-50 cm ($dS\ m^{-1}$)	4,924
EC_b 75-100 cm ($dS\ m^{-1}$)	1,682
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	4,864
Vodostaj Metković Neretva (cm)	6,258
EC_w površina Metković Neretva ($\mu S\ cm^{-1}$)	2,031
Oborine (mm)	1,117

Model, s najnižom vrijednošću AIC kriterija, uključuje sedam prediktora. Varijable vodostaj Male Neretve na profilu Opuzen ustava nizvodno i količina oborina nisu pridonijele smanjenju AIC vrijednosti (Tablica 4.48). Odabrani model razvijen na setu podataka za trening imao je vrijednost R^2 višu od 0,8, slično kao i kod modela za predviđanje satnih vrijednosti EC_w . Parametri modela MLR prikazani su u Tablici 4.49.

Tablica 4.48. Rezultati odabira najboljeg modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Broj varijabli	Varijable	MSE	R ²	Prilagođeni R ²	AIC
1	EC _b 25-50 cm	0,506	0,291	0,288	-197,038
2	EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm	0,276	0,615	0,612	-373,372
3	Temperatura vode / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm	0,176	0,756	0,753	-504,046
4	Temperatura vode / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm / Vodostaj Metković Neretva	0,138	0,809	0,806	-574,056
5	Temperatura vode / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,125	0,827	0,824	-600,964
6	Dubina vode / Temperatura vode / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva	0,117	0,839	0,835	-619,306
7	Dubina vode / Temperatura vode / EC_b 25-50 cm / EC_b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC_w površina Metković Neretva	0,114	0,843	0,839	-625,622
8	Dubina vode / Temperatura vode / ORP / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva	0,114	0,844	0,839	-624,453
9	Dubina vode / Temperatura vode / ORP / EC _b 25-50 cm / EC _b 75-100 cm / Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva / Vodostaj Metković Neretva / EC _w površina Metković Neretva / Oborine	0,115	0,844	0,839	-622,678

Podobljan je najbolji model na temelju AIC kriterija

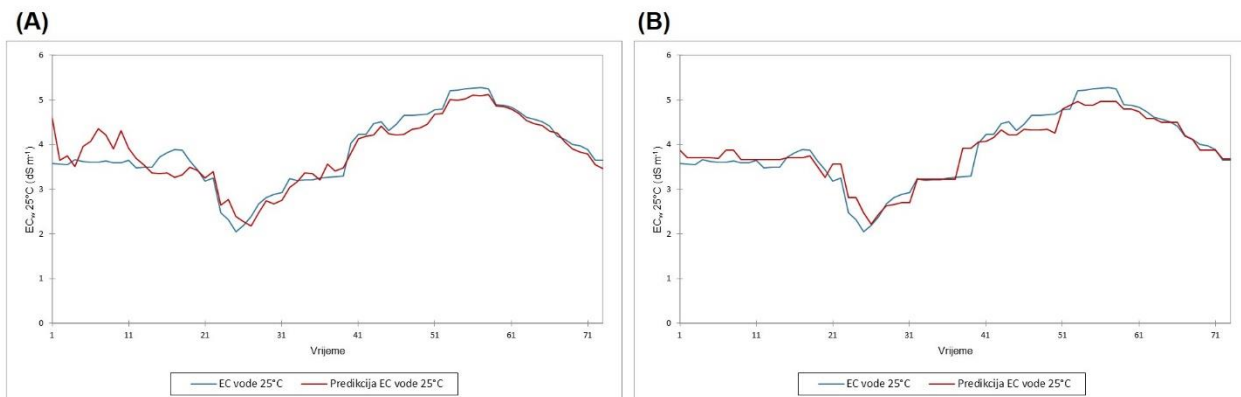
Tablica 4.49. Parametri modela MLR za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t
Odsječak na osi y	5,007	0,228	21,995	<0,0001
Dubina vode (m)	-0,309	0,070	-4,394	<0,0001
Temperatura vode (°C)	-0,151	0,014	-10,914	<0,0001
ORP (mV)	0,000	0,000		
EC_b 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0,275	0,020	-13,854	<0,0001
EC_b 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,608	0,032	19,303	<0,0001
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,028	0,005	5,399	<0,0001
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,011	0,002	-7,506	<0,0001
EC_w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,000	0,000	-3,124	0,002
Oborine (mm)	0,000	0,000		

Prediktori korišteni u regresijskom modelu korišteni su i za razvoj modela XGB, a postavljeni hiperparametri bili su: *max depth*=2; *learning rate*=0,3; *minimum son size*=2; *L2*=1. Vrijednost R^2 modela XGB bila je viša ($R^2=0,945$) u odnosu na model MLR na setu podataka za treniranje modela kao i na setu podataka za testiranje modela uz niže vrijednosti pogrešaka (Tablica 4.50). Manje vrijednosti pogrešaka modela XGB (Slika 4.38.A) vidljive su i iz grafičkog prikaza gdje su predviđene vrijednosti EC_w bile bliže izmjerenim vrijednostima u odnosu na model MLR (Slika 4.38.B).

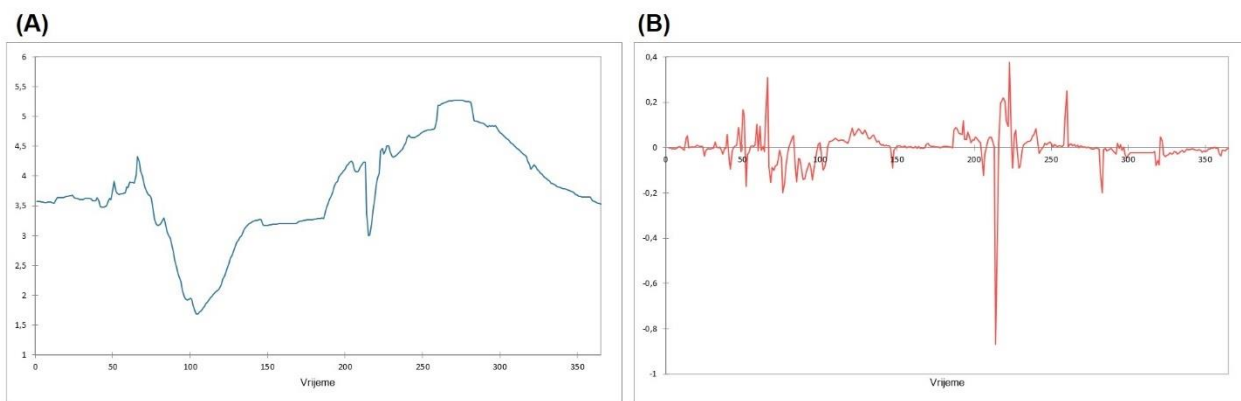
Tablica 4.50. Procjenitelji modela MLR i XGB na testnom setu dnevnih podataka u podzemnoj vodi na LI Luke

Model	R^2	AIC	MAE	RMSE
MLR	0,870	-169,265	0,214	0,285
XGB	0,923	-207,730	0,164	0,219

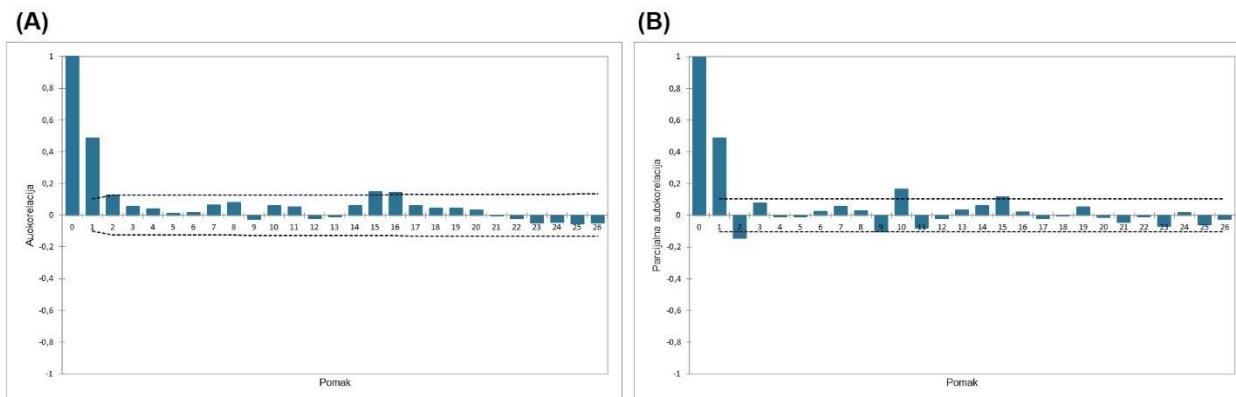


Slika 4.38. Grafički prikaz stvarno izmjerene i predviđene vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A) i modelom XGB (B) na LI Luke na testnom setu dnevnih podataka

Analizom stacionarnosti ADF testom utvrđeno je da je vremenska serija dnevnih vrijednosti EC_w nestacionarna ($p=0,784$) te je diferenciranjem prvog reda transformirana u stacionarnu (Slika 4.39). Pregledom korelograma autokorelacija (Slika 4.40.A) i parcijalne autokorelacije (Slika 4.40.B) odabrano je 8 kombinacija ARIMA modela koji su testirani. Kao najbolji model s najnižom vrijednošću AIC kriterija odabran je model ARIMA (1,1,1) (Tablica 4.51).



Slika 4.39. Nediferencirana (A) i diferencirana (B) vremenska serija EC_w podzemne vode na LI Luke



Slika 4.40. Korelogram autokorelacijske funkcije (A) i parcijalne autokorelacijske funkcije (B) EC_w podzemne vode na LI Luke

Tablica 4.51. ARIMA modeli za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

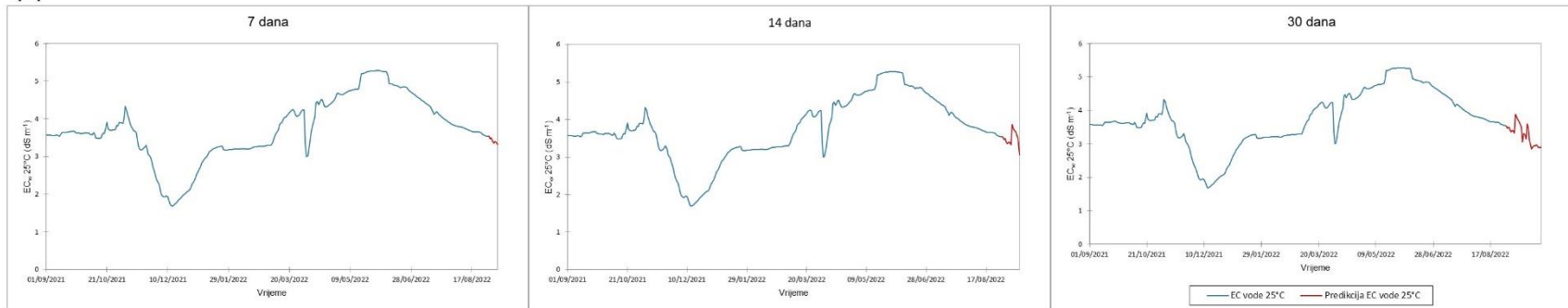
Model	AIC
ARIMA (0,1,1)	-923,425
ARIMA (0,1,2)	-926,915
ARIMA (1,1,0)	-919,927
ARIMA (2,1,0)	-925,605
ARIMA (1,1,1)	-927,312
ARIMA (1,1,2)	-925,345
ARIMA (2,1,1)	-925,346
ARIMA (2,1,2)	-923,367

Razvijeni modeli korišteni su za predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na lokaciji Luke. Najbolje predikcije uz najmanje vrijednosti pogrešaka imao je model ARIMA (1,1,1) za sva tri vremenska razdoblja (Tablica 4.52). Modeli strojnog učenja imali su slične vrijednosti pogrešaka za predviđanje sedam i 30 dana unaprijed, dok je značajnija razlika utvrđena kod predviđanja 14 dana unaprijed gdje je model MLR ipak imao manje pogreške od modela XGB. Predikcije za sve modele i vremenska razdoblja prikazani su na Slici 4.41.A-C.

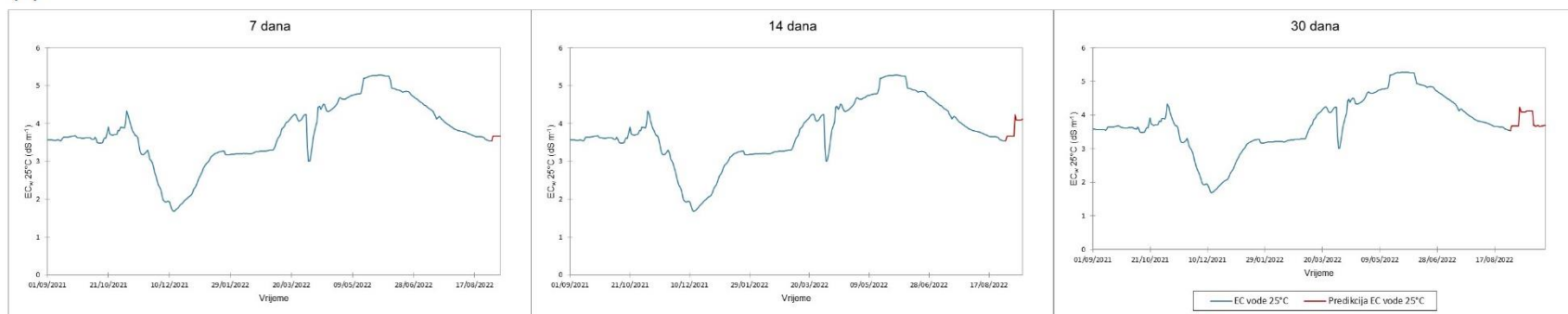
Tablica 4.52. Procjenitelji predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode na LI Luke

Predviđanje	MLR		XGB		ARIMA (1,1,1)	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
7 dana	0,117	0,128	0,149	0,150	0,010	0,011
14 dana	0,185	0,227	0,395	0,466	0,035	0,051
30 dana	0,340	0,409	0,330	0,407	0,032	0,045

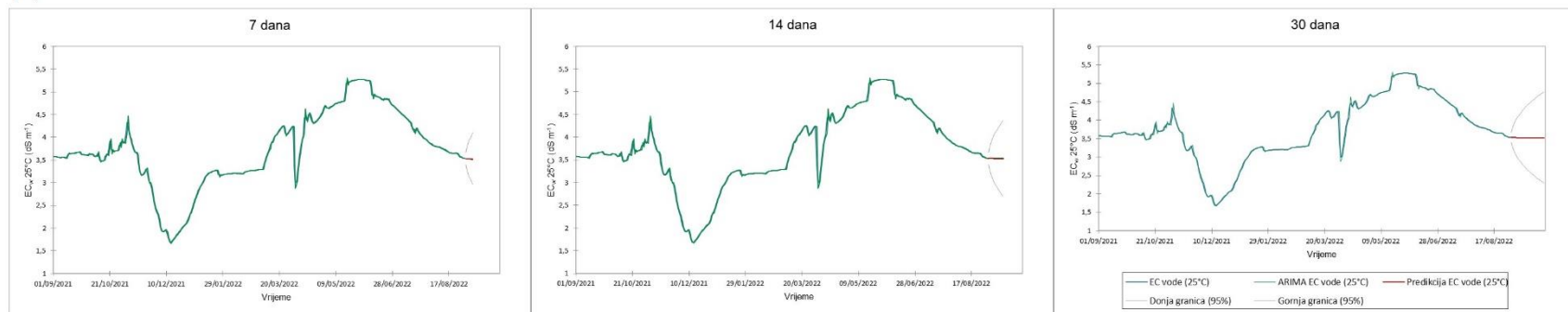
(A)



(B)



(C)



Slika 4.41. Predviđanje dnevnih vrijednosti EC_w podzemne vode modelom MLR (A), modelom XGB (B) i ARIMA modelom (C) na LI Luke

5. RASPRAVA

Zaslanjivanje površinskih i podzemnih voda rastući je globalan problem koji utječe na sigurnost opskrbe pitkom vodom, zdravlje ekosustava, biološku raznolikost i proizvodnju hrane (Kaushal i sur., 2021). Klimatske promjene, u prvom redu globalni porast prosječne razine mora te promjene u obrascima oborina i evapotranspiracije dovode do pojačanog pritiska na izvore površinskih i podzemnih voda u priobalju što može rezultirati degradacijom kakvoće i smanjenja količinskih stanja (Colombani i sur., 2016). Posljedično, primarno su ugrožena tla pri čemu je zaslanjivanje tla jedan od globalno najvažnijih oblika degradacije, a zaslanjena tla zauzimaju više od 932 Mha u više od 100 država (Rengasamy, 2006). Povijesno gledano, zaslanjivanje tla bio je jedan od glavnih razloga propasti nekih od najvećih svjetskih civilizacija (npr. sumerska civilizacija u Mezopotamiji), a danas se procjenjuje da bi do 2050. godine 50 % obradivih poljoprivrednih površina moglo biti pod utjecajem zaslanjivanja (Zhou i sur., 2013; Butcher i sur., 2016). Proces koji dovode do zaslanjivanja tla mogu biti prirodni (primarno zaslanjivanje) kao što su transport i depozicija oceanskih soli oborinama i eolskim procesima, fizikalno i kemijsko trošenje minerala bogatih solima te prisutnost zaslanjenih plitkih podzemnih voda (Hassani i sur., 2021). Sekundarno zaslanjivanje rezultat je djelovanja čovjeka, a glavni izvori uključuju zahvate kao što su navodnjavanje zaslanjenom vodom, prekomjerno korištenje gnojiva, ali i intruzija morske vode kao posljedica prekomjernog crpljenja podzemnih voda i neadekvatnog gospodarenja vodama (Hassani i sur., 2021). U Europi posebno ugroženo je područje Mediterana, a premda se problem zaslanjivanja voda i tla u RH javlja na cijeloj jadranskoj obali ti procesi posebno su izraženi u aluvijalnoj dolini rijeke Neretve koja se smatra jednim od najranjivijih područja na klimatske promjene. Kako bi se prirodni i antropogeni procesi zaslanjivanja mogli kontrolirati, a štetne posljedice minimalizirati, nužna je uspostava sustava monitoringa sastavnica okoliša. U 19. stoljeću prvi uspostavljeni sustavi monitoringa kakvoće voda bili su povezani sa zagađenjima izvora pitke vode i u svrhu sprečavanja zdravstvenih rizika, dok se nešto kasnije ispitivanje kakvoća tla i monitoring počeo provoditi prvenstveno za potrebe poljoprivredne proizvodnje (Thomas i Burgess, 2022). Uz obvezne sustave monitoringa voda (operativni i nadzorni), u RH se provode i istraživački monitorinzi kojima je zadaća utvrđivanje nepoznatih odnosa u okviru DPSIR ciklusa (Romić i sur., 2022a). Klasični istraživački monitoring fokusiran na problematiku zaslanjivanja voda i poljoprivrednih tala uspostavljen je u dolini rijeke Neretve i kontinuirano se provodi od 2009. godine (Romić i sur., 2014). Premda postoje određena ograničenja kod provođenja klasičnog mjesečnog monitoringa (visoki zahtjevi u pogledu vremenskih, financijskih i ljudskih resursa te

nemogućnost dobivanja rezultata u realnom vremenu), klasični sustava monitoringa omogućava dobivanje preciznih, točnih i pouzdanih rezultata te je iznimno važan za detekciju i karakterizaciju dugoročnih trendova i sezonalnosti parametara kakvoće voda.

5.1. Klasični mjesečni monitoring stupanja zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda

Analizom podataka klasičnog mjesečnog monitoringa utvrđeno je da prema klasifikaciji pogodnosti vode za navodnjavanje (Rhoades i sur., 1992) i prosječno utvrđenim vrijednostima EC_w niti površinska niti podzemna voda na odabranim LI nisu bez ograničenja ukoliko se koriste za navodnjavanje poljoprivrednih kultura. Naime, prosječno utvrđene vrijednosti EC_w u višegodišnjem monitoringu (2010.-2022.) kretale su se u rasponu od $2,4 \text{ dS m}^{-1}$ u površinskoj vodi na LI Vidrice do $8,9 \text{ dS m}^{-1}$ u podzemnoj vodi na LI Vidrice (Tablica 4.1) svrstavajući i površinske i podzemne vode na LI Vidrice i LI Luke u klasu srednje zaslanjenih voda (Rhoades i sur., 1992). Na LI Vidrice više prosječne vrijednosti EC_w utvrđene su u podzemnoj vodi, dok su na LI Luke više vrijednosti utvrđene u površinskoj vodi pri čemu su razlike između vrsta voda na istim lokacijama bile statistički značajne (Slika 4.3). Iako prosječno utvrđene vrijednosti EC_w nisu prelazile 9 dS m^{-1} , analizirajući maksimalno utvrđene vrijednosti EC_w utvrđeno je da se u podzemnoj vodi na LI Vidrice i površinskoj vodi na LI Luke mogu detektirati i vrijednosti EC_w koje odgovaraju klasi jako ili vrlo jako zaslanjenih voda.

Uz poznavanje vrijednosti EC_w kao pokazatelja stupnja zaslanjenosti i ukupne koncentracije soli, za procjenu kakvoće vode za navodnjavanje važno je poznavanje njezinog ionskog sastava (Romić i sur., 1999). Određivanje ionskog sastava uglavnom se provodi laboratorijskim ispitivanjima i zahtijeva znatne financijske i ljudske resurse, osobito kada se provodi kontinuirano kao sastavni dio uspostavljenog sustava monitoringa voda. Visoka korelacijska povezanost EC_w i koncentracije pojedinih iona može poslužiti kao ulazna varijabla za razvoj regresijskih modela za procjenu, odnosno predviđanje koncentracije pojedinih iona na temelju poznate vrijednosti EC_w , odnosno korištenja EC_w kao *proxy* varijable (Myers, 2019) za određivanje ionskog sastava površinskih i podzemnih voda. Jaka do vrlo jaka signifikantna korelacijska veza utvrđena je između EC_w i koncentracija Na^+ i Cl^- iona na LI Vidrice i LI Luke u površinskim i podzemnim vodama, dok su se korelacijske veze između EC_w i ostalih iona razlikovale za pojedinu lokaciju i vrstu voda (Prilog, Tablice 8.2-8.5). Zbog jake korelacijske povezanosti i utvrđenih funkcionalnih veza između EC_w i ionskog sastava, visoka varijabilnost utvrđena je i u vrijednostima EC_w i koncentracijama glavnih iona, osobito Na^+ i Cl^- kao glavnih

konstituentata morske vode. Prema Levačiću (1977) dominantni ioni u kemijskom sastavu Jadranskog mora su Cl^- (55,49 %), Na^+ (30,84 %) i SO_4^{2-} (7,75 %) dok je udio koncentracije ostalih iona manji od 6 %. Funkcionalne veze između EC_w i ionskog sastava u uvjetima zaslanjivanja morskom vodom Jadranskog mora u višegodišnjem istraživanju utvrdio je Romić (1994) na području Vranskog jezera. Provedenom korelacijskom analizom utvrđena je signifikantna, jaka do vrlo jaka korelacijska veza između stupnja zaslanjenosti i koncentracije SO_4^{2-} ($r=0,72$), K^+ ($r=0,85$), Mg^{2+} ($r=0,94$), Na^+ ($r=0,99$) te Cl^- ($r=0,99$). Procjena koncentracije pojedinih iona na temelju izmjerenih vrijednosti EC_w odrađena je razvijenim regresijskim modelima pri čemu su najviše vrijednosti koeficijenta determinacije imali upravo modeli procjene glavnih konstituentata morske vode, Na^+ ($R^2=0,986$) i Cl^- ($R^2=0,993$). Slične rezultate, ali u istraživanju procesa intruzije morske vode u podzemne vode većeg broja jadranskih otoka dobili su Terzić i sur. (2010). Modelima linearne regresije utvrđene su funkcionalne veze između EC_w i koncentracije iona s vrlo visokim koeficijentima korelacije posebice za varijable SO_4 ($r=0,9$), Na ($r=0,99$) i Cl ($r=1,00$), a koje su uz varijable TDS, Br, K i Mg odgovarale faktoru F1 provedene faktorske analiza unutar kojeg su grupirane varijable povezane s intruzijom i procesima miješanja slatke i slane vode. Praktična primjena dobivenih rezultata ogleda se u činjenici da se dobivenim modelima mogu napraviti grube procjene gotovo cijelog hidrokemijskog sastava uzoraka podzemnih voda na temelju utvrđene vrijednosti EC_w (Terzić i sur., 2010).

Poznavanje ionskog sastava površinskih i podzemnih voda, uz korištenje alata kao što je Piperov troosni dijagram, omogućili su identifikaciju i detaljniji uvid u procese koji se odvijaju prilikom miješanja slatke i slane vode na LI Vidrice (Slika 4.1) i LI Luke (Slika 4.2). Iako prema prosječno utvrđenoj vrijednosti EC_w površinska voda na LI Vidrice nije pogodna za navodnjavanje, gotovo polovica uzoraka imala je $\text{EC}_w < 2,0 \text{ dS m}^{-1}$ i pripadala je klasi malo zaslanjenih voda te se kao takva može koristiti za navodnjavanje većeg broja poljoprivrednih kultura. S porastom vrijednosti EC_w dolazi do promjene hidrokemijskog facijesa iz Ca-Na- HCO_3 -Cl prema Ca-Na-Cl i manje prema Na-Cl. Ovakav razvoj hidrokemijskog facijesa i činjenica da se većina uzoraka nalazi na gotovo ravnoj liniji između ionskog sastava slatke i slane vode (Appelo i Postma, 2005) ukazuju na proces izravnog miješanja morske i svježe vode (Slika 4.1.A). Na Slici 4.1.B vidljiva je promjena tipa glavnog ionskog sastava podzemne vode na LI Vidrice od Ca-Na-Cl prema Na-Cl facijesu praćena povećanjem stupnja zaslanjenosti u istom smjeru. Dobiveni rezultati sugeriraju na odvijanje procesa intruzije morske vode u kojoj dolazi do izmjene kationa Ca^{2+} za Na^+ na ionskim izmjenjivačima u plitkom vodonosniku što ima snažan utjecaj na promjenu kemijskog sastava podzemne vode. U

površinskoj vodi na LI Luke 77 % uzoraka bilo je srednje, a 18 % jako zaslanjeno. Dominantno su pripadali Na-Cl hidrokemijskom facijesu te su po kemijskom sastavu bili vrlo blizu točki koja predstavlja prosječan sastav morske vode (Slika 4.2.A). U podzemnoj vodi s povećanjem EC_w hidrokemijski facijes mijenjao se iz Ca-HCO₃ prema facijesu u kojem dominiraju kloridni i sulfatni anioni ukazujući na procese intruzije morske vode u plitki vodonosnik (Slika 4.2.B). Dok je u podzemnoj vodi na LI Vidrice dominantni anion bio Cl⁻, podzemnu vodu na LI Luke prema prosječnim koncentracijama karakterizira dominacija SO₄²⁻ u odnosu na Cl⁻. Više koncentracije SO₄²⁻ u podzemnim vodama mogu se pripisati procesu intruzije morske vode u plitki vodonosnik (Perry i sur., 2002) jer morska vode, konkretno Jadranskog mora, sadrži oko 2970 mg L⁻¹ SO₄²⁻. Međutim, više koncentracije SO₄²⁻ iona mogu biti i posljedica razgradnje organske tvari te cikličkih procesa oksidacije i redukcije sulfata (Miao i sur., 2012). Na LI Luke proslojci tla bogati organskom tvari utvrđeni su u stratigrafskoj građi profila tla na dubini 60-80 cm (Slika 4.17) čijom mineralizacijom može doći do oslobađanja sulfata (Ondrašek i sur., 2019) i migracije u dublje slojeve tla, a time i u podzemnu vodu.

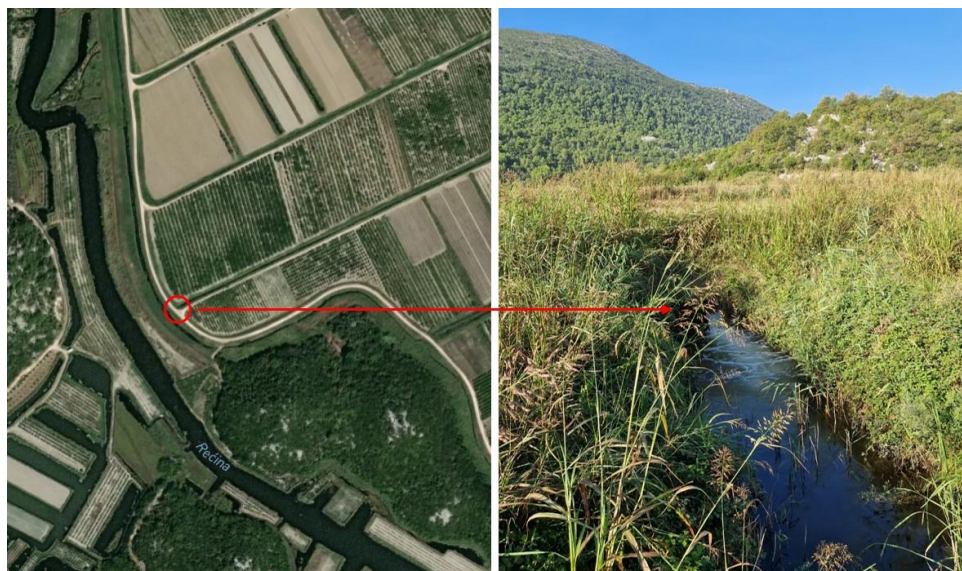
Utvrđene razlike u stupnju zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda uvjetovane razlikama u ionskom sastavu i procesima intruzije morske vode rezultat su interakcije većeg broja čimbenika. U prvom redu to su geomorfološke i hidrogeološke značajke pojedinih MP, odnosno lokacija, zatim način regulacije suvišnih voda i izvedena hidrotehnička rješenja, te u konačnici način i uvjeti korištenja zemljišta. Ljudske intervencije na području sliva rijeke Neretve uključujući regulaciju toka rijeke Neretve za potrebe plovnosti do Metkovića, zatvaranje Male Neretve uzvodnom i nizvodnom ustavom, izgradnju obrambenih nasipa te naročito izgradnju većeg broja hidroenergetskih postrojenja u srednjem dijelu toka rijeke Neretve (Jablanica-Mostar) utjecale su na promjene hidrološkog režim otjecanja sa sliva (Vranješ i sur., 2007a). Prema provedbenom planu obrane od poplava područja doline rijeke Neretve (Hrvatske vode, 2014), visoki vodostaji na području doline posljedica su:

- dotoka velikih voda koritom rijeke Neretve s uzvodnog dijela sliva koji su pod utjecajem prirodnih čimbenika kao što su oborine, ali i antropogenih čimbenika kao što su izgrađeni hidroenergetski sustavi čime je potpuno izmijenjen režim otjecanja sa sliva (Vranješ i sur., 2013)
- povišenja razine mora uslijed plime, ali i djelovanja valova
- dotoka vode iz brojnih izvora koji se nalaze po rubu doline
- dotoka oborinskih voda na samom području doline

Procesima intruzije morske vode i zaslanjivanjem površinskih i podzemnih izvora vode najugroženija su područja bliža ušću, međutim u uvjetima smanjenog dotoka sa sliva utjecaj mora može se detektirati i preko 20 km uzvodno od ušća (Krvavica i sur., 2021; Ljubenković i Vranješ, 2012). Do sada provedenim istraživanjima utvrđeno je da morska voda u područje doline prodire u dva dominantna smjera: priobalnim vodonosnicima kroz podzemlje i kroz korito rijeke Neretve (Vranješ i sur., 2007b) što se može povezati i s procesima koji dovode do zaslanjivanja u MP Vidrice, odnosno Luke.

Više vrijednosti EC_w u plitkom piezometru koje su u pojedinim terminima u višegodišnjem monitoringu iznosile i preko 20 dS m^{-1} rezultat su intruzije morske vode u vodonosni sustav. Naime, MP Vidrice je zbog svoje niske prosječne nadmorske visine, ali i blizine Jadranskog mora pod utjecajem intruzije morske vode kroz krški masiv koji sa zapadne strane predstavlja granicu područja prema moru. Intruzijom morske vode dolazi do zaslanjivanja dubokog, ali i plitkog vodonosnika. Razine podzemne vode u dubljem, zatvorenom vodonosniku ispod nepropusnog sloja gline uvijek su iznad razina u plitkom vodonosnom sustavu, što znači da je kontinuirano uspostavljen gradijent toka iz dubljeg sloja prema površini tla što uzrokuje procjeđivanje slane vode iz dubljih slojeva prema površini tla (Vranješ i sur., 2013; Romić i sur., 2014). Nakon pojave obilnih oborina, aluvijalni vodonosnik se prihranjuje vodom iz okolnog okršenog masiva čime slatka voda potiskuje slanu. Međutim u sušnom razdoblju, zbog smanjenja pijezometarske visine, granična ploha između slatke i slane vode u plitkom vodonosniku je plića zbog čega se jedan dio krških kanala puni morskom vodom te se postupno istiskuje slatka voda (Vranješ i sur., 2007b). Ova pojava jasno je vidljiva ukoliko se promatra izdvojeno i analizirano jednogodišnje razdoblje (rujan 2021. - kolovoz 2022.) u kojem su niže vrijednosti EC_w u podzemlju utvrđene u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja u kojem je utvrđena najveća količina oborina (listopad 2021. - prosinac 2021.). Da je zaslanjivanje plitkog vodonosnika u MP Vidrice posljedica intruzije morske vode kroz vodonosnik pokazali su i Romić i sur. (2023a) gdje je provedenim Grangerovim testom utvrđena uzročno-posljedična veza između stupnja zaslanjenosti vode u plitkom piezometru i razine more na mareografu. Za razliku od podzemlja, u površinskoj vodi su i u višegodišnjem i jednogodišnjem razdoblju utvrđene statistički značajno niže vrijednosti EC_w koje su se u izdvojenom i analiziranom jednogodišnjem razdoblju u mjesečnoj frekvenciji motrenja kretale oko 2 dS m^{-1} (Tablica 4.2). Niže vrijednosti EC_w površinske vode na LI Vidrice mogu biti posljedica hidrauličke povezanosti s lateralnim kanalom Vidrice u kojem je utvrđena prosječna vrijednost EC_w u petogodišnjem razdoblju mjesečnog monitoringa (2014.-2018.) iznosila $1,9 \text{ dS m}^{-1}$ (Romić i sur., 2019b). Odvodni kanal na LI Vidrice povezan je cjevastim s lateralnim kanalom preko kanala koji se

nalazi uz obrambeni nasip s unutarnje strane MP (Slika 5.1). Dobiveni rezultati sugeriraju da uz obranu područja od suvišnih vanjskih voda, lateralni kanal ima i važnu funkciju osvježavanja površinske vode u mreži odvodnih kanala s jugozapadne strane MP.



Slika 5.1. Propust na odvodnom kanalu na LI Vidrice (Izvor: M. Reljić)

Za razliku od MP Vidrice koji je pod dominantnim utjecajem zaslanjivanja uslijed intruzije morske vode u krški vodonosni sustav, MP Luke je zbog svog položaja pod dominantnim utjecajem stratificiranog toka rijeke Neretve. Morska voda, kao fluid veće gustoće uvlači se u korito rijeke u obliku klina iznad kojeg teče slatka voda s vrlo uskom tranzicijskom zonom (Romić i sur., 2006). Provedenim istraživanjima utvrđeno je da intruzija morske vode kroz korito rijeke Neretve i propagacija slanog klina uzvodno od ušća u prvom redu ovisi o dotoku sa sliva (Vranješ i sur., 2007b; Ljubenković i Vranješ, 2012; Krvavica i sur., 2021). Pored rijeke Neretve, neka od najpoznatijih visoko vertikalno stratificiranih ušća (Krvavica i Ružić, 2020) uključuju ušće rijeke Mississippi i Merrimack u SAD-u (Geyer i MacCready, 2014), Fraser u Kanadi (MacDonald i Geyer, 2004), Swan u Australiji (Thompson, 1998) i Ebro i Rone u Europi (Ibañez i sur., 1997). Djelovanjem rubnih uvjeta, dominantno dotoka slatke vode s uzvodnog dijela sliva, ali i morskih mijena na ušću, slani klin pomiče se uzvodno, odnosno nizvodno (Vranješ i sur., 2007b). Prosječno utvrđena vrijednost EC_w podzemne vode u višegodišnjem i izdvojenom jednogodišnjem razdoblju uz geopoziciju piezometra koji se nalazi u neposrednoj blizini rijeke Neretve, sugerira da je plitki piezometar na LI Luke u komunikaciji s rijekom. Navedenu tvrdnju potvrđuju rezultati profilnih mjerenja EC_w u rijeci Neretvi na profilu Opuzen u okviru većeg broja istraživanja (Vranješ i sur., 2007b; Ljubenković i Vranješ, 2012; Romić i sur., 2014; Lovrinović i

sur., 2022) koji ukazuju na to da se slani klin morske vode na ovoj lokaciji uglavnom nalazi na dubini između -2,0 m.n.m. i -3,0 m.n.m. iznad kojeg se nalazi sloj manje zaslanjene vode. Lovrinović i sur. (2022) su profilnim mjerenjima u mjesečnom vremenskom intervalu u razdoblju srpanj 2021. – rujan 2021. utvrdili da se vrijednost EC_w u površinskom sloju rijeke Neretve kretala u rasponu $2,7 \text{ dS m}^{-1}$ - $3,1 \text{ dS m}^{-1}$ na profilu Opuzen i $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ - $3,4 \text{ dS m}^{-1}$ na profilu Komin, što približno odgovara prosječno utvrđenoj vrijednosti EC_w u podzemnoj vodi na LI Luke. Iako su analizom višegodišnjeg razdoblja utvrđene statistički značajne razlike u prosječnoj vrijednosti EC_w podzemne i površinske vode, te razlike u izdvojenom jednogodišnjem razdoblju nisu bile statistički značajne (Slika 4.5). Međutim, analizirajući jednogodišnje razdoblje, gotovo dvostruko više vrijednosti EC_w utvrđene su u površinskoj vodi u vegetacijskom razdoblju u odnosu na podzemnu vodu. Veći stupanj zaslanjenosti površinskih voda može biti posljedica regulacije razine voda unutar poldera. MP Luke karakterizira ranije spomenuto izraženo slijeganja terena čime se intenziviraju procesi procjeđivanja podzemne vode. Uz to, zbog niskih kota terena neophodan je kontinuirani rad crpki (Vranješ i Vidoš, 1995) čime se snižava razina vode u kanalskoj mreži što dovodi do povećanja gradijenta u vertikalnom smjeru i procjeđivanja zaslanjene podzemne vode. Da zaslanjene podzemne vode mogu dovesti do zaslanjivanja površinskih vodenih tokova dokazali su Delsman i sur. (2014). u dvogodišnjem pokusu na području poldera Schermer u Nizozemskoj istražujući hidrauličku povezanost podzemnih i površinskih voda te utjecaj povezanosti na kemijske značajke. Na istoj parceli analizirane su vrijednosti TDS vode u odvodnom kanalu, vode prikupljene drenažnim cijevima instaliranim na dubini 1 m od površine tla, te u plitkom piezometru. Dobiveni rezultati pokazali su statistički značajno višu vrijednost TDS u otvorenom kanalu (11 g L^{-1}) u odnosu na vodu iz drenažnih cijevi ($3,6 \text{ g L}^{-1}$) te vodu u piezometru na dubini od 1 m ispod površine tla. Autori su zaključili da su utvrđene više koncentracije soli u otvorenom kanalu posljedica procjeđivanja više zaslanjene podzemne vode (prisutne na dubini većoj od 2 m ispod površine tla) prema kanalu kao posljedica crpljenja. Uz procjeđivanje podzemne vode, do zaslanjivanja površinskih voda dolazi i uslijed crpljenja što dovodi do snižavanja razine vode u odvodnom kanalu i uspostavu gradijenta s ruba područja te migracije soli prema odvodnim kanalima.

Visok stupanj varijabilnost EC_w na LI Vidrice i LI Luke (Tablica 4.1) ukazuje na dinamične promjene ovog pokazatelja što je osobito izraženo u okolišima kao što su riječne delte koji predstavljaju prijelaznu zonu gdje je distribucija zaslanjenosti rezultat kompleksnih interakcija kopnenih i morskih utjecaja (Savenije, 2005). Visoka višegodišnja, ali i sezonska varijabilnost EC_w površinskih i podzemnih voda karakteristična je za priobalna područja, osobito stratificirane riječne delte u kojima intruzija morske vode u manjoj mjeri ovisi o marinskim

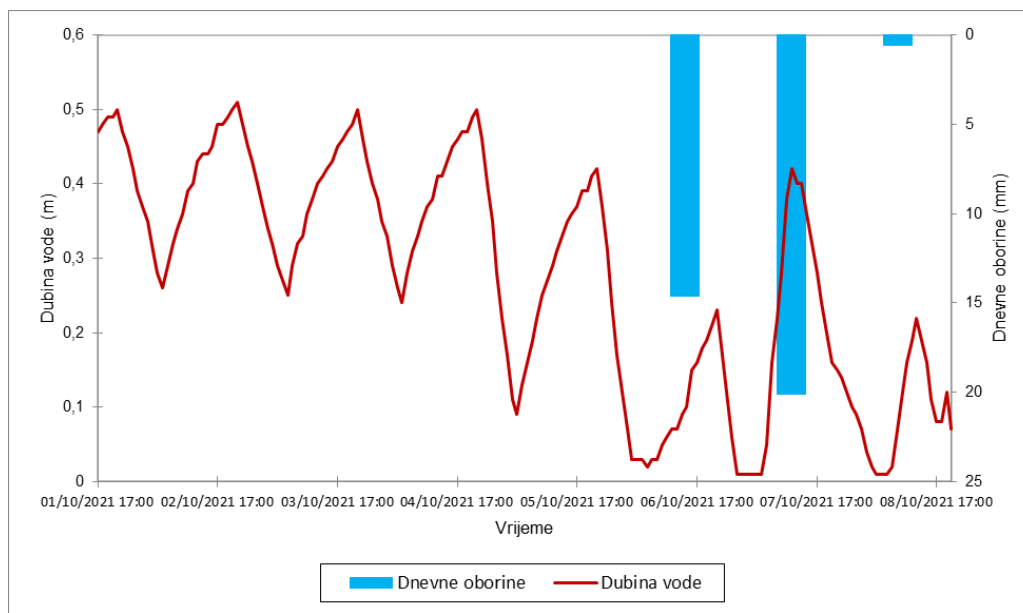
uvjetima kao što je plimni režim, a u većoj mjeri o uvjetima uzvodno od ušća, prvenstveno dotoku svježje vode sa sliva (Snedden i sur., 2012; Kurup i sur., 2008). Delta rijeke Neretve koja pripada skupini izrazito stratificiranih mikro plimnih ušća karakterizira prosječna višegodišnja amplituda plime koja ne prelazi 30 cm (Rezo i Pavasović, 2014) i klin morske vode koji u uvjetima smanjenog dotoka sa sliva propagira više od 20 km uzvodno od ušća (Krvavica i sur., 2021; Ljubenkov i Vranješ, 2012). Također, visoka varijabilnost sugerira i potrebu za uspostavom monitoringa stupnja zaslanjenosti u gušćoj vremenskoj rezoluciji od mjesečne. Da je EC_w parametar čiji bi monitoring bilo poželjno uspostaviti u višim vremenskim frekvencijama obzirom na njegovu visoku varijabilnost potvrdili su i El-Agha i sur. (2020) koji su analizirali stupanj zaslanjenosti u glavnim i sabirnim odvodnim kanalima kao i u drenskim cijevima unutar centralnog dijela delte rijeke Nil u satnoj vremenskoj rezoluciji. Unutar područja istraživanja u kojem se razina voda ispod pedološkog sloja održava radom CS, najveća varijabilnost stupnja zaslanjenosti utvrđena je u sabirnim odvodnim kanalima, pri čemu se vrijednost EC_w kretala u rasponu 927 do 7480 $\mu S\ cm^{-1}$. Za razliku od EC_w i ionskog sastava površinskih i podzemnih voda, parametar kod kojeg je u klasičnom monitoringu (višegodišnjem i izdvojenom jednogodišnjem razdoblju) utvrđena vrlo niska varijabilnost i visoka stabilnost je pH čija se vrijednost CV kretala od 0,02 u površinskoj vodi na LI Vidrice do 0,04 u podzemnoj vodi na LI Luke (Tablica 4.1 i Tablica 4.2). Dobiveni rezultati niske varijabilnosti pH u podzemnim vodama u skladu su s rezultatima istraživanja Dhar i sur. (2008) u plitkim i dubokim piezometrima unutar poldera Araihasar u Bangladešu gdje je utvrđena varijabilnost pH u mjesečnim uzorcima bila uglavnom niža od 1 % na većem broju postaja monitoringa. Također, niska varijabilnost pH u površinskim vodama u suglasju je s rezultatima istraživanja Muoi i sur. (2022) gdje je u površinskoj vodi rijeke Ganh Hao u delti rijeke Mekong u Vijetnamu varijabilnost pH bila manja od 2 %.

5.2. *In-situ* kontinuirani monitoring stupnja zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda

Razvoj i implementacija prvih sustava *in-situ* kontinuiranog monitoringa kakvoće voda započela je 1950-tih godina prošlog stoljeća u SAD-u (Cohen i McCarthy, 1963). Brzi i kontinuirani tehnološki napredak, osobito u posljednja dva desetljeća, omogućio je razvoj jeftinijih, točnijih i pouzdanijih senzora i višeparametarskih sonde koje danas imaju sve širu globalnu primjenu. *In-situ* kontinuirani sustavi monitoringa koji imaju mogućnost prikupljanja podataka u visokim vremenskim rezolucijama pružaju mogućnost kvantifikacije ekstrema, kratkoročnih trendova i unutar dnevne varijabilnosti (Halliday i sur., 2012) što klasičnim sustavima monitoringa u

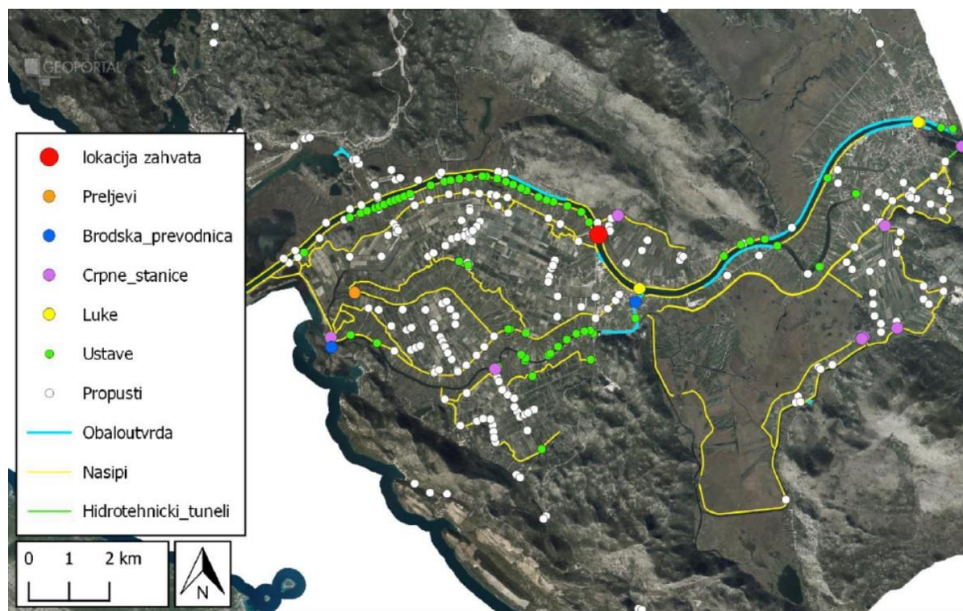
mjesečnoj vremenskoj rezoluciji nije moguće. Prikupljanje podataka visoke vremenske razlučivosti od iznimne je važnosti za razumijevanje hidroloških i hidrokemijskih procesa različitih vodnih tijela unutar kompleksnih agroekosustava kao što je dolina rijeke Neretve.

Iz rezultata deskriptivne statistike *in-situ* kontinuiranog monitoringa (Tablica 4.3 i Tablica 4.4), ali i vizualnog prikaza satnih vremenskih serija EC_w na LI Vidrice i LI Luke (Slika 4.6 i Slika 4.8) jasno se može zaključiti da gušći interval mjerenja omogućuje detekciju ekstremnih događaja i unutar dnevne varijabilnosti, posebno kod dinamičnih veličina kao što je EC_w (Halliday i sur., 2012). Vegetacijsko razdoblje u površinskoj vodi na LI Vidrice karakterizirale su manje satne oscilacije vrijednosti EC_w koja se uglavnom kretala oko 2 dS m^{-1} , s višim utvrđenim vrijednostima za vrijeme trajanja oborinskih događaja. Usporedbom s klasičnim mjesečnim monitoringom, može se potvrditi da rezultati *in-situ* kontinuiranog monitoringa u vegetacijskom razdoblju odgovaraju rezultatima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima. U podzemnoj vodi za vrijeme vegetacijskog razdoblja zabilježen je kontinuirani porast vrijednosti EC_w u 2021. i 2022. godini. Dinamičnije promjene stupnja zaslanjenosti podzemnih, a osobito površinskih voda na LI Vidrice utvrđene su u izvanvegetacijskom razdoblju pri čemu se izdvaja segment koji odgovara razdoblju u kojem je pala i najveća količina oborina, 637 mm u razdoblju od listopad 2021. do prosinac 2021. Iz vremenske serije dubine vode u kanalu (Slika 4.7.A) jasno je vidljivo da je u analiziranom razdoblju CS radila svakodnevno jer nisu utvrđene promjene u frekvenciji, a što je detaljnije prikazano sedmodnevnim isječkom (1.10. – 8.10.2021.) (Slika 5.2). Iz istog grafičkog prikaza vidljivo je da se za vrijeme trajanja oborina, ali i preventivno jedan dan ranije, razina vode u kanalu održavala nižom u odnosu na razdoblje koje je prethodilo oborinama s ciljem zaštite MP od suvišnih oborinskih voda.



Slika 5.2. Vremenska serija satnih vrijednosti dubine površinske vode na LI Vidrice u odnosu na dnevnu količinu oborina u razdoblju 1.10.2021. - 8.10.2021.

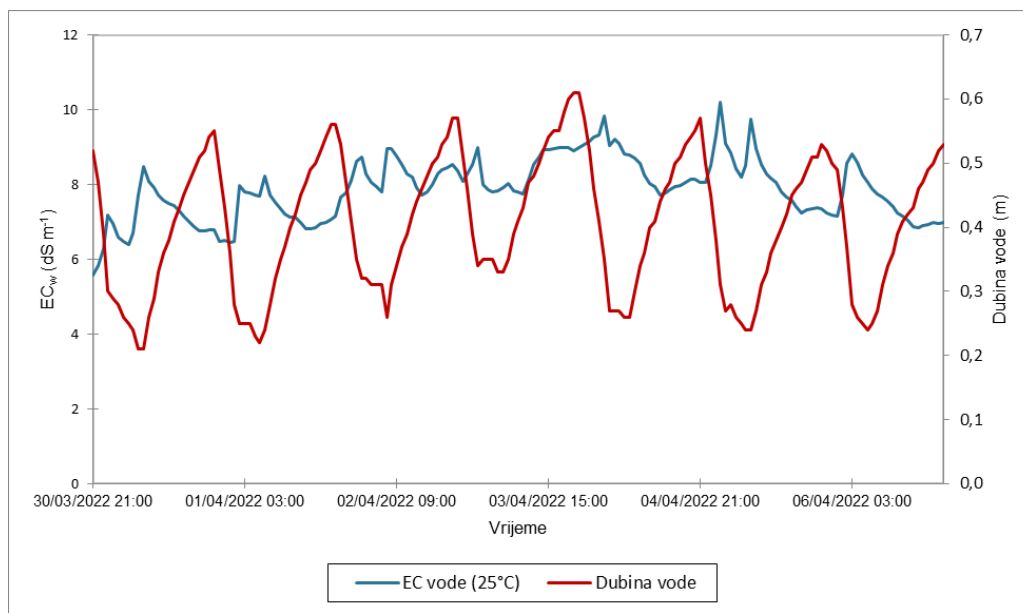
U izdvojenom i analiziranom tromjesečnom razdoblju (listopad 2021. – prosinac 2021.) vrijednost EC_w površinske vode kretala se u vrlo širokom rasponu, od manje od 1 dS m^{-1} do 11 dS m^{-1} (Slika 4.7.A). Dinamične promjene i utvrđene više vrijednosti EC_w od višegodišnjeg prosjeka mogu biti posljedica kombinacije nekoliko različitih prirodnih i antropogenih pojava. Ranije je utvrđeno da između odvodnog melioracijskog kanala na LI Vidrice i lateralnog kanala postoji hidraulička povezanost kojom je omogućen dotok svježije vode u MP pri čemu je upuštanje vode iz lateralnog kanal kontrolirano ustavom (Slika 5.3). Za vrijeme vegetacijskog razdoblja ustava je uglavnom otvorena što potvrđuju i niže vrijednosti EC_w izmjerene VPS, dok u izvanvegetacijskom razdoblju položaj ustave ovisi o hidrološkim i meteorološkim prilikama područja. Zatvaranje ustave u svrhu zaštite od suvišnih vanjskih voda uslijed obilnih i intenzivnih oborina, uz pojačano crpljenje koje dovodi do povećanja gradijenta u vertikalnom smjeru i procjeđivanja podzemne vode (koja je na LI Vidrice u istom razdoblju imala prosječnu vrijednost EC_w od 13 dS m^{-1}) može rezultirati dinamičnim promjenama u stupnja zaslanjenosti koje su utvrđene *in-situ* senzorskim monitoringom u satnoj vremenskoj rezoluciji. Uz to, povećane koncentracije soli u površinskoj vodi mogu biti i posljedica pronosa soli kroz profil tla i dreniranja prema odvodnom kanalu uslijed intenzivnih oborina. Naime, prema podacima prikupljenim FDR sensorima za monitoring stupnja zaslanjenosti tla, prosječna vrijednost EC_b u profilu tla do dubine 1 m na LI Vidrice iznosila je $4,1 \text{ dS m}^{-1}$.



Slika 5.3. Hidromorfološki pritisci na području doline rijeke Neretve 1:150000. Izvor: Vranješ i sur. (2019)

Osim u površinskim, *in-situ* kontinuiranim monitoringom detektirane su promjene u stupnju zaslanjenosti podzemnih voda u satnoj vremenskoj rezoluciji koje su pratile promjene dubine vode (Slika 4.7.B). Obilne oborine dovele su do povećanja piezometarske visine kao posljedice prihranjivanja plitkog vodonosnika infiltracijom kroz tlo, ali i povećanim dotokom s reljefno višeg okruženog dijela sliva. Spuštanje razine podzemne vode koje je uslijedilo sugerira na antropogeni utjecaj, odnosno regulaciju razine podzemnih voda unutar MP radom CS Prag. Da oborine u zimskom razdoblju (travanj - rujna) najviše doprinose prihranjivanju plitkog vodonosnika i povećanju piezometarske visine pokazali su Costall i sur. (2020) analizom višegodišnjih vremenskih serija razine podzemne vode u krškom vodonosniku nedaleko Perth (Australija). Hidrološki uvjeti i promjena razine vode u plitkom piezometru za posljedicu je imala i promjenu kemizma vode pri čemu je povećanje razine vode u piezometru rezultiralo smanjenjem vrijednosti EC_w u analiziranom segmentu izvanvegetacijskog razdoblja. Povećanje piezometarske visine uz istovremeno smanjenje stupnja zaslanjenosti uslijed obilnih oborina u dolini rijeke Neretve unutar MP Opuzen ušće utvrdili su Lovrinović i sur. (2023) primjenom višeparametarske sonde u satnoj vremenskoj rezoluciji. Rezultati mjerenja na dubini -3,0 m.n.m. pokazali su gotovo trenutnu reakciju povećanja piezometarske visine i smanjenja vrijednosti EC_w kao posljedice intenzivnih oborina u prvoj dekadi listopada 2021., što odgovara dobivenim rezultatima u istom razdoblju u podzemnoj vodi na LI Vidrice.

Dinamičnije promjene stupnja zaslanjenosti na LI Luke osobito su bile u površinskoj vodi (Slika 4.8.A). Iz vizualnog pregleda vremenskih serija vidljiv je utjecaj intenzivnih oborina na smanjenje stupnja zaslanjenosti podzemnih voda u izvanvegetacijskom razdoblju, što je kao i na LI Vidrice rezultat prihranjivanja plitkog vodonosnika svježom oborinskom vodom (Slika 4.8.B). Međutim, u površinskoj vodi visoke amplitude vrijednosti EC_w u satnoj vremenskoj rezoluciji utvrđene su neovisno o količini i intenzitetu oborina što sugerira utjecaj antropogenih čimbenika na promjene stupnja zaslanjenosti. Za detaljniju analizu utjecaja prirodnih i antropogenih čimbenika na stupanj zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda odabran je i izdvojen segment koji odgovara posljednjem mjesecu izvanvegetacijskog (ožujak) i prvom mjesecu vegetacijskog razdoblja (travanj) u 2022. godini kada se na LI Luke uzgajao kupus (*Brassica oleracea* L.var.*capitata*) (Slika 4.9). Prikupljeni podaci dubine površinske vode sugeriraju na dvodnevni režim crpljenja u dijelu razdoblja bez oborina, dok je promjena u frekvenciji utvrđena za vrijeme trajanja oborina što je vidljivo na Slici 4.9.A. Više vrijednosti EC_w koje su utvrđene u dijelu razdoblja s oborinama mogu biti posljedica kombinacije promjene u režimu crpljenja, ali i ispiranja soli s okolnih poljoprivrednih površina i dreniranja prema odvodnom kanalu. Naime uzgajana kultura je prije oborina navodnjavana kroz 4 obroka navodnjavanja sa srednje zaslanjenom vodom prosječne vrijednosti $EC_w = 5,3 \text{ dS m}^{-1}$ što je dovelo do akumulacije određene količine soli, osobito u površinskom sloju tla. Kod rada crpne stanice u dnevnom režimu (Slika 5.4) utvrđeno je da snižavanje razine vode u kanalu prati povećanje stupnja zaslanjenosti u satnoj vremenskoj rezoluciji. Dobiveni rezultati mogu se povezati s činjenicom da rad CS dovodi do snižavanja razine vode u odvodnom kanalu na LI Luke i uspostavu gradijenta s ruba područja i iz dubljih slojeva prema odvodnim kanalima (Romić i sur., 2014). Slične rezultate dobili su Lovrinović i sur. (2023) analizirajući promjenu vrijednosti EC_w u odnosu na razinu vode u kanalu Jasenska koji se nalazi u MP Opuzen ušće na lijevoj obali rijeke Neretve. Autori su utvrdili da režim rada crpne stanice Modrič uvjetuje promjene u stupnju zaslanjenosti površinske vode pri čemu paljenje CS i početak crpljenja rezultira višestrukim povećanjem vrijednosti EC_w , dok se snižavanje stupnja zaslanjenosti opaža prestankom rada CS u jutarnjim satima.



Slika 5.4. Vremenska serija satnih vrijednosti dubine i EC_w površinske vode na LI Luke u razdoblju 30.3.2022. - 6.4.2022.

U podzemnoj vodi je u razdoblju ožujak – travanj 2022. utvrđen blagi porast vrijednosti EC_w izuzev prve dekade travnja kada je na području palo 88,2 mm što je rezultiralo snižavanjem vrijednosti EC_w . Dobiveni rezultati sugeriraju da je u analiziranom razdoblju promjena stupnja zaslanjenosti podzemne vode dominantno bila pod utjecajem prirodnih čimbenika, odnosno oborina (Slika 4.9.B). Međutim, periodične promjene dubine podzemne vode mogu biti posljedica regulacije razine podzemne voda radom CS Luke. Da je stupanj zaslanjenosti plitkih podzemnih voda pod utjecajem oborina pokazali su Fan i sur. (2023) gdje su na nekoliko lokacija monitoringa u delti Žute rijeke (Hoangho) koje su pozicionirane bliže morskoj obali utvrdili privremeno smanjenje stupnja zaslanjenosti kao posljedice prihranjivanja piezometara svježom vodom uslijed oborina.

5.2.1. Vrednovanje *in-situ* kontinuiranog monitoringa

Premda je primjena senzorskih tehnologija u istraživanjima povezanim s kakvoćom površinskih i podzemnih voda u posljednjih nekoliko godina sve učestalija (Kohli i sur., 2017; Preziosi i sur., 2019; Mohan i Krishnakumar, 2021), manji broj studija uključuje kombinacija primjene naprednih terenskih tehnika monitoringa uz usporedbu istih nekom od analitičkih metoda. Sustavi kontinuiranog *in-situ* monitoringa vrlo često se provode u zahtjevnim okolišnim uvjetima kao što su riječne delte, a mjerni instrumenti i senzori izloženi su djelovanju različitih vanjskih čimbenika što može dovesti do pogrešaka u mjerenju koje mogu biti posljedica *drifta*,

pristranosti ili potpunog kvara senzora što u konačnici utječe na točnost i pouzdanost prikupljenih podataka (Yoo i sur., 2008). Iako je kontinuiranim monitoringom omogućeno prikupljanje velike količine podataka i detektiranje promjena u visokim vremenskim frekvencijama što često klasičnim pristupom monitoringu nije moguće, da bi prikupljeni podaci bili pouzdani nužno je osigurati određeni oblik validacije (Alferes i sur., 2013).

Iz vremenskih serija EC_w površinskih voda na LI Vidrice i LI Luke vidljivo je da vrijednosti EC_w dobivene *in-situ* kontinuiranim monitoringom u velikoj mjeri odgovaraju vrijednostima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima (Slika 4.11 i Slika 4.12). Isto vrijedi i za podzemnu vodu na LI Luke. Značajnije razlike utvrđene su u podzemnoj vodi na LI Vidrice i to u dijelu izvanvegetacijskog razdoblja u kojem je pala najveća količina oborina. Provedenim postupkom usporedbe utvrđene su vrlo niske vrijednosti pogrešaka MAE i RMSE između dva pristupa monitoringu u površinskoj vodi na LI Vidrice te površinskoj i podzemnoj vodi na LI Luke. Dobivene niske vrijednosti pogrešaka uz vrijednosti koeficijenta determinacije $R^2 > 0,9$ ukazuju na visoku razinu prihvatljivosti mjerenja uspostavljenog kontinuiranog *in-situ* monitoringa u analiziranim uvjetima. Niska vrijednost R^2 i RMSE od $3,16 \text{ dS m}^{-1}$ na prosječno utvrđenu vrijednost EC_w od $11,3 \text{ dS m}^{-1}$ ukazuju na nižu razinu prihvatljivosti *in-situ* monitoringa u podzemnoj vodi na LI Vidrice. Detaljnijom analizom pojedinačno utvrđenih vrijednosti EC_w i usporedbom s rezultatima laboratorijskih ispitivanja utvrđeno je da su veće pogreške posljedica razlika u izvanvegetacijskom razdoblju, točnije u razdoblju listopad 2021. – siječanj 2022.. Obilne oborine u ovom razdoblju rezultirale su prihranjivanjem piezometra i snižavanjem vrijednosti EC_w (Slika 4.7.B) što posljedično može rezultirati različitim vrijednostima EC_w u klasičnom i *in-situ* monitoringu. Dok je VPS bila fiksirana na određenoj dubini tijekom cijelog razdoblja istraživanja, dubina s koje se provodilo uzorkovanje u klasičnom monitoringu ovisilo je o razini podzemne vode. Naime, uzorkovanje u klasičnom monitoringu provodi se korištenjem ručnog uređaja za uzorkovanje čijim se uranjanjem u piezometar uzorkuje sloj vode bliži vodnom licu. U studenom i prosincu 2021. kada su utvrđene najveće razlike u vrijednostima EC_w , izmjerena dubina vode iznosila je više od 2,0 m što obzirom na princip određivanja dubine vode VPS na temelju razlika u tlaku (opisano u poglavlju 3.4) znači da se voda nalazila na dubini od 50 cm od površine tla. U istim terminima, sonda je mjerila stupanj zaslanjenosti na dubini od 2,57 cm od površine tla. Minimalne razlike u ostatku istraživanog razdoblja uz činjenicu da se nakon obilnih oborina aluvijalni vodonosnik prihranjuje vodom iz okruženog masiva koji okružuje MP (Vranješ i sur., 2007b) ukazuju da više utvrđene pogreške mogu biti posljedica različite dubine uzorkovanja u dva različita pristupa monitoringu. Navedenu tvrdnju potvrđuje i provedena ANOVA i testiranje značajnosti razlika aritmetičkih sredina *post-hoc*

Tukey HSD testom svih lokacija i vrsta vode pri čemu nisu utvrđene statistički značajne razlike između vrijednosti EC_w dobivene *in-situ* kontinuiranim u odnosu na klasični monitoring za pojedine lokacije (Slika 4.13). Visoku razinu prihvatljivosti većeg broja parametara uključujući EC_w dvije višeparametarske sonde (Xylem EXO1 i EXO2) u laboratorijskim i terenskim uvjetima utvrdila je Snazelle (2015). Mjerenja dvije sonde u kontroliranim laboratorijskim i terenskim uvjetima na monitoring lokaciji East Pearl River (Mississippi) uspoređena su s rezultatima dobivenim sondom YSI 6920 V2-2 čija je točnost verificirana od strane USGS (*U.S. Geological Survey*). Razlike od $\pm 15\%$ u mjerenjima EC_w između testiranih i referentne sonde smatraju se prihvatljivima prema Wagner i sur., (2006). Prema navedenim kriterijima, prihvatljivi rezultati dobiveni su za površinske i podzemne vode i na LI Vidrice i LI Luke za obje vrste voda. Provedenim analizama i potvrdom prihvatljivosti prikupljenih mjerenja može se zaključiti da podaci prikupljeni *in-situ* kontinuiranim monitoringom u visokoj vremenskoj frekvenciji sadrže informacije neophodne za razumijevanje hidroloških i geokemijskih procesa (Yang i Moyer, 2020) u ranjivim agroekosustavima kao što su riječne delte. Nadalje, korištenje kontinuiranog senzorskog monitoringa u odnosu na klasični monitoring s mjesečnim uzorkovanjem i laboratorijskim ispitivanjima može doprinijeti boljem razumijevanju dinamike oborina i otjecanja sa sliva (van der Grift, 2016), interakcije i hidrološke povezanosti površinskih i podzemnih voda (Malcolm i sur., 2006; Romić i sur., 2023a), kvantifikacije uzroka dinamičnih dnevnih, unutar dnevnih i drugih kratkoročnih varijabilnosti kemijskih pokazatelja vodnih tijela (Halliday i sur., 2012; Yang i Moyer, 2020).

5.3. Monitoring stupnja zaslanjenosti tla

Aluvijalne deltne ravnice nastale stabilizacijom razine mora prije više od 6000 godina i oblikovane dugotrajnim ponavljanjima erozijskih i sedimentacijskih procesa (Zovko, 2015) obično karakteriziraju vrlo povoljni agroekološki uvjeti. Neovisno o veličini same rijeke, spomenutim procesima u riječnim deltama osigurani su uvjeti za pedogenezu dubokih i plodnih poljoprivrednih tala (Zovko i sur., 2013). Danas, riječne delte u obalnim područjima uglavnom karakteriziraju izmijenjene geomorfološke i hidrološke značajke kao posljedica antropogenih aktivnosti uključujući melioracijske zahvate odvodnje i navodnjavanja, regulacije vodotoka gradnjom hidrotehničkih građevina, prekomjernog crpljenja podzemnih voda, čime se intenziviraju prirodni procesi intruzije morske vode u podzemne i površinske vodene tokove što posljedično dovodi i do za zaslanjivanja visokovrijednog poljoprivrednog zemljišta. Sekundarno zaslanjivanja kao posljedica ljudskih aktivnosti, u prvom redu navodnjavanja vodom s povišenim koncentracijama soli predstavlja jedan od glavnih faktora koji ugrožavaju

poljoprivrednu proizvodnju u aridnim obalnim područjima (Daliakopoulos i sur., 2016). Različite izvedbe FDR i TDR senzora danas imaju vrlo važnu ulogu u monitoringu stupnja zaslanjenosti tala, osobito u uvjetima navodnjavanja (Selim i sur., 2013; Bañón i sur., 2021) zbog svoje pristupačnosti i jednostavnosti korištenja.

Primjena FDR senzora za monitoring vlažnosti i stupnja zaslanjenosti tla na LI Vidrice omogućila je detektiranje promjena koje su bile posljedica prirodnih i antropogenih čimbenika. Prosječno utvrđena vlažnost tla kao i vrijednost EC_b na LI Vidrice povećavala se povećanjem dubine kroz cijelo razdoblje istraživanja (Tablica 4.5). Intenzivne oborine koje su u izvanvegetacijskom razdoblju i prvoj dekadi travnja u vegetacijskom razdoblju dovele do prihranjivanja plitkog piezometra i povećanja piezometarske visine, rezultirale su i promjenama u volumetrijskom sadržaju vlage, ali i promjenama u stupnju zaslanjenosti, pri čemu su dinamičnije promjene utvrđene u dijelu profila tla 0-75 cm (Slika 4.14). Manje promjene u stupnju zaslanjenosti i gotovo konstantne vrijednosti vlažnosti utvrđene su u najdubljem sloju tla 75-100 cm koji je dominantno bio pod utjecajem zaslanjenih plitkih podzemnih voda i vlaženja kapilarnim usponom (Slika 4.14). Do 75 cm dubine, pomoću FDR senzora detektirane su i promjene u dijelu vegetacijskog razdoblja kada se provodila mjera navodnjavanja nasada mandarina (Slika 4.15). Iako su u navedenom razdoblju zabilježene i određene količine oborina, količina oborina koja je došla do površine tla i koja se infiltrirala nije bila dovoljna za detektiranje promjene u stupnju vlažnosti na dubini od 25 cm. U istom razdoblju, u najdubljem sloju su utvrđene manje promjene stupnja zaslanjenosti u pojedinim terminima navodnjavanja, dok su promjene u volumetrijskom sadržaju vlage tla bile gotovo zanemarive. Vlažnost tla i EC_b do dubine od 75 cm bile su uglavnom pod utjecajem agrotehničke mjere navodnjavanja i to vodom čija se vrijednost EC_w uglavnom kretala oko 2 dS m^{-1} . Gotovo konstantna vlažnost i EC_b na dubini 75-100 cm rezultat su utjecaja zaslanjene podzemne vode koja se u izdvojenom razdoblju nalazila na dubini oko 150 cm od površina tla te kapilarnim silama ascedentno kretala prema površini tla. Da je zaslanjena podzemna voda konstantno prisutna na dubini većoj od 100 cm ukazuje i izdvojeni Gr horizont u stratigrafskoj građi pedološkog profila (Slika 4.15) unutar kojeg se odvijaju isključivo redukcijски procesi. Promjene u volumetrijskoj vlažnosti tla kao posljedicu prirodnih (oborina), ali i antropogenih (navodnjavanja) čimbenika u dvogodišnjem istraživanju na poljoprivrednim površinama poldera Schermer u Nizozemskoj utvrdili su Delsman i sur. (2014). Instalirani TDR senzori na dubini od 25 cm detektirali su povećanje vlažnosti tla nakon oborina, ali i jednog od dva provedena obroka navodnjavanja kišenjem. TDR senzor instaliran u polderu Schermer na dubini od 100 cm bio je pod neprestanim utjecajem podzemne vode koja je fluktuirala između 60 i 160 cm ispod površine

tla, a utvrđena volumetrijska vlažnost tla kroz dvije vegetacijske sezone bila je gotovo konstantna i iznosila je $\approx 0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Da nakon obroka navodnjavanja dolazi do povećanja vrijednosti EC_b , u istraživanju na zaslanjenim tlima u Iraku pokazali su Salman i sur. (2021). Primjenom FDR senzora na dubini 20 cm od površine tla na dvije lokacije istraživanja zaključili su da je nagli porast vrijednosti EC_b nakon primjene navodnjavanja i visoka varijabilnost EC_b između dva obroka navodnjavanja posljedica pronosa akumuliranih soli u profilu tla, ali i soli prisutnih u vodi za navodnjavanje.

Za razliku od LI Vidrice, na LI Luke dinamične promjene u sadržaju vlage, ali i EC_b utvrđene su po cijeloj dubini analiziranog dijela profila tla (0-100 cm), pri čemu su u izvanvegetacijskom razdoblju promjene bile pod utjecajem oborina, a u vegetacijskom razdoblju kao posljedica provođenja mjere navodnjavanja (Slika 4.16). Iz vremenske serije EC_b kroz cijelo razdoblje istraživanja (Slika 4.16), a posebno u izdvojenom segment koji odgovara razdoblju u kojem se na poljoprivrednoj parceli uzgajao kupus (*Brassica oleracea* L.var.*capitata*) (Slika 4.17), dinamičnije promjene utvrđene su na dubini 50-75 cm i 75-100 cm. Uvažavajući činjenicu da je uzgajana kultura navodnjavana s 9 obroka kojima je prosječno dodano 24 mm srednje zaslanjene vode (prosječna vrijednost EC_w 7,0 dS m^{-1}) (Tablica 4.4) u kombinaciji s primjenom vodotopivih gnojiva za očekivati bi bilo da su dinamičnije promjene utvrđene bliže površini tla. Dobiveni rezultati mogu biti posljedica preferencijalnog toka vode koji predstavlja neravnomjerno, brže kretanje vode kroz makropore tla nastale kao posljedica obrade tla, djelovanjem faune i korijena biljke u tlu, ali i bubrenjem i stezanjem minerala gline (Magdić, 2021). Manje izražena dinamika promjena vlažnosti i EC_b tla u prvoj polovici profila ukazuje na preferencijalni tok uspostavljen u blizini senzora do dubine profila od 75 cm koji ujedno karakterizira visok udio gline u granulometrijskom sastavu (Slika 4.17). Navedena pretpostavka može se potvrditi pukotinama koje su formirane u neposrednoj blizini instaliranih FDR senzora i cijevi sustava za navodnjavanje (Slika 5.5). Slične rezultate, kao posljedicu preferencijalnog toka oborinske vode dobio je i Magdić (2021) gdje su u pokusu postavljenom u vinogradu dinamičnije i brže reakcije na promjenu sadržaja vlažnosti tla TDR sensorima utvrđene na dubini od 90 cm u odnosu na senzore instalirane na dubini od 30 cm.



Slika 5.5. Pukotine na površini tla na LI Luke (Izvor: D. Romić)

5.4. Modeli predviđanja stupnja zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda

Sustavi *in-situ* kontinuiranog senzorskog monitoringa, uz uspostavljen protokol kontrole kvalitete dobivenih rezultata, pružaju mogućnost prikupljanja velikog broja pouzdanih, točnih mjerenja i razvoj velikih baza podataka (eng. *big data*) koji predstavljaju vrijedne ulazne varijable za razvoj predikcijskih modela. U hidromelioriranoj delti u kojoj su poljoprivredne parcele polderskog tipa, a procesi intruzije morske vode rezultiraju zaslanjivanjem izvora vode koja se koristi za navodnjavanje, modeli kratkoročnog predviđanja stupnja zaslanjenosti površinskih i podzemnih voda mogu biti vrlo koristan alat prilikom planiranja budućeg načina upravljanja vodama i tlima. Zbog kompleksnosti interakcija brojnih čimbenika kojima su uvjetovane geokemijske značajke površinskih i podzemnih voda, u sustave *in-situ* kontinuiranog monitoringa uz monitoring fizikalno-kemijskih karakteristika voda, neophodno je implementirati mogućnost praćenja i fizikalno-kemijskih značajki tla kao što su temperatura, vlažnost i EC_b , meteoroloških pokazatelja (u prvom redu oborina) te hidroloških parametara kao što su vodostaji u glavnim vodotocima područja.

U razvijenim modelima strojnog učenja, neovisno o LI, vrsti voda i vremenskoj frekvenciji mjerenja, kao prediktori za predviđanje vrijednosti EC_w korišteni su vodostaji na rijekama Maloj

Neretvi (ustava ušće nizvodno) i Neretvi kao i vrijednost EC_w u površinskom sloju rijeke Neretve (na profilu Metković), te količina oborina. Uz navedene, za razvoj modela MLR i XGB korištene su i druge varijable čiji su podaci prikupljeni uspostavljenim *in-situ* monitoringom voda i tla, pri čemu je uključenost pojedinih varijabli u modele ovisila o lokaciji, vrsti voda i vremenskoj frekvenciji mjerenja. Na testnom setu nasumično odabranih 20 % prikupljenih podataka XGB model i u satnoj i u dnevnoj vremenskoj frekvenciji pokazao je bolje performanse (R^2 i AIC) te niže razine pogrešaka (MAE i RMSE) u odnosu na model MLR. Bolji rezultati testnog modela XGB u odnosu na MLR posebno su izraženi u modelima sa satnim ulaznim podacima i na modelima za predviđanje stupnja zasljenosti površinskih voda (Tablica 4.12 i Tablica 4.34; Slika 4.18 i Slika 4.30). Premda je model XGB bio superiorniji te je pokazao bolje performanse u odnosu na model MLR, dobiveni rezultati sugeriraju da se u uvjetima manje dinamičnih promjena koje su utvrđene u podzemnim vodama mogu razviti jednostavniji modeli MLR prihvatljive pouzdanosti (Tablica 4.23, Tablica 4.28, Tablica 4.45 i Tablica 4.50). Da su u određenim uvjetima jednostavniji modeli mogu imati bolje performanse pokazali su El Bilali i Taleb (2020). Testirajući osam algoritama strojnog učenja za predviđanje većeg broja pokazatelja kakvoće voda na dvije lokacije monitoringa u slivu rijeke Bouregret (Maroko) zaključili su da model MLR i ANN daju bolje rezultate i manje vrijednosti pogrešaka od modela temeljenih na stablima odlučivanja (DT, RF i AdaBoost).

Svi razvijeni modeli korišteni su za predviđanje EC_w za razdoblja sedam, 14 i 30 dana te su validirani podacima koji nisu korišteni niti za trening niti za testiranje modela. Kod modela sa satnim ulaznim podacima najmanje pogreške bile su kod modela XGB predviđanja 7 dana unaprijed, a s povećanjem predikcijskog razdoblja povećavale su se i razine pogrešaka. Najmanje pogreške kod sedmodnevnog modela predviđanja utvrđene su u podzemnoj vodi na LI Vidrice (MAE= 0,187 dS m⁻¹ i RMSE=0,255 dS m⁻¹), dok su najveće pogreške utvrđene u površinskoj vodi na LI Vidrice (MAE= 0,22 dS m⁻¹ i RMSE=0,253 dS m⁻¹). Relativno velika pogreška kod sedmodnevnog predviđanja EC_w u površinskoj vodi na LI Vidrice modelom XGB ipak je više nego dvostruko manja u odnosu na model MLR (MAE= 0,518 dS m⁻¹ i RMSE=0,572 dS m⁻¹). Više vrijednosti pogrešaka mogu biti posljedica dinamičnih promjena i vrlo širokog raspona vrijednosti EC_w koje su utvrđene u izvanvegetacijskom razdoblju na LI Vidrice kao posljedica specifičnih uvjeta (obilne oborine i zatvaranje ustave). Usprkos tome, dobiveni rezultati sugeriraju da su analizom odabrani optimalni hiperparametri koji su omogućili razvoj modela XGB koji prilikom prognoziranja dobro generalizira, pri čemu su zadovoljavajući rezultati postignuti za predviđanje sedam dana unaprijed u površinskoj (Tablica 4.13 i Tablica 4.35) i izvrsni rezultati za predviđanje EC_w do 30 dana unaprijed u podzemnoj vodi (Tablica

4.24 i Tablica 4.46). Međutim, usporedbom nekoliko algoritama strojnog učenja, uključujući MLR, SVM, RF i ANN za predviđanje saliniteta mora na ušću rijeke Elorn (Francuska) u visokoj vremenskoj rezoluciji, Guillou i sur. (2023) pokazali su da se slični rezultati mogu dobiti korištenjem jednostavniji modela kao što je RF (RMSE=3,32 i $R^2=0,46$) u odnosu na znatno kompleksniji neuronsku mrežu, konkretno MLP (eng. *Multi Layer Perceptron*) (RMSE=3,26 i $R^2=0,48$). Da se vrlo dobri rezultati predikcija mogu dobiti modelom XGB pokazala su istraživanja Nguyen i sur. (2021) i Ibrahim Ahmed Osman i sur. (2021). Za predviđanju intruzije soli u tla na području delte rijeke Mekong, Nguyen i sur. (2021) su koristeći kombinaciju spektralnih snimki i *in-situ* mjerenja razvili i testirali osam modela strojnog učenja. Iako je najbolje rezultate imao hibridni model XGB u kombinaciji s optimizacijskim algoritmom Grasshopper na validacijskom setu podataka ($R^2=0,86$ i RMSE=0,161), od pojedinačnih modela najbolje performanse pokazao je model XGB ($R^2=0,76$ i RMSE=0,101) dok je primjerice model duboke neuronske mreže imao vrijednost $R^2=0,28$ i RMSE=0,176. Ibrahim Ahmed Osman i sur. (2021) su pak pokazali da se modelom XGB mogu dobiti pouzdanije predikcije dnevnih razina podzemnih u odnosu na kompleksniji model ANN u istraživanju provedenom na području pet gradova provincije Selangor (Malezija). Premda kompleksniji modeli kao što su ANN u određenim uvjetima mogu rezultirati boljim predikcijama u odnosu na druge jednostavnije modele strojnog učenja (Tyrallis i sur., 2021), neuronske mreže zahtijevaju znatno više resursa u pogledu procesne moći (Rosa i sur., 2020) u odnosu na primjerice model XGB koji je brži (Zounemat-Kermani i sur., 2021) i zahtijeva znatno manje resursa (Liu i Fan, 2021), uz dobivanje pouzdanih predikcija.

Kod modela razvijenih korištenjem dnevnih ulaznih podataka, neovisno o kojoj lokaciji i vrsti voda se radilo, ARIMA model vremenskih serija pokazao je najbolje performanse. Najmanje razine pogrešaka utvrđene su kod ARIMA modela za predviđanje sedam dana unaprijed, pri čemu su najmanje bile za predviđanje EC_w u podzemnoj vodi na LI Luke (MAE=0,01 dS m^{-1} i RMSE=0,011 dS m^{-1}) (Tablica 4.52) dok su najveće bile za predviđanje EC_w u površinskoj vodi na LI Luke (MAE=0,483 dS m^{-1} i RMSE=0,616 dS m^{-1}). Dobiveni rezultati modeliranja sugeriraju da ARIMA model može biti dobar izbor za kratkoročno predviđanje stupnja zasljenosti u manje dinamičnim sredinama (podzemne vode na LI Vidrice i LI Luke, ali i površinske vode na LI Vidrice u vegetacijskom razdoblju) i u uvjetima kada je monitoring ograničen samo na jednu varijablu (EC_w) u dnevnoj vremenskoj rezoluciji. Da se pouzdane prognoze primjenom ARIMA modela mogu dobiti na manjem setu podataka pokazali su Abuamra i sur. (2021) koristeći godišnje podatke vremenskih serija (1989.-2018.) tri piezometra u gradu Deir El-Balah (pojas Gaze) koji su pod utjecajem zasljenjivanja uslijed intruzije morske vode. Na jednoj od tri lokacije

najmanju MAPE pogrešku za predviđanje vrijednosti EC_w imao je klasični ARIMA model (MAPE=4,2 %), dok je na druge dvije najmanju pogrešku imao model ARIMA model u kombinaciji s dodatnim tehnikama za vremenske serije s izraženim sezonalnim promjenama (TBATS – trigonometrijska sezonalnost; Box-Cox transformacija; ARMA pogreške; trend; sezonalnost) (MAPE=4,0 i 5,4 %). Na sve tri lokacije modeli vremenskih serija razvijeni na relativno malom setu ulaznih podataka pokazali su se pouzdanijima u predviđanju vrijednosti EC_w uz manje pogreške u odnosu na hibridni ARIMA model u kombinaciji s modelom strojnog učenja, konkretno neuronskom mrežom. Slične rezultate dobili su Tyrallis i sur. (2021) testiranjem većeg broja različitih modela za predviđanje dnevnih protoka na 511 lokacija u SAD-u koristeći desetogodišnji set dnevnih ulaznih podataka (2004.-2013.) Iako su najbolje performanse pokazali kompleksni ansambl modeli i modeli neuronskih mreža, bolje performanse i manje pogreške MAE i RMSE pokazao je ARIMA model u odnosu na modele XGB i MLR.

6. ZAKLJUČCI

Globalni porast prosječne razine mora jedan je od glavnih čimbenika intenziviranja intruzije morske vode u priobalne vodonosnike Mediterana, a time i riječnih delti hrvatskog priobalja. Geomorfologija područja i način korištenja zemljišta polderskog tipa dodatno pridonose načinu i intenzitetu pronosa otopljenih tvari. To se u prvom redu odnosi na hidrotehničke građevine za zaštitu od poplava te umjetno održavanje razine podzemne vode putem sustava crpnih stanica. Monitoring kakvoće voda nužan je za donošenje pravovremenih odluka i gospodarenje vodom i tlom u osjetljivim agroekosustavima riječnih delti. Istraživanje provedeno ovom disertacijom polučilo je sljedeće zaključke:

- Istraživanjem su obuhvaćene dvije lokacije unutar riječne delte koje se razlikuju po načinu korištenja, ali i procesima i interakcijama između podzemne vode i različitih kategorija površinskih voda. Klasičnim mjesečnim istraživačkim monitoringom stupnja zasljenosti površinske i podzemne vode na lokacijama istraživanja u razdoblju 2010.-2022. utvrđene su statistički značajne razlike u vrijednostima EC_w kako između podzemne i površinske vode na pojedinoj lokaciji, tako i između istih vrsta voda na različitim lokacijama. Iste razlike potvrđene su i primjenom *in-situ* kontinuiranog monitoringa senzorskim sustavom koji producira podatke u visokoj vremenskoj rezoluciji.
- Međutim, za razliku od klasičnog mjesečnog monitoringa, senzorski *in-situ* monitoring u visokoj vremenskoj rezoluciji mjerenja omogućio je praćenje unutar-dnevne varijabilnosti stupnja zasljenosti voda te pojavu i kvantifikaciju ekstremnih vrijednosti. Nadalje, povezivanjem tako utvrđene dinamike zasljenosti voda s drugim okolišnim varijablama u istraživanom području, kao što su oborine, režim rada crpnih stanica i navodnjavanje, omogućena je karakterizacija prirodnih i antropogenih doprinosa zasljenivanju voda.
- Provedenom usporedbom rezultata klasičnog i *in-situ* kontinuiranog monitoringa, niske vrijednosti pogrešaka utvrđene su za monitoring stupnja zasljenosti površinske i podzemne vode na LI Luke i površinske vode na LI Vidrice. Veće pogreške utvrđene u *in-situ* monitoringu podzemnih voda na LI Vidrice mogu se povezati s različitim dubinom uzorkovanja vode u klasičnim monitoringu i to u izvanvegetacijskom razdoblju. Prosječne vrijednosti EC_w nisu se statistički značajno razlikovale između dva pristupa monitoringu niti na jednoj LI u površinskim i podzemnim vodama.

- Prikupljeni podaci u visokoj vremenskoj rezoluciji omogućili su razvoj i testiranje modela temeljenih na strojnom učenju (MLR i XGB) i stohastičkim procesima (ARIMA) za predviđanje stupnja zasljenosti sedam, 14 i 30 dana unaprijed. Superiorniji model za predviđanje satnih vrijednosti EC_w bio je XGB u odnosu na model MLR, a pouzdane prognoze dobivene su za predviđanje sedam dana unaprijed u površinskoj vodi na LI Vidrice te do 30 dana unaprijed u površinskoj vodi na LI Luke i podzemnim vodama na LI Vidrice i LI Luke. Korištenjem dnevnih ulaznih podataka bolje performanse pokazao je ARIMA model u odnosu na modele strojnog učenja pri čemu su najmanje pogreške utvrđene kod predviđanja EC_w sedam dana unaprijed.
- Podaci visoke vremenske rezolucije zajedno s razvijenim modelima pokazali su se kao prihvatljiv alat za detekciju, kvantifikaciju i predviđanje promjena stupnja zasljenosti površinskih i podzemnih voda u osjetljivim agroekosustavima kao što su riječne delte. Izražena heterogenost stupnja zasljenosti voda i tla ukazuje na važnost prilagodbe monitoringa i individualnog pristupa svakoj lokaciji pri čemu bi buduća istraživanja trebalo usmjeriti na uspostavu sličnih sustava i na drugim MP.

7. LITERATURA

- Abba S.I., Hadi S.J., Abdullahi J. (2017). River water modelling prediction using multi-linear regression, artificial neural network, and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. *Procedia Comput Sci* 120: 75–82. doi:10.1016/j.procs.2017.11.212
- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J Hydrol (Amst)* 524: 733–752. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
- Abdul Wahid A., Arunbabu E. (2022). Forecasting water quality using seasonal ARIMA model by integrating in-situ measurements and remote sensing techniques in Krishnagiri reservoir, India. *Water Pract Technol* 17 (5): 1230–1252. doi:10.2166/wpt.2022.046
- Abuamra I.A., Maghari A.Y.A., Abushawish H.F. (2021). Medium-term forecasts for salinity rates and groundwater levels. *Model Earth Syst Environ* 7 (1): 485–494. doi:10.1007/s40808-020-00901-y
- Adams J.B., Pretorius L., Snow G.C. (2019). Deterioration in the water quality of an urbanised estuary with recommendations for improvement. *Water SA*. Vol 45 No. 1. doi: 10.4314/wsa.v45i1.10
- Alferes J., Tik S., Copp J., Vanrolleghem P.A. (2013). Advanced monitoring of water systems using in situ measurement stations: data validation and fault detection. *Water Science and Technology* 68 (5): 1022–1030. doi:10.2166/wst.2013.302
- Alpaydin E. (2014). *Introduction to Machine Learning*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- AMAP. (1998). *AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues*. Oslo, Norway
- Amezketta E. (2006). An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. *J Arid Environ* 67 (4): 594–606. doi:10.1016/j.jaridenv.2006.03.010
- Appelo C.A.J., Postma D. (2004). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. CRC Press. doi:10.1201/9781439833544
- Aquaread. (2021). *Instruction Manual for the Aquaprobe® AP-5000 Multiparameter Water Quality Probe and associated Aquameter*

- Asuero A.G., Sayago A., González A.G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. *Crit Rev Anal Chem* 36 (1): 41–59. doi:10.1080/10408340500526766
- Ayres S.K. (2015). A Simulation of the Mississippi River Salt Wedge Estuary Using a Three-Dimensional Cartesian Z Coordinate Mode. University of New Orleans, New Orleans
- Badon-Ghyben W. (1889). Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Amsterdam. *Tijdschr Kon Inst Ing* 9: 8–22
- Bañón S., Álvarez S., Bañón D., Ortuño M.F., Sánchez-Blanco M.J. (2021). Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors. *Scientia Horticulturae*. 285. 110171. doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110171.
- Barlow P.M., Reichard E.G. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeol J* 18 (1): 247–260. doi:10.1007/s10040-009-0514-3
- Bartram J., Ballance R. (1996). Water quality monitoring : a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programs. E & FN SPON, an imprint of Chapman & Hall, London, UK
- Bindoff N.L., Willebrand J., Artale V., Cazenave A., Gregory J.M., Gulev S., Hanawa K., Le Quéré C., Levitus S., Nojiri Y., Shum C.K., Talley L.D., Unnikrishnan A.S. (2007). Observations: oceanic climate and sea level. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Biondić B., Brkić Ž., Biondić R. (1996). *Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske. Hidrogeologija, I. faza*. Zagreb
- Bošnjak R. (2019). Prognoza vremenskih serija korištenjem programske knjižice Scikit-learn. Diplomski. Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
- Botunac I. (2018). Primjena metoda strojnog učenja u predviđanju kretanja vrijednosti burzovnog indeksa. Diplomski rad. Sveučilište u Zadru, Zadar
- Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. (2008). *Time Series Analysis*. Wiley. doi:10.1002/9781118619193
- Breiman L. (2001). Random forests. *Mach Learn* 45 (1): 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324

- Brkić Ž. (2022). Hidrogeološke značajke delte rijeke Neretve - izvještaj u okviru projekta 'Napredni sustav motrenja agroekosustava u riziku od zaslanjivanja i onečišćenja'. Zagreb
- Bubalo M. (2016). Model predviđanja koncentracije nitrata u podzemnim vodama pod utjecajima iz poljoprivrede. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb
- Burkov A. (2019). The Hundred-Page Machine Learning Book. Andriy Burkov
- Buškulčić P. (2019). Hidrogeokemijske značajke podzemne vode u panonskom dijelu Republike Hrvatske. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
- Butcher K., Wick A.F., DeSutter T., Chatterjee A., Harmon J. (2016). Soil Salinity: A Threat to Global Food Security. *Agronomy Journal* 108 (6). doi:10.2134/agronj2016.06.0368
- Cameron W.M., Pritchard D.W. (1963). *Estuaries. The Sea*, John Wiley and Sons, New York, pp. 306–324
- Cañedo-Argüelles M. (2020). A review of recent advances and future challenges in freshwater salinization. *Limnetica* 39 (1): 185–211. doi:10.23818/limn.39.13
- Caputo M., Pieri L., Unguendoli M. (1970). Geometric investigation of the subsidence in the Po Delta. CNR, Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse
- Carvalho-Santos C., Nunes J.P., Monteiro A.T., Hein L., Honrado J.P. (2016). Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. *Hydrological Processes* 30 (5): 720–738. doi:10.1002/hyp.10621
- Cassidy R., Jordan P. (2011). Limitations of instantaneous water quality sampling in surface-water catchments: Comparison with near-continuous phosphorus time-series data. *J Hydrol (Amst)* 405 (1–2): 182–193. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.020
- Chapman D. (1996). *Water Quality Assessments. A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Chapman & Hall, London
- Chatfield C. (2003). *The Analysis of Time Series*. Chapman and Hall/CRC. doi:10.4324/9780203491683
- Chen T., Guestrin C. (2016). XGBoost. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, ACM, New York, NY, USA, pp. 785–794. doi:10.1145/2939672.2939785

Chowdury M.S.U., Emran T. Bin, Ghosh S., Pathak A., Alam Mohd.M., Absar N., Andersson K., Hossain M.S. (2019). IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System. *Procedia Comput Sci* 155: 161–168. doi:10.1016/j.procs.2019.08.025

Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne Antony J., Pfeffer W. Tad, Stammer Detlef, Unnikrishnan Alakkat S. (2013). Sea Level Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York, NY, USA

Cihan M.T. (2021). Coparison of artificial intelligence methods for predicting compressive strength of concrete. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* 73 (06): 617–632. doi:10.14256/JCE.3066.2020

Cohen B., McCarthy L.T. (1963). *Salinity of the Delaware Estuary*. U.S. Geological Survey , Newark, Delaware

Colombani N., Osti A., Volta G. Mastrocicco M. (2016). Impact of Climate Change on Salinization of Coastal Water Resources. *Water Resources Management* 30. 2483–2496. doi.org/10.1007/s11269-016-1292-z

Corwin D.L., Scudiero E. (2019). Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors, pp. 1–130. doi:10.1016/bs.agron.2019.07.001

Corwin D.L., Yemoto K. (2020). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Soil Sci Soc Am J.* 2020; 84: 1442–1461. <https://doi.org/10.1002/saj2.20154>

Costall A.R., Harris B.D., Teo B., Schaa R., Wagner F.M., Pigois J.P. (2020). Groundwater Throughflow and Seawater Intrusion in High Quality Coastal Aquifers. *Sci Rep* 10 (1): 9866. doi:10.1038/s41598-020-66516-6

Črnčec P., Andročec D. (2020). PRIMJENA STROJNOG UČENJA NA PROBLEMU KOLORIZACIJE CRNO-BIJELIH SLIKA. *Zbornik Radova Veleučilišta u Šibeniku*, pp. 123–135

Da Lio C., Tosi L. (2019). Vulnerability to relative sea-level rise in the Po river delta (Italy). *Estuar Coast Shelf Sci* 228: 106379. doi:10.1016/j.ecss.2019.106379

Dalbelo Bašić B., Čupić M., Šnajder J. (n.d.). *Umjetne neuronske mreže*. Skripta

Daliakopoulos I.N., Tsanis I.K., Koutroulis A., Kourgialas N.N., Varouchakis A.E., Karatzas G.P., Ritsema C.J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment* 573: 727–739. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.177

Danielson T.L. (2020). Sensor Recommendations for Long Term Monitoring of the F-Area Seepage Basins

Day J.W., Yáñez-Arancibia A., Kemp W.M., Crump B.C. (2012). Introduction to Estuarine Ecology *Estuarine Ecology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 1–18. doi:10.1002/9781118412787.ch1

de Louw P.G.B., Griffioen J., Van den Eertwegh G.A.P.H. (2000). High nutrient and chloride loads to surface water in polder areas due to groundwater seepage. *Past Achievements and Future Challenges* (Sililo O., ed), A.A. Balkema, Cape Town, South Africa, pp. 418–486

de Louw P.G.B., Oude Essink G.H.P., Stuyfzand P.J., van der Zee S.E.A.T.M. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. *J Hydrol (Amst)* 394 (3–4): 494–506. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.009

Delsman J.R. (2015). *Saline groundwater – surface water interaction in coastal lowlands*. IOS Press BV, Amsterdam

Delsman J.R., Waterloo M.J., Groen M.M.A., Groen J., Stuyfzand P.J. (2014). Investigating summer flow paths in a Dutch agricultural field using high frequency direct measurements. *J Hydrol (Amst)* 519: 3069–3085. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.10.058

De Pascale S., Maggio A., Barbieri G. (2005). Soil salinization affects growth, yield and mineral composition of cauliflower and broccoli, *European Journal of Agronomy*. 23 (3).254-264 doi: 10.1016/j.eja.2004.11.007.

Dhar R.K., Zheng Y., Stute M., van Geen A., Cheng Z., Shanewaz M., Shamsudduha M., Hoque M.A., Rahman M.W., Ahmed K.M. (2008). Temporal variability of groundwater chemistry in shallow and deep aquifers of Araihasar, Bangladesh. *J Contam Hydrol* 99 (1–4): 97–111. doi:10.1016/j.jconhyd.2008.03.007

Di Bucchianico A. (2007). Coefficient of Determination. *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Wiley. doi:10.1002/9780470061572.eqr173

- Diener A., Hartmann P., Urso L., Vives i Batlle J., Gonze M.A., Calmon P., Steiner M. (2017). Approaches to modelling radioactive contaminations in forests – Overview and guidance. *J Environ Radioact* 178–179: 203–211. doi:10.1016/j.jenvrad.2017.09.003
- Díez-Minguito M., Ortega-Sánchez M., Baquerizo A., De Swart H.E., Losada M.A. (2014). SUSPENDED PARTICLE DYNAMICS IN A WELL-MIXED ESTUARY: DEVIATIONS FROM MORPHODYNAMIC EQUILIBRIUM. *Coastal Engineering Proceedings* 1 (34): 78. doi:10.9753/icce.v34.sediment.78
- Domazetović F., Lončar N., Šiljeg A. (2017). Kvantitativna analiza utjecaja porasta razine Jadranskog mora na hrvatsku obalu: GIS pristup. *Naše more* 64 (2): 33–43. doi:10.17818/NM/2017/2.7
- Dyer K.R. (1973). *Estuaries: A Physical Introduction*. John Wiley and Sons, New York
- El Bilali A., Taleb A. (2020). Prediction of irrigation water quality parameters using machine learning models in a semi-arid environment. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 19 (7): 439–451. doi:10.1016/j.jssas.2020.08.001
- El-Agha D.E., Molle F., Rap E., El Bialy M., El-Hassan W.A. (2020). Drainage water salinity and quality across nested scales in the Nile Delta of Egypt. *Environmental Science and Pollution Research* 27 (26): 32239–32250. doi:10.1007/s11356-019-07154-y
- Eslami S., Hoekstra P., Kernkamp H.W.J., Nguyen Trung N., Do Duc D., Nguyen Nghia H., Tran Quang T., van Dam A., Darby S.E., Parsons D.R., Vasilopoulos G., Braat L., van der Vegt M. (2021). Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: results of field observations and integrated coastal–inland modelling. *Earth Surface Dynamics* 9 (4): 953–976. doi:10.5194/esurf-9-953-2021
- Eslami S., Hoekstra P., Nguyen Trung N., Ahmed Kantoush S., Van Binh D., Duc Dung D., Tran Quang T., van der Vegt M. (2019). Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation. *Sci Rep* 9 (1): 18746. doi:10.1038/s41598-019-55018-9
- Fan X., Min T., Dai X. (2023). The Spatio-Temporal Dynamic Patterns of Shallow Groundwater Level and Salinity: The Yellow River Delta, China. *Water (Basel)* 15 (7): 1426. doi:10.3390/w15071426

- Ferchichi H., Ben Hamouda M.F., Farhat B., Ben Mammou A. (2018). Assessment of groundwater salinity using GIS and multivariate statistics in a coastal Mediterranean aquifer. *International Journal of Environmental Science and Technology* 15 (11): 2473–2492. doi:10.1007/s13762-018-1767-y
- Ferlatti A. (2019). Metode strojnog i dubinskog učenja za predikciju otkazivanje rezervacija. Završni rad. Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula
- Filipović L. (2016). Modifikacija biopristupačnosti bakra i kadmija biljci boba (*Vicia faba* L.) pod utjecajem organske tvari i saliniteta tla. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb
- Forthofer R.N., Lee E.S., Hernandez M. (2007). Linear Regression. *Biostatistics* 349–386. doi:10.1016/B978-0-12-369492-8.50018-2
- Franceschini F., Signorini R. (2016). Seawater intrusion via surface water vs. deep shoreline salt-wedge: A case history from the Pisa coastal plain (Italy). *Groundw Sustain Dev* 2–3: 73–84. doi:10.1016/j.gsd.2016.05.003
- Frollini E., Parrone D., Ghergo S., Masciale R., Passarella G., Pennisi M., Salvadori M., Preziosi E. (2022). An Integrated Approach for Investigating the Salinity Evolution in a Mediterranean Coastal Karst Aquifer. *Water (Basel)* 14 (11): 1725. doi:10.3390/w14111725
- Gabbiani F., Cox S.J. (2010). Stochastic Processes. *Mathematics for Neuroscientists*, Elsevier, pp. 251–266. doi:10.1016/B978-0-12-374882-9.00016-2
- Galloway W.E. (1975). Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems. *Deltas: Models for Exploration* (Broussard M.L., ed), Houston Geological Society, Houston, pp. 87–98
- Gassman P.W., Sadeghi A.M., Srinivasan R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. *J Environ Qual* 43 (1): 1–8. doi:10.2134/jeq2013.11.0466
- Geeson N. A., Brandt C. J., Thornes John B. (2003). *Mediterranean Desertification: A Mosaic of Processes and Responses*. John Wiley & Sons, Chichester, UK
- Geyer R., Trowbridge J., Bowen M. (2000). The Dynamics of a Partially Mixed Estuary. *J Phys Oceanogr* 30 (8): 2035–2048. doi:10.1175/1520-0485(2000)030<2035:TDOAPM>2.0.CO;2

Geyer W.R. (2010). Estuarine salinity structure and circulation. *Contemporary Issues in Estuarine Physics* (Valle-Levinson A., ed), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 12–26

Geyer W.R., MacCready P. (2014). The Estuarine Circulation. *Annu Rev Fluid Mech* 46 (1): 175–197. doi:10.1146/annurev-fluid-010313-141302

Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J. (2007). Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model. *J Hydrol (Amst)* 340 (1–2): 91–104. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.04.001

Gilja G., Kuspilić N., Lacko M., Romić D. (2023). Reconstruction of Recharge and Discharge Pattern in the Polder Drainage Canal Network. *Hydrology* 10 (3): 60. doi:10.3390/hydrology10030060

Gregor D., Loeng H., Barrie L. (1998). *The Influence of Physical and Chemical Processes on Contaminant Transport into and within the Arctic*. Oslo

Gudas, M., Povilaitis, A. (2013). Factors affecting seasonal and spatial patterns of water quality in Lithuanian rivers, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 21:1, 26-35, doi:10.3846/16486897.2012.696058

Guillou N., Chapalain G., Petton S. (2023). Predicting sea surface salinity in a tidal estuary with machine learning. *Oceanologia* 65 (2): 318–332. doi:10.1016/j.oceano.2022.07.007

Haj-Amor Z., Araya T., Kim D.-G., Bouri S., Lee J., Ghiloufi W., Yang Y., Kang H., Jhariya M.K., Banerjee A., Lal R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Science of The Total Environment* 843: 156946. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156946

Halle R. (2004). *Kemizam i obradba vode*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

Halliday S.J., Wade A.J., Skeffington R.A., Neal C., Reynolds B., Rowland P., Neal M., Norris D. (2012). An analysis of long-term trends, seasonality and short-term dynamics in water quality data from Plynlimon, Wales. *Science of The Total Environment* 434: 186–200. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.052

Hassan Omer N. (2020). *Water Quality Parameters*. *Water Quality - Science, Assessments and Policy*, IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.89657

Hassani A., Azapagic A., Shokri N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nat Commun* 12, 6663. doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3

Havnø K., Madsen M.N., Dørge J. (1995). MIKE 11 - a generalized river modelling package. *Computer Models of Watershed Hydrology*. (Singh V.P., ed), Water Resources Publications, Colorado, pp. 733–782

Herzberg A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J Gasbeleucht Wasserversorg* 44: 842–844

Hosen J.D., Aho K.S., Appling A.P., Creech E.C., Fair J.H., Hall R.O., Kyzivat E.D., Lowenthal R.S., Matt S., Morrison J., Saiers J.E., Shanley J.B., Weber L.C., Yoon B., Raymond P.A. (2019). Enhancement of primary production during drought in a temperate watershed is greater in larger rivers than headwater streams. *Limnol Oceanogr* 64 (4): 1458–1472. doi:10.1002/lno.11127

Hrastić D. (2019). Implementacija klasifikacijskog algoritma podizanja gradijenta stabilima odluke s primjenom na predikciju ishoda nogometnih utakmica. Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

HRN EN 5667-6. (2016). Water Quality - Sampling - Part 6: Guidance on Sampling of Rivers and Streams. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN EN 27888. (2008). Water Quality - Determination of Electrical Conductivity. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN EN ISO 15682. (2008). Determination of chloride by flow analysis (CFA and FIA) and photometric or potentiometric detection. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN EN ISO 11885. (2010). Water quality -- Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN EN ISO/IEC 17021-1. (2017). Conformity assessment -- Requirements for bodies providing audit and certification of management systems -- Part 1: Requirements. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN ISO 5667-11. (2011). Water Quality - Sampling - Part 11: Guidance on Sampling of Groundwaters. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

HRN ISO 10523. (2012). Water quality -- Determination of pH. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute. Croatian Standard Institute

HRN ISO 9964-3. (1998). Water Quality - Determination of Sodium and Potassium - Part 3: Determination of Sodium and Potassium by Flame Emission Spectrometry. International Organisation for Standardisation. Croatian Standard Institute

Hrvatska enciklopedija mrežno izdanje. (2021). Stohastički proces

Hrvatske vode. (2015). Plan upravljanja vodnim područjima 2016. – 2021. - Nacr

Hrvatske vode. (2014). Provedbeni plan obrane od poplava branjenog područja Sektor F - južni Jadran. Zagreb

Hyndman R., Athanasopoulos G., Bergmeir C., Caceres G., Chhay L., O'Hara-Wild M., Petropoulos F., Razbash S., Wang E., Yasmeeen F. (2023). orecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.21

Ibañez C., Pont D., Prat N. (1997). Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries. *Limnol Oceanogr* 42 (1): 89–101. doi:10.4319/lo.1997.42.1.0089

Ibrahim Ahmed Osman A., Najah Ahmed A., Chow M.F., Feng Huang Y., El-Shafie A. (2021). Extreme gradient boosting (Xgboost) model to predict the groundwater levels in Selangor Malaysia. *Ain Shams Engineering Journal* 12 (2): 1545–1556. doi:10.1016/j.asej.2020.11.011

Jiao J., Post V. (2019). *Coastal Hydrogeology*. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139344142

Juračić M. (1998). O nastanku i promjenama delte rijeke Neretve. *Matica hrvatska* 4: 228–232

Kaushal S.S., Likens G.E., Pace M.L., i sur. (2021). Freshwater salinization syndrome: from emerging global problem to managing risks. *Biogeochemistry* 154, 255–292. doi.org/10.1007/s10533-021-00784-w

Kelly D. (2006). Development of Seawater Intrusion Protection Regulations. 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-Chia Laguna

- Ketabchi H., Mahmoodzadeh D., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. (2016). Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *J Hydrol (Amst)* 535: 235–255. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.083
- Khaska M., Le Gal La Salle C., Lancelot J., team A., Mohamad A., Verdoux P., Noret A., Simler R. (2013). Origin of groundwater salinity (current seawater vs. saline deep water) in a coastal karst aquifer based on Sr and Cl isotopes. Case study of the La Clape massif (southern France). *Applied Geochemistry* 37: 212–227. doi:10.1016/j.apgeochem.2013.07.006
- Kirchner J.W., Feng X., Neal C., Robson A.J. (2004). The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future. *Hydrol Process* 18 (7): 1353–1359. doi:10.1002/hyp.5537
- Kohli P., Siver P.A., Marsicano L.J., Hamer J.S., Coffin A.M. (2017). Assessment of long-term trends for management of Candlewood Lake, Connecticut, USA. *Lake Reserv Manag* 33 (3): 280–300. doi:10.1080/10402381.2017.1335812
- Konde S., Deosarkar Dr.S. (2020). IOT Based Water Quality Monitoring System. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.3645467
- Kotamäki N., Thessler S., Koskiahio J., Hannukkala A., Huitu H., Huttula T., Havento J., Järvenpää M. (2009). Wireless in-situ Sensor Network for Agriculture and Water Monitoring on a River Basin Scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective. *Sensors* 9 (4): 2862–2883. doi:10.3390/s90402862
- Kovačić Z.J. (1995). *Analiza vremenskih serija*. Univerzitet u Beogradu Ekonomski fakultet, Beograd
- Kralj D., Romić D., Romić M., Cukrov N., Mlakar M., Kontrec J., Barišić D., Širac S. (2016). Geochemistry of stream sediments within the reclaimed coastal floodplain as indicator of anthropogenic impact (River Neretva, Croatia). *J Soils Sediments* 16 (4): 1150–1167. doi:10.1007/s11368-015-1194-3
- Krešić N. (2023). *Hydrogeology 101: Introduction to Groundwater Science and Engineering*. Blue Ridge Press LLC, Warrenton, VA, USA
- Krvavica N., Gotovac H., Lončar G. (2021). Salt-wedge dynamics in microtidal Neretva River estuary. *Reg Stud Mar Sci* 43: 101713. doi:10.1016/j.rsma.2021.101713

- Krvavica N., Ružić I. (2020). Assessment of sea-level rise impacts on salt-wedge intrusion in idealized and Neretva River Estuary. *Estuar Coast Shelf Sci* 234: 106638. doi:10.1016/j.ecss.2020.106638
- Kuhta M., Brkić Ž. (2020). Analiza trasiranja provedenih na području krša u Republici Hrvatskoj. Zagreb
- Kurup G.R., Hamilton D.P., Patterson J.C. (1998). Modelling the Effect of Seasonal Flow Variations on the Position of Salt Wedge in a Microtidal Estuary. *Estuar Coast Shelf Sci* 47 (2): 191–208. doi:10.1006/ecss.1998.0346
- Lange H., Sippel S. (2020). Machine Learning Applications in Hydrology, pp. 233–257. doi:10.1007/978-3-030-26086-6_10
- Lassiter A. (2021). Rising seas, changing salt lines, and drinking water salinization. *Curr Opin Environ Sustain* 50: 208–214. doi:10.1016/j.cosust.2021.04.009
- Li C., Gao X., Li S., Bundschuh J. (2020). A review of the distribution, sources, genesis, and environmental concerns of salinity in groundwater. *Environmental Science and Pollution Research* 27 (33): 41157–41174. doi:10.1007/s11356-020-10354-6
- Li D., Liu S. (2019). System and Platform for Water Quality Monitoring. *Water Quality Monitoring and Management*, Elsevier, pp. 101–112. doi:10.1016/B978-0-12-811330-1.00003-X
- Li M., Chen Z. (2019). An Assessment of Saltwater Intrusion in the Changjiang (Yangtze) River Estuary, China. *Coasts and Estuaries*, Elsevier, pp. 31–43. doi:10.1016/B978-0-12-814003-1.00002-2
- Li Y., Li M. (2011). Effects of winds on stratification and circulation in a partially mixed estuary. *J Geophys Res* 116 (C12): C12012. doi:10.1029/2010JC006893
- Li Y., Migliaccio K. (2010). *Water Quality Concepts, Sampling, and Analyses*. CRC Press. doi:10.1201/b10157
- Liang J., Yang Q., Sun T., Martin J.D., Sun H., Li L. (2015). MIKE 11 model-based water quality model as a tool for the evaluation of water quality management plans. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 64 (6): 708–718. doi:10.2166/aqua.2015.048

Linklater N., Örmeci B. (2013). Real-Time and Near Real-Time Monitoring Options for Water Quality. *Monitoring Water Quality*, Elsevier, pp. 189–225. doi:10.1016/B978-0-444-59395-5.00008-X

Liu P., Fan W. (2021). Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Model for Vehicle Trajectory Prediction in Connected and Autonomous Vehicle Environment. *Traffic & Transportation* 33 (5): 767–774. doi:10.7307/ptt.v33i5.3779

Ljubenkov I., Vranješ M. (2012). Numerical model of stratified flow – case study of the Neretva riverbed salination (2004). *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers* 64 (2): 101–113. doi:10.14256/JCE.639.2011

Lovrinović I., Bergamasco A., Srzić V., Cavallina C., Holjević D., Donnici S., Erceg J., Zaggia L., Tosi L. (2021). Groundwater Monitoring Systems to Understand Sea Water Intrusion Dynamics in the Mediterranean: The Neretva Valley and the Southern Venice Coastal Aquifers Case Studies. doi:10.3390/w13040561

Lovrinović I., Srzić V., Aljinović I. (2023). Characterization of seawater intrusion dynamics under the influence of hydro-meteorological conditions, tidal oscillations and melioration system operative regimes to groundwater in Neretva valley coastal aquifer system. *J Hydrol Reg Stud* 46: 101363. doi:10.1016/j.ejrh.2023.101363

Lovrinović I., Srzić V., Matic I., Brkić M. (2022). Combined Multilevel Monitoring and Wavelet Transform Analysis Approach for the Inspection of Ground and Surface Water Dynamics in Shallow Coastal Aquifer. *Water (Basel)* 14 (4): 656. doi:10.3390/w14040656

Lu H., Ma X. (2020). Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction. *Chemosphere* 249: 126169. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.126169

Lumivero. (2023). XLSTAT statistical and data analysis solution

Mabrouk M., Jonoski A., Oude Essink G., Uhlenbrook S. (2018). Impacts of Sea Level Rise and Groundwater Extraction Scenarios on Fresh Groundwater Resources in the Nile Delta Governorates, Egypt. *Water (Basel)* 10 (11): 1690. doi:10.3390/w10111690

MacDonald D.G., Geyer W.R. (2004). Turbulent energy production and entrainment at a highly stratified estuarine front. *J Geophys Res Oceans* 109 (C5). doi:10.1029/2003JC002094

Machiwal D., Jha M.K., Zhang Z. (2012). *Hydrologic time series analysis : theory and practice*. Springer, 303 pp.

- Magdić I. (2021). Modeliranje toka i retencije vode na obronačnom pseudogleju u uvjetima uzgoja vinove loze. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb
- Mäkelä A., Meybeck M. (1996). Designing a Monitoring Programme. Water Quality Monitoring (Bartram J., Ballance R., eds), WHO, London
- Malcolm I.A., Soulsby C., Youngson A.F. (2006). High-frequency logging technologies reveal state-dependent hyporheic process dynamics: implications for hydroecological studies. *Hydrol Process* 20 (3): 615–622. doi:10.1002/hyp.6107
- Marcos M., Tsimplis M.N. (2008). Coastal sea level trends in Southern Europe. *Geophys J Int* 175 (1): 70–82. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03892.x
- Margeta J., Fistanić I. (2000). Gospodarenje sustavom i monitoring bazena rijeke Neretve. *Građevinar* 52 (6): 331–338
- Marsland S. (2015). MACHINE LEARNING: An Algorithmic Perspective, Second Edition. Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL
- Mastrocicco M., Colombani N. (2021). The Issue of Groundwater Salinization in Coastal Areas of the Mediterranean Region: A Review. *Water (Basel)* 13 (1): 90. doi:10.3390/w13010090
- Mbuh M.J., Mbih R., Wendi C. (2019). Water quality modeling and sensitivity analysis using Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) in the Shenandoah River watershed. *Phys Geogr* 40 (2): 127–148. doi:10.1080/02723646.2018.1507339
- McGrane S.J., Hutchins M.G., Miller J.D., Bussi G., Kjeldsen T.R., Loewenthal M. (2017). During a winter of storms in a small UK catchment, hydrology and water quality responses follow a clear rural-urban gradient. *J Hydrol (Amst)* 545: 463–477. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.12.037
- Meter Group. (2022). TEROS 11/12 User manual
- Meybeck M., Kuusisto E., Mäkelä A., Mälkki E. (2004). WATER QUALITY. Water Quality Monitoring (Bartram J., Ballance R., eds), Taylor & Francis, New York
- Miao Z., Brusseau M.L., Carroll K.C., Carreón-Diazconti C., Johnson B. (2012). Sulfate reduction in groundwater: characterization and applications for remediation. *Environ Geochem Health* 34 (4): 539–550. doi:10.1007/s10653-011-9423-1

Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. (2018). Sedmo nacionalno izvješće i treće dvogodišnje izvješće Republike Hrvatske prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih naroda o promjeni klime (UNFCCC). Zagreb

Mohammed R., Scholz M. (2018). Critical review of salinity intrusion in rivers and estuaries. *Journal of Water and Climate Change* 9 (1): 1–16. doi:10.2166/wcc.2017.334

Mohan U., Krishnakumar A. (2021). Geospatial distribution of groundwater quality using entropy water quality index and statistical assessment: A study from a tropical climate river basin. *Environmental Quality Management*. doi:10.1002/tqem.21840

Montgomery D.C., Jennings C.L., Kulahci M. (2015). *Introduction to TIME SERIES ANALYSIS AND FORECASTING*. Second edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Muoi L. Van, Srilert C., Dang Tri V.P., Pham Van T. (2022). Spatial and temporal variabilities of surface water and sediment pollution at the main tidal-influenced river in Ca Mau Peninsular, Vietnamese Mekong Delta. *J Hydrol Reg Stud* 41: 101082. doi:10.1016/j.ejrh.2022.101082

Mustać I. (2015). Primjena modelacijskih pristupa u agroekosustavima. *Voda u Agroekosustavima* (Ondrašek G., ed), Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Myers D.N. (2019). Innovations in Monitoring With Water-Quality Sensors With Case Studies on Floods, Hurricanes, and Harmful Algal Blooms, pp. 219–283. doi:10.1016/B978-0-12-815730-5.00010-7

Nair J.P., Vijaya M.S. (2021). Predictive Models for River Water Quality using Machine Learning and Big Data Techniques - A Survey. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, IEEE, pp. 1747–1753. doi:10.1109/ICAIS50930.2021.9395832

Narodne novine - NN. (2019a). Uredba o standardu kakvoće voda. 96

Narodne novine - NN. (2019b). Zakon o vodama. 66

Natekin A., Knoll A. (2013). Gradient boosting machines, a tutorial. *Front Neurobot* 7. doi:10.3389/fnbot.2013.00021

Nguyen T.G., Tran N.A., Vu P.L., Nguyen Q.-H., Nguyen H.D., Bui Q.-T. (2021). Salinity intrusion prediction using remote sensing and machine learning in data-limited regions: A case study in Vietnam's Mekong Delta. *Geoderma Regional* 27: e00424. doi:10.1016/j.geodrs.2021.e00424

- Nicolas F., Tamai T., Ben-Gal A., Ochoa-Brito J. Daccache A., Ogunmokun F. Kisekka I. (2023). Assessing salinity impacts on crop yield and economic returns in the Central Valley. *Agricultural Water Management*. 287. 108463. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108463
- Nord G., Michielin Y., Biron R., Esteves M., Freche G., Geay T., Hauet A., Legoût C., Mercier B. (2020). An autonomous low-power instrument platform for monitoring water and solid discharges in mesoscale rivers. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 9 (1): 41–67. doi:10.5194/gi-9-41-2020
- Obeidat M.M., Awawdeh M., Al-Rub F.A., Al-Ajlouni A. (2012). An Innovative Nitrate Pollution Index and Multivariate Statistical Investigations of Groundwater Chemical Quality of Umm Rijam Aquifer (B4), North Yarmouk River Basin, Jordan. *Water Quality Monitoring and Assessment*. InTech. doi:10.5772/32436
- Obin N., Tao H., Ge F., Liu X. (2021). Research on Water Quality Simulation and Water Environmental Capacity in Lushui River Based on WASP Model. *Water (Basel)* 13 (20): 2819. doi:10.3390/w13202819
- O'Grady J., Zhang D., O'Connor N., Regan F. (2021). A comprehensive review of catchment water quality monitoring using a tiered framework of integrated sensing technologies. *Science of The Total Environment* 765: 142766. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2020.142766
- Ondrašek G., Bakić Begić H., Zovko M., Filipović L., Meriño-Gergichevich C., Savić R., Rengel Z. (2019). Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications. *Science of The Total Environment* 658: 1559–1573. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.243
- Ondrašek G., Rengel Z. (2021). Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions. *Science of The Total Environment* 754: 142432. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142432
- Oude Essink G. (2003). Mathematical models and their application to salt water intrusion problems. *TIAC'03: Coastal Aquifers Intrusion Technology*, Alicante, Spain
- Park J., Kim K.T., Lee W.H. (2020). Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality. *Water (Basel)* 12 (2): 510. doi:10.3390/w12020510

Pasika S., Gandla S.T. (2020). Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. *Heliyon* 6 (7): e04096. doi:10.1016/J.HELIYON.2020.E04096

Patle G.T., Singh D.K., Sarangi A., Rai A., Khanna M., Sahoo R.N. (2015). Time series analysis of groundwater levels and projection of future trend. *Journal of the Geological Society of India* 85 (2): 232–242. doi:10.1007/s12594-015-0209-4

Perillo G.M.E., Piccolo M.C. (2011). Global Variability in Estuaries and Coastal Settings. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Elsevier, pp. 7–36. doi:10.1016/B978-0-12-374711-2.00102-9

Perriquet M., Tiernan H., Cave R., Leonardi V., Jourde H. (2012). Hydrodynamics of a coastal karst aquifer affected by saltwater intrusion under oceanic climatic influence, Co.Clare, Ireland. *Proceedings of the 22th Salt Water Intrusion Meeting, META MARKETING E EVENTOS*, Rio de Janeiro, Brasil

Perry E., Velazquez-Oliman G., Marin L. (2002). The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Int Geol Rev* 44 (3): 191–221. doi:10.2747/0020-6814.44.3.191

Piniewski M., Marcinkowski P., Koskiaho J., Tattari S. (2019). The effect of sampling frequency and strategy on water quality modelling driven by high-frequency monitoring data in a boreal catchment. *J Hydrol (Amst)* 579: 124186. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124186

Pinova. (2022). Pinova Meteo - Agriculture weather station user manual

Piper A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union* 25 (6): 914. doi:10.1029/TR025i006p00914

Postolache O., Silva P., Dias Pereir J.M. (2012). Water Quality Monitoring and Associated Distributed Measurement Systems: An Overview. *Water Quality Monitoring and Assessment*, InTech. doi:10.5772/32159

Prandle D. (2009). *Estuaries: Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. Cambridge University Press, Cambridge

Preziosi E., Frollini E., Zoppini A., Ghergo S., Melita M., Parrone D., Rossi D., Amalfitano S. (2019). Disentangling natural and anthropogenic impacts on groundwater by hydrogeochemical, isotopic and microbiological data: Hints from a municipal solid waste landfill. *Waste Management* 84: 245–255. doi:10.1016/j.wasman.2018.12.005

Pritchard D.W. (1955). Estuarine circulation patterns. *Proceedings Amer Soc Civil Eng (ASCE)* (71): 1–11

Qiu C., Wan Y. (2013). Time series modeling and prediction of salinity in the Caloosahatchee River Estuary. *Water Resour Res* 49 (9): 5804–5816. doi:10.1002/wrcr.20415

R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*

Rahman M.M., Penny G., Mondal M.S., Zaman M.H., Kryston A., Salehin M., Nahar Q., Islam M.S., Bolster D., Tank J.L., Müller M.F. (2019). Salinization in large river deltas: Drivers, impacts and socio-hydrological feedbacks. *Water Secur* 6: 100024. doi:10.1016/j.wasec.2019.100024

Ramos, T.B., Darouich, H., Oliveira, A.R., Farzamian, M., Monteiro, T., Castanheira, N., Paz, A., Alexandre, C., Gonçalves, M.C., Pereira, L.S. (2023). Water use, soil water balance and soil salinization risks of Mediterranean tree orchards in southern Portugal under current climate variability: Issues for salinity control and irrigation management. *Agricultural Water Management* 283 (108319). doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108319

Randhawa S., Sandha S.S., Srivastava B. (2016). A Multi-sensor Process for In-Situ Monitoring of Water Pollution in Rivers or Lakes for High-Resolution Quantitative and Qualitative Water Quality Data. 2016 19th IEEE Intl Conference on Computational Science and Engineering (CSE), IEEE 14th Intl Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), and 15th Intl Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering (DCABES) 122–129. doi:10.1109/CSE-EUC-DCABES.2016.171

Reljić M., Romić M., Romić D., Gilja G., Mornar V., Ondrašek G., Bubalo Kovačić M., Zovko M. (2023). Advanced Continuous Monitoring System—Tools for Water Resource Management and Decision Support System in Salt Affected Delta. *Agriculture* 13 (2): 369. doi:10.3390/agriculture13020369

Rengasamy P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *J Exp Bot* 57 (5): 1017–1023. doi:10.1093/jxb/erj108

Rengasamy P. (2002). Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soils: an overview. *Aust J Exp Agric* 42 (3): 351. doi:10.1071/EA01111

Rezo M., Pavasović M. (2014). Analiza mareografskih podataka o Jadranskom moru od 1953. do 2006. godine. *Geodetski list* 4: 269–290

Rhoades J.D., Kandiah A., Mashali A.M. (1992). The use of saline waters for crop production, FAO irrigation and drainage paper 48, Rome

Riaz M., Arif M.S., Ashraf M.A., Mahmood R., Yasmeen T., Shakoor M.B., Shahzad S.M., Ali M., Saleem I., Arif M., Fahad S. (2019). A Comprehensive Review on Rice Responses and Tolerance to Salt Stress. *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* 133–158. doi:10.1016/B978-0-12-814332-2.00007-1

Ritchie J.C., Schiebe F.R. (2000). Water Quality. Remote Sensing in Hydrology and Water Management, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 287–303. doi:10.1007/978-3-642-59583-7_13

Rode M., Wade A.J., Cohen M.J., Hensley R.T., Bowes M.J., Kirchner J.W., Arhonditsis G.B., Jordan P., Kronvang B., Halliday S.J., Skeffington R.A., Rozemeijer J.C., Aubert A.H., Rinke K., Jomaa S. (2016). Sensors in the Stream: The High-Frequency Wave of the Present. *Environ Sci Technol* 50 (19): 10297–10307. doi:10.1021/acs.est.6b02155

Romić D. (1994). Navodnjavanje zaslanjenim vodama u agroekološkim uvjetima Vranskog bazena. Doktorska disertacija. Agronomski fakultet, Zagreb

Romić D., Bubalo Kovačić M., Mornar V., Salajpal K., Romić M., Zovko M., Bakić Begić H., Ondrašek G., Husnjak S., Tonković F., Reljić M. (2022a): Preispitivanje područja podložna eutrofikaciji i područja ranjiva na nitrate (SAGRA 3). Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb, (170 str.)

Romić D., Castrignanò A., Romić M., Buttafuoco G., Bubalo Kovačić M., Ondrašek G., Zovko M. (2020a). Modelling spatial and temporal variability of water quality from different monitoring stations using mixed effects model theory. *Science of The Total Environment* 704: 135875. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135875

Romić D., Ondrašek G., Romić M., Borošić J., Vranješ M., Petošić D. (2008). Salinity and irrigation method affect crop yield and soil quality in watermelon (*Citrullus lanatus* L.) growing. *Irrigation and Drainage* 57 (4): 463–469. doi:10.1002/ird.358

Romić D., Ondrašek G., Zovko M., Bubalo Kovačić M., Romić M., Filipović L., Maurović N., Igrc M.D., Kranjčec F., Vranješ M., Srzić V. (2020b). Monitoring zaslanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve - izvješće za 2019. godinu

Romić D., Reljić M., Romić M., Bagić Babac M., Brkić Ž., Ondrašek G., Bubalo Kovačić M., Zovko M. (2023a). Temporal Variations in Chemical Properties of Waterbodies within Coastal Polders: Forecast Modeling for Optimizing Water Management Decisions. *Agriculture* 13 (6): 1162. doi:10.3390/agriculture13061162

Romić D., Romić M., Zovko M., Bakić H., Ondrašek G. (2012). Trace metals in the coastal soils developed from estuarine floodplain sediments in the Croatian Mediterranean region. *Environ Geochem Health* 34 (4): 399–416. doi:10.1007/s10653-012-9449-z

Romić D., Romić M., Zovko M., Bubalo M., Ondrašek G., Husnjak S., Stričević I., Maurović N., Bakić H., Matijević L., Vranješ M. (2014). Petogodišnje izvješće (2009-2013) monitoringa zaslanjivanja tla i vode u dolini Neretve. Zagreb

Romić D., Tomić F., Marušić J., Klačić Ž., Vranješ M. (1999). Quality of Surface Water in The Neretva Valley and Its Possible Use in Irrigation. 2nd CROATIAN CONFERENCE ON WATERS - CROATIAN WATERS FROM THE ADRIATIC TO THE DANUBE (Gereš D., ed), Hrvatske vode, Zagreb, pp. 813–819

Romić D., Vranješ M., Ondrašek G. (2003). Intrusion of Seawater and its Effect on Quality of Surface Water in the Neretva River Valley. 3rd CROATIAN CONFERENCE ON WATERS - CROATIAN WATERS IN 21ST CENTURY (Gereš D., ed), Hrvatske vode, Zagreb, pp. 443–450

Romić D., Vranješ M., Petošić D., Romić M., Ondrašek G., Dolanjski D., Salopek Z., Husnjak S., Vidaček Ž., Sraka M., Juračak J., Borošić J., Mladineo N., Bojanić D., Zovko M. (2006). Plan navodnjavanja za područje Dubrovačko-neretvanske županije. Split

Romić D., Zovko M., Bubalo Kovačić M., Ondrašek G., Bakić Begić H., Romić M. (2019a). PROCESI, DINAMIKA I TREND ZASLANJIVANJA VODA I TLA U POLJOPRIVREDNOM PODRUČJU DOLINE RIJEKE NERETVE. 7. HRVATSKA KONFERENCIJA O VODAMA. HRVATSKE VODE U ZAŠTITI OKOLIŠA I PRIRODE., Opatija, Croatia

Romić D., Zovko M., Bubalo Kovačić M., Romić M., Ondrašek G., Filipović L., Kranjčec F., Reljić M., Maurović N., Igrc M.D. (2021). Monitoring zaslanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve: izvješće za 2020. godinu

Romić D., Zovko M., Romić M., Bubalo Kovačić M., Ondrašek G., Srzić V., Vranješ M. (2019b). Petogodišnje izvješće projekta Monitoring zaslanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve za razdoblje 2014.-2018. Zagreb

Romić D., Zovko M., Romić M., Bubalo Kovačić M., Reljić M., Ondrašek G., Kranjceč F., Maurović N., Igrc M.D., Atlija B., Brnadić Cestar Ž. (2022b). Monitoring zaslanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve: izvješće za 2021. godinu. Zagreb, Croatia

Romić D., Zovko M., Romić M., Ondrašek G., Bubalo Kovačić M., Reljić M., Bakić Begić H., Maurović N., Atlija B., Kranjčec F., Brnadić Cestar Ž. (2023b). Monitoring zaslanjenja voda i poljoprivrednih tala na području doline Neretve - izvješće za 2022. godinu

Rosa J.P.S., Guerra D.J.D., Horta N.C.G., Martins R.M.F., Lourenço N.C.C. (2020). Overview of Artificial Neural Networks, pp. 21–44. doi:10.1007/978-3-030-35743-6_3

Rusydi, A.F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 118. doi :10.1088/1755-1315/118/1/012019

Salama R.B., Otto C.J., Fitzpatrick R.W. (1999). Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. Hydrogeol J 7 (1): 46–64. doi:10.1007/s100400050179

Salman A.K., Aldulaimy S.E., Mohammed H.J., Abed Y.M. (2021). Performance of soil moisture sensors in gypsiferous and salt-affected soils. Biosyst Eng 209: 200–209. doi:10.1016/j.biosystemseng.2021.07.006

Savenije H.H.G. (2005). Introduction. Salinity and Tides in Alluvial Estuaries, Elsevier, pp. 1–22. doi:10.1016/B978-044452107-1/50002-2

Schölkopf B., Smola A.J. (2018). Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond. MIT Press, London

Schultz B., Wandee P. (2003). SOME PRACTICAL ASPECTS OF THE NEW POLICY ON WATER MANAGEMENT IN THE NETHERLANDS POLDERS. 9th International Drainage Workshop, Utrecht

Schultz E. (1982). From natural to reclaimed land. Land and water management in the polders of The Netherlands. International Symposium Polders of the World, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen

Segeren W.A. (1983). Introduction to the keynotes of the international symposium 'Polders of the World'. Final report of the international symposium 'Polders of the World'

Selim T., Bouksila F., Berndtsson R., Persson M. (2013). Soil Water and Salinity Distribution under Different Treatments of Drip Irrigation. *Soil Science Society of America Journal*. 77(4). p. 1144-1156. doi.org/10.2136/sssaj2012.0304

Šegota T., Filipčić A. (2003). KÖPPENOVA PODJELA KLIMA I HRVATSKO NAZIVLJE. *Geoadria* 8 (1): 17–37

Shahid S.A., Zaman M., Heng L. (2018). Introduction to Soil Salinity, Sodicity and Diagnostics Techniques. *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*, Springer International Publishing, Cham, pp. 1–42. doi:10.1007/978-3-319-96190-3_1

Skeffington R.A., Halliday S.J., Wade A.J., Bowes M.J., Loewenthal M. (2015). Using high-frequency water quality data to assess sampling strategies for the EU Water Framework Directive. *Hydrol Earth Syst Sci* 19 (5): 2491–2504. doi:10.5194/hess-19-2491-2015

Slišković I. (2014). *Vode u kršu slivova Neretve i Cetine*. Hrvatski geološki institut, Zagreb

Snazelle T. (2015). *Evaluation of Xylem EXO water-quality sondes and sensors*. Reston, VA

Snedden G.A., Cable J.E., Kjerfve B. (2012). *Estuarine Geomorphology and Coastal Hydrology*. *Estuarine Ecology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 19–38. doi:10.1002/9781118412787.ch2

Šošić I. (2004). *Primijenjena statistika*. Školska knjiga, Zagreb

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 (Basel)* 12 (2): 348. doi:10.3390/w12020348

Strobl R.O., Robillard P.D. (2008). Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *J Environ Manage* 87 (4): 639–648. doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.001

Struve D., Zhou M. (2010). Field Measurements. *Water Quality Concepts, Sampling, and Analyses* (Li Y., Migliaccio K., eds), CRC Press, pp. 113–135

Suarez D.L. (1989). Impact of Agricultural Practices on Groundwater Salinity. *Agric Ecosyst Environ* 26: 215–227

Sun H., Koch M. (2001). Case Study: Analysis and Forecasting of Salinity in Apalachicola Bay, Florida, Using Box-Jenkins ARIMA Models. *Journal of Hydraulic Engineering* 127 (9): 718–727. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:9(718)

Švonja M., Barbarić Ž. (1999). Conflict between Reclamation Works and Utilization of the Lower Neretva Region. 2. Hrvatska Konferencija o Vodama - Hrvatske Vode Od Jadrana Do Dunava (Gereš D., ed), Hrvatske vode, Zagreb, Dubrovnik 19.-22.5.1999., pp. 565–573

Syvitski J.P.M. (2008). Deltas at risk. *Sustain Sci* 3 (1): 23–32. doi:10.1007/s11625-008-0043-3

Syvitski J.P.M., Saito Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Glob Planet Change* 57 (3–4): 261–282. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.12.001

Taheri Tizro A., Ghashghaie M., Georgiou P., Voudouris K. (2014). Time series analysis of water quality parameters. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* 1: 43–52

Tanji K.K. (2002). Salinity in the soil environment. *Salinity: Environment—Plants—Molecules* (Lauchli A., Lutge U., eds), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 21–51

Taylor M., Elliott H.A., Navitsky L.O. (2018). Relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in Marcellus hydraulic fracturing fluids. *Water Science and Technology* 77 (8): 1998–2004. doi:10.2166/wst.2018.092

Teatini P., Tosi L., Strozzi T. (2011). Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *J Geophys Res* 116 (B8): B08407. doi:10.1029/2010JB008122

Telahigue F., Mejri H., Mansouri B., Souid F., Agoubi B., Chahlaoui A., Kharroubi A. (2020). Assessing seawater intrusion in arid and semi-arid Mediterranean coastal aquifers using geochemical approaches. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 115: 102811. doi:10.1016/j.pce.2019.102811

Terzić J., Peh Z., Marković T. (2010). Hydrochemical properties of transition zone between fresh groundwater and seawater in karst environment of the Adriatic islands, Croatia. *Environ Earth Sci* 59 (8): 1629–1642. doi:10.1007/s12665-009-0146-x

Thin P.P., Hendrayana H., Wilopo W., Kawasaki S. (2018). Assessment of groundwater facies in Wates Coastal Area, Kulon Progo, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 5 (4): 1389–1401. doi:10.15243/jdmlm.2018.054.1389

Thomas O., Burgess C. (2022). Chapter 1 - What do we need for water and soil quality monitoring?. U UV-Visible Spectrophotometry of Waters and Soils (Third Edition). Elsevier. 1-24. doi.org/10.1016/B978-0-323-90994-5.00012-5

Thompson P.A. (1998). Spatial and Temporal Patterns of Factors Influencing Phytoplankton in a Salt Wedge Estuary, the Swan River, Western Australia. *Estuaries* 21 (4): 801. doi:10.2307/1353282

Thu Minh H.V., Tri V.P.D., Ut V.N., Avtar R., Kumar P., Dang T.T.T., Hoa A. Van, Ty T. Van, Downes N.K. (2022). A Model-Based Approach for Improving Surface Water Quality Management in Aquaculture Using MIKE 11: A Case of the Long Xuyen Quadangle, Mekong Delta, Vietnam. *Water (Basel)* 14 (3): 412. doi:10.3390/w14030412

Tiyasha, Tung T.M., Yaseen Z.M. (2020). A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020. *J Hydrol (Amst)* 585: 124670. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124670

Tosi L., Da Lio C., Bergamasco A., Cosma M., Cavallina C., Fasson A., Viezzoli A., Zaggia L., Donnici S. (2021). Sensitivity, Hazard, and Vulnerability of Farmlands to Saltwater Intrusion in Low-Lying Coastal Areas of Venice, Italy. *Water (Basel)* 14 (1): 64. doi:10.3390/w14010064

Tsimplis M.N., Raicich F., Fenoglio-Marc L., Shaw A.G.P., Marcos M., Somot S., Bergamasco A. (2012). Recent developments in understanding sea level rise at the Adriatic coasts. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 40–41: 59–71. doi:10.1016/j.pce.2009.11.007

Tyralis H., Papacharalampous G., Langousis A. (2021). Super ensemble learning for daily streamflow forecasting: large-scale demonstration and comparison with multiple machine learning algorithms. *Neural Comput Appl* 33 (8): 3053–3068. doi:10.1007/s00521-020-05172-3

Ullrich A., Volk M. (2009). Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agric Water Manag* 96 (8): 1207–1217. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.010

Valle-Levison A. (2011). Classification of Estuarine Circulation. *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (Wolanski E., McLusky D., eds), Academic Press, pp. 75–86

van Dam J.C. (1999). Exploitation, Restoration and Management, pp. 73–125. doi:10.1007/978-94-017-2969-7_4

van Weert F., van der Gun J., Reckman J. (2009). *Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis*. Utrecht

Vander Woude A., Ruberg S., Johengen T., Miller R., Stuart D. (2019). Spatial and temporal scales of variability of cyanobacteria harmful algal blooms from NOAA GLERL airborne hyperspectral imagery. *J Great Lakes Res* 45 (3): 536–546. doi:10.1016/j.jglr.2019.02.006

van der Griff B., Broers H.P., Berendrecht W., Rozemeijer J., Osté L., Griffioen J. (2016). High-frequency monitoring reveals nutrient sources and transport processes in an agriculture-dominated lowland water system. *Hydrol Earth Syst Sci* 20 (5): 1851–1868. doi:10.5194/hess-20-1851-2016

Vapnik V., Golowich S., Smola A. (1996). Support vector machine for function approximation regression estimation and signal processing. *Adv Neural Inform Process Syst Res* 9: 281–287

Vijeće Europske unije (2000). DIREKTIVA 2000/60/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 23. listopada 2000. o uspostavi okvira za djelovanje Zajednice u području vodne politike. Službeni list Europske unije

Vineis P., Chan Q., Khan A. (2011). Climate change impacts on water salinity and health. *J Epidemiol Glob Health* 1 (1): 5–10. doi:10.1016/j.jegh.2011.09.001

Vinković A. (2017). Taložni okoliši i foraminiferske zajednice u sedimentima delte rijeke Mirne. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Vranješ D., Lončar G., Šarić I., Tomašević I., Meštrović M., Dujmović K., Španić R. (2019). Elaborat zaštite okoliša u postupku ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš zahvat: Izmjena sustava navodnjavanja Donja Neretva, podsustav Opuzen – povećanje brodske provodnice na mobilnoj pregradi na rijeci Neretvi. Zagreb

Vranješ M., Ljubenković I., Gotovac H., Andričević R. (2007a). Salt intrusion into the lower Neretva area - monitoring and modelling. 4. Hrvatska Konferencija o Vodama - Hrvatske Vode i Europska Unija - Izazovi i Mogućnosti (Gereš D., ed), Hrvatske vode, Zagreb, Opatija, 17.-19.5.2007., pp. 657–664

Vranješ M., Prskalo M., Džeba T. (2013). HIDROLOGIJA I HIDROGEOLOGIJA SLIVA NERETVE I TREBIŠNICE, OSVRT NA IZGRADNJU DIJELA HE SUSTAVA - GORNJI HORIZONTI. e-ZBORNIK Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Mostaru 5: 1–23

- 270 Vranješ M., Vidoš D. (1995). Sizing Reclamation Systems in the Lower Neretva Region. 1. Hrvatska Konferencija o Vodama - Održivi Razvoj i Upravljanje Vodama (Gereš D., ed), JVP Hrvatska vodoprivreda, Zagreb, Dubrovnik, 24.-27.5.1995., pp. 463–471
- Vranješ M., Vidoš D., Glavaš B. (2007b). Status of sediments in the lower Neretva River. 4. Hrvatska Konferencija o Vodama - Hrvatske Vode i Europska Unija - Izazovi i Mogućnosti (Gereš D., ed), Hrvatske vode, Zagreb, Opatija, 17.-19.5.2007., pp. 337–344
- Wade A.J., Palmer-Felgate E.J., Halliday S.J., Skeffington R.A., Loewenthal M., Jarvie H.P., Bowes M.J., Greenway G.M., Haswell S.J., Bell I.M., Joly E., Fallatah A., Neal C., Williams R.J., Gozzard E., Newman J.R. (2012). Hydrochemical processes in lowland rivers: insights from in situ, high-resolution monitoring. *Hydrol Earth Syst Sci* 16 (11): 4323–4342. doi:10.5194/hess-16-4323-2012
- Wagner R.J., Boulger Jr R.W., Oblinger C.J., Smith B.A. (2006). Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors: Station operation, record computation, and data reporting. Reston, VA. doi:https://doi.org/10.3133/tm1D3
- Walton N.R.G. (1989). Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids-What is Their Precise Relationship? . *Desalination* 72: 275–292
- Wang H., Zheng C., Ning S., Cao C., Li K., Dang H., Wu Y., Zhang J. (2023). Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation. *Agricultural Water Management* 286 (108383). doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108383
- Wang X., Zhou Y., Zhao Z., Wang L., Xu J., Yu J. (2019). A novel water quality mechanism modeling and eutrophication risk assessment method of lakes and reservoirs. *Nonlinear Dyn* 96 (2): 1037–1053. doi:10.1007/s11071-019-04837-6
- Wen X., Lu J., Wu J., Lin Y., Luo Y. (2019). Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risks of heavy metals. *Science of The Total Environment* 652: 267–277. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.250
- Wesseling J. (1980). Saline seepage in The Netherlands: occurrence and magnitude. Research on possible changes in the distribution of saline seepage in The Netherlands. Committee for Hydrological Research (CHO-TNO), Proc and Informations 17–33
- Witten I.H., Frank E. (2000). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementation*. Morgan Kaufman Publisher, San Francisco

Wool T., Ambrose R.B., Martin J.L., Comer A. (2020). WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA's Water Quality Model. *Water (Basel)* 12 (5): 1398. doi:10.3390/w12051398

Wright L.D. (1978). *River Deltas. Coastal Sedimentary Environments*, Springer US, New York, NY, pp. 5–68. doi:10.1007/978-1-4684-0056-4_2

Yang G., Moyer D.L. (2020). Estimation of nonlinear water-quality trends in high-frequency monitoring data. *Science of The Total Environment* 715: 136686. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136686

Yoo C.K., Villez K., Van Hulle S.W.H., Vanrolleghem P.A. (2008). Enhanced process monitoring for wastewater treatment systems. *Environmetrics* 19 (6): 602–617. doi:10.1002/env.900

Zainurin S.N., Wan Ismail W.Z., Mahamud S.N.I., Ismail I., Jamaludin J., Ariffin K.N.Z., Wan Ahmad Kamil W.M. (2022). Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 19 (21): 14080. doi:10.3390/ijerph192114080

Zaman M., Shahid S.A., Heng L. (2018). *Irrigation Water Quality. In: Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_5

Zekić-Sušac M., Frajman-Jakšić A., Drvenkar N. (2009). Neuronske mreže i stabla odlučivanja za predviđanje uspjehnosti studiranja. *Ekonomski vjesnik XXII* (2): 314–327

Zeman C., Rich M., Rose J. (2006). World water resources: Trends, challenges, and solutions. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 5:333–346. DOI 10.1007/s11157-005-4089-8

Zhou D., Lin Z., Liu L., Zimmermann D. (2013). Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework. *Journal of Environmental Management* 128. 642-654. doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.025

Zörb C., Geilfus C.M., Dietz K.J. (2019). Salinity and crop yield. *Plant Biol J*, 21: 31-38. doi.: 10.1111/plb.12884

Zounemat-Kermani M., Batelaan O., Fadaee M., Hinkelmann R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *J Hydrol (Amst)* 598: 126266. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126266

Zovko M. (2015). Procjena rizika zaslanjivanja i mobilnosti metala u poljoprivrednim tlima i priobalnih riječnih dolina. Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb

Zovko M., Romić D., Colombo C., Di Iorio E., Romić M., Buttafuoco G., Castrignanò A. (2018). A geostatistical Vis-NIR spectroscopy index to assess the incipient soil salinization in the Neretva River valley, Croatia. *Geoderma* 332: 60–72. doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.005

Zovko M., Romić D., Romić M., Ondrašek G. (2013). Soil and Water Management for Sustained Agriculture in Alluvial Plains and Flood Plains Exposed to Salinity: A Case of Neretva River Valley. *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress*, Springer New York, New York, NY, pp. 473–494. doi:10.1007/978-1-4614-4747-4_18

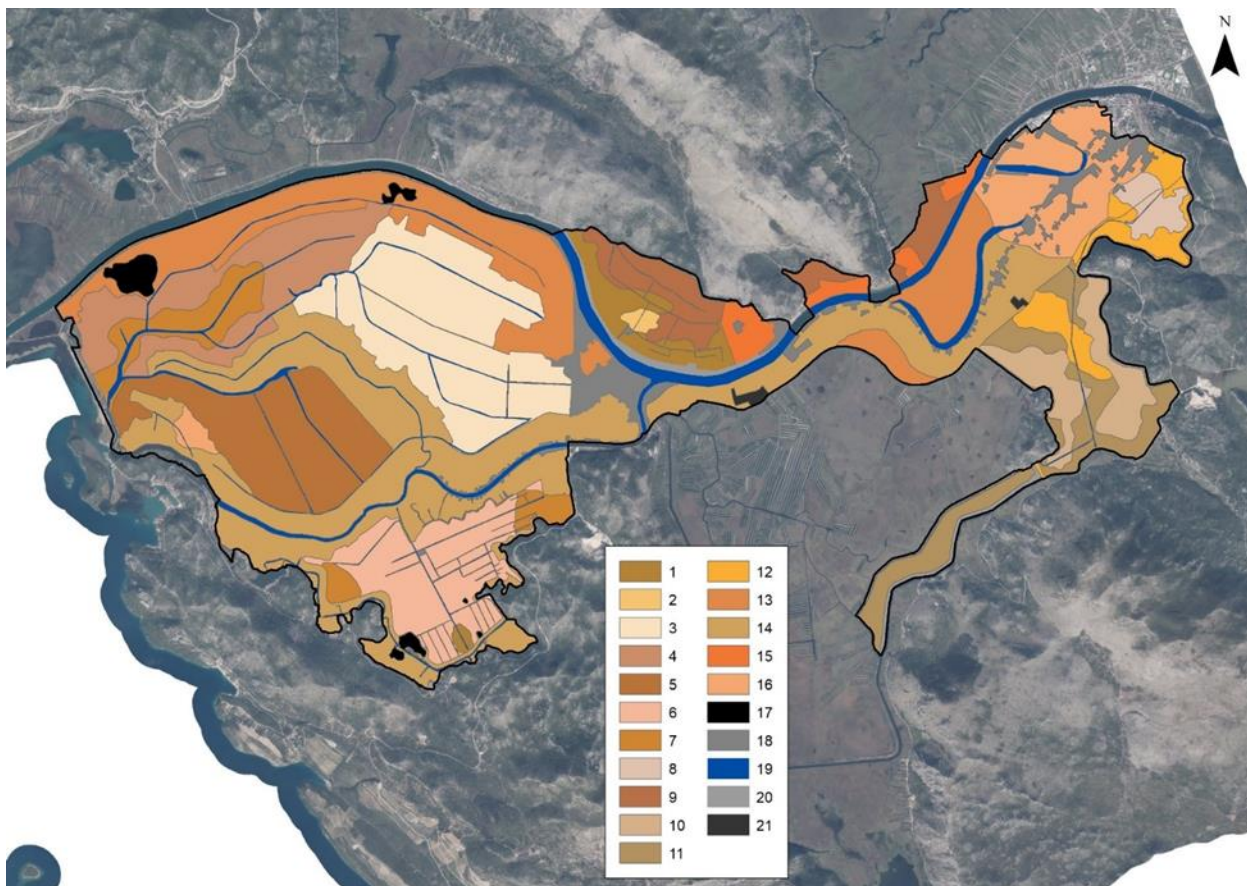
ŽIVOTOPIS AUTORA

Marko Reljić, mag.ing.agr. rođen je 12.12.1991. godine u Slavonskom Brodu gdje je završio osnovnu školu i prirodoslovno-matematičku gimnaziju. Preddiplomski studij na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu smjer Ekološka poljoprivreda završio je 2014. godine i stekao akademski naziv sveučilišnog prvostupnika univ.bacc.ing.agr. Diplomirao je 2016. godine na diplomskom studiju Agroekologije i stekao akademski naziv mag.ing.agr. Na zavodu za Melioracije Agronomskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu zaposlen je od veljače 2020. u statusu asistenta. Suradnik je na nekoliko modula na preddiplomskom (Poljoprivredne melioracije; Izvođenje melioracijskih sustava; Navodnjavanje), diplomskom studiju (Uređivanje voda; Korištenje i zaštita voda) i diplomskom studiju na engleskom (*Regulation of Water; Hydrology and water resources*). Sudjelovao je na nekoliko znanstvenih i stručnih usavršavanja: "Geoinformation Educational Resources for Climate Change Management – Winter School", Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences (HSWT), Njemačka (2023); "Modeling water flow and contaminant transport in soils and groundwater using the HYDRUS software packages", Online Short Course , Prag, Češka (2021); "Geostatistics for Soil and Geoenvironmental Sciences", Zagreb, Hrvatska (2020). Kao suradnik aktivno je sudjelovao na većem broju nacionalnih i međunarodnih projekata. Aktivno sudjeluje u stručnim i znanstvenim aktivnostima Zavoda za melioracije: (ko)autor je četiri znanstvena rada indeksirana u a1 bazi podataka i šest a3 znanstvena rada. Rezultate svog rada prezentirao je na osam međunarodnih znanstvenih skupova.

Lista radova iz CROSBİ bibliografije:

<https://web-proba.croris.srce.hr/crosbi/searchByContext/2/37367>

8. PRILOZI



Slika 8.1. Pedološka karta doline rijeke Neretve. Mjerilo 1:25000. Legenda u Prilogu, Tablica 8.1. Izvor: projekt DELTASAL

Tablica 8.1. Legenda pedološke karte prikazane na Slici 8.1.

Kartirana jedinica tla			%	Površina, ha
Broj	Naziv			
I. HIDROMORFNA HIDROMELIORIRANA TLA KANALIMA				
1	Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, većim dijelom zaslanjeni	70	124	
	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, ilovasti, većim dijelom zaslanjeni	30		
2	Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, glinasti, mjestimično zaslanjeni	60	13,3	
	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, glinasti, mjestimično zaslanjeni	40		
3	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni	60	645	
	Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni	25		

	Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	15	
4	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni	70 30	348
5	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeni Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	80 15 5	417
6	Humofluvisol srednje duboko glejni, karbonatni, ilovasti, većim dijelom zaslanjeni Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, većim dijelom zaslanjeno Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, većim dijelom zaslanjeni	80 15 5	323
7	Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	85 15	181
8	Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto, mjestimično zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, mjestimično zaslanjeno	50 50	58,3
9	Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, humozno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, većim dijelom zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, humozno karbonatno, glinasto ilovasto, većim dijelom zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, većim dijelom zaslanjeno	60 30 10	200
10	Močvarno glejno hipoglejno, vrlo plitko glejno, humozno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, većim dijelom zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, humozno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, većim dijelom zaslanjeno	70 30	176
11	Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, većim dijelom zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, većim dijelom zaslanjeno	70 30	242
12	Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, mjestimično zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, glinasto ilovasto, s proslojcima treseta, mjestimično zaslanjeno	70 30	161
UKUPNO ZA HIDROMELIORIRANA TLA KANALIMA			
HIDROMORFNA KOLMIRANJEM HIDROMELIORIRANA TLA			
13	Aluvijalno karbonatno, plitko glejno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	65 20	623

	Aluvijalno karbonatno srednje duboko glejno ilovasto, mjestimično zaslanjeno	15	
14	Aluvijalno karbonatno, plitko glejno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno Aluvijalno karbonatno srednje duboko glejno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno Močvarno glejno hipoglejno, plitko glejno, mineralno, karbonatno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	50 40 10	1215
15	Aluvijalno karbonatno, plitko glejno, glinasto ilovasto, mjestimično zaslanjeno Aluvijalno karbonatno, vrlo plitko glejno, ilovasto, mjestimično zaslanjeno	75 25	90,6
16	Humofluvisol plitko glejni, karbonatni, ilovasti, mjestimično zaslanjeno Aluvijalno karbonatno srednje duboko glejno ilovasto, mjestimično zaslanjeno	65 35	276
UKUPNO ZA KOLMIRANJEM HIDROMELIORIRANA TLA			
UKUPNO ZA POLJOPRIVREDNO ZEMLJIŠTE (I. i II.)			
17	Brda i neplodno		49,8
18	Naselja		222
19	Vodene površine (rijeke i kanali)		300
20	Nasip		55,5
21	Proizvodni pogoni		10,9

Tablica 8.2. Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u površinskoj vodi na LI Vidrice

	pH	EC _w	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1								
EC _w	-0,313**	1							
Ca ²⁺	-0,309**	0,474**	1						
Mg ²⁺	-0,390**	0,903**	0,520**	1					
K ⁺	-0,309**	0,890**	0,613**	0,894**	1				
Na ⁺	-0,249**	0,971**	0,401**	0,898**	0,887**	1			
HCO ₃ ⁻	-0,307**	0,335**	0,888**	0,399**	0,468**	0,245**	1		
Cl ⁻	-0,200*	0,927**	0,352**	0,860**	0,865**	0,963**	0,191**	1	
SO ₄ ²⁻	-0,324**	0,645**	0,747**	0,710**	0,764**	0,576**	0,638**	0,547**	1

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Tablica 8.3. Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u podzemnoj vodi na LI Vidrice

	pH	EC _w	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1								
EC _w	-0,009 ^{ns}	1							
Ca ²⁺	0,238 ^{**}	-0,188 [*]	1						
Mg ²⁺	0,144 ^{ns}	0,708 ^{**}	0,020 ^{ns}	1					
K ⁺	0,062 ^{ns}	0,636 ^{**}	0,026 ^{ns}	0,715 ^{**}	1				
Na ⁺	0,001 ^{ns}	0,949 ^{**}	-0,248 ^{**}	0,740 ^{**}	0,711 ^{**}	1			
HCO ₃ ⁻	-0,064 ^{ns}	0,845 ^{**}	-0,399 ^{**}	0,672 ^{**}	0,576 ^{**}	0,847 ^{**}	1		
Cl ⁻	-0,004 ^{ns}	0,923 ^{**}	-0,180 [*]	0,774 ^{**}	0,778 ^{**}	0,965 ^{**}	0,819 ^{**}	1	
SO ₄ ²⁻	0,297 ^{**}	0,093 ^{ns}	0,388 ^{**}	0,352 ^{**}	0,218 ^{**}	0,031 ^{ns}	0,074 ^{ns}	0,070 ^{ns}	1

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Tablica 8.4. Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u površinskoj vodi na LI Luke

	pH	EC _w	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1								
EC _w	-0,476 ^{**}	1							
Ca ²⁺	-0,474 ^{**}	0,608 ^{**}	1						
Mg ²⁺	-0,436 ^{**}	0,941 ^{**}	0,654 ^{**}	1					
K ⁺	0,435 ^{**}	0,958 ^{**}	0,535 ^{**}	0,941 ^{**}	1				
Na ⁺	-0,447 ^{**}	0,975 ^{**}	0,541 ^{**}	0,944 ^{**}	0,966 ^{**}	1			
HCO ₃ ⁻	-0,315 ^{**}	0,279 ^{**}	0,646 ^{**}	0,371 ^{**}	0,247 ^{**}	0,241 ^{**}	1		
Cl ⁻	-0,418 ^{**}	0,952 ^{**}	0,533 ^{**}	0,935 ^{**}	0,945 ^{**}	0,968 ^{**}	0,215 ^{**}	1	
SO ₄ ²⁻	-0,459 ^{**}	0,667 ^{**}	0,900 ^{**}	0,697 ^{**}	0,614 ^{**}	0,597 ^{**}	0,551 ^{**}	0,570 ^{**}	1

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Tablica 8.5. Spearmanov koeficijent korelacije između analiziranih parametara u podzemnoj vodi na LI Luke

	pH	EC _w	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1								
EC _w	-0,341**	1							
Ca ²⁺	-0,238**	0,845**	1						
Mg ²⁺	-0,078 ^{ns}	0,682**	0,622**	1					
K ⁺	0,454**	-0,167 ^{ns}	-0,303**	0,209*	1				
Na ⁺	-0,243**	0,949**	0,759**	0,649**	-0,107 ^{ns}	1			
HCO ₃ ⁻	0,228*	0,281**	0,576**	0,263**	-0,093 ^{ns}	0,262**	1		
Cl ⁻	-0,173 ^{ns}	0,880**	0,586**	0,578**	0,121 ^{ns}	0,878**	0,081 ^{ns}	1	
SO ₄ ²⁻	-0,269**	0,780**	0,887**	0,774**	-0,209*	0,702**	0,424**	0,522**	1

** Korelacija signifikantna na razini 0,01; * Korelacija signifikantna na razini 0,05; ^{ns} Korelacija nije signifikantna

Tablica 8.6. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _w 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površinska Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																												
Temperatura vode (°C)	0,658	1																											
pH (25°C)	-0,160	-0,537	1																										
ORP (mV)	-0,385	-0,138	-0,149	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0,318	-0,083	-0,364	0,128	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	-0,468	-0,772	0,255	0,139	0,120	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	-0,305	-0,648	0,270	0,020	-0,041	0,932	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	-0,212	-0,624	0,393	-0,075	-0,215	0,832	0,930	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	-0,301	-0,648	0,484	-0,077	-0,122	0,784	0,850	0,876	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	0,571	0,969	-0,614	-0,064	-0,028	-0,777	-0,674	-0,668	-0,681	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	0,514	0,949	-0,668	-0,029	0,052	-0,766	-0,691	-0,714	-0,736	0,983	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	0,473	0,919	-0,696	0,005	0,120	-0,747	-0,693	-0,738	-0,767	0,957	0,991	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	0,406	0,863	-0,715	0,063	0,195	-0,719	-0,695	-0,765	-0,797	0,908	0,960	0,987	1																
EC _w 0-25 cm (dS m ⁻¹)	-0,385	-0,271	-0,222	0,342	0,568	0,416	0,223	0,016	0,000	-0,216	-0,125	-0,043	0,059	1															
EC _w 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0,303	-0,612	0,172	0,021	0,031	0,919	0,963	0,883	0,769	-0,626	-0,634	-0,630	-0,629	0,291	1														
EC _w 50-75 cm (dS m ⁻¹)	-0,329	-0,653	0,299	0,063	-0,066	0,913	0,949	0,916	0,846	-0,679	-0,705	-0,715	-0,726	0,159	0,920	1													
EC _w 75-100 cm (dS m ⁻¹)	-0,249	-0,535	0,247	-0,034	-0,098	0,791	0,843	0,826	0,889	-0,554	-0,596	-0,623	-0,650	0,058	0,861	0,890	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	-0,461	-0,796	0,320	0,138	0,006	0,935	0,890	0,863	0,812	-0,803	-0,810	-0,803	-0,785	0,234	0,861	0,909	0,796	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	-0,294	-0,632	0,368	-0,004	-0,149	0,844	0,875	0,865	0,890	-0,658	-0,697	-0,715	-0,728	0,070	0,820	0,904	0,913	0,867	1										
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	-0,183	-0,095	-0,268	0,285	0,247	0,422	0,385	0,273	0,230	-0,098	-0,065	-0,038	-0,008	0,377	0,400	0,392	0,330	0,398	0,311	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,195	0,324	-0,527	0,067	0,091	0,094	0,125	0,031	0,010	0,349	0,351	0,350	0,346	0,189	0,139	0,112	0,200	0,038	0,094	0,537	1								
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	-0,032	0,162	-0,373	0,236	0,220	0,111	0,062	-0,035	-0,059	0,164	0,200	0,222	0,246	0,290	0,104	0,076	0,055	0,089	0,033	0,891	0,576	1							
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,260	0,365	-0,483	0,042	-0,029	-0,009	0,036	-0,021	-0,074	0,394	0,384	0,374	0,362	0,085	0,059	0,037	0,113	-0,035	0,030	0,443	0,927	0,748	1						
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,198	-0,185	-0,200	0,261	0,219	0,514	0,491	0,390	0,334	-0,189	-0,166	-0,139	-0,110	0,369	0,498	0,493	0,423	0,501	0,409	0,926	0,499	0,748	0,392	1					
EC _w površinska Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,119	0,183	-0,023	-0,156	0,095	-0,424	-0,505	-0,512	-0,509	0,168	0,210	0,245	0,287	0,059	-0,477	-0,521	-0,528	-0,458	-0,479	-0,442	-0,293	-0,273	-0,254	-0,469	1				
Temperatura zraka (°C)	0,570	0,900	-0,439	-0,121	-0,051	-0,714	-0,614	-0,593	-0,610	0,835	0,830	0,808	0,766	-0,215	-0,578	-0,627	-0,528	-0,732	-0,606	-0,079	0,232	0,168	0,271	-0,180	0,210	1			
Oborine (mm)	-0,111	-0,081	-0,109	0,004	0,049	0,181	0,138	0,072	0,083	-0,067	-0,063	-0,058	-0,048	0,140	0,155	0,139	0,140	0,132	0,120	0,219	0,181	0,194	0,159	0,213	-0,109	-0,088	1		

Tablica 8.7. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Vidrice

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Uštava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Uštava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																												
Temperatura vode (°C)	0.712	1																											
pH (25°C)	-0.234	-0.577	1																										
ORP (mV)	-0.437	-0.136	-0.108	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0.387	-0.110	-0.433	0.147	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	-0.536	-0.776	0.254	0.142	0.177	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	-0.359	-0.654	0.273	0.019	0.003	0.936	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	-0.249	-0.625	0.398	-0.076	-0.190	0.835	0.934	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	-0.354	-0.650	0.496	-0.079	-0.099	0.787	0.856	0.876	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	0.651	0.987	-0.621	-0.074	-0.048	-0.783	-0.684	-0.674	-0.685	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	0.597	0.963	-0.681	-0.038	0.034	-0.771	-0.701	-0.720	-0.740	0.985	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	0.547	0.931	-0.713	-0.002	0.105	-0.752	-0.703	-0.743	-0.771	0.958	0.991	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	0.474	0.873	-0.734	0.058	0.184	-0.724	-0.706	-0.770	-0.802	0.909	0.960	0.987	1																
EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	-0.411	-0.249	-0.251	0.347	0.618	0.398	0.203	0.000	-0.019	-0.203	-0.110	-0.027	0.075	1															
EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0.351	-0.612	0.169	0.021	0.074	0.921	0.961	0.886	0.773	-0.630	-0.638	-0.635	-0.635	0.273	1														
EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	-0.384	-0.654	0.301	-0.063	-0.028	0.916	0.952	0.918	0.849	-0.681	-0.707	-0.717	-0.728	0.143	0.923	1													
EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	-0.295	-0.537	0.251	-0.036	-0.057	0.799	0.850	0.830	0.889	-0.559	-0.601	-0.628	-0.655	0.048	0.820	0.894	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	-0.532	-0.797	0.320	0.144	0.054	0.939	0.898	0.870	0.815	-0.806	-0.811	-0.805	-0.786	0.220	0.866	0.912	0.803	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	-0.342	-0.630	0.363	-0.004	-0.105	0.849	0.885	0.873	0.894	-0.658	-0.696	-0.714	-0.728	0.053	0.828	0.910	0.923	0.869	1										
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	-0.280	-0.113	-0.368	0.359	0.341	0.485	0.438	0.320	0.278	-0.076	-0.055	-0.030	0.003	0.439	0.449	0.469	0.388	0.481	0.377	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0.237	0.340	-0.580	0.073	0.175	0.101	0.132	0.032	0.008	0.352	0.357	0.359	0.356	0.216	0.141	0.121	0.210	0.039	0.096	0.626	1								
Vodostaj Uštava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	-0.074	0.214	-0.611	0.332	0.365	0.135	0.069	-0.063	-0.092	0.268	0.301	0.326	0.353	0.402	0.117	0.076	0.038	0.110	0.026	0.846	0.718	1							
Vodostaj Uštava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0.347	0.411	-0.551	0.047	0.049	-0.014	0.030	-0.041	-0.077	0.418	0.410	0.402	0.391	0.099	0.042	0.025	0.123	-0.046	0.026	0.526	0.950	0.663	1						
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0.297	-0.207	-0.270	0.308	0.279	0.585	0.555	0.459	0.411	-0.181	-0.170	-0.150	-0.123	0.401	0.559	0.581	0.506	0.595	0.499	0.976	0.599	0.758	0.496	1					
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0.179	0.231	-0.070	-0.136	0.041	-0.509	-0.598	-0.593	-0.589	0.218	0.278	0.318	0.361	0.065	-0.566	-0.614	-0.601	-0.533	-0.556	-0.491	-0.308	-0.247	-0.269	-0.555	1				
Temperatura zraka (°C)	0.665	0.957	-0.543	-0.122	-0.091	-0.786	-0.678	-0.646	-0.662	0.952	0.929	0.902	0.852	-0.222	-0.629	-0.679	-0.564	-0.800	-0.654	-0.128	0.273	0.197	0.348	-0.222	0.248	1			
Oborine (mm)	-0.187	-0.115	-0.133	0.031	0.256	0.221	0.161	0.083	0.100	-0.109	-0.104	-0.092	-0.072	0.217	0.201	0.172	0.152	0.173	0.129	0.319	0.185	0.312	0.175	0.310	-0.127	-0.121	1		

Tablica 8.8. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)					
Dubina vode (m)	1																															
Temperatura vode (°C)	-0,478	1																														
pH (25°C)	0,429	-0,505	1																													
ORP (mV)	0,192	0,417	-0,074	1																												
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0,441	0,852	-0,359	0,375	1																											
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	0,919	-0,366	0,425	0,313	-0,260	1																										
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	0,922	-0,514	0,397	0,211	-0,435	0,932	1																									
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	0,879	-0,686	0,403	0,083	-0,583	0,832	0,930	1																								
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	0,848	-0,645	0,489	-0,038	-0,535	0,784	0,850	0,876	1																							
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,685	0,430	-0,539	-0,209	0,195	-0,777	-0,674	-0,668	-0,681	1																						
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	-0,705	0,541	-0,592	-0,128	0,301	-0,766	-0,691	-0,714	-0,736	0,983	1																					
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	-0,712	0,624	-0,610	-0,048	0,382	-0,747	-0,693	-0,738	-0,767	0,957	0,991	1																				
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	-0,713	0,723	-0,630	0,049	0,483	-0,719	-0,695	-0,765	-0,797	0,908	0,960	0,987	1																			
EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,179	0,536	-0,173	0,578	0,535	0,416	0,223	0,016	0,000	-0,216	-0,125	-0,043	0,059	1																		
EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	0,901	-0,450	0,315	0,242	-0,382	0,919	0,963	0,883	0,769	-0,626	-0,634	-0,630	-0,629	0,291	1																	
EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,949	-0,554	0,476	0,152	-0,477	0,913	0,949	0,916	0,846	-0,679	-0,705	-0,715	-0,726	0,159	0,920	1																
EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,901	-0,550	0,358	0,026	-0,527	0,791	0,843	0,826	0,889	-0,554	-0,596	-0,623	-0,650	0,058	0,812	0,890	1															
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	0,945	-0,456	0,447	0,221	-0,361	0,935	0,890	0,863	0,812	-0,803	-0,810	-0,803	-0,785	0,234	0,861	0,909	0,796	1														
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	0,907	-0,561	0,427	0,056	-0,466	0,844	0,875	0,865	0,890	-0,658	-0,697	-0,715	-0,728	0,070	0,820	0,904	0,913	0,867	1													
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	0,456	0,171	0,037	0,357	0,054	0,422	0,385	0,273	0,230	-0,098	-0,065	-0,038	-0,008	0,377	0,400	0,392	0,330	0,398	0,311	1												
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,161	0,198	-0,273	0,212	-0,046	0,094	0,125	0,031	0,010	0,349	0,351	0,350	0,346	0,189	0,139	0,112	0,200	0,038	0,094	0,537	1											
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	0,143	0,325	-0,141	0,251	0,200	0,111	0,062	-0,035	-0,059	0,164	0,200	0,222	0,246	0,290	0,104	0,076	0,055	0,089	0,033	0,891	0,576	1										
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,076	0,157	-0,294	0,111	-0,085	-0,009	0,036	-0,021	-0,074	0,394	0,384	0,374	0,362	0,085	0,059	0,037	0,113	-0,035	0,030	0,443	0,927	0,748	1									
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,553	0,083	0,082	0,368	-0,019	0,514	0,491	0,390	0,334	-0,189	-0,166	-0,139	-0,110	0,369	0,498	0,493	0,423	0,501	0,409	0,926	0,499	0,748	0,392	1								
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	-0,568	0,308	-0,280	-0,043	0,368	-0,424	-0,505	-0,512	-0,509	0,168	0,210	0,245	0,287	0,059	-0,477	-0,521	-0,528	-0,458	-0,479	-0,442	-0,293	-0,273	-0,254	-0,469	1							
Temperatura zraka (°C)	-0,642	0,348	-0,468	-0,180	0,155	-0,714	-0,614	-0,593	-0,610	-0,835	0,830	0,808	0,766	-0,215	-0,578	-0,627	-0,528	-0,732	-0,606	-0,079	0,232	0,168	0,271	-0,180	0,210	1						
Oborine (mm)	0,165	0,041	0,066	0,108	0,043	0,181	0,138	0,072	0,083	-0,067	-0,063	-0,058	-0,048	0,140	0,155	0,139	0,140	0,132	0,120	0,219	0,181	0,194	0,159	0,213	-0,109	-0,088	1					

Tablica 8.9. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Vidrice

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _s 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _s 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _s 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _s 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)			
Dubina vode (m)	1																													
Temperatura vode (°C)	-0,477	1																												
pH (25°C)	0,435	-0,505	1																											
ORP (mV)	0,194	0,423	-0,065	1																										
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0,444	0,854	-0,357	0,385	1																									
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	0,923	-0,369	0,434	0,318	-0,266	1																								
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	0,928	-0,523	0,411	0,213	-0,446	0,936	1																							
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	0,884	-0,688	0,409	0,088	-0,590	0,835	0,934	1																						
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	0,850	-0,649	0,497	-0,039	-0,542	0,787	0,856	0,876	1																					
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,686	0,430	-0,546	-0,218	0,195	-0,783	-0,684	-0,674	-0,685	1																				
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	-0,705	0,540	-0,597	-0,135	0,301	-0,771	-0,701	-0,720	-0,740	0,985	1																			
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	-0,713	0,623	-0,615	-0,054	0,381	-0,752	-0,703	-0,743	-0,771	0,958	0,991	1																		
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	-0,713	0,723	-0,633	0,045	0,483	-0,724	-0,706	-0,770	-0,802	0,909	0,960	0,987	1																	
EC _s 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,166	0,549	-0,178	0,595	0,544	0,398	0,203	0,000	-0,019	-0,203	-0,110	-0,027	0,075	1																
EC _s 25-50 cm (dS m ⁻¹)	0,905	-0,458	0,325	0,239	-0,393	0,921	0,961	0,886	0,773	-0,630	-0,638	-0,635	-0,635	0,273	1															
EC _s 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,951	-0,557	0,482	0,151	-0,483	0,916	0,952	0,918	0,849	-0,681	-0,707	-0,717	-0,728	0,143	0,923	1														
EC _s 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,905	-0,550	0,363	0,030	-0,531	0,799	0,850	0,830	0,869	-0,559	-0,601	-0,628	-0,655	0,048	0,820	0,894	1													
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	0,947	-0,457	0,452	0,223	-0,365	0,939	0,898	0,870	0,815	-0,606	-0,611	-0,805	-0,786	0,220	0,866	0,912	0,803	1												
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	0,912	-0,562	0,429	0,058	-0,475	0,849	0,885	0,873	0,894	-0,658	-0,696	-0,714	-0,728	0,053	0,828	0,910	0,923	0,869	1											
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	0,529	0,192	0,075	0,382	0,039	0,485	0,438	0,320	0,278	-0,076	-0,055	-0,030	0,003	0,439	0,449	0,469	0,388	0,481	0,377	1										
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,169	0,212	-0,277	0,229	-0,040	0,101	0,132	0,032	0,008	0,352	0,357	0,359	0,356	0,216	0,141	0,121	0,210	0,039	0,096	0,626	1									
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	0,160	0,447	-0,191	0,319	0,282	0,135	0,069	-0,063	-0,092	0,268	0,301	0,326	0,353	0,402	0,117	0,076	0,038	0,110	0,026	0,846	0,718	1								
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,077	0,179	-0,308	0,126	-0,091	-0,014	0,030	-0,041	-0,077	0,418	0,410	0,402	0,391	0,099	0,042	0,025	0,123	-0,046	0,026	0,526	0,950	0,653	1							
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,638	0,067	0,113	0,365	-0,064	0,585	0,555	0,459	0,411	-0,181	-0,170	-0,150	-0,123	0,401	0,559	0,581	0,506	0,595	0,499	0,976	0,599	0,758	0,496	1						
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	-0,657	0,366	-0,374	-0,050	0,413	-0,509	-0,598	-0,593	-0,589	0,218	0,278	0,318	0,361	0,065	-0,566	-0,614	-0,601	-0,533	-0,556	-0,491	-0,308	-0,247	-0,269	-0,555	1					
Temperatura zraka (°C)	-0,696	0,372	-0,512	-0,241	0,150	-0,786	-0,678	-0,646	-0,662	0,852	0,929	0,902	0,852	-0,222	-0,629	-0,679	-0,564	-0,800	-0,654	-0,128	0,273	0,197	0,348	-0,222	0,248	1				
Oborine (mm)	0,188	0,060	0,063	0,181	0,098	0,221	0,161	0,083	0,100	-0,109	-0,104	-0,092	-0,072	0,217	0,201	0,172	0,152	0,173	0,129	0,319	0,185	0,312	0,175	0,310	-0,127	-0,121	1			

Tablica 8.10. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																										
Temperatura vode (°C)	0,268	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	0,141	0,544	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	-0,120	-0,586	-0,206	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	-0,163	-0,624	-0,238	0,923	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	-0,226	-0,699	-0,354	0,868	0,921	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	-0,251	-0,769	-0,409	0,836	0,883	0,973	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	0,235	0,961	0,521	-0,604	-0,626	-0,736	-0,806	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	0,247	0,932	0,531	-0,579	-0,597	-0,714	-0,780	0,985	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	0,272	0,869	0,532	-0,521	-0,535	-0,666	-0,730	0,941	0,980	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	0,293	0,810	0,521	-0,478	-0,489	-0,624	-0,687	0,894	0,947	0,990	1																
EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,152	0,560	0,643	-0,019	-0,071	-0,187	-0,271	0,562	0,595	0,629	0,644	1															
EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0,083	-0,613	-0,071	0,729	0,765	0,648	0,637	-0,560	-0,496	-0,379	-0,290	0,129	1														
EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	-0,075	-0,305	0,234	0,640	0,704	0,592	0,507	-0,272	-0,244	-0,198	-0,158	0,333	0,719	1													
EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,067	0,391	0,633	0,088	0,165	-0,001	-0,106	0,412	0,426	0,430	0,425	0,760	0,225	0,668	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	-0,258	-0,749	-0,376	0,826	0,877	0,925	0,930	-0,749	-0,706	-0,630	-0,572	-0,206	0,732	0,540	-0,064	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	-0,218	-0,865	-0,449	0,726	0,758	0,820	0,857	-0,868	-0,836	-0,758	-0,689	-0,399	0,689	0,380	-0,300	0,879	1										
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	-0,062	-0,076	-0,006	0,437	0,406	0,412	0,372	-0,111	-0,066	-0,007	0,024	0,147	0,304	0,200	0,033	0,428	0,305	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,076	0,381	0,204	0,118	0,091	0,095	0,016	0,315	0,334	0,344	0,331	0,301	-0,134	-0,007	0,147	0,003	-0,131	0,537	1								
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	0,026	0,180	0,124	0,180	0,153	0,112	0,069	0,156	0,200	0,246	0,267	0,282	0,141	0,085	0,125	0,133	0,017	0,891	0,576	1							
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,076	0,420	0,209	0,016	-0,033	-0,025	-0,092	0,351	0,356	0,353	0,333	0,313	-0,219	-0,103	0,105	-0,112	-0,203	0,443	0,927	0,555	1						
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,076	-0,167	-0,080	0,489	0,455	0,485	0,452	-0,208	-0,169	-0,111	-0,080	0,054	0,318	0,185	-0,049	0,498	0,391	0,926	0,499	0,748	0,392	1					
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,237	0,176	0,159	-0,317	-0,322	-0,403	-0,389	0,255	0,278	0,306	0,332	0,029	-0,098	-0,071	0,068	-0,320	-0,287	-0,442	-0,293	-0,273	-0,254	-0,469	1				
Temperatura zraka (°C)	0,245	0,852	0,483	-0,551	-0,593	-0,570	-0,729	0,831	0,817	0,783	0,713	0,496	-0,534	-0,276	0,335	-0,710	-0,777	-0,079	0,232	0,168	0,271	-0,180	0,210	1			
Oborine (mm)	0,003	-0,060	0,022	0,193	0,209	0,212	0,168	-0,064	-0,061	-0,044	-0,030	0,041	0,154	0,166	0,075	0,198	0,132	0,219	0,181	0,194	0,159	0,213	-0,109	-0,088	1		

Tablica 8.11. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w površinskih voda na LI Luke

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC ₀ 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC ₀ 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC ₀ 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC ₀ 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																										
Temperatura vode (°C)	0,274	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	0,100	0,579	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	-0,167	-0,595	-0,224	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	-0,216	-0,633	-0,269	0,926	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	-0,285	-0,708	-0,396	0,869	0,923	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	-0,308	-0,773	-0,455	0,846	0,892	0,977	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	0,268	0,968	0,580	-0,609	-0,634	-0,742	-0,806	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	0,287	0,939	0,590	-0,583	-0,605	-0,720	-0,780	0,987	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	0,317	0,876	0,591	-0,523	-0,544	-0,672	-0,729	0,942	0,980	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	0,343	0,817	0,580	-0,479	-0,499	-0,631	-0,686	0,895	0,947	0,990	1																
EC ₀ 0-25 cm (dS m ⁻¹)	0,167	0,557	0,697	-0,017	-0,074	-0,189	-0,264	0,557	0,590	0,625	0,640	1															
EC ₀ 25-50 cm (dS m ⁻¹)	-0,090	-0,614	-0,078	0,733	0,762	0,647	0,642	-0,561	-0,496	-0,379	-0,290	0,138	1														
EC ₀ 50-75 cm (dS m ⁻¹)	-0,104	-0,307	0,252	0,645	0,706	0,594	0,514	-0,274	-0,246	-0,199	-0,158	0,341	0,723	1													
EC ₀ 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,061	0,393	0,684	0,089	0,161	-0,002	-0,100	0,409	0,422	0,426	0,421	0,763	0,228	0,672	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	-0,304	-0,754	-0,418	0,838	0,887	0,933	0,937	-0,754	-0,710	-0,635	-0,578	-0,203	0,736	0,546	-0,064	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	-0,254	-0,871	-0,492	0,733	0,762	0,822	0,855	-0,871	-0,840	-0,762	-0,695	-0,399	0,688	0,382	-0,302	0,881	1										
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	-0,125	-0,081	-0,006	0,536	0,502	0,487	0,442	-0,116	-0,067	0,004	0,036	0,206	0,375	0,228	0,066	0,521	0,355	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,086	0,375	0,211	0,133	0,106	0,112	0,034	0,306	0,336	0,355	0,345	0,310	-0,124	-0,014	0,153	0,018	-0,124	0,626	1								
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	0,065	0,252	0,159	0,242	0,221	0,147	0,094	0,239	0,298	0,356	0,382	0,372	0,189	0,093	0,170	0,191	0,014	0,846	0,718	1							
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,133	0,441	0,251	0,029	-0,013	-0,004	-0,078	0,362	0,379	0,383	0,365	0,343	-0,221	-0,100	0,123	-0,110	-0,212	0,526	0,950	0,663	1						
Vodostaj Metković Neretva (cm)	-0,165	-0,179	-0,115	0,573	0,535	0,550	0,512	-0,225	-0,187	-0,124	-0,095	0,080	0,364	0,197	-0,044	0,573	0,439	0,976	0,599	0,758	0,496	1					
EC _w površina Metković Neretva (μS cm ⁻¹)	0,281	0,231	0,201	-0,397	-0,405	-0,497	-0,477	0,322	0,347	0,376	0,402	0,052	-0,134	-0,118	0,068	-0,406	-0,356	-0,491	-0,308	-0,247	-0,269	-0,555	1				
Temperatura zraka (°C)	0,232	0,961	0,553	-0,625	-0,662	-0,744	-0,804	0,954	0,919	0,856	0,798	0,541	-0,600	-0,322	0,366	-0,771	-0,865	-0,128	0,273	0,197	0,348	-0,222	0,248	1			
Oborine (mm)	-0,049	-0,078	0,023	0,261	0,280	0,260	0,220	-0,087	-0,087	-0,061	-0,044	-0,019	0,199	0,198	0,033	0,245	0,190	0,319	0,185	0,312	0,175	0,310	-0,127	-0,121	1		

Tablica 8.12. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja satnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _w 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _w 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Nerešva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Nerešva (cm)	Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Nerešva (cm)	Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Nerešva (cm)	Vodostaj Metković Nerešva (cm)	EC _w površina Metković Nerešva (μS cm ⁻¹)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																												
Temperatura vode (°C)	-0,138	1																											
pH (25°C)	0,255	-0,057	1																										
ORP (mV)	0,444	-0,667	0,539	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0,448	-0,191	-0,707	-0,368	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	0,705	-0,161	0,456	0,534	-0,484	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	0,795	-0,153	0,445	0,543	-0,444	0,923	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	0,857	-0,315	0,433	0,656	-0,453	0,868	0,921	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	0,822	-0,349	0,498	0,712	-0,519	0,836	0,883	0,973	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,544	0,495	-0,714	-0,875	0,583	-0,604	-0,626	-0,736	-0,806	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	-0,497	0,594	-0,675	-0,892	0,501	-0,579	-0,597	-0,714	-0,780	0,985	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	-0,430	0,716	-0,604	-0,891	0,373	-0,521	-0,535	-0,666	-0,730	0,941	0,980	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	-0,378	0,793	-0,542	-0,883	0,280	-0,478	-0,489	-0,624	-0,687	0,894	0,947	0,990	1																
EC _w 0-25 cm (dS m ⁻¹)	-0,193	0,602	-0,380	-0,551	0,362	-0,019	-0,071	-0,187	-0,271	0,562	0,595	0,629	0,644	1															
EC _w 25-50 cm (dS m ⁻¹)	0,526	0,242	0,649	0,386	-0,556	0,729	0,765	0,648	0,637	-0,560	-0,496	-0,379	-0,290	0,129	1														
EC _w 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,513	0,119	0,291	0,209	-0,127	0,640	0,704	0,592	0,507	-0,272	-0,244	-0,198	-0,158	0,333	0,719	1													
EC _w 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,027	0,382	-0,288	-0,356	0,412	0,088	0,165	-0,001	-0,106	0,412	0,426	0,430	0,425	0,760	0,225	0,668	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	0,022	-0,177	0,567	0,615	-0,586	0,826	0,977	0,925	0,930	-0,748	-0,706	-0,630	-0,572	-0,206	0,732	0,540	-0,064	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	0,075	-0,246	0,659	0,723	-0,710	0,725	0,758	0,820	0,857	-0,888	-0,836	-0,755	-0,693	-0,399	0,893	0,980	-0,300	0,879	1										
Vodostaj Opuzen Nerešva (cm)	0,414	0,161	0,129	0,076	-0,900	0,437	0,406	0,412	0,372	-0,111	-0,066	-0,007	0,024	0,147	0,304	0,200	0,033	0,428	0,305	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Nerešva (cm)	0,195	0,170	-0,390	-0,258	0,124	0,118	0,091	0,095	0,016	0,315	0,334	0,344	0,331	0,301	-0,134	-0,007	0,147	0,003	-0,131	0,537	1								
Vodostaj Ustava ušće nizv. Mala Nerešva (cm)	0,168	0,321	-0,042	-0,186	-0,136	0,180	0,153	0,112	0,069	0,156	0,200	0,246	0,267	0,282	0,141	0,085	0,125	0,133	0,017	0,891	0,576	1							
Vodostaj Ustava ušće uzv. Mala Nerešva (cm)	0,050	0,128	-0,424	-0,283	0,211	0,016	-0,033	-0,025	-0,092	0,351	0,356	0,353	0,333	0,313	-0,219	-0,103	0,105	-0,112	-0,203	0,443	0,927	0,555	1						
Vodostaj Metković Nerešva (cm)	0,465	0,071	0,179	0,172	-0,344	0,489	0,455	0,485	0,452	-0,208	-0,169	-0,111	-0,080	0,054	0,318	0,185	-0,049	0,498	0,391	0,926	0,499	0,748	0,392	1					
EC _w površina Metković Nerešva (μS/cm)	-0,203	0,309	-0,106	-0,292	0,005	-0,317	-0,322	-0,403	-0,389	0,255	0,278	0,306	0,332	0,029	-0,098	-0,071	0,068	-0,320	-0,287	-0,442	-0,293	-0,273	-0,254	-0,469	1				
Temperatura zraka (°C)	-0,549	0,345	-0,649	-0,704	0,590	-0,551	-0,593	-0,670	-0,729	0,631	0,617	0,763	0,713	0,496	-0,534	-0,276	0,335	-0,710	-0,777	-0,079	0,232	0,168	0,271	-0,180	0,210	1			
Oborine (mm)	0,223	0,043	0,046	0,000	-0,090	0,193	0,209	0,212	0,168	-0,064	-0,061	-0,044	-0,030	0,041	0,154	0,166	0,075	0,198	0,132	0,219	0,181	0,194	0,159	0,213	-0,109	-0,088	1		

Tablica 8.13. Korelacijska matrica varijabli za izradu modela MLR predviđanja dnevnih vrijednosti EC_w podzemnih voda na LI Luke

Varijable	Dubina vode (m)	Temperatura vode (°C)	pH (25°C)	ORP (mV)	EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	Temperatura tla 0-25 cm (°C)	Temperatura tla 25-50 cm (°C)	Temperatura tla 50-75 cm (°C)	Temperatura tla 75-100 cm (°C)	EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Uštava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Uštava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	Vodostaj Metković Neretva (cm)	EC _w površina Metković Neretva (μS/cm)	Temperatura zraka (°C)	Oborine (mm)		
Dubina vode (m)	1																												
Temperatura vode (°C)	-0,137	1																											
pH (25°C)	0,267	-0,047	1																										
ORP (mV)	0,448	-0,669	0,547	1																									
EC _w (25°C) (dS m ⁻¹)	-0,446	-0,191	-0,713	-0,376	1																								
Vlažnost tla 0-25 cm (m ³ m ⁻³)	0,706	-0,148	0,477	0,537	-0,492	1																							
Vlažnost tla 25-50 cm (m ³ m ⁻³)	0,795	-0,149	0,467	0,547	-0,442	0,926	1																						
Vlažnost tla 50-75 cm (m ³ m ⁻³)	0,858	-0,311	0,451	0,660	-0,448	0,869	0,923	1																					
Vlažnost tla 75-100 cm (m ³ m ⁻³)	0,823	-0,337	0,514	0,711	-0,520	0,846	0,892	0,977	1																				
Temperatura tla 0-25 cm (°C)	-0,553	0,486	-0,718	-0,884	0,595	-0,609	-0,634	-0,742	-0,806	1																			
Temperatura tla 25-50 cm (°C)	-0,503	0,584	-0,679	-0,902	0,514	-0,583	-0,605	-0,720	-0,780	0,987	1																		
Temperatura tla 50-75 cm (°C)	-0,434	0,707	-0,607	-0,901	0,385	-0,523	-0,544	-0,672	-0,729	0,942	0,980	1																	
Temperatura tla 75-100 cm (°C)	-0,383	0,785	-0,545	-0,892	0,293	-0,479	-0,499	-0,631	-0,686	0,895	0,947	0,990	1																
EC _e 0-25 cm (dS m ⁻¹)	-0,188	0,593	-0,380	-0,550	0,373	-0,017	-0,074	-0,189	-0,264	0,557	0,590	0,625	0,640	1															
EC _e 25-50 cm (dS m ⁻¹)	0,528	0,254	0,655	0,384	-0,555	0,733	0,762	0,647	0,642	-0,561	-0,496	-0,379	-0,290	0,138	1														
EC _e 50-75 cm (dS m ⁻¹)	0,506	0,126	0,303	0,209	-0,121	0,645	0,706	0,594	0,514	-0,274	-0,246	-0,199	-0,158	0,341	0,723	1													
EC _e 75-100 cm (dS m ⁻¹)	0,022	0,373	-0,285	-0,354	0,427	0,089	0,161	-0,002	-0,100	0,409	0,422	0,426	0,421	0,763	0,228	0,672	1												
Matrični potencijal 0-25 cm (kPa)	0,828	-0,174	0,581	0,622	-0,585	0,838	0,887	0,933	0,937	-0,754	-0,710	-0,635	-0,578	-0,203	0,736	0,546	-0,064	1											
Matrični potencijal 25-50 cm (kPa)	0,681	-0,243	0,674	0,679	-0,673	0,733	0,762	0,822	0,855	-0,871	-0,840	-0,762	-0,695	-0,399	0,688	0,382	-0,302	0,881	1										
Vodostaj Opuzen Neretva (cm)	0,492	0,182	0,119	0,100	-0,298	0,536	0,502	0,487	0,442	-0,116	-0,067	0,004	0,036	0,206	0,375	0,228	0,066	0,521	0,355	1									
Vodostaj Opuzen ustava nizv. Mala Neretva (cm)	0,221	0,184	-0,394	-0,264	0,122	0,133	0,106	0,112	0,034	0,306	0,336	0,355	0,345	0,310	-0,124	-0,014	0,153	0,018	-0,124	0,628	1								
Vodostaj Uštava ušće nizv. Mala Neretva (cm)	0,229	0,444	-0,083	-0,265	-0,154	0,242	0,221	0,147	0,084	0,239	0,298	0,356	0,382	0,372	0,189	0,083	0,170	0,191	0,014	0,946	0,718	1							
Vodostaj Uštava ušće uzv. Mala Neretva (cm)	0,083	0,150	-0,465	-0,312	0,236	0,029	-0,013	-0,004	-0,078	0,362	0,379	0,383	0,365	0,343	-0,221	-0,100	0,123	-0,110	-0,212	0,528	0,950	0,663	1						
Vodostaj Metković Neretva (cm)	0,529	0,056	0,169	0,211	-0,325	0,573	0,536	0,558	0,512	-0,225	-0,187	-0,124	-0,095	0,080	0,364	0,197	-0,044	0,575	0,439	0,976	0,599	0,758	0,496	1					
EC _w površina Metković Neretva (μS/cm)	-0,291	0,370	-0,134	-0,359	0,012	-0,397	-0,405	-0,497	-0,477	0,322	0,347	0,376	0,402	0,052	-0,134	-0,118	0,068	-0,406	-0,356	-0,491	-0,308	-0,247	-0,269	-0,555	1				
Temperatura zraka (°C)	-0,603	0,369	-0,724	-0,515	0,664	-0,625	-0,662	-0,744	-0,804	0,954	0,919	0,856	0,798	0,541	-0,600	-0,322	0,366	-0,771	-0,865	-0,128	0,273	0,197	0,348	-0,222	0,248	1			
Oborine (mm)	0,278	0,061	0,097	0,033	-0,195	0,261	0,280	0,260	0,220	-0,087	-0,087	-0,061	-0,044	-0,019	0,199	0,198	0,033	0,245	0,190	0,319	0,165	0,312	0,175	0,310	-0,127	-0,121	1		