



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Iva Dominović Novković

**RECENTNE PROMJENE
FIZIČKO-KEMIJSKIH SVOJSTAVA
VODENOGA STUPCA MORSKOG
JEZERA ZMAJEVO OKO
(ROGOZNICA, HRVATSKA)**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Iva Dominović Novković

**RECENTNE PROMJENE
FIZIČKO-KEMIJSKIH SVOJSTAVA
VODENOGA STUPCA MORSKOG
JEZERA ZMAJEVO OKO
(ROGOZNICA, HRVATSKA)**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

dr. sc. Ivica Vilibić

dr. sc. Irena Ciglencečki-Jušić

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Science

Iva Dominović Novković

**RECENT CHANGES IN
THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES
OF THE WATER COLUMN
OF THE MARINE LAKE ZMAJEVO OKO
(ROGOZNICA, CROATIA)**

DOCTORAL THESIS

Mentors:

Ivica Vilibić, PhD

Irena Ciglencečki-Jušić, PhD

Zagreb, 2026

Ova doktorska disertacija izrađena je na interdisciplinarnom doktorskom studiju Oceanologije na Geološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom dr. sc. Ivice Vilibića i dr. sc. Irene Ciglencečki-Jušić. Analize i izrada rada izvršene su na Institutu Ruđer Bošković i dijelom na Sveučilištu Bangor (Ujedinjeno Kraljevstvo) pod mentorstvom prof. Petera Robinsa. Mjerenja su rađena na jezeru Zmajevu oko kraj Rogoznice. Istraživanje je financirano potporom Hrvatske zaklade za znanost kroz istraživačke projekte IP-2018-01-1717 (MARRES), IP-2022-10-3064 (GLOMETS), IP-2024-05-2377 (ISO-ZOKO) i projekt mobilnosti MOBDOK-2023-6353.

Zahvala

Posveta

Na večernjem druženju tijekom konferencije EGU 2025 do mene je sjedio jedan stariji kolega iz područja šumarstva. Čuo je kada sam drugom kolegi rekla da se brinem što će biti sa Zmajevim okom jer se u blizini planira graditi još jedan turistički kompleks. Okrenuo se i rekao:

„Zašto jednostavno ne isušite jezero i pustite ljude da grade kompleks? Ionako vam zemlja živi od turizma!“

Valjano pitanje te sam dala sve od sebe da mu pojasnim značaj jezera. Rekla sam mu kako je jezero posebno po svojim fizičkim, kemijskim i biološkim svojstvima. Kako nismo našli nijedno drugo takvo jezero u literaturi – u cijelom svijetu. Kako je ono prirodni laboratorij nadohvat ruke jer brzo reagira na promjene u okolišu. Kako je zanimljivo i misteriozno zbog naglog obrtanja slojeva, promjene boje i neugodnih mirisa koji se potom šire. Kako nastane opći pomor životinja kada se slojevi obrću.

Kolega je na sve to odmahivao glavom te nije djelovao uvjeren, dapače, činilo se kako ga cijela situacija zabavlja. Konačno, u želji da završim taj razgovor i pričam s nekim drugim, rekla sam:

„Pa dobro, zaista ne znam što više da Vam kažem – osim da želim da i moji unuci imaju priliku vidjeti jezero na kojem im je baka doktorirala!“. Na to je ustuknuo, pa se zatim nasmijao od srca i rekao:

„Kolegice, sad ste me uvjerali, to je pravi argument za sačuvati jezero!“.

...

Stoga, posvećujem ovaj rad svim unucima, mojim i vašim, s nadom da će vidjeti Zmajevo oko i uživo, a ne samo u starim novinama i doktoratima (slika 1.6).

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geološki odsjek

Doktorski rad

**Recentne promjene fizičko-kemijskih svojstava vodenoga stupca
morskog jezera Zmajevog oko (Rogoznica, Hrvatska)**

Iva Dominović Novković

Zavod za istraživanje mora i okoliša, Institut Ruđer Bošković

Sažetak:

Jezero Zmajevog oko je morsko meromiktično jezero u kojemu povremeno dolazi do naglog miješanja slojeva pri čemu ono postane sasvim anoksično. Analizom dugoročnih fizičko – kemijskih podataka prikupljenih sezonalno u razdoblju od 1996. do 2022. godine, utvrđeno je da halino raslojavanje ima dominantnu ulogu u procesima miješanja vodenog stupca Zmajevog oka, osobito u sušnim godinama. Tijekom razdoblja 2021. – 2023. godine istraživao je kontakt jezera s morem koji se odvija podzemno kroz krške stijene. U jezeru su utvrđene dvije podvodne točke kontakta te je nađeno da morska voda ne ulazi u jezero izravno, već kao mješavina morske, jezerske i slatke vode pri čemu može utjecati na temperaturu uz rubove jezera i u njega unositi hranjive tvari. Izmjena vode kontrolirana je morskom razinom čiji signal do jezera dolazi prigušen i s vremenskim kašnjenjem od približno tri sata. Razvijen je numerički model jezera Zmajevog oko s pomoću modela Delft3D FM, modul FLOW, uz forsiranje podacima reanalize ERA5. Modelom je uspješno simulirano miješanje 2021. godine i očuvano raslojavanje 2023. godine. Rezultati upućuju da model precjenjuje miješanje vjetrom i podcjenjuje unos slatke vode. Preporučuje se nastavak dugoročnog praćenja fizičko – kemijskih svojstava na visokoj prostornoj rezoluciji, kao i daljnji razvoj modela. Kvalitetnije forsiranje vjetrom i uključivanje pokazatelja kvalitete vode ključni su za procjenu stanja jezera u različitim klimatskim scenarijima. Konačno, buduća istraživanja trebala bi ispitati ulogu dvostruke difuzije u vertikalnom miješanju Zmajevog oka.

Izvorni rad je na hrvatskom jeziku i sadrži 167 stranica, 58 slika, 15 tablica i 165 literaturnih navoda.

Ključne riječi: Zmajevog oko, anoksija, fizičko – kemijska svojstva, Delft3D

Mentori:

dr. sc. Ivica Vilibić

dr. sc. Irena Ciglenečki-Jušić

Ocjenjivači:

Prof. dr. sc. Zrinka Ljubešić

Prof. dr. sc. Dalibor Carević

Prof. dr. sc. Zoran Pasarić

Rad prihvaćen: 10. ožujka 2026.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Doctoral dissertation

Recent changes in the physico-chemical properties of the water column of the marine lake Zmajevsko oko (Rogoznica, Croatia)

Iva Dominović Novković

Division for Marine and Environmental Research, Ruđer Bošković Institute

Abstract:

Lake Zmajevsko oko is a marine meromictic lake in which abrupt mixing events occasionally occur, causing the entire water column to become completely anoxic. Based on the analysis of long-term physicochemical data collected seasonally between 1996 and 2022, it was found that haline stratification plays a dominant role in controlling the mixing regime of the water column in Zmajevsko oko, particularly during dry years. During the period 2021 – 2023, the underground connection between the lake and the sea, maintained through the karstic rocks surrounding the lake, was investigated. Two submerged contact points between the lake and the sea were identified in the lake. At these locations, seawater does not enter the lake directly but rather as a mixture of seawater, lake water, and freshwater, which can influence temperature near the lake boundaries and introduce nutrients into the lake. Water exchange is controlled by sea level variations, whose signal reaches the lake attenuated and with a time lag of approximately three hours. A numerical model of Zmajevsko oko was developed using Delft3D FM (FLOW module), forced with ERA5 reanalysis data. The model successfully simulated the mixing event in 2021 and preserved stratification in 2023. The results indicate that the model overestimates wind-driven mixing and underestimates freshwater inflow. Continued long-term monitoring of physicochemical properties at high spatial resolution is recommended, together with further development of the model. Improved wind forcing and the inclusion of water quality indicators are essential for assessing the state of the lake under different climate scenarios. Finally, future research should investigate the role of double diffusion in the vertical mixing of Zmajevsko oko.

This work contains 167 pages, 58 figures, 15 tables and 165 references. Original work written in Croatian.
Keywords: Zmajevsko Oko, anoxia, physicochemical properties, Delft3D

Mentors:

Ivica Vilibić, PhD
Irena Ciglenečki-Jušić, PhD

Reviewers:

Professor Zrinka Ljubešić, PhD
Professor Dalibor Carević, PhD
Professor Zoran Pasarić, PhD

Thesis accepted: 10 March 2026

O mentorima

Dr. sc. Ivica Vilibić

Dr. sc. Ivica Vilibić je znanstveni savjetnik u trajnom izboru u Laboratoriju za fiziku mora i kemiju vodenih sustava Zavoda za istraživanje mora i okoliša Instituta Ruđer Bošković, kao i Instituta za jadranske kulture i melioraciju krša. Njegovo područje interesa su prvenstveno promjene razine mora, s naglaskom na meteorološke tsunamije i ekstremne razine mora, kao i njihov utjecaj na obalnu infrastrukturu. Također, Ivica Vilibić bavi se proučavanjem vodenih masa i temohaline cirkulacije u Jadranu i Sredozemlju, njihovom vezom s biogeokemijskim ciklusom u moru i živim svijetom (s naglaskom na područje Jadranskog mora), klimatskim simulacijama visoke razlučivosti, i drugim. Autor je na više od 170 međunarodnih znanstvenih radova, više od 100 konferencijskih priopćenja te ima preko 4800 citata (Web of Science) uz h-index 38. Značajan dio svog vremena Ivica posvećuje i razvoju hrvatske i globalne znanosti, kroz mnoge recenzije znanstvenih članaka (npr. časopisi Nature, Nature Communications, Science Advances, Global and Planetary Change, Journal of Geophysical Research, Geophysical Research Letters, i mnoge druge), glavno uredništvo časopisa Geofizika, kao i uredništvo u drugim međunarodnim časopisima (Natural Hazards, Acta Adriatica). Također, obnaša funkciju predsjednika Povjerenstva za prigovore pri Hrvatskoj zakladi za znanost, a dosada je (između ostalog) bio i predsjednik Odbora za etiku u znanosti i visokom obrazovanju, nacionalni predstavnik u Programskim odborima EU istraživačkih programa, i drugo. Dosad je bio koordinator ili voditelj na više od deset nacionalnih i međunarodnih projekata, pri čemu su projekti GLOMETS, AdriaClimPlus i AdriaClimRisk još u tijeku. Velik dio svoje karijere posvetio je izobrazbi mladih znanstvenika, pa je tako od 2008. godine mentorirao preko trideset poslijedoktorskih istraživača, doktorskih i diplomskih studenata, od kojih su mnogi danas i sami ugledni znanstvenici. U slobodno vrijeme možete ga naći s obitelji na planinskim vrhovima ili kako nastupa kao član pjevačke klape.

Dr. sc. Irena Ciglencečki-Jušić

Dr. sc. Irena Ciglencečki-Jušić je znanstvena savjetnica u trajnom izboru i voditeljica Laboratorija za fiziku mora i kemiju vodenih sustava od 2016. godine u okviru Zavoda za istraživanje mora i okoliša na Institutu Ruđer Bošković. Svoju istraživačku karijeru posvetila je istraživanju biogeokemijskog ciklusa sumpora (S) i ugljika (C), osobito u ekstremnim, hipoksičnim i anoksičnim uvjetima. Poseban naglasak daje specijaciji S vrsta i karakterizaciji organske tvari, posebno u istraživanju jedinstvenog, sulfidnog okoliša Rogozničkog jezera – Zmajeva oka, koje aktivno istražuje od 1990. g., kao i u procesima eutrofikacije Jadranskog mora, s naglaskom na sjeverni Jadran. Irena je sudjelovala na mnogim terenskim istraživanjima, uključujući i rad na meromiktičnom jezeru Pavin (Francuska). Autorica je stotinjak znanstvenih radova indeksiranih u Web of Science bazi, uključujući velik broj publikacija s mladim znanstvenicima, kao i i nekoliko poglavlja u knjigama. Irena vodi i akreditirani laboratorij za određivanje organskog C u prirodnim vodama i sedimentu. Aktivno sudjeluje u međunarodnoj znanstvenoj zajednici kroz članstva u relevantnim stručnim društvima i organizaciji međunarodnih radionica i konferencija. Usavršavala se na nekoliko međunarodnih institucija, od čega je važno spomenuti poslijedoktorsko usavršavanje na Sveučilištu Maryland (College Park, SAD) u grupi prof. dr. emeritusa G.R. Helza, kao i boravke na institutu Max-Planck u Njemačkoj u grupi prof. dr. Andrea i prof. dr. T. Ferdelmana. Do sada je vodila/vodi 9 znanstvenih (od toga 3 HRZZ, 1 UKF) i nekoliko nacionalno važnih stručnih projekata. Važan dio karijere posvetila je i vođenju mladih znanstvenika, osobito u području primjene okolišne elektrokemije te ekološkim istraživanjima u eutrofnih i hipoksično-anoksičnih sredina, pa je tako vodila ili komentirala devet doktorskih i poslijedoktorskih studenata. Tijekom karijere imala je nekoliko kraćih prekida dok je zbog diplomatske službe pratila supruga po svijetu. Slobodno vrijeme voli provoditi putujući s obitelji, a osim u laboratoriju, voli eksperimentirati i s modom, pa ju često možete vidjeti u jedinstvenim kombinacijama.

Extended abstract

Zmajevsko lake (or Rogoznica lake; ZO) is a marine lake at the Adriatic coast near Rogoznica village (Croatia). It is 13.5 m deep and has an area of 9904 m². ZO has been extensively researched since 1994 due to its peculiar biogeochemical cycle. Namely, during a year, the lake is mostly stratified with a pronounced pycnocline that separates the upper, oxic part, from the lower, anoxic part, where there is a high concentration of reduced sulphur species, in some years, reaching even millimolar values. The interface of these two parts is home to an abundant population of green and purple sulphur bacteria. This places ZO in the meromictic lake category regarding seasonal mixing, very much resembling Palau lakes. But, contrary to Palau lakes, every few years in early autumn, ZO abruptly mixes, becoming completely anoxic and vertically uniform regarding temperature and salinity, which has happened three times in the period 1994–2019. These events cause high mortality of aerobic organisms in the lake and the ecosystem never fully recovers. Recently, the abrupt anoxic mixing has happened two years in a row: in 2020 and in 2021. This, in combination with construction plans for the nearby area, raises the question of the lake's future in context of climate change and anthropogenic impact. The thesis tackles this question by analysing the past and present ZO physicochemical data, thus providing framework for future modelling endeavours.

An overview of the temperature, salinity, dissolved oxygen and reduced sulphur species time series collected throughout the vertical water column during 1996–2022 is presented. Firstly, by using the bathymetry data, it has been found that the oxic volume of water has reduced for 50% in the 27 years. Secondly, temperature and salinity data has been divided into surface (0 – 5 m average) and bottom (10 – 12 m average) data and analysed for these two layers using a linear model. The analysis shows that the surface layer is warming by 0.93 °C per decade, while the bottom layer is becoming more stagnant, indicating reduced transfer of heat between the layers. Salinity data has less obvious seasonal cycle and no detectable linear trend. However, from observations it appears that salinity is governed by a climate variability on a long-term time scale. Thirdly, comparing the yearly average salinity data to average monthly precipitation, it has been found that the salinity in the lake varies with precipitation and reflects dry and wet years by a 3 to 4-year cycle. The dry years have been connected to the halocline weakening and disappearance by the end of summer, which seems to be a precondition to the water column mixing. Moreover, by inspecting the thermal and haline contributions to density, it was shown that thermal contribution can destabilize the water column, while, in most situations, haline contribution tends to stabilize it.

The second part of the research investigates a series of short-term field campaigns during 2020–2025, when continuous temperature, conductivity and water level data were collected, joined by water sampling for nutrient analysis by a scuba diver. During the scuba diving mission, it was confirmed that there was no tunnel connecting ZO with the sea, as was the case for some of the Palau lakes when similar investigations were conducted. Yet, the connection exists through the small pores of the karstic rocks, especially through the two caves found in the lake.

This was further confirmed by the analysis of samples collected at the beginning of the tide and immediately before its end in the lake, which showed that seawater does not enter the lake directly, but rather as a mixture of lake water and underground freshwater that brings nutrients into the lake. By inspection of combined water level and temperature data, this laterally entering water was found

to reduce water temperature during warmer months and increase water temperature during colder months. In addition to being time-varying, comparison of temperature data collected at different locations across the lake showed that the effects of the entering water are also spatially variable. However, when compared with data from the center of the lake, it was concluded that the effects of tidally entering water on a short time scale are felt only at the lake–rocks boundary.

Temperature and conductivity datasets collected at the surface and near the bottom in the center of the lake revealed several key findings. First, it was shown that the surface layer exhibits strong seasonal temperature variability (~ 20 °C between February and July), confirming results from the previous research phase. Second, density calculations showed that in 2025 the lake was approximately ten times more stable in summer than in winter in terms of hydrostatic stability. When processing water-level data, ignoring density variations led to an error of approximately 5%. Lastly, water-level data collected in 1999, 2013, 2023, and 2025 were compared. Spectral analysis showed that the lake signal lags behind and is filtered relative to the sea signal. Moreover, this lag differs between years, showing an increasing trend from 2013 to 2025, indicating that the lake signal now lags more than it did previously, raising questions about the causes of this flow prolongation.

Numerical modelling was applied to ZO. The Delft3D FM FLOW module was selected and set up for thermohaline simulations of ZO. The grid consisted of 100 vertical layers with a vertical resolution of 0.14 m. The horizontal grid was constructed using the flexible mesh option and consisted of 525 triangular elements. Temperature and salinity profiles measured at ZO were used as initial conditions and for model verification, which was carried out using root mean squared error calculations. ERA5 reanalysis data – including 10 m wind, 2 m air temperature and dew-point temperature, 2 m relative humidity, total precipitation, and total cloud cover – were used as meteorological forcing.

The study included six sensitivity tests for the September–October 2023 stratification, each consisting of four to ten simulations, as well as six additional scenarios simulating the 2021 anoxic mixing event. The first set of simulations tested which of the nine ERA5 grid points surrounding ZO was most suitable for meteorological forcing. It was found that grid points classified as land in the ERA5 land–sea mask performed best, and further tests were conducted using point (43.75° N 16.00° E), point (43.75° N 16.25° E), or both. As this test also revealed overly strong vertical mixing, the next set of simulations examined wind scaling, whereby wind speeds were multiplied by factors ranging from 0.1 to 1.0. Additionally, a method accounting for wind direction was developed and applied in one simulation pair. Results showed that simulations without wind reproduced the deeper thermocline and halocline most accurately, while the surface thermocline and halocline were not reproduced in any model run.

Since field measurements and experience indicated that wind must play some role, the third test focused on adding evaporation and precipitation processes, which had previously been omitted. The goal was to reproduce the surface halocline when wind forcing is included in the simulation. It was concluded that neglecting evaporation resulted in slight salinity underestimation, while including evaporation led to slight overestimation; however, all simulations remained within one salinity unit of the measured profile. The most important outcome of this test was that, even with precipitation included, the surface halocline was still not successfully reproduced. Consequently, the fourth test examined scaled precipitation, in which ERA5 rainfall was multiplied by factors

between 1.0 and 4.0. Using two to three times more rainfall successfully reproduced the surface halocline, indicating that surface runoff contributes significantly to the freshwater input to ZO, potentially at a magnitude comparable to direct precipitation.

In all simulations, the surface pycnocline was too deep; therefore, the fifth and sixth tests investigated vertical turbulence parameterization. These tests examined, first, the turbulence closure scheme used in the model and, second, the vertical turbulent diffusivity coefficient. The results showed that turbulent vertical diffusivity was overestimated in the surface layer and underestimated in deeper layers, indicating a need for implementing user-defined, vertically varying turbulent diffusivity, particularly for short-term simulations.

Simulations of the 2021 mixing event showed that mixing can occur even in the absence of wind. Rainfall was found to have a stabilizing effect with respect to salinity but a destabilizing effect with respect to temperature. Furthermore, the simulations suggest that double diffusion may contribute to mixing near the pycnocline – an effect not investigated in previous studies of ZO mixing. Finally, a substantial temperature decrease, driven by increased cloudiness that suppressed daily surface heating, appears to have been the primary cause of the 2021 mixing event.

This research provides directions for future investigations of vertical mixing in ZO, both historical and ongoing. One key conclusion is the need for continuous monitoring of both thermal and haline stratification in the lake at high spatial resolution. Another recommendation is to continue seasonal sampling of laterally entering water to determine its seasonal variability and to enable the development of additional boundary conditions for numerical modelling. This effort would benefit from collaboration with experts from other disciplines, such as coastal civil engineers and hydrogeologists. Additionally, long-term (multi-year), continuous, and synchronized measurements of sea and lake water levels are needed to improve understanding of lake volume changes and to support water-level forecasting for sampling campaigns and model forcing. Extra efforts should be taken for understanding the double diffusive mixing in ZO. Finally, numerical modelling with Delft3D FM FLOW has shown promising results and its application for ZO should be continued with improved wind representation and, subsequently, with inclusion of the water-quality module to simulate oxygen and sulfide cycles in the lake.

Sadržaj

1 UVOD	1
1.1 Kategorizacija jezera	1
1.2 Vertikalni profil jezera	3
1.3 Važnost istraživanja i očuvanja jezera	4
1.4 Morska jezera	7
1.5 Jezero Zmajevsko oko	14
1.6 Fizičko – kemijska svojstva jezera: pristupi u istraživanjima	17
1.6.1 Dugoročna istraživanja jezera	17
1.6.2 Kratkoročna istraživanja jezera i izmjena vode s okolinom	20
1.6.3 Numeričko modeliranje jezera	26
1.7 Ciljevi i hipoteze rada	28
 2 PROMJENE U ZMAJEVOM OKU NA DUGOROČNOJ VREMENSKOJ LJESTVICI	 31
2.1 Materijali i metode	31
2.1.1 Materijali	31
2.1.1.1 Vertikalni profili ZO-a	31
2.1.1.2 Oborina	32
2.1.2 Metode	32
2.1.2.1 Priprema dugoročnih podataka	32
2.1.2.2 Analiza gustoće i raslojavanja	36
2.2 Rezultati	38
2.2.1 Koncentracija RSS i OK	38
2.2.2 Temperatura i salinitet	39
2.2.3 Oborina i hidrostatička stabilnost	41
2.2.4 Termalni i halini doprinosi gustoći i hidrostatičkoj stabilnosti	44
2.3 Diskusija	46
2.3.1 Širenje anoksičnog dijela jezera	46
2.3.2 Zagrijavanje površinskog sloja i stagnacija pridonog sloja	48
2.3.3 Oborina kao dugogodišnji pokretač varijabilnosti saliniteta	49
2.3.4 Varijabilnost hidrostatičke stabilnosti	51
 3 KRATKOROČNA ISTRAŽIVANJA ZMAJEVOG OKA I NJEGOVA IZMJENA VODE S MOREM I KRŠEM	 53
3.1 Materijali i metode	53
3.1.1 Materijali	54
3.1.1.1 Uređaji korišteni za kontinuirana mjerenja	54
3.1.1.2 Uzorkovanje vode	57
3.1.2 Metode	57
3.1.2.1 Analiza kontinuiranih mjerenja	57
3.1.2.1.1 Razina vode	59
3.1.2.1.2 Temperatura	63
3.1.2.1.3 Vodljivost, salinitet i gustoća	63

3.1.2.2 Ostali fizičko – kemijski podaci	64
3.2 Rezultati	64
3.2.1 Temperatura	64
3.2.2 Salinitet	72
3.2.3 Gustoća	74
3.2.4 Razina vode	75
3.2.5 Fizičko – kemijska svojstva uzorkovane vode	85
3.3 Diskusija	89
3.3.1 Interpretacija vremenskih nizova temperature vode	89
3.3.2 Uloga plime u dinamici temperature uz rub jezera	90
3.3.3 Koherentnost signala u jezeru i moru	91
3.3.4 Kašnjenje plimnog signala u jezeru u odnosu na more	93
3.3.5 Salinitet i hidrostatička stabilnost	94
3.3.6 Korištenje aproksimirane jednadžbe za razinu vode	96
3.3.7 Nutrijenti i kemijski parametri	96
3.3.8 Prijedlozi za daljnja istraživanja	98
4 MODELIRANJE DINAMIKE JEZERA	100
4.1 Materijali i metode	101
4.1.1 Opće postavke modela	101
4.1.2 Početni uvjeti i rubni uvjeti (forsiranje modela)	102
4.1.3 Opis simulacija	106
4.1.3.1 Testovi osjetljivosti	107
4.1.3.2 Simulacije miješanja 2021. godine	109
4.2 Rezultati	110
4.2.1 Testovi osjetljivosti	110
4.2.1.1 Utjecaj odabira točke iz ERA5 mreže	110
4.2.1.2 Skaliranje brzine vjetra	112
4.2.1.3 Procesi oborine i isparavanja	115
4.2.1.4 Vertikalna turbulencija	119
4.2.2 Simulacije vertikalnog miješanja u listopadu 2021. godine	122
4.3 Diskusija	128
4.3.1 Testovi osjetljivosti – opći pregled	128
4.3.2 Utjecaj oborine na miješanje 2021. godine	129
4.3.3 Utjecaj vjetra na miješanje 2021. godine	130
4.3.4 Ostali procesi koji utječu na miješanje	131
4.3.5 Prijedlozi za daljnji razvoj modela	132
5 ZAKLJUČCI DISERTACIJE	134
Literatura	138
Dodatak A	152
Dodatak B	158
Dodatak C	161
Životopis doktorandice	162
Znanstvena publikacija doktorandice	162

Popis skraćenica korištenih u radu

BVF	kvadrirana Brunt-Väisälä frekvencija
LSM	maska kopno-more
OK	otopljeni kisik
PTM	potpovršinski temperaturni maksimum
RMSE	korijen srednje kvadratne pogreške
RSS	reducirane specije sumpora
S	salinitet
SSI	Schmidtov indeks stabilnosti
T	temperatura
VTD	vertikalna turbulentna difuzivnost
ZO	Zmajevo oko

1 UVOD

1.1 Kategorizacija jezera

Od ukupne vode na Zemlji 96,5% vode nalazi se u morima, dok voda u jezerima čini tek 1,3% vodnih rezervi (Shiklomanov, 1993). Preostala voda raspoređena je u podzemne vode, ledenjake i trajni snježni/ledeni pokrivač, rijeke, atmosferu te žive organizme. Iako se može činiti da su jezera dugoročni spremnici vode, ona mogu biti vrlo kratkog životnog vijeka, primjerice tek nekoliko tjedana u slučaju jezera nastalih odronima tla (Meybeck, 1995). Najstarija jezera su nastala tektonskim pomicanjima, pa je tako jezero Bajkal staro otprilike 20 milijuna godina. Po postanku, jezera mogu biti i vulkanska, ledenjačka, riječna i kraterska te ona koja spadaju u kategoriju „razni načini postanka“ (Meybeck, 1995). Primjerice, u potonju kategoriju mogu se svrstati krška jezera (ili jezera otapanja; engl. *solution lakes*), jezera izdubljenja vjetrom (engl. *wind deflation lakes*) te već spomenuta jezera nastala odranjanjem (engl. *landslide lakes*). Prema brojnosti najviše ima ledenjačkih jezera. Iako su po brojnosti iduća najveća kategorija jezera riječnog postanka, iza kojih slijede tektonska jezera, riječna jezera zauzimaju četiri puta manju površinu od tektonskih jezera. Najveće jezero na svijetu – Kaspijsko jezero – upravo je tektonskog porijekla i staro nekoliko milijuna godina (npr. Yanina i sur., 2018). Najzahtjevnije je određivanje brojnosti jezera u kategoriji vrlo malih jezera (površina $< 0,01 \text{ km}^2$) jer kod takvih jezera granica nije uvijek sasvim jasna, kao što je to slučaj s primjerice močvarnim poljima i plitkim jezerima (dubina $< 1 \text{ m}$). Stoga se za ovu kategoriju u literaturi brojnost najviše i razlikuje te ovisi o autoru i odabranoj metodi procjene (Meybeck, 1995; Wetzel, 2001b).

Prema tipu održavanja vodne bilance, jezera su endoreična ili egzoreična (Meybeck, 1995). Endoreična jezera mogu imati pritoke, ali nemaju površinsko otjecanje. Ta jezera gube vodu isključivo isparavanjem i podzemnim tokovima te zbog toga često imaju visoke koncentracije soli. Takvo je, na primjer, Kaspijsko jezero, Veliko slano jezero (engl. *Great Salt Lake*), jezero Urmia (Iran), Mrtvo more, Aralsko jezero i jezero Issyk Kul (Kirgistan). Jezera koja imaju površinsko otjecanje (najčešće u rijeku ili more) nazivaju se egzoreičnima te je takva većina slatkovodnih jezera. Jezero vodu može dobivati iz atmosfere (oborinom), površinskim pritjecanjem (pritoci

rijeka, potoka, mora i/ili slijevanje oborinskih voda) i podzemnim vodama (pritjecanje vode). Pomak od ravnotežnog stanja za bilo koju od spomenutih komponenti vodne bilance dovodi do promjene količine vode u jezeru, što se najjednostavnije vidi u promjeni razine vode (Winter, 1995).

Još jedna kategorizacija jezera, koja se često miješa s prethodno navedenom, jest prema tome je li jezero talasično ili atalasično. Talasična jezera su vezana za obližnje more ili ocean, dok su atalasična dublje u kopnu te nemaju takvu vezu, a oba pojma obuhvaćaju šire područje sliva. Dakle, jezero može biti endoreično (visokog saliniteta; prevladavajućeg procesa isparavanja) i talasično (npr. vezano podzemnim tokovima za more). Primjer jednog takvog jezera jest Rogozničko jezero – Zmajevsko oko (Republika Hrvatska) (Ciglencečki *i sur.*, 2017).

Jezera također možemo podijeliti i prema tipu izmješavanja, odnosno, prema čestini i opsežnosti cirkulacije vode kroz jezero u odnosu na njegovu vertikalnu os. Jezera kod kojih barem jednom godišnje dolazi do potpune izmjene vode između površine i dna nazivamo monomiktičnim jezerima, a sam proces miješanja holomiksijom (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017). Kod takvih je jezera nakon holomiksije vodeni stupac ujednačen po svojim fizičko – kemijskim svojstvima, o čemu će više riječi biti u jednom od narednih odlomaka. Jezera kod kojih se takav proces odvija dvaput godišnje nazivaju se dimiktičnim jezerima te su to obično jezera čija je površina dio godine zaleđena. Ako je jezero tijekom cijele godine zaleđeno, tada je takvo jezero amiktično (Wetzel, 2001b). Jezera kod kojih ciklus izmješavanja nije pravilan nazivaju se oligomiktičnima (ako je holomiksija rijetka pojava na višegodišnjoj vremenskoj ljestvici) i polimiktičnima (ako je holomiksija česta kroz godinu). Posljednju kategoriju čine meromiktična jezera. U meromiktičnim jezerima cirkulacija doseže samo do određene dubine (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017), to jest, dublji slojevi jezera se ne miješaju (kao što je slučaj kod amiktičnih jezera), dok se ostatak jezera vodi režimom miješavanja kao kod monomiktičnih, dimiktičnih, oligomiktičnih ili polimiktičnih jezera.

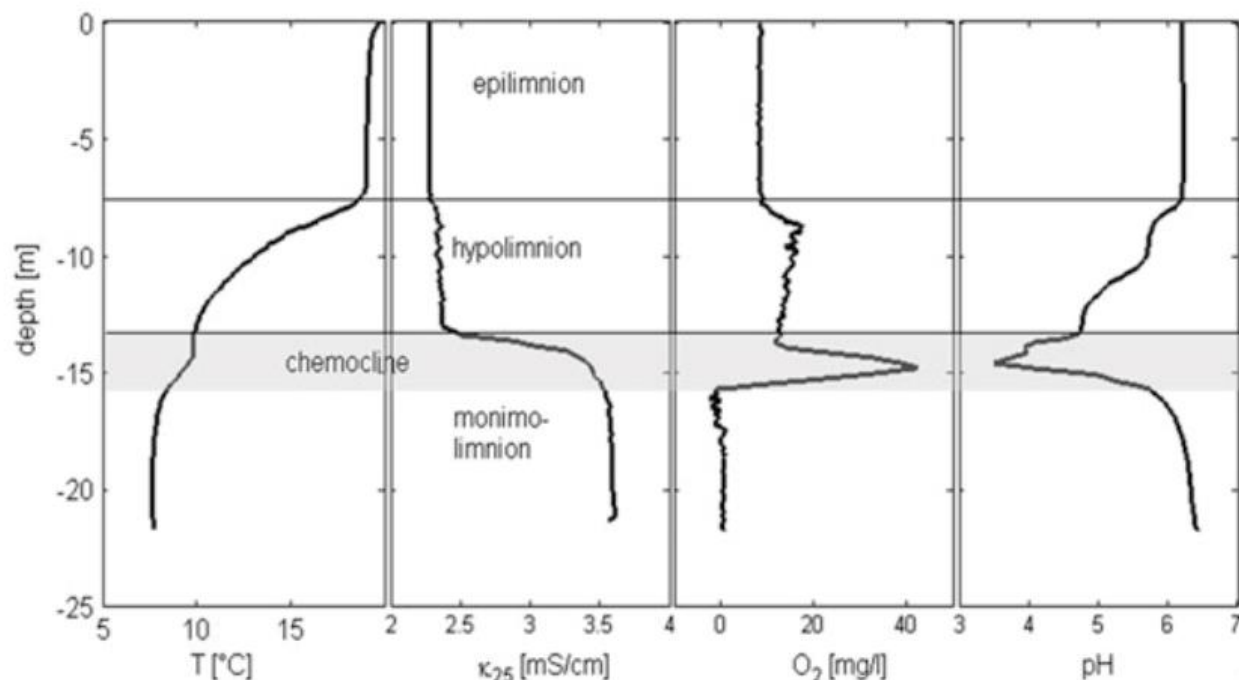
Tip ili režim izmješavanja ovisi o klimi na području gdje se jezero nalazi te donosu tvari s kopna ili kroz podzemlje. Tako ćemo amiktična i dimiktična jezera najčešće naći u polarnim područjima, monomiktična i oligomiktična u nižim geografskim širinama, a polimiktična na visokim

nadmorskim visinama (Wetzel, 2001b). Meromiktična jezera pak često nastanu na mjestima bivših rudnika ili vulkanskih kratera, gdje je znatno otapanje obogaćenih stijena, a mogu biti uzrokovana i dotokom vode višeg saliniteta zbog svoje veze s morem. Meromiksija je uobičajena pojava u slanim jezerima radi hidrostatski stabilizirajućeg učinka koje halino raslojavanje ima na vodeni stupac. Prema nastanku meromiksije, jezera možemo podijeliti na ektogena (meromiksija uzrokovana vanjskim dotokom), krenogena (meromiksija uzrokovana podzemnim vodama) i biogena (meromiksija uzrokovana raspadom organskog materijala). Ova podjela je naknadno doradana pa se ektogenom smatra meromiksija uzrokovana dotokom vode drugačijeg saliniteta, većeg turbiditeta te podzemnim vodama, dok se endogenom smatra ona koja nastaje raspadom organskog materijala ili izlučivanjem soli prilikom zaleđivanja jezera (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017). Zbog slabijeg intenziteta i dosega miješanja, u meromiktičnim jezerima u pridnenim slojevima uglavnom vladaju anoksični uvjeti, to jest, okoliš u kojemu nema slobodnih molekula kisika i kojeg nastanjuju anaerobni organizmi (Schultze *i sur.*, 2017; Zadereev, Gulati i Camacho, 2017). Dubina granice između anoksičnog i oksičnog dijela obično je određena raspodjelom gustoće kroz vodeni stupac koja ima sezonsku varijabilnost (Rogozin *i sur.*, 2017).

1.2 Vertikalni profil jezera

Svojstvo vode koje upravlja vertikalnom cirkulacijom u jezerima jest upravo njezina gustoća. Pokazano je da gustoća ovisi o fizičko – kemijskim svojstvima vode. Ta svojstva čine temperatura vode i u njoj otopljene tvari (od kojih je najčešća tvar natrijev klorid) te tlak vode. Zbog različitog zagrijavanja i hlađenja s površine (npr. dnevni i godišnji ciklus) ili kroz korito (npr. geotermalni izvori, pritjecanje podzemne vode), u jezeru se stvaraju slojevi različitih temperatura (Wetzel, 2001a), proces koji se naziva raslojavanje (engl. *stratification*). Sloj u kojemu je vertikalni gradijent temperature najveći zove se termoklina (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017). Raslojavanje može biti uzrokovano ili potpomognuto različitim koncentracijama otopljenih tvari u vodenom stupcu (npr. pridneno otapanje stijena, površinski prtok slatke vode, itd.). Sloj s najvećim gradijentom u otopljenim tvarima naziva se kemoklina. U specifičnom slučaju kada se radi o otopljenom kisiku (OK), u literaturi je čest naziv oksiklina. Za jezera kod kojih je otopljena tvar koja znatno utječe na raslojavanje sol koristi se pojam haloklina. U slatkovodnim jezerima termoklina se podudara s piknoklinom – slojem najvećeg gradijenta gustoće. Primjer vertikalne raspodjele u vodenom stupcu nalazi se na slici 1.1. Na slici su također prikazani i uobičajeni nazivi

za pojedine dijelove jezera: dio ispod kemokline koji postoji u meromiktičnim jezerima i ne miješa se s ostatkom jezera naziva se monimolimnion. Iznad kemokline nalazi se miksolimnion kojeg čine gornji sloj, epilimnion, i donji sloj, hipolimnion (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017). Epilimnion je pod stalnim utjecajem atmosferskih zbivanja i dobro izmiješan, dok se hipolimnion miješa s gornjim slojem samo povremeno. Jezera koja nisu meromiktična sastoje se samo od miksolimnija.



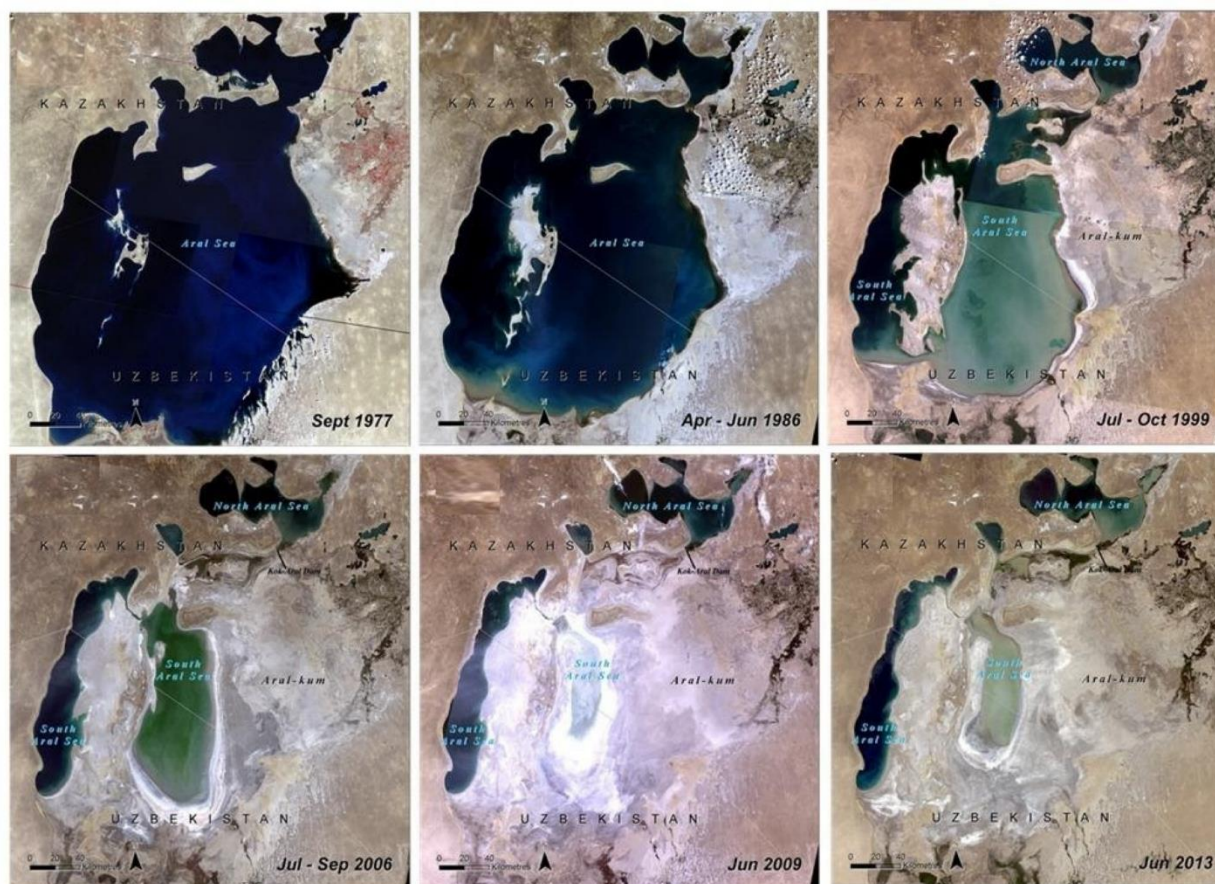
Slika 1.1. Vertikalni profil temperature, električne vodljivosti, koncentracije otopljenog kisika i pH. Mjerenja za jezero Felsensee (Njemačka) na dan 18. rujna 2006. Preuzeto i prilagođeno iz Boehrer, von Rohden i Schultze (2017).

1.3 Važnost istraživanja i očuvanja jezera

Interdisciplinarna znanost koja se bavi proučavanjem jezera zove se limnologija. Osim zbog opće želje za proširivanjem znanja, ljudima je važno proučavati jezera zbog njihova gospodarskog značaja i utjecaja na kvalitetu života. Naime, jezera se često koriste kao spremnici pitke vode, za navodnjavanje, ishranu, sportske i turističke djelatnosti te proizvodnju električne energije (Xia i sur., 2025). Jezera također utječu na klimu područja. Poznati primjer su Velika jezera na granici Sjedinjenih Američkih Država i Kanade gdje je numeričkim simulacijama pokazano kako jezera

utječu na ublažavanje dnevnih minimuma i maksimuma temperature zraka, povećanje oborine u hladnom i njeno smanjenje u toplom dijelu godine te oslabljivanje anticiklona u hladnom dijelu godine (Notaro *i sur.*, 2013). Uz direktnu ekonomsku važnost, jezera su važna i kao izolirani ekosustavi, kolijevke biološke raznolikosti, u kojima često žive endemske vrste (Jelić *i sur.*, 2008; Boedeker *i sur.*, 2018; Sheraliev *i sur.*, 2022; Fuke *i sur.*, 2024, ...). Zbog svega navedenoga, očuvanje jezera bitan je zadatak svih nas, izrazito kad se u obzir uzme da su zbog brzog reagiranja na promjene u okolišnim uvjetima jezera vrlo ugrožena klimatskim promjenama i antropogenim onečišćenjima (Råman Vinnå *i sur.*, 2021; Rad *i sur.*, 2022; Woolway, Sharma i Smol, 2022).

Promjene koje se najčešće bilježe i očekuju u budućoj klimi su skraćivanje trajanja ledenog pokrivača na jezerima i povećanje površinske temperature (što posljedično vodi do promjena u režimu miješanja) te smanjenje razine vode i površine jezera (Woolway *i sur.*, 2020). Svaki od navedenih procesa ima svoje posljedice na ekosustav jezera, a često su procesi i njihovi utjecaji isprepleteni. Tako povećanje temperature vode ubrzava metabolizam primarnih proizvođača (što omogućava hiperprodukciju i štetno cvjetanje algi; npr. Wang *i sur.*, 2021) te povećava hidrostatičku stabilnost vodenog stupca (Woolway *i sur.*, 2019), što pak smanjivanjem izmjene tvari između površine i dubljih slojeva otežava regeneraciju jezera. Još jedna posljedica povećanja temperature jest manja topljivost kisika u vodi što može uzrokovati njegov nedostatak i gušenje aerobnih organizama, proces koji je već zabilježen globalno, a kojim su najviše ugrožena mala jezera (Jansen *i sur.*, 2024). Jedna od ljudskih djelatnosti koja direktno utječe na kvalitetu i razinu vode u jezeru jest navodnjavanje i građenje brana. Naj(ne)slavniji primjer loše vođenog vodnog inženjeringa jest slučaj Aralskog jezera (poznatijeg pod nazivom *Aralsko more*) čija je razina vode tijekom 44 godine u prosjeku padala čak 56 cm po godini, nakon čega se drugačijim gospodarenjem vode godišnji pad sveo na i dalje ekstremnih 38 cm godišnje (Wang *i sur.*, 2020). Time je jezero dovedeno do toga da danas ima 10-15% svog volumena u usporedbi s volumenom iz sredine prošlog stoljeća (slika 1.2) što je dovelo do gotovo potpunog prekida gospodarskih djelatnosti u regiji (Zavialov, 2005). Još jedna posljedica aralske katastrofe jest intenzivno zaslanjivanje jezera, pri čemu je salinitet porastao za oko 20 jedinica (s 10 na 30; Waiser i Robarts, 2009) što, kako je već spomenuto, dovodi do povećane stabilnosti vodenog stupca, manji doseg sezonskog miješanja te postupno smanjenje koncentracije OK. Stoga, jezera su sustavi osjetljive ravnoteže te pomak u jednom parametru može uzrokovati vrlo naglo propadanje cijelog sustava.



Slika 1.2. Satelitske snimke Aralskog jezera napravljene tijekom 36 godina; isušivanje jezera i djelomično oporavljanje u nedavnije doba. Preuzeto iz Anchita i sur. (2021).

Štetan utjecaj ljudskih djelatnosti na jezera sve se češće uočava i na području Republike Hrvatske. Najveće ugroze predstavljaju promjena korištenja i oblika obale te slivnog područja (npr. građenje turističkih staza, betoniranje prometnica, prenamjena polja u poljoprivredna; Rubinić i Katalinić, 2014; Martinić *i sur.*, 2019), povećan unos nutrijenata i nakupljanje organske tvari (tzv. eutrofikacija, Simonović *i sur.*, 2023) i povećana potreba za pitkom vodom (Bonacci, 1993). Na žalost, u nekim sustavima već je zabilježen zabrinjavajući porast temperature vode (Ciglencečki *i sur.*, 2015), dok se za druge sustave takav porast očekuje narednih desetljeća (Brkić i Larva, 2024). Situacija s jezerima je možda i ozbiljnija, ali to je teško potvrditi ili opovrgnuti radi nedostatka recentnih višegodišnjih limnoloških istraživanja. Jedno od rijetkih takvih istraživanja provedeno je na Plitvičkim jezerima gdje je povećanje u oborini i temperaturi zraka dovedeno u vezu s povećanim dotokom vode i povišenjem temperature vode dijela Plitvičkih jezera (Sironić *i sur.*,

2017). Kasnije istraživanje (Vurnek *i sur.*, 2021) pokazalo je kako su u razdoblju 2006. – 2017. porasli tvrdoća vode i nitriti (čest indikator pada kvalitete vode), dok se temperatura vode snizila. No, monitoring za to istraživanje proveden je samo u toplijem dijelu godine (travanj – listopad) te nije jasno kakva je stopa promjene temperature za cijelo razdoblje niti kakva je veza lokalne klime s primijećenim promjenama. Što se tiče područja fizičke limnologije, za jezera u Republici Hrvatskoj postoji manjak istraživanja koja se bave utjecajem klimatskih promjena i čovjekova djelovanja na vodnu bilancu i stabilnost vodenog stupca te ih je u literaturi prisutno samo nekolicina (npr. Rubinić *i sur.*, 2010; Rubinić i Katalinić, 2014; Ciglencečki *i sur.*, 2015, 2017; Šarović i Klaić, 2023).

1.4 Morska jezera

Od ukupne vode u jezerima, procjenjuje se da je 54% slatkovodno, dok je 46% slano (Shiklomanov, 1993). Definicija slanog jezera razlikuje se među autorima te ovisi o tome kojom se znanstvenom disciplinom autor bavi. Na primjer, biološka literatura slana i slatkovodna jezera razmatra kroz omjer vrsta i granice u kojima one toleriraju ili ne toleriraju prisutnost soli (Hammer, 1986). Opširnija ekološka literatura slana jezera definira preko koncentracije otopljene čvrste tvari i ljudske granice osjetljivosti na slanost ($< 3 \text{ g/L}$; Williams, 1964), dok geokemijska literatura više opisuje specifičan sastav i omjer iona u vodi (Deocampo i Jones, 2014). Literatura iz područja fizike jezera također nerijetko koristi definiciju preko čvrste tvari i saliniteta, pri čemu su razlike u vodljivosti vode od izrazitog interesa (npr. Bohrer i Schultze, 2008).

Umjesto na talasična i atalasična, pojedini autori slana jezera dijele na obalne lagune i jezera zaslanjena zbog isparavanja (Meybeck, 1995). Naziv „obalna laguna“ sporan je jer izaziva nejasnoće u nazivlju. Naime, nije jasno koja je granica između pojma obalne lagune u oceanografskom smislu i pojma morskog jezera u limnološkom smislu, kako ga definiraju Mackenzie *i sur.* (1995), iako se oba izvora nalaze unutar iste knjige (Lerman, Imboden i Gat, 1995). Tako Mackenzie *i sur.* (1995) jezero Solar (Egipat) nazivaju morskim jezerom, dok bi ga prema Meybecku (1995) trebali svrstati u obalnu lagunu, unatoč tome što jezero nema vidljivu vezu s morem (npr. kanal) i što, za razliku od lagune Maracaibo – koja se isto kategorizira kao jezero (Meybeck, 1995) – ima tek povremene plimne oscilacije čiji utjecaj slabi udaljavanjem od granice s morem. Kako bi se izbjegle nejasnoće, u ovom radu definirat ćemo morska jezera kao

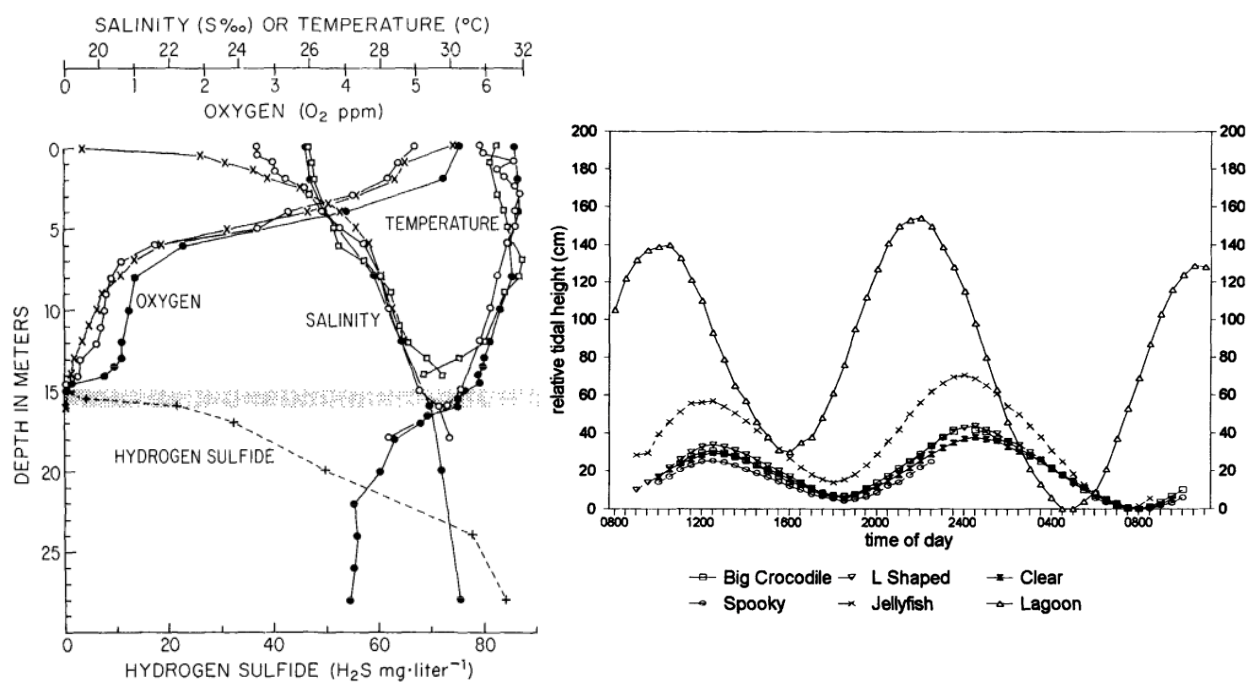
ona jezera koja imaju vezu s morem (podzemnu ili nadzemnu) te kod kojih se morski utjecaj očituje u kemijskom sastavu vode – povećanom udjelu kloridnih, natrijevih, sulfatnih, magnezijevih i kalcijevih iona (odnosno, onih iona koji čine 99,9% iona morske vode i time ukazuju na znatan morski donos; Millero, 2005). Dakle, donos morske vode ujedno je i uzrok slanosti morskih jezera. U literaturi se često spominju morska jezera Mangrove (Bermudi), Jellyfish (Republika Palau), Solar (Egipat) i Zmajevsko oko (Republika Hrvatska) (Mackenzie i sur., 1995; Ciglencić i sur., 2017). No, postoje i jezera koja nemaju aktivnu vezu s morem, a kod kojih je ipak prisutna voda morskog porijekla velike starosti u monimolimniju. Takva su jezera nastala prilikom promjene razine mora ili tla, kada je dio mora ostao zarobljen dublje u kopnu te je potom gornje slojeve razrijedila oborinska voda ili voda iz podzemnih i nadzemnih pritoka. Preostala slana jezera nastala su uglavnom isparavanjem (to jest, gubitkom vode radi klime područja), otapanjem slanih depozicija i stijena već prisutnih u tlu ili donosom soli pritocima (Meybeck, 1995). Poznati primjeri takvih jezera u svijetu su jezero Issyk-Kul (Kirgistan), Aralsko jezero (granica Kazahstana i Uzbekistana), Mrtvo more (granica Izraela i Jordana) i Veliko slano jezero (Sjedinjene Američke Države).

Posebno zanimljiva kategorija slanih jezera (neovisno o porijeklu soli) su tzv. heliothermalna jezera. To su jezera u kojima je halina stratifikacija iznimno izražena pa je miješanje među vertikalnim slojevima zanemarivo, a površinsko zagrijavanje toliko da energija apsorbirana u epilimniju može uzrokovati temperaturne ekstreme do 90 °C (Kirkland, Bradbury i Dean, 1980). Zanimljiva jest ekonomska iskoristivost takvih jezera u kojima se javljaju potpovršinski temperaturni maksimumi, izrazito kada se razmotri da kod određenih jezera pojava nije sezonska, već cjelogodišnja (npr. jezero Ursu, Rumunjska; Alexe i Serban, 2014). Naime, uz velike količine akumulirane Sunčeve energije, sloj vode debljine 1 m u kojem se ne odvija miješanje ima jednak učinak toplinske izolacije kao ploča stiropora debljine 5 cm. Unatoč tome, u literaturi su istraživanja heliothermalnih jezera slabo zastupljena. Jedno nedavno istraživanje (Izhitskiy i sur., 2021) pokazalo je kako su se u dijelu Aralskog jezera, zbog već spomenutih promjena, stvorili uvjeti za potpovršinski maksimum te se ono trenutno smatra najvećim heliothermalnim jezerom u svijetu. U Egiptu, u malom jezeru Solar, je pak izmjeren potpovršinski maksimum od 60,5 °C na dubini između 2,5 i 3 metara (Cohen i sur., 1977). U Republici Hrvatskoj je takva pojava zabilježena u srpnju 1988. u estuariju Krke kada je potpovršinski maksimum iznosio 31 °C, što je u to doba bila rekordna

vrijednost izmjerena u Jadranu (Legović, Gržetić i Žutić, 1991), i u jezeru Zmajevu oko, gdje je iznosio 32 °C na dubini 6 m u srpnju 2013. godine (Marguš *i sur.*, 2023).

Za ovo istraživanje važan sustav morskih jezera su jezera u Republici Palau koju čini skup karbonatnih otočića u zapadnom Tihom oceanu. Zanimljivo je da su otoci bili naseljeni veći dio ljudske povijesti, s iznimkom razdoblja između 1200. i 1600. godine tijekom kojega su bili napušteni iz neobjašnjenih razloga. Također, jezera dugo nisu istraživana jer ih je lokalno stanovništvo izbjegavalo radi nepristupačnosti terena, nedostatka pitke vode i priča o duhovima koji opsjedaju jezera. Ipak, jezera su opsežnije proučavana tijekom 18 godina u drugoj polovici 20. stoljeća te su rezultati tih istraživanja obuhvaćeni u radu Hamner i Hamner (1998). Ondje je izneseno kako je klima u Palau tropska vlažna s prosječnom mjesečnom oborinom 20 do 40 cm, dok su vjetrovi niskog intenziteta i postojani s četiri veće tropske oluje tijekom godine. Smatra se kako je uzrok toliko morskih meromiktičnih jezera u Palau izdignuta krška topografija i okolno raslinje. Takva topografija omogućava cirkulaciju vode između jezera i okoliša te štiti jezera od miješanja vjetrom, no također prigušuje oscilacije iz mora te one uglavnom ne doprinose znatno miješanju jezera. Drugi razlog je klima, koja ne dopušta velike oscilacije površinske temperature te osigurava dovoljno oborine za cjelogodišnju hidrostatičku stabilnost jezera. Temperature u površinskom sloju kreću se između 28 i 32 °C, a razlika između površine i dna u nekim jezerima je i po deset jedinica, pri čemu je pridneni salinitet blizak onome u obližnjem oceanu (~ 33). Tijekom 18 godina proučavanja jezera se nisu vertikalno miješala, dok analiza sedimentnih jezgri u jezeru Jellyfish pokazala je kako se takav događaj nije dogodio najmanje 100 godina. No, istraživanje velike populacije meduza, po kojima je jezero i dobilo ime, ukazalo je na mogućnost da je jezero izolirano od mora i meromiktično čak nekoliko tisuća godina. Također je otkriveno kako populacija meduza dnevno migrira s istoka na zapad, a gustoća je mjestimično i do 1 000 jedinki po m². Meduze su bezopasne za ljude i zanimljive zlatne boje pa je jezero iznimno privlačno ronionicima. Palau jezera su eutrofna radi velikih količina organske tvari koja dolazi iz okoline i koja se proizvodi u jezeru što pak uzrokuje nestašicu kisika u dubljim slojevima (Hamner i Hamner, 1998). Tako je i jezero Jellyfish anoksično ispod 15 m dubine, dok se na granici oksičnog i anoksičnog dijela jezera nalazi sloj u kojem obitavaju ljubičaste sumporne bakterije (slika 1.3, lijevo). Jezera izmjenjuju vodu s obližnjim lagunama direktno (podzemnim tunelima) ili indirektno (kroz okolne stijene), pri čemu se u potonjem slučaju jezerska i morska voda miješaju s vodom iz vodne leće koja se nalazi u karbontanoj pregradi između jezera i lagune. Promjene razine vode

ovise o promjenama morske razine, a u odnosu na nju su prigušene i kasne u fazi, intenzitet čega ovisi o već spomenutoj vrsti veze između jezera i lagune (slika 1.3, desno). Direktna veza je brža, omogućava veću izmjenu tvari između mora i jezera pa kroz nju prolaze i veći organizmi (npr. larve koje ne mogu proći kroz pukotine u kršu). Također, vrsta veze utječe i na izgled vertikalnog profila jezera, o čemu će više riječi biti u potpoglavlju 1.6.2.

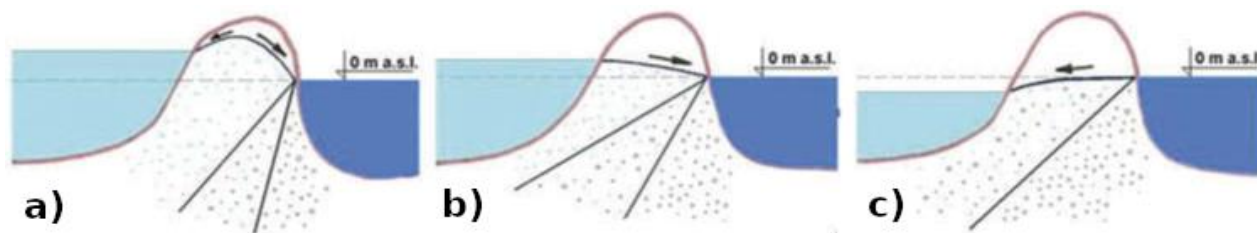


Slika 1.3. Lijevi graf prikazuje vertikalni profil jezera Jellyfish mjeren 1979. godine (preuzeto iz Hamner, Gilmer i Hamner, 1982). Osjenčani dio na 15 m dubine označava sloj kemokline u kojem obitavaju ljubičaste sumporne bakterije. Desni graf prikazuje promjene razine vode u pet palauških jezera u usporedbi s razinom u obližnjoj laguni (preuzeto iz Hamner i Hamner, 1998).

Klima na područjima uz Jadran manje je vlažna i s većim godišnjim amplitudama temperature u usporedbi s onom u Palau. S druge strane, vlažnija je nego, primjerice, u Egiptu gdje se nalazi jezero Sinai koje je zaslanjeno isparavanjem. Stoga, klima u jadranskoj regiji ne podržava nastajanje slanih jezera procesima isparavanja, no ipak nalazimo sustav nekoliko malih, slanih jezera u Bosni i Hercegovini (naziva Slana jezera ili Panonska jezera; grad Tuzla) čiji je visok salinitet usporediv sa salinitetom Jadranskog mora, a uzrokovan otapanjem rudne soli (Nezirović, 2016). U literaturi je vrlo malo podataka dostupno o ovim jezerima te su malobrojni članci

uglavnom iz područja turizma i geografije (npr. Nezirović, 2016; Nezirović i Krdžalić, 2024). Ostali slani sustavi su većinom obalne lagune (npr. laguna Lesina u južnoj Italiji, Roselli *i sur.*, 2009) i morska jezera. Krajolik uz obale Jadranskog mora je uglavnom krški, izgrađen od poroznih karbonatnih stijena, s izrazitom podzemnom cirkulacijom koja ide i do dubine 40 – 50 m ispod razine mora i uzrokuje zanimljive krške tvorevine (Fleury, Bakalowicz i de Marsily, 2007). Jedna od njih su i krške rijeke. Hrvatska obala ima relativno mali broj površinskih voda, tek deset razmjerno malih krških rijeka, od kojih najveći srednji godišnji protok ima rijeka Neretva (Barić, Grbec i Bogner, 2008). Duž obale nalazimo i tzv. anhijaline špilje ispunjene vodom u kojima je prisutno halino raslojavanje (npr. Žic, Truesdale i Cukrov, 2008; Cuculić *i sur.*, 2011). Još jedna pojava su i krška jezera koja nisu sva morska jezera. Dva slatkovodna jezera su Vransko jezero na otoku Cresu površine 5,8 km² i Vransko jezero u blizini grada Biograda površine 30,7 km² (Barić, Grbec i Bogner, 2008). No, u Vranskom jezeru kraj Biograda zabilježene su povremene slane intruzije (pritoci slane vode) koje se odvijaju kroz karbonatnu pregradu između jezera i mora, a koje mogu naglo dići salinitet u jezeru (zabilježen klorinitet do 6500 mg L⁻¹; približno salinitetu 11) (Rubinić *i sur.*, 2010). Kako smo već spomenuli, povećanje saliniteta otežava sezonsku obnovu jezera, a uz to direktno ugrožava i slatkovodne vrste koje u njemu žive te uzrokuje povremenu anoksiju na dnu jezera. No, unatoč zaslanjivanju, Vransko jezero je tijekom godine još uvijek vrlo dobro izmiješano, odnosno, polimiktično (Batina, Cukrov i Denona, 2025). Čestina i intenzitet slanih intruzija ovise o relativnom odnosu razine mora i razine vode u jezeru (slika 1.4) te će s primijećenim (Rubinić i Katalinić, 2014) i očekivanim porastom morske razine biti nužno voditi dodatnu brigu o očuvanju Vranskog jezera.

Morskim jezerima u nas smatraju se jezera Mir (Dugi otok), Crniševo (dio Baćinskih jezera; kraj Ploča), Veliko i Malo jezero (Mljet) te Zmajevo oko (Rogoznica). Sva navedena jezera su talasična, to jest, imaju vezu s morem, makar slabu. Jezero Mir je malo i plitko jezero (površina ~ 0,2 km²; prosječna dubina 3,3 m; Fiket, Mlakar i Kniewald, 2018) te je dio Parka prirode Telaščica. Slično kao u slučaju Vranskog jezera, od mora ga dijeli oko 90 m karbonatnih stijena. No, za razliku od Vranskog jezera, veza s morem kroz krš je, iako slaba (prema kemijskim i biološkim parametrima; Žic *i sur.*, 2012; Mlakar *i sur.*, 2015), ipak stalna, što se vidi iz plimnih oscilacija koje su između 1 i 2 cm (Džaja, 2003; Žic *i sur.*, 2012). Radi izraženog procesa isparavanja, jezero ima visok



Slika 1.4. Vertikalni presjek situacija na karbonatnoj pregradi (grebenu) između Vranskog jezera (svijetlo plavo) i Jadranskog mora (tamno plavo): a) visoka razina vode u jezeru tijekom vlažnog razdoblja s mnogo oborine, b) visoka razina vode u jezeru tijekom sušnog razdoblja i c) niska razina vode u jezeru tijekom sušnog razdoblja. Preuzeto i prilagođeno iz Rubinić i Katalinić (2014).

salinitet koji povremeno prelazi onaj u obližnjem moru (37 – 40), a na kojeg dodatno utječe prelijevanje mora preko najnižeg, jugoistočnog dijela pregrade tijekom olujnog vremena (Mlakar *i sur.*, 2015). Osim tih povremenih prelijevanja, jezero možemo smatrati endoreičnim. U istom radu autori navode kako je jezero dobro izmiješano i neraslojeno, iz čega bi se moglo zaključiti kako je polimiktično. Ipak, vertikalni profil fizičko – kemijskih svojstava u tom istraživanju mjeren je u ožujku, svibnju i rujnu te nije isključeno stvaranje površinske termokline tijekom ljeta, kao što se (iako slabo izraženo) dogodilo u srpnju 2010. godine (Žić *i sur.*, 2012). Iako se ne smatra stalnom pojavom, u literaturi se spominje pojava anoksije u pridnom sloju (Žić *i sur.*, 2012) u kojem je potvrđena i prisutnost reduciranih specija sumpora (RSS) (usmena korespondencija, dr. sc. Irena Ciglencečki-Jušić).

Jezero Crniševo dio je sustava Baćinskih jezera. Površina mu je 0,4 km², a maksimalna dubina 34 m (Ilijanić, 2014). Na dubini 25 m javljaju se povišena mjerenja električne vodljivosti koja odražavaju utjecaj morske vode. Ona u jezero pristiže kroz porozni krški krajolik u obliku podvodnog izvora za vrijeme visoke morske razine, dok za vrijeme niske razine istim putem otječe u more (Bonacci i Švonja, 1984). Stoga se Crniševo može svrstati u kategoriju endoreičnih jezera jer nema površinsko otjecanje. Također se smatra polimiktičnim (Ilijanić, 2014), a pri dnu je zabilježena pojava anoksije i povećana koncentracija sulfata što ukazuje na povezanost s morem. Kako je većina Baćinskih jezera slatkovodna, porast saliniteta predstavlja jak ekološki pritisak što

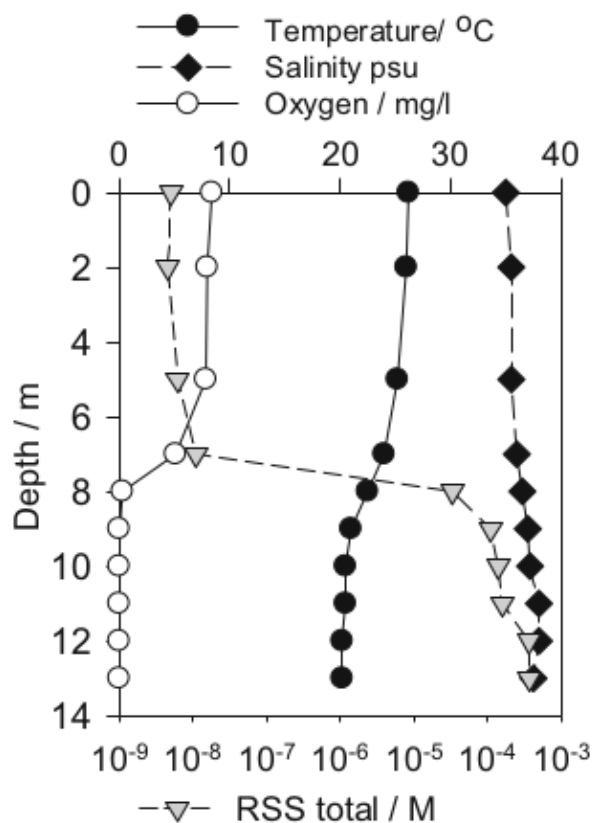
se očituje u smanjenoj stabilnosti životnih zajednica jezera – slično kao i u Vranskom jezeru (Rubinić i Katalinić, 2014; Stanić *i sur.*, 2025). Crniševo ima veliku varijabilnost temperature koja se kreće od 4 °C do 26 °C (Bonacci i Švonja, 1984). Ovo jezero je vrlo slabo zastupljeno u literaturi o fizičkoj limnologiji, iako se za jezero Sladinac (slatkovodno; također u sustavu Baćinskih jezera) razina vode, s povremenim prekidima, mjeri čak od 1923. godine (Bonacci i Roje-Bonacci, 2020).

Malo i Veliko jezero na Mljetu (dio Nacionalnog parka Mljet) primjer su morskih jezera gdje bi i izraz obalna laguna bio sasvim primjeren te su oba jezera svakako egzoreična. Naime, Veliko jezero (1,4 km²; maks. dubina 46 m; Vuletić, 1953) spojeno je s Jadranskim morem kanalom te ima plimne oscilacije amplitude slične kao i more (Peharda i Vilibić, 2008). Malo jezero povezano je s Velikim jezerom plitkim (1 m) i uskim kanalom (2 m), a razina vode oscilira plimnim frekvencijama, no prigušeno i s pomakom u odnosu na jadranske oscilacije. U Malom jezeru (0,2 km²; maksimalna dubina 29,4; Vuletić, 1953) postoji mnoštvo aktivnih krških izvora koji su dodatni način izmjene vode s okolišem (Vilibić, Žuljević i Nikolić, 2010). 1970-ih su zabilježeni anoksični uvjeti u pridnenom sloju Malog jezera zajedno s visokim koncentracijama sumporovodika. No, vertikalnim miješanjem jezera u zimskom razdoblju jezero bi se oksigeniralo, a od 2003. jezero se redovno miješa te anoksični uvjeti nisu primijećeni ni u Velikom ni Malom jezeru tijekom narednih sedam godina (Vilibić, Žuljević i Nikolić, 2010). Jezera imaju velike oscilacije temperature pa je tako tijekom četiri uzastopne godine mjerenja minimalna temperatura bila 12,28 °C, a maksimalna 24,20 °C (Buljan i Špan, 1976). Mjerenja sredinom prošlog stoljeća pokazala su i veću sezonsku varijabilnost saliniteta u Malom jezeru (29 – 38) nego u Velikom jezeru (30 – 36) (Vuletić, 1953), no od 1990-ih je primijećen porast saliniteta te tijekom višegodišnjih mjerenja nije zabilježen salinitet niži od 36,3 (Benović *i sur.*, 2000). Kako su jezera raslojena tijekom ljeta i jeseni (Benović *i sur.*, 2000), a zimi se ne zaleđuju radi visokog saliniteta, možemo ih svrstati u monomiktična jezera. Na žalost, o stopama promjene saliniteta i temperature od 2010.-ih na dalje nema podataka radi nedostatka recentnih istraživanja na ovu temu. Općenito, morska jezera predstavljaju izrazito osjetljivu skupinu jer su pod direktnim i brzim utjecajem procesa i u atmosferi, i u moru, i u vodopropusnim krškim vodotocima, a na koje mogu znatno utjecati ljudske djelatnosti.

1.5 Jezero Zmajevsko oko

Morsko jezero koje također ima aktivnu vezu s morem, ali za razliku od Mljetskih jezera, ima nejednolik ciklus miješanja, jest Rogozničko jezero – Zmajevsko oko (ZO) kod Rogoznice, koje je ujedno i predmet istraživanja ove doktorske disertacije. ZO je udaljeno 100 – 200 m od Jadranskog mora, no nije s njime povezano direktnim, vidljivim kanalom, slično kao u slučaju jezera Crniševo i Jellyfish. Stoga se i ovo jezero može svrstati u endoreičnu kategoriju. Veza s morem je aktivna jer su prisutne plimne oscilacije (Ciglencečki *i sur.*, 2005), a jezero dijeli dio flore i faune s obližnjim morem, iako je raznolikost vrsta znatno manja nego u moru (Bakran-Petricioli, Petricioli i Požar-Domac, 1998). Nastanak ZO-a povezuje se s urušavanjem podzemne šupljine uslijed erozije pokrovnih stijena, koja se, nakon izdizanja razine mora poslije zadnjeg ledenog doba, ispunila morskom vodom (Mihelčić *i sur.*, 1996).

Jezero nije duboko (max. dubina 13,45 m) niti veliko (površina 9 904 m² i volumen 90 692 m³; Panda, 2020), no unatoč malim dimenzijama pokazuje izrazitu vertikalnu raslojenost. Tijekom



Slika 1.5. Vertikalni profil jezera Zmajevsko oko mjeren u svibnju 2012. Preuzeto iz Ciglencečki *i sur.* (2017).

gotovo cijele godine u jezeru su jasno definirani termoklina, haloklina te kemoklina, a njihov se položaj mijenja ovisno o godišnjem dobu (Ciglencečki *i sur.*, 2005, 2015; Simonović *i sur.*, 2023). Vodeni se stupac može razdijeliti na oksični dio (gornji; plići) i anoksični dio (donji; dublji), a granica se obično nalazi u sloju naglog prijelaza gustoće – piknoklini (Ciglencečki *i sur.*, 2017; slika 1.5). Na granici oksije i anoksije, kao i unutar anoksičnog sloja, obitavaju zelene i ljubičaste sumporne bakterije (Pjevac *i sur.*, 2015; Čanković *i sur.*, 2017, 2019, 2020), što ZO čini vrlo sličnim jezeru Jellyfish. Ipak, u ZO-u se raslojavanje tijekom godine mijenja te se prevladavanje jedne populacije bakterija nad drugom smatra biološkim pokazateljem hidrostatičke

stabilnosti vodenog stupca: zelenim sumpornim bakterijama pogodniji su manje raslojeni uvjeti, dok ljubičaste prevladavaju pri izraženijoj raslojenosti (Ciglencečki *i sur.*, 2017; Čanković *i sur.*, 2020; Mateša *i sur.*, 2025). I u ZO-u dolazi do akumulacije sulfida u dubljim slojevima te su koncentracije i do 50 puta veće od onih mjerenih u jezeru Jellyfish (slika 1.5; Hamner i Hamner, 1998). Sumporne bakterije su fotosintetske bakterije te apsorbiraju Sunčevo zračenje koje dolazi do kemokline. One ne razgrađuju direktno organsku tvar, ali imaju važnu ulogu u njenoj mineralizaciji kroz ciklus sumpora (amonijevi ioni, silikati, fosfati; Ciglencečki *i sur.*, 2005). Stoga, ispod kemokline ZO je sasvim mračno što je ujedno i razlog zašto u njemu većina ronilaca izbjegava roniti na dubinama većima od kemokline.

Tijekom 30-godišnjeg istraživanja ZO-a zabilježen je pad brojnosti i raznolikosti flore i faune jezera, što se dovodi u vezu sa sve učestalijim izmješavanjima praćenima anoksijom u cijelom vodenom stupcu (usmena korespondencija, Donat Petricioli). Naglo anoksično izmješavanje je i glavna specifičnost ZO-a po kojoj se razlikuje od svoga jezerskog „brata“, jezera Jellyfish, koje je stalno raslojeno. Naime, iako je jezero i ranije privlačilo pažnju znanstvenika raznih struka radi svoje specifičnosti (npr. Buljan, 1956), najveću pažnju izazvalo je naglo izmješavanje vertikalnog stupca krajem rujna 1997. godine, kada je jezero tijekom jedne noći postalo fizičko – kemijski jednoliko (holomiksija) i potpuno anoksično. To miješanje je dovelo do pomora svih aerobnih organizama jer su tijekom procesa sulfidi i amonijak – inače akumulirani u dubljem, anoksičnom dijelu – reagirali s kisikom iz plićeg, oksičnog dijela, potpuno iscrpivši njegovu zalihu u jezeru (Kršinić, 2000; Ciglencečki *i sur.*, 2005, 2017). Nakon tog događaja ekosustav jezera se djelomično oporavio, a od tada su slični događaji zabilježeni još 4 puta (2011., 2016., 2020. i 2021. godine), pri čemu su se posljedice miješanja uočavale i golim okom (slika 1.6) zbog taloženja koloidnog sumpora kao jedne od specija koja nastaje oksidacijom RSS-a i koja mijenja boju u jezeru (npr. Marguš *i sur.*, 2015; Ciglencečki *i sur.*, 2017; Čanković *i sur.*, 2019, 2020; Simonović *i sur.*, 2023). Iako nema dostupnih mjerenja o anoksičnom miješanju ZO-a prije 1997. godine, znamo da se jezero na ovaj način sigurno miješalo i prije, što je informacija koju možemo zahvaliti vidljivosti promjene u jezeru (slika 1.6). Naime, ZO se nalazi u blizini naseljenog mjesta te se među lokalnim stanovništvom kroz naraštaje prepričava nekoliko različitih legendi, a u kojima se spominje, i na različite maštovite načine objašnjava, nagla promjena boje jezera iz prozirne/plavkaste u sivu/mlječno-bijelu. Tako u jednoj priči boju uzrokuje naglo buđenje zmaja koji spava u jezeru,

dok u drugoj vanzemaljci koji žive na dnu šalju signale u svemir svakih nekoliko godina. Mnogi su vjerojatno ostali razočarani kada su istraživanja krajem 90-ih i početkom 2000.-ih pokazala kako je uzrok zapravo vrlo ovozemaljski. Naime, pri već spomenutoj reakciji RSS-a i OK-a tijekom miješanja jezera može doći do potpune oksidacije sumpora, odnosno, do produkcije velikih količina koloidnog elementarnog sumpora koji je pak slabo topljiv u vodi i koji, u velikim koncentracijama, sasvim zamućuje i „boja“ jezersku vodu (Bura-Nakić *i sur.*, 2009; Ciglencečki *i sur.*, 2017). U znanstvenoj literaturi ZO se spominje vrlo rano upravo zbog nalaza sumporovodika u dubljim slojevima jezera (Buljan, 1956).



Slika 1.6. Jezero Zmajevsko oko tijekom razdoblja kada je vertikalni vodeni stupac raslojen (lijevo; lipanj, 2021.) i kada je vodeni stupac jednolik i anoksičan te obogaćen koloidnim sumporom (desno; listopad, 2021.)

Kako se ZO miješa do većih dubina tek povremeno, u skladu s definicijom iz Wetzel (2001b), jezero bi prema tipu miješanja trebalo svrstati u oligomiktična. Ipak, fizičko – kemijska svojstva upućuju na meromiksiju jer dno ostaje trajno anoksično, to jest, najdublji slojevi ne mijenjaju se značajnije ni tijekom holomiksije, što upućuje opstojnost monimolinija (Čanković *i sur.*, 2019). Prema uzroku meromiksije, ZO se svrstava u ektogena jezera, odnosno, ona u kojima stratifikaciju održava unos slane vode. Okidači i mehanizmi naglog miješanja još uvijek nisu u potpunosti objašnjeni, iako se ono povezuje sa znatnim i naglim padom temperature zraka i ohlađivanjem površine vjetrom (Ciglencečki *i sur.*, 2015). Dosadašnja su istraživanja bila dijelom usmjerena na analizu podataka, a dijelomično na korištenje numeričkog 1D modeliranja. Kod dugoročnih analiza termohalinih svojstava u ZO se obično razlikuju dva sloja: površinski (0 – 5 m) i pridneni (7 – 12 m) (Ciglencečki *i sur.*, 2015). Za površinski sloj je pokazano da je varijabilniji, s temperaturama u rasponu 6 – 33 °C i salinitetima u rasponu 14 – 30, dok su u pridnenom sloju te vrijednosti bile 23

– 31 °C i 33 – 38 (Ciglencečki *i sur.*, 2015, 2017), što potvrđuje općenito visoku raslojenost ZO-a. Dakle, u usporedbi s jezerom Jellyfish, ZO ima veće temperaturne oscilacije (izraženu sezonalnost) i viši pridneni salinitet, što je u skladu s klimom umjerenih širina i vezom s Jadrnom čiji je salinitet ~ 38. Numeričko 1D modeliranje za vertikalna miješanja 1997. i 2011. godine pokazalo je da nagli pad temperature zraka i hlađenje površinskog sloja vjetrom mogu biti uzročnici naglog miješanja (Ciglencečki *i sur.*, 2015). Ipak, hidrostatička stabilnost ZO-a dosad nije razmatrana u okviru sezonskih utjecaja i dnevnih vanjskih čimbenika, kao što je svakodnevna izmjena vode s morem tijekom plime i oseke. Također, sva dosadašnja istraživanja bila su usmjerena na analizu prethodnih stanja u jezeru, dok ekološko stanje ZO još nije razmatrano u okviru buduće klime Jadrana.

Nedavna istraživanja pokazala su kako se u jezeru tijekom više desetljeća akumulira organska tvar (osobito u anoksičnom sloju) koja također ima svoje višegodišnje cikluse (Simonović *i sur.*, 2023) što se djelomično povezuje s povećanim donosom nutrijenata putem saharske prašine mokrom depozicijom (Mifka *i sur.*, 2022), slično kao u jezeru Mir. Organska tvar se u najvećoj mjeri nakuplja u području piknokline te neposredno iznad nje, a, kako je već spomenuto, u jezeru su primijećeni i potpovršinski temperaturni maksimumi viši od 30 °C koji su povezani s povećanom produkcijom klorofila (Marguš *i sur.*, 2023). Stoga, temeljem tih nedavnih spoznaja, ZO bi se moglo svrstati u kategoriju heliothermalnih jezera. O pojačanoj hidrostatičkoj stabilnosti ovisi i koncentracija sumpornih spojeva unutar i ispod kemokline, što je pokazano u recentnom istraživanju (Mateša *i sur.*, 2025).

1.6 Fizičko – kemijska svojstva jezera: pristupi u istraživanjima

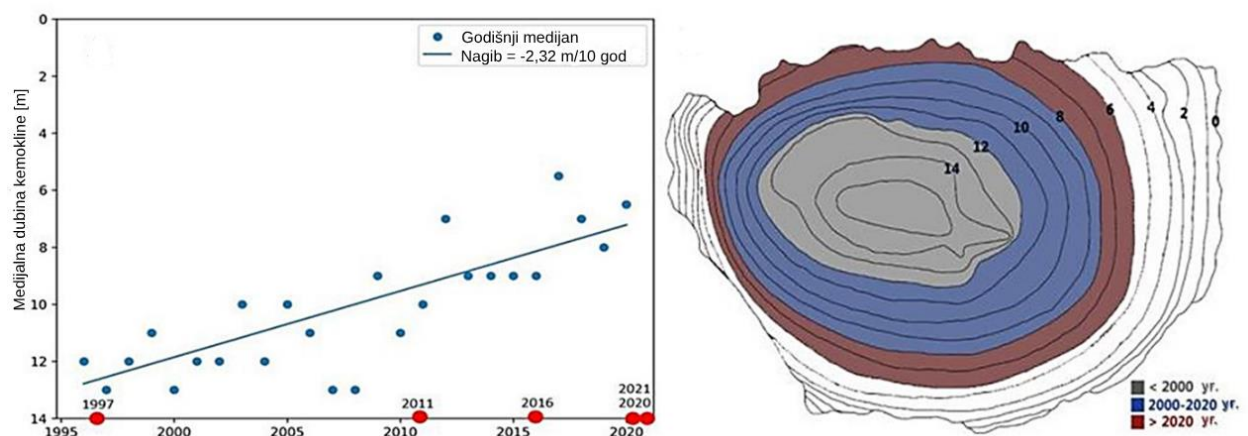
1.6.1 Dugoročna istraživanja jezera

Kako je bilo spomenuto u prethodnim odlomcima, u istraživanjima diljem svijeta primijećen je porast temperature vode jezera, a slično se očekuje i u budućoj klimi, što su pokazala međunarodna istraživanja (Wang *i sur.*, 2023), ali i ona provedena na području Republike Hrvatske (primjer: jezero Vrana, otok Cres; Brkić i Larva, 2024). Takvi zaključci mogu se donositi samo ako je dostupan dugi niz podataka stoga je važno provoditi sustavna mjerenja, osobito ona temperature vode jer je temperatura usko povezana s drugim fizičko – kemijskim svojstvima. S povišenjem temperature vode smanjuje se topljivost kisika u njoj što dovodi do niže koncentracije OK u vodi,

a što se smatra padom kvalitete vode; procesom izrazito izraženim u plitkim obalnim dijelovima mora (Ni *i sur.*, 2019) i jezerima (Jane *i sur.*, 2021). Zabrinjavajuće je što se zone smanjenog OK-a sve više šire, a njihovo trajanje se produljuje (tzv. proces deoksigenacije) što ugrožava aerobni dio ekosustava (Grégoire *i sur.*, 2023). Uz samu topljivost, na smanjenje OK izrazito utječu eutrofikacija i stalna raslojenost sustava. Prvi proces povećava količinu kisika koja je potrebna za pridnenu razgradnju organskog materijala, a kojeg pospješuje viša temperatura vode u kojoj organizmi imaju brži metabolizam (Carstensen *i sur.*, 2014). Drugi proces, kako smo spomenuli, otežava miješanje slojeva te tako sprječava da se iskorišteni kisik nadomjesti kisikom iz plićih slojeva, odnosno iz atmosfere. Drugim riječima, što je vodeni stupac više raslojen, to je više energije potrebno da se izmiješa. Woolway *i sur.* (2021) pokazali su na globalnoj ljestvici da zagrijavanje površinskog sloja jezera direktno utječe na sezonalnost miješanja jezera te trajanje razdoblja u kojem jezero ostaje izmiješano – što se može nazvati i razdobljem obnavljanja jezera. Od 100 jezera za koja je pokazano kako će im se do kraja stoljeća promijeniti režim miješanja, za čak četvrtinu monomiktičnih jezera očekuje se potpuni prestanak vertikalnog miješanja pri čemu će ta jezera postati trajno raslojeni sustavi (Woolway i Merchant, 2019). Navedena istraživanja ukazuju na smanjenje trajanja razdoblja izmiješanosti jezera na sjevernoj polutci, posljedično uzrokujući opadanje kvalitete vode (i, posljedično, jezerskih ekosustava).

Stoga, kada spojimo ta opažanja s onima o pojavi manjka kisika, dolazi se do zaključka kako je za razmatranje budućnosti nekog jezera najprije potrebno dugoročno praćenje njegove površinske temperature i OK-a. Upravo zato je prvi korak u istraživanju budućnosti jezera ZO detaljna analiza njegove prošlosti i sadašnjosti, to jest, analiza dugoročnih podataka prikupljenih u vodenom stupcu. Prvi put je to napravljeno 2013. godine (Ciglencečki *i sur.*, 2015) kada je razmatrana temperatura u sloju 0 – 5 m za razdoblje 1996. – 2012. Analiza je pokazala stopu zagrijavanja od čak 1,72 °C po desetljeću. Ista analiza napravljena četiri godine kasnije za mjerenja na dubini 12 m ukazala je na stopu zagrijavanja od 0,70 °C po desetljeću (Čanković *i sur.*, 2019), što je znanstvenike još više zabrinulo jer je pokazalo da je višegodišnje zagrijavanje izraženo kroz cijeli vodeni stupac ZO-a, a ne samo u površinskom sloju. U jezeru je opažena i izražena eutrofikacija. Naime, istraživanje za razdoblje 1996. – 2020. (Simonović *i sur.*, 2023) razmatralo je promjene organske tvari u ZO-u koja u ciklusima raste i ima iznimne koncentracije, a također je primijećen i porast koncentracije nutrijenata (često nazivano i hipertrofijom). Takvi pritisci na sustav uzrokovali su da se granica

oksija – anoksija s dubine 9 – 13 m gdje se nalazila sredinom 90-ih (Mihelčić *i sur.*, 1996; Ciglencečki *i sur.*, 1998; Ćosović *i sur.*, 2000) podigla na 6 – 8 m (slika 1.7). Simonović *i sur.* (2023) su razmatrali i srednju temperaturu vodenog stupca te se ispostavilo da se vodeni stupac u prosjeku zagrijava brzinom od 1,31 °C po desetljeću.



Slika 1.7. Medijalna dubina kemokline u ZO-u; primijećeno je znatno smanjenje dubine granice oksija – anoksija tijekom razdoblja 1996. – 2020. (lijevo). Raspon izobata između kojih se nalazila anoksija u razdoblju prije 2000. godine, tijekom razdoblja 2000. – 2020. i nakon 2020. godine (desno). Preuzeto i prilagođeno iz Simonović *i sur.* (2023), prema batimetriji iz Mihelčić *i sur.* (1996).

Općenito, za razdoblje 1996. – 2012. u površinskom sloju zabilježene su temperature 6 – 33 °C i vrlo varijabilan salinitet 14 – 30, dok su u sloju 7 – 12 m temperature bile u rasponu 23 – 31 °C, a salinitet je bio sličniji onome u Jadranskom moru, odnosno, raspona 33 – 38 (Ciglencečki *i sur.*, 2017). Tijekom zime i proljeća na obali u okolici Rogoznice uglavnom je više oborine nego u ostatku godine, pa su i temperature vode i njen salinitet znatno niže u površinskom sloju nego što su u pridnenom (Ciglencečki *i sur.*, 2017). Kako je već izneseno u prvom poglavlju, sniženi salinitet doprinosi hidrostatskoj stabilnosti vodenog stupca i time otežava izmjenu topline među slojevima. Stoga, osim analize dugoročnih podataka temperature, kao drugi korak važno je ispitati vezu stabilnosti vodenog stupca s oborinom u okolici jezera. Kako je u ZO-u visok salinitet, a i njegova varijabilnost, u istraživanjima dugoročnih podataka nije dovoljno razmotriti samo površinsku temperaturu kao u Woolway *i sur.* (2019), već bi trebalo razmotriti i podatke o salinitetu.

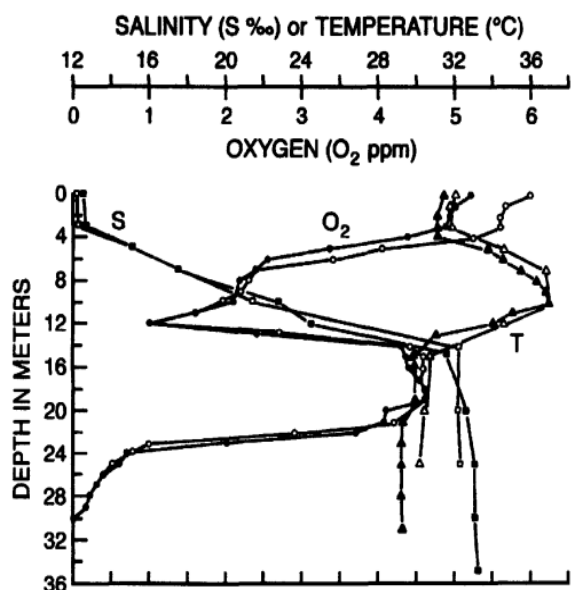
Za razmatranje prošlosti, sadašnjosti i budućnosti jezera dobro je razmotriti i već spomenuto vrijeme u godini kada se jezero miješa te trajanje razdoblja u kojem je ono izmiješano (Woolway *i sur.*, 2021), što je i predmet istraživanja ove disertacije. Dodatni, ali ne i manje važan indikator stanja jezera, jest količina kisika koja je dostupna za korištenje aerobnim organizmima, odnosno OK. Upravo su OK razmatrali Jane *i sur.* (2021) kao važan parametar u ocjeni globalnog stanja kvalitete vode u jezerima. Obzirom na primijećeno smanjenje dubine kemokline u ZO-u (slika 1.7), prirodno se postavlja pitanje o trenutnom stanju OK-a u odnosu na dugoročne podatke. Također, u ZO-u je bitan odnos između koncentracije OK-a i RSS-a čija je koncentracija tijekom dugih razdoblja raslojenosti bila čak na ljestvici mmola (Ciglencčki *i sur.*, 2005). Analize dugoročnih nizova podataka potrebne su kako bi se ustvrdili višegodišnji i unutargodišnji preduvjeti za pojavu naglog miješanja, to jest, anoksične holomiksije ZO-a.

1.6.2 Kratkoročna istraživanja jezera i izmjena vode s okolinom

Općenito, jezera imaju interakciju s atmosferom, površinskim vodama (površinsko otjecanje; engl. *runoff* te površinski pritoci) i podzemnim vodama (Winter, 1995). Mogu gubiti vodu zbog isparavanja, površinskog otjecanja iz jezera te podzemnim vodama – otjecanjem u podzemlje. Neravnoteža ovih procesa očituje se u promjenama razine vode u jezeru. Za određivanje koliko koja sastavnica i u kojoj mjeri utječe na razinu vode (odnosno, vodnu bilancu) potrebno je imati kvalitetne podatke (razina vode, protoci, oborina, ...) i mogućnosti detaljnog modeliranja sustava. Obično je vrlo problematično određivati oborinu koja otječe u jezero radi njene prostorne nejednakosti. No, s dobro raspoređenim kišomjernim postajama, ili u slučaju malih jezera, direktni doprinos iz atmosfere može se relativno dobro procijeniti. Također, u određenim regijama gdje je oborina, kada do nje dođe, raspoređena uglavnom jednoliko preko cijelog područja, procjena količine koja padne na jezero je prilično točna. S druge strane, u regijama gdje može doći do mjestimičnih lokalnih pljuskova (konvektivna oborina popraćena jakim vjetrom), kao što su razvijena orografska područja, to je teže napraviti. Za ostale sastavnice vodne bilance izračun je posredniji i unosi veću neodređenost. Kada se radi o slanim jezerima, vodna bilanca je direktno povezana s količinom soli (npr. Zavialov, 2005). Promjene u razini vode mogu biti uzrokovane i tektonski – primjerice, unosi vode su se mijenjali za afričko jezero Asal kroz geološku prošlost, pa je vezu s morem danas bitno uključiti u vodnu bilancu, dok prije to nije uzimano u obzir (Gasse i

Fontes, 1989). Još jedan primjer gdje je promjena vodne bilance utjecala na zaslanjivanje jest jezero Poopo (Bolivija) koje je izgubilo glavni izvor slatke vode kada se razina jezera Titicaca (granica Bolivije i Perua) kroz nekoliko tisuća godina spustila za 50 metara, što je prekinulo njihovu međusobnu komunikaciju (Meybeck, 1995). Jezero Poopo se tada počelo zaslanjivati, a preusmjeravanjem tokova rijeka koje su dovodile vodu u jezero i uslijed klimatskih promjena, jezero je danas sasvim isušeno – sudbina do koje su promjene u vodnoj bilanci dovele i već spomenuto Aralsko jezero.

U slučaju morskih jezera, u vodnu bilancu važno je uključiti i izmjenu vode s morem ukoliko je krš porozan, a visina jezera bliska nadmorskoj visini (Blanchette *i sur.*, 2020). Takva jezera obično su zaštićena od vjetra visokim raslinjem i strmim liticama (Hamner i Hamner, 1998) pa na njihovu razinu vode najviše utječu dugoperiodičke oscilacije mora s kojim su povezana. Ta jezera nastaju i nestaju uslijed izdizanja i povlačenja mora na geološkim vremenskim ljestvicama, dok njihova veza s morem može biti stalna ili povremena (npr. tijekom ekstremnih razina u moru; Fleury, Bakalowicz i de Marsily, 2007). Uz promjene razine mora na dužoj vremenskoj ljestvici na fizičko – kemijska svojstva morskih jezera utječu još i meteorološki i klimatološki uvjeti, izmjena vode more-jezero i podzemne vode-jezero te unutarjezerska cirkulacija vode (Blanchette *i sur.*, 2020). Razina vode u morskim jezerima obično odražava plimu i oseku u moru, a izgled signala ovisi o tome kakva je veza s morem. Hamner i Hamner (1998) su temeljem istraživanja provedenih na trinaest morskih jezera u Palau došli do zaključka kako se prema tipu veze s morem jezera mogu podijeliti na ona čija je veza s morem „direktna“ – npr. kroz kanal ili podzemni tunel – i na ona koja vodu izmjenjuju kroz sitne pore u krškoj pregradi između jezera i mora, pri čemu ulazi boćata voda radi miješanja s podzemnim vodonosnikom slatke vode. Daljnjim povezivanjem nekoliko skupova kratkoročnih podataka (npr. kontinuirana mjerenja morske razine, mjerenja vertikalnih profila, uzorkovanje vode, ...) ustvrdili su kako način na koji je jezero povezano s morem i mjesto na kojem voda ulazi u jezero direktno određuje kakve će fizičko – kemijske karakteristike imati jezero. Naime, ako se izmjena vode plimom i osekom odvija na površini, kroz krške pore (što je sporiji proces u odnosu na direktnu izmjenu), dubina kemokline određena je miješanjem vjetrom. Također, u jezerima s takvom vezom, vodeni stupac je hidrostatski dovoljno stabilan da podržava nastanak slojeva u kojima slobodno plutaju sumporne bakterije. S druge strane, kod jezera koja imaju direktniju vezu s morem, dubina kemokline određena je dubinom na kojoj se morska voda ulijeva. Ono što je zanimljivo jest da u tim jezerima može postojati i više od jedne



Slika 1.8. Vertikalni profil T, S i OK mjereno u jezeru Hot Water 1980. godine (preuzeto iz Hamner i Hamner, 1998)

termokline/halokline/kemokline zbog miješanja koje uzrokuje voda koja ulazi. To je miješanje dovoljno jako da se obično ne stvaraju slojevi s bakterijama. No, ulazna voda može uzrokovati i veću stabilnost vodenog stupca, što Hamner i Hamner (1998) povezuju s time da morska voda ulazi duboko u jezero te se stvara pridneni sloj koji je puno većeg saliniteta od gornjih slojeva. Taj sloj ne mora nužno biti i anoksičan jer, ako je količina ulazne vode dovoljno velika, ona zapravo oskigenira dublje slojeve jezera, što se u vertikalnom profilu očituje kao druga, dublja kemoklina. Razlika između ova dva tipa veze more – jezero lijepo se vidi iz kratkoročnih mjerenja razine vode nekoliko

palauških jezera u odnosu na morsku razinu (Hamner i Hamner, 1998). Što je kašnjenje i prigušenje signala u jezeru veće, to je veza indirektnija i ulijevanje vode u jezero sporije (slika 1.3, desno, iz prvog poglavlja). Na primjer, palauško jezero Gologuguel povezano je s morem podzemnim tunelom širine oko 3 m x 1 m te su kroz njega ronionci mogli proći cijelim putem od mora do jezera. U tunelu se javljaju jake struje, čak i do 2,5 cm/s, što čini zaron opasnim te se on mora pažljivo planirati u trenutku kada su struje najniže (za vrijeme visoke ili niske vode) zbog čega je važno imati dobre prognoze plimnih oscilacija. Zbog tako brze veze, signal u jezeru Gologuguel kasni za onim mjerenim u obližnjoj laguni tek nekoliko minuta, a prigušenje plimnog signala je zanemarivo. Još jedno jezero iz istog sustava koje je s morem povezano većim tunelom je jezero Hot Water. Ono je raslojeno kroz veći dio vodenog stupca, osim između 14 i 20 metara gdje se stalno miješa radi siline ulazne vode, a to se najviše vidi po kisiku kojeg na toj dubini ima u sličnim količinama kao na površini (slika 1.8). Iako je tunel veličinom dovoljno velik da se kroz njega provuče jedan ronilac, radi jakih struja to nije rađeno. No, takva vrsta povezanosti omogućava ulazak više morskih organizama pa jezero Hot Water ima puno veću bioraznolikost nego jezera sa sporom vezom kroz krš (nađeno je nekoliko vrsta riba, beskralježnjaka, velikih raža, pa čak i jedan krokodil). Ipak, radi udaljenosti između jezera i mora, plimni signal u jezero dolazi s odgodom od oko 1 sat i 45 minuta te oko 50% prigušenja.

Jedno od palauških jezera koje ima sporiju vezu s morem je jezero Jellyfish, za koje smo u uvodu ustvrdili da je i najbližije jezeru Zmajevu oko – s iznimkom povremene holomiksije u vodenom stupcu koja se javlja u ZO-u, a u jezeru Jellyfish ne. Ono je posebno detaljno ispitivano tijekom nekoliko kratkoročnih mjernih pothvata što je izneseno u radu Hamner i Hamner (1998). Jezero Jellyfish je dublje od ZO-a (maks. dubina 30 m), ali površinom dvostruko manje (4000 m²; Burnett *i sur.*, 1989). Dno i pridneni slojevi su anoksični, dok je površina oksigenirana, siromašna nutrijentima i mutna, te ima slabu izmjenu vode prilikom plime i oseke jer se izmjena odvija kroz male pukotine u kršu, uglavnom pri površini (Hamner i Hamner, 1998). U jezeru su nađena i tri tunela, no dva od njih se nakon 30 metara sužavaju te ih nije bilo moguće ispitati do kraja, tako da nije bilo moguće dokumentirati koja im je duljina te izlaze li negdje na strani lagune ili su zapravo dvije povodne špilje. Treći „tunel“ od samog početka nije prohodan za čovjeka, a na njegovom ulazu nisu nađeni sesilni organizmi koji se hrane procesom filtracije pa je zaključeno kako kroz taj tunel ne dolazi dovoljno hranjivih tvari. U nedostatku suvremene opreme koja se danas koristi (npr. samostalni uzorkivači, engl. *data loggeri*), istraživači su ipak vrlo učinkovito uspjeli kontinuirano mjeriti razinu u jezeru i moru te ih potom usporediti. Naime, nekoliko je istraživača u smjenama, na okomito postavljenim letvama, istovremeno bilježilo razinu u jezeru i u laguni svakih 15 do 30 minuta. Kako tada nije bilo mobitela, za sinkronizaciju su koristili satove. Kada su poslije nacrtali podatke, ustanovili su kako plimni signal u jezeru Jellyfish za morskim kasni oko 1 sat i 40 minuta te je prigušen za oko 30%. U kasnijem radu (Blanchette *i sur.*, 2020) utvrđeno je da je za jezero Jellyfish bitna i izmjena vode u srednjem sloju, između 5 i 10 m dubine, a koja je brža jer se odvija kroz četiri tunela, odnosno, otkriven je i četvrti spojni „tunel“. Kroz tunele povremeno dolazi hladnija i slanija voda koja se radi razlike u gustoći smješta bliže dnu te tako dodatno osnažuje raslojenost jezera (Blanchette *i sur.*, 2020). Kako smo spomenuli u drugom poglavlju, jezera su općenito vrlo osjetljiva na klimatske promjene, a slično je pokazano i za jezero Jellyfish. Diskutirali smo kako ono odražava čak i klimatsku varijabilnost na hemisfernoj ljestvici – poput ciklusa ENSO (Martin *i sur.*, 2006). Ipak, atmosfera utječe na jezero Jellyfish i na kraćim vremenskim ljestvicama. Numeričko modeliranje izmjene more – jezero u kombinaciji s istovremenim mjerenjima temperature u moru, tunelima i jezeru pokazala su kako tijekom jačih olujnih nevremena u jezero može ulaziti i znatno hladnija voda, dok se miješanje u površinskom sloju pojača (Blanchette *i sur.*, 2020). Hamner i Hamner (1998) su kratkoročnim mjerenjima zabilježili i kako je u jezeru nakon velike oluje došlo do naglog pada saliniteta u površinskom sloju, a koji se

kroz dva tjedna vratio na uobičajene vrijednosti. Nije nam poznato da je ovaj povratak u ravnotežno stanje dalje istraživao, to jest, da je utvrđeno kakav doprinos ima ravnoteža oborina-isparavanje u odnosu na unos vode iz mora u mehanizmu vraćanja saliniteta u ravnotežno stanje.

Po pitanju izmjene vode more – jezero, slična istraživanja provedena su i na još nekoliko morskih jezera koja nisu dio palauškog sustava. Primjerice, u i okolo jezera Solar (Egipat) Cohen i sur. (1977) su mjerili razinu vode u usporedbi s razinom u obližnjoj laguni. Zaključili su kako signal u jezeru kasni otprilike 2,5 sati u odnosu na morski signal te da je prigušen za 50%. Zanimljivo je da su radili i piezometrijska mjerenja u nekoliko bušotina na liniji između jezera i mora – uz samo jezero, bliže moru, itd. Time su ustanovili da tlak (pa i razina vode) ovisi o mjestu bušenja i vremenu u danu/mjesecu/godini jer plima i oseka uzrokuju različite tlakove u tako dobivenim „zdcencima“ (engl. *well*). Također su ustanovili da više vode ulazi zimi nego ljeti. Ova saznanja povezali su s vodnom lećom, konceptom koji je kratko spomenut u prvom poglavlju, a kojeg ćemo ovdje i razjasniti. Kada se govori o podzemnim vodama, obično se spominju tri zone: zasićena zona (engl. *saturated zone*; zona vodonosnika ili engl. *aquifer*), zona podzemne vode ili vodnog zrcala (engl. *water table*) i nezasićena zona (engl. *unsaturated zone* ili *vadose zone*) (Winter, 1995). Iznad vodnog zrcala, koje dijeli zasićenu i nezasićenu zonu, pukotine u stijeni su ispunjene zrakom i vodom, a ispod te granice pukotine su ispunjene samo vodom. U slučaju krškog područja uz more, javlja se još jedan pojam – vodna leća. Vodna leća je sloj slatke ili boćate vode koji leži na zoni zasićenoj morskom vodom. Granica među njima ovisi o količine manje guste vode (slatke ili boćate), odnosno, uglavnom o oborini koja prodire u tlo. Vodna leća lijepo se vidi na slici 1.4 u prvom poglavlju (primjer za Vransko jezero kraj Biograda) kao konveksna linija između jezera i mora. U slučaju Palau jezera, koja su u tropskoj klimi, debljina vodne leće je kroz godinu uglavnom slična, dok kod jezera u umjerenim ili sušnim područjima ona može jako varirati, što je potvrđeno i mjerenjima na jezeru Solar.

Što se tiče vodne bilance morskih jezera na području Republike Hrvatske, istraživanja su rađena na jezerima spomenutima u potpoglavlju 1.4 – dvama mljetskim jezerima (Malo i Veliko jezero). Ona su međusobno povezana kanalom, a s morem su povezana drugim kanalom koji spaja Jadransko more i Veliko jezero. Istovremenim mjerenjima razine u oba jezera i u obližnjoj uvali utvrđeno je kako signal u Veliko jezero ulazi neznatno izmijenjen, dok je signal u Malom jezeru – koje se puni i prazni preko Velikog jezera – prigušen oko 30% te kasni u fazi za morskim signalom

nekoliko sati (Peharda i Vilibić, 2008). Upravo zbog spore izmjene vode, koja vjerojatno kao i kod dijela jezera u Palau ne uzrokuje dodatno miješanje jezera, a dopušta visoku raslojenost, u nekoliko je navrata u Malom jezeru bila bilježena pojava anoksije. Takvi događaji bili su popraćeni i visokim koncentracijama RSS-a u formi sumporovodika, izrazito tijekom ljeta (Buljan i Špan, 1976; Benović *i sur.*, 2000). No, takvi ekstremni uvjeti u Malom jezeru ipak dulje vrijeme nisu prijavljeni, najvjerojatnije radi redovnog vertikalnog miješanja jezera (Vilibić *i sur.*, 2010). Kako je sustav Malo jezero – Veliko jezero – more povezan prilično pravilnim kanalima, izmjena vode je i modelirana modelom kutije te je nađeno kako malo jezero ima vrijeme zadržavanja vode od 54 dana. U mljetskim jezerima su provedena i mjerenja temperature kako bi se utvrdio učinak dolazne vode na hidrostatičku stabilnost jezera. Istovremenim mjerenjima temperature na nekoliko lokacija u moru i mljetskim jezerima ispostavilo se kako u različito doba godine voda koja ulazi tijekom plimnih oscilacija ima različit utjecaj na stabilnost u jezeru (Vilibić *i sur.*, 2010). Naime, u hladnom dijelu godine, morska voda koja ulazi je toplija i zadržava se u površinskom sloju jezera te tako doprinosi stabilnosti vodenog stupca. S druge strane, u toplom dijelu godine, hladnija i slanija voda Jadranskog mora ulazi u jezero te doprinosi miješanju i stvaranju turbulentnog sloja od površine do dubine barem 15 m (Vilibić *i sur.*, 2010).

Ovdje bismo ukratko usporedili spomenuta jezera sa jezerom ZO u kontekstu izmjene vode i utjecaja na fizičko – kemijska svojstva. Što se tiče raslojavanja i hidrostatičke stabilnosti, ZO je vrlo slično jezeru Jellyfish. Ipak, ZO se povremeno sasvim izmiješa i postane anoksično što je glavna razlika između ova dva jezera, a što je dosad povezivano vjetrom i naglim padom temperature zraka te nije povezivano s ulaskom vode u jezero (Ciglencečki *i sur.*, 2015). To naravno ne znači da se sa sigurnošću može reći da nikakva voda ne ulazi niti da ne doprinosi miješanju. Nadalje, u okolini ZO-a nisu bušeni pijezometrijski zdenci kao što je to napravljeno kod jezera Solar te stoga nije poznato ni kakav je tlak u području između jezera i mora te ima li tlak svoju sezonsku stopu promjene. Također, već na prvi pogled na sliku iz zraka (slika 3.1; treće poglavlje) vidi se da ZO nije povezano s morem kanalima kao u slučaju mljetskih jezera te je pretpostavljeno da ZO s morem ima vezu kroz pukotine u kršu (Cvitković, 2001). No, u jezeru su uočeni plima i oseka (Cvitković, 2001; Ciglencečki *i sur.*, 2005), a jezero s morem dijeli dio flore i faune (Bakran-Petricioli, Petricioli i Požar-Domac, 1998; Barić *i sur.*, 2003). Uz to, raznolikost vrsta puno je manja u ZO-u naspram one u obližnjoj uvali. Općenito je za ZO dostupno vrlo malo podataka vezanih uz izmjenu vode more – jezero: problematike se dotiče još rad Ciglencečki *i sur.* (2017)

gdje je navedeno kako su oborina i površinsko otjecanje jedini dotoci slatke vode u ZO jer nema bočnih pritoka kroz stijene. No, kada ovih nekoliko informacija usporedimo s onima za druga morska jezera, može se postaviti hipoteza kako je ZO povezano s morem (promjene razine na dnevnoj vremenskoj ljestvici) i to kroz krške pukotine (mala raznolikost vrsta), ali vrlo slabom vezom koja ne doprinosi znatno miješanju (prisutstvo jedne kemokline) s pretpostavkom da pred kraj plimnog ciklusa u jezero ulazi morska voda. Upravo se time bavi treće poglavlje ove disertacije – nalaženjem gdje su otvori kroz koje ulazi voda koja utječe na razinu vode, opisivanjem tih mjesta i veze more – jezero, ispitivanjem fizičko – kemijskih svojstava ulazne vode kratkoročnim mjernim postavima te kakav je utjecaj ove veze s morem na hidrostatičku stabilnost ZO-a.

1.6.3 Numeričko modeliranje jezera

U potpoglavljima 1.6.1 i 1.6.2 već je bilo spomena o korištenju numeričkih modela: na dugoročnoj skali Woolway *i sur.* (2021) su koristili modele za istraživanje budućih promjena u režimu miješanja jezera, dok su za potrebe kratkoročnih istraživanja Blanchette *i sur.* (2020) proučavali temperaturu jezera za vrijeme oluje, a Peharda i Vilibić (2008) izmjenu vode između Mljetskih jezera i mora. Dakle, korištenje numeričkih modela omogućuje simuliranje procesa za koje ne postoje podaci ili su oni iz nekog razloga nedovoljni za proučavanje procesa od interesa (npr. previše kratak vremenski niz, nedovoljna frekvencija uzorkovanja, nedostajući podaci, itd.). Takav pristup u istraživanju ZO-a prvi put je primijenjen 2013. godine (Ciglencečki *i sur.*, 2015) kada je korišten 1D model General Ocean Turbulence Model (GOTM) za simuliranje vertikalnog miješanja u razdoblju kolovoz – listopad za 1997., 2003. i 2011. godinu. Simulacije su rađene za te tri godine jer je autorima bio cilj usporediti što se među njima razlikovalo po pitanju hidrostatičke stabilnosti, s obzirom na to da su 1997. i 2011. godine zabilježeni anoksični uvjeti u cijelom vodenom stupcu, dok je 2003. godine vodeni stupac tijekom jesenskog razdoblja miješanja bio hipoksičan. U tu svrhu model je svakih 6 sati forsiran podacima s najbliže meteorološke postaje i dinamički prilagođavan mjerenim vertikalnim profilima T i S s vremenom relaksacije od 1 dan. Jezero je u modelu bilo dubine 15 m, a vertikalna diskretizacija mreže (engl. *grid*) bila je 0,5 m (jednoliki prostorni korak). Utvrđeno je kako je u razmatranim godinama jezero tijekom jeseni povremeno gubilo toplinu tijekom noći u količinama koje se nisu mogle nadomjestiti dnevnim zagrijavanjem. Razmatranjem kvadrirane Brunt-Väisälä frekvencije (BVF) zaključeno je kako se

vertikalna stabilnost razlikuje u razmatranim godinama te da vertikalno miješanje nastupa u kasno ljeto ili ranu jesen. Iako nije nađeno direktno obilježje koje je bilo zajedničko miješanjima, utvrđeno je kako je 2011. godine glavni okidač miješanja bio ekstremno meteorološki događaj tijekom kojeg je puhala jaka bura, a temperatura zraka pala za 10 °C tijekom 12 sati. Modeliranje modelom GOTM bilo je dio veće fizičko – kemijske studije (Ciglencčki *i sur.*, 2015) jezera te nije detaljnije razmatrano, a modeliranje ZO-a na žalost nije nanovo korišteno sljedećih deset godina. No, u jesen 2020. i 2021. godine jezero se ponovno u potpunosti izmiješalo, postalo sasvim anoksično, a ekosustav se izmijenio u vrlo kratkom razdoblju. Na žalost, za ispitivanje tih miješanja bili su dostupni samo vertikalni profili mjereni jednom tijekom ljeta i jednom u jesen (sezonski profili). Stoga, ukazala se potreba za uporabom numeričkih modela kod opisa dinamike jezera između ljeta i jeseni, kao i za mogućnost prognoze ovakvih događaja te izrade projekcija fizičko – kemijskog stanja jezera u budućoj klimi.

Prvi korak u takvom pristupu istraživanju je odabir numeričkog modela koji bi se zatim prilagodio za potrebe istraživanja jezera od interesa, u ovom slučaju ZO-a. Korištenje numeričkih modela u istraživanjima jezera je često, no ne postoji jedan model koji glasi kao „najbolji“. Na primjer, u nedavno provedenom istraživanju (Feldbauer *i sur.*, 2025) simulirana je temperatura pomoću četiri 1D numerička modela – FLake, GLM, GOTM i Simstrat – za 73 jezera raspostranjena globalno, a za koje postoje podaci temeljem kojih se radila ocjena uspješnosti modela (tzv. proces verifikacije). Rezultati su pokazali kako kvaliteta simulacije pojedinog modela ovisi o jezeru za koje se simulacija radi, ukazujući time na posebnost fizičko – kemijskih uvjeta i procesa koji na njih utječu za svako od jezera. Nakon primjene modela s postavkama koje su tvornički zadane u modelu, rađen je proces kalibracije za nekoliko parametara koji su se u prethodnim istraživanjima pokazali ključnima za simulacije temperature u vodenom stupcu (npr. koeficijent kojim se skalira brzina vjetra, vertikalna turbulentna difuzivnost – engl. *vertical eddy diffusivity*; VTD, doseg utjecaja vjetra, ...). Ponovno, za svako su jezero rezultati bili drugačiji te je iznos parametara, i njihova osjetljivost na promjene, ovisio o modeliranom sustavu i samom modelu. Nadalje, svi ovi modeli su jednodimenzionalni te se njima simuliraju promjene u vertikalnom stupcu. Za istraživanje ZO-a provedeno 2013. godine, gdje su od interesa bili protoci topline tijekom kraćih vremenskih razdoblja, 1D model se pokazao prikladnim. No, kako se tijekom ovog doktorskog istraživanja pokazalo, za buduće klimatske simulacije ZO-a bilo bi bolje postaviti 3D model, čime se bavi treće poglavlje.

Model Delft3D se široko primjenjuje u različite istraživačke svrhe, a ovdje navodimo nekoliko onih koje se odnose na slana i morska jezera te na obalna područja – neka istraživanja se direktno dotiču i kvalitete života ljudi. Tako je nedavno uspostavljen model za jezero Kivu, na granici Ruande i Konga, kojim je ispitivana stabilnost jezera uslijed planova za crpljenje metana (koji predstavlja opasnost za okolne stanovnike) iz jezera za potrebe proizvodnje električne energije (Kranenburg *i sur.*, 2020). Povezivanjem Delft3D modula FLOW i WAVE Zarzuelo i suradnici (2023) su proučavali meteorološke događaje koji bi nastalim valovima mogli ugroziti obalnu infrastrukturu i stanovnike uvale Cadiz (Španjolska). Nadalje, korištenjem Delft3D FLOW i WAQ modula otkriveni su uzorci zaslanjivanja i isušivanja kalifornijskog jezera Salton koji su razlog češćih pješčanih oluja te posljedičnih povećanih pojava astme i kardiovaskularnih bolesti u obližnjim općinama (Lee i Stenstrom, 2023). Osim u znanstvene i istraživačke svrhe, Delft3D se često koristi i u inženjerske svrhe, pa su tako temeljem simulacija ovim modelom predlagane mjere za sprječavanje eutrofikacije i zaslanjivanja jezera u Egiptu (Rifaat *i sur.*, 2023) i u Turskoj (Kacikoc, Dadaser-Celik i Beyhan, 2025).

Cjelovito korištenje numeričkog modeliranja pri opisu dinamike ZO-a, što uključuje prognozu stanja jezera, uvažavanje svih procesa koji utječu na ZO i generiranje scenarija njegove budućnosti po pitanju fizičko – kemijskih procesa – vrlo je opsežan posao, nadilazi samu disertaciju i zasigurno će se nastaviti u godinama koje slijede. Stoga, cilj ovog dijela doktorskih istraživanja bio je uspostaviti Delft3D FM model s modulom FLOW za ZO te napraviti testove osjetljivosti i simulacije za jedan testni slučaj (miješanje 2021. godine), što bi omogućilo daljnje razvijanje modela i povezivanje s drugim modulima u budućim istraživanjima. U narednim potpoglavljima predstavljene su osnovne postavke modela, korišteni rubni uvjeti i prvi rezultati simulacija.

1.7 Ciljevi i hipoteze rada

Glavni ciljevi ovog dokorskog istraživanja su opisivanje višegodišnje varijabilnosti fizičko – kemijskih svojstava ZO-a te stvaranje preduvjeta za prognozu budućih holomiktičnih anoksija i izradu klimatskog scenarija ZO-a za naredna desetljeća. Priprema i analiza podataka na dugoj vremenskoj ljestvici omogućava razmatranje ZO-a u kontekstu okolišnih promjena i istraživanja trendova. Izrada klimatskog scenarija za ZO omogućila bi ispitivanje budućnosti ovog zaštićenog sustava pa tako i definiranje smjernica za urbani razvoj u njegovoj neposrednoj blizini. Dodatni

cilj je ispitati vezu jezero – more i dinamiku jezera kratkoročnim, kontinuiranim mjernim pothvatima što omogućava uvid u procese na kraćim vremenskim ljestvicama te planiranje budućih ispitivanja fizičko – kemijskih svojstava vode koju ZO izmjenjuje s okolinom. Ujedno, rezultati tog dijela istraživanja omogućili bi i definiranje rubnih uvjeta za 3D numerički model. Zadrje, ali ne i manje bitno, jest da se ovim doktorskim radom doprinosi istraživanju morskih jezera sa stajališta fizičke limnologije, kako u području Jadrana, tako i na globalnoj razini. Naime, već su Mlakar i sur. (2015) uočili da se dostupna literatura o morskim jezerima uglavnom bavi biološkim aspektima sustava te da se opsežna limnološka mjerenja na njima provode vrlo rijetko (npr. Vuletić, 1953; Buljan i Špan, 1976; Hamner i Hamner, 1998; Ciglencečki, 2017). Temeljem ciljeva ovog rada definirane su i četiri hipoteze:

1. Intenzitet raslojavanja gustoće u vodenom stupcu ZO-a se mijenja ovisno o višemjesečnim i višegodišnjim uvjetima u atmosferi i moru
2. Uvjeti za potpuno izmješavanje slojeva ZO-a u jesen ili izostanak istog posljedica su fizičko – kemijskih uvjeta u ZO-u u prethodnim mjesecima
3. Izmjena vode jezero – krš – more slabi na višegodišnjoj vremenskoj skali
4. Izmijenjena voda je drugačijih fizičko – kemijskih svojstava u usporedbi s jezerskom i morskom vodom

Višegodišnja varijabilnost fizičko – kemijskih svojstava jezera je opsežniji prikaz istraživanja objavljenog u Dominović i sur. (2023) u kojem se analiziraju podaci prikupljeni sezonski kroz 27 godina (1996. – 2022.), a čija je svrha bila odgovoriti na prvu i drugu hipotezu. Ovo poglavlje daje pregled promjena u ZO-u na dužoj vremenskoj ljestvici i služi kao kontekst za istraživanja hidrodinamike jezera i veze između ZO-a i mora na finijoj vremenskoj ljestvici, odnosno, odgovara na treću i četvrtu hipotezu. Istraživanja na finoj vremenskoj ljestvici su djelomično objavljena u Dominović i sur. (2024) te su dodatno proširena istraživanjima 2025. godine što je trenutno i najrecentniji prikaz stanja u ZO-u. Nakon analize mjerenja prikupljenih tijekom dugoročnih i kratkoročnih istraživanja uspostavlja se numerički model ZO-a kojim se nastoje upotpuniti rezultati iz prethodne dvije cjeline, a koji su ograničeni prostorno – vremenskom rezolucijom mjerenja. U njemu se opisuju postavke 3D numeričkog modela ZO-a te se predstavljaju rezultati testova osjetljivosti za raslojeno razdoblje 2023. godine i simuliranja miješanja vodenog stupca ZO-a u jesen 2021. godine, pri čemu se posebna pažnja daje testovima osjetljivosti modela na forsiranje.

Disertacija završava zaključcima te planovima i prijedlozima za daljnja istraživanja ZO-a i njemu po raslojenosti ili ugroženosti sličnih sustava.

2 PROMJENE U ZMAJEVOM OKU NA DUGOROČNOJ VREMENSKOJ LJESTVICI

Objedinjavanje i analiza dugoročnih fizičko – kemijskih podataka ZO napravljena je kako bi se odgovorilo na prvu i drugu hipotezu, što daje kontekst promjena u ZO-u na dugoj vremenskoj ljestvici.

2.1 Materijali i metode

2.1.1 Podaci

2.1.1.1 Vertikalni profili ZO-a

Sezonska mjerenja fizičko – kemijskih svojstava u vertikalnom vodenom stupcu ZO-a provode se od 1996. godine. Mjerenja se provode uvijek na istoj lokaciji – iznad točke jezera ($43^{\circ}31'50.7''$ sjeverno i $15^{\circ}57'31.7''$ istočno; lokacija označena kao „*Centar*“ na slici 3.1 – naredno poglavlje). Isprva su temperatura (T) i salinitet (S) mjereni odmah po prikupljanju uzoraka živinim termometrom i refraktometrom (proizvođač: Atago) (Ciglenečki *i sur.*, 2005, 2015). Mjerenja saliniteta su dodatno provjeravana argentometrijskom titracijom. OK je u tom razdoblju mjereno Winkler titracijom. Od rujna 2009. do kraja mjerenja koja su obuhvaćena ovim istraživanjem, OK, T i S mjereni su *in situ* spuštanjem sonde HQ40d (proizvođač: Hach Lange) od površine do 12 m. Iako najnovija mjerenja pokazuju da je jezero dubine 13,45 m (Panda, 2020), tijekom ovog istraživanja je zaključeno da su mjerenja s dubine veće od 12 m nepouzdana radi resuspenzije sedimenta koju sonda uzrokuje pri spuštanju, a koji zatim prolazi kroz osjetilne dijelove senzora sonde. Stoga, mjerenja s dubina većih od 12 m nisu korištena pri čemu „oksični dio“ jezera podrazumijeva dio u kojem su sva mjerenja OK pokazivala vrijednost jednaku ili veću 2 mg L^{-1} , dok je preostali dio jezera smatran anoksičnim. Korišteni su vertikalni profili mjereni u razdoblju 1996. – 2022., pri čemu za razdoblje kolovoz 2018. – svibanj 2019. nedostaju mjerenja T i S zbog kvara na sondi. Podaci su za razne potrebe (praćenje stanja u sloju, praćenje stanja na određenoj dubini, koreliranje s biološkim i kemijskim parametrima, ...) korišteni u mnogim prethodnim

istraživanjima (npr. Ciglencečki *i sur.*, 1998, 2005; Ćosović *i sur.*, 2000; Bura-Nakić *i sur.*, 2009; Pjevac *i sur.*, 2015; Čanković *i sur.*, 2017; Marguš *i sur.*, 2023; Mateša *i sur.*, 2025). Za potrebe dugoročnog razmatranja fizičko – kemijskih parametara, u ovom radu je napravljena kontrola kvalitete za cijeli niz podataka T, S i OK pri čemu je svaki zaseban vertikalni profil pregledan i provjeren (problemi s dubinama > 12 m su već spomenuti). Dodatno, digitalizirani su podaci koji su do početka ovog istraživanja bili dostupni samo u tekstualnom obliku (npr. podaci iz rada Čanković, 2018) te je svaki vertikalni profil formatiran na isti način kako bi se olakšala daljnja obrada podataka. Stoga, niz vertikalnih T, S i OK podataka analiziranih u ovome dijelu istraživanja predstavlja dosad najpotpuniji i najdetaljnije opisan dostupan niz podataka T, S i OK za Zmajevo oko. Podaci za dugoročnu analizu RSS-a preuzeti su iz prethodnih istraživanja, a laboratorijska obrada napravljena je na način opisan u tim istraživanjima (npr. Ciglencečki *i sur.*, 2005; Bura-Nakić *i sur.*, 2009; Ciglencečki *i sur.*, 2015; Marguš *i sur.*, 2015; Mateša *i sur.*, 2025). Uzorci za RSS su prikupljeni na dubinama 0, 2, 5, 7, 8, 9, 10, 11 i 12 m. Podaci T, S, OK i RSS su dalje analizirani u skladu s potrebama pojedinog dijela istraživanja, a što je detaljnije opisano u potpoglavlju 2.1.2.1.

2.1.1.2 Oborina

Za analizu oborine korišteni su mjesečni podaci za razdoblje 1996. – 2020. s klimatološke postaje Šibenik koju održava Državni hidrometeorološki zavod (<https://meteo.hr/>). Iako je postaja udaljena oko 23 km (odnosno, nije neposredno kraj jezera), ovaj skup podataka je pouzdan te smatramo da je reprezentativan za razmatranje dugogodišnjih promjena oborine u užem području oko ZO-a. U cijelom razdoblju nedostaju samo dva mjerenja (kolovoz 2000. godine i prosinac 2015. godine).

2.1.2 Metode

2.1.2.1 Priprema dugoročnih podataka

Tijekom analize korištena su tri tipa usrednjavanja podataka. Naime, prilikom analize dugoročnih podataka cilj je bio svesti mjerenja vertikalnih profila na reprezentativne vrijednosti, prikladne onome što se u konkretnom dijelu istražuje. Prvo je napravljena analiza površinskih i pridnenih

vrijednosti za parametre T i S. U toj analizi svaka točka predstavlja vrijednost koja je dobivena usrednjavanjem vrijednosti T i S u određenom sloju, po uzoru na to kako je slična procedura rađena u prethodnim istraživanjima (npr. Ciglencečki *i sur.*, 2015), dakle usrednjavanje u prostoru. To je dobra praksa ako se želi razmatrati poopćena vrijednost za sloj, a ne specifična dubina, što u ovom slučaju i jest bila situacija jer nas je zanimalo kako se kretala temperatura u površinskom i u pridnenom sloju. Za plitka polimiktična jezera dovoljno je razmatrati samo srednju vrijednost u vodenom stupcu (npr. Batina, Cukrov i Denona, 2025), no za jezero poput ZO-a takav pristup nije prikladan te se u dosadašnjim istraživanjima koristio upravo navedeni tip podjele na dva sloja. Ovisno o potrebama istraživanja, površinski sloj bio je drugačije definiran. Na primjer, u Simonović *i sur.* (2023) površinski sloj je bio definiran kao srednjak vrijednosti prikupljenih na dubinama $\overline{[0, 2]}$ m, dok je pridneni sloj bio srednjak $\overline{[10, 12]}$ m. S druge strane, Ciglencečki *i sur.* (2015) površinski sloj definiraju kao srednjak $\overline{[0, 5]}$ m, dok je u nešto kasnijem radu (Ciglencečki *i sur.*, 2017) pridneni sloj definiran kao srednjak $\overline{[7, 12]}$ m. Pregledom što je u kojem radu rađeno, za potrebe ovog istraživanja kao površinski sloj odabran je srednjak $\overline{[0, 5]}$ m – radi usporedivosti s Ciglencečki *i sur.* (2015) koji su radili analizu niza podataka 1996. – 2012. – dok je pridneni sloj definiran kao srednjak $\overline{[10, 12]}$ m radi usporedivosti sa Simonović *i sur.* (2023) te kako bi sloj koji razmatramo uvijek bio ispod kemokline (u onim slučajevima kad je ona bila prisutna). To jest, pretpostavka je da bila kako je pridneni sloj manje varijabilan naspram površinskog sloja te je to bila i motivacija za usporedbu ta dva sloja. Simonović *i sur.* (2023) su također razmatrali i srednju temperaturu vodenog stupca kao prosjek temperatura mjerenih na svakoj od dubina u jednom vertikalnom profilu (tj. $\overline{[0, 12]}$), odnosno neotežani srednjak, te je isti postupak ponovljen i u ovom istraživanju radi usporedbe.

Tako dobiveni srednjaci modelirani su slično kao u Ciglencečki *i sur.* (2015), to jest, primjenom linearne regresije pri čemu su modelirane godišnja (period 12 mjeseci) i polugodišnja (period 6 mjeseci) komponenta kosinus funkcije (uobičajena metoda za termohalina svojstva; npr. Vilibić *i sur.*, 2020). Postupak se temelji na generalnom modelu harmoničke regresije. Ovaj korak ima višestruku svrhu. Prva svrha jest uvažiti činjenicu da mjerenja nisu datumski ravnomjerno raspoređena kroz godinu, stoga se uključivanjem sezonalnosti umanjuje pristranost modela (za razliku od modeliranja samo pravcem). Druga svrha jest uklanjanje autokorelacije iz niza (ako se računa korelacija među različitim parametrima). Treća svrha jest omogućavanje uklanjanja

sezonskog utjecaja (jednom kad je modeliran) kako bi se, ako postoji, mogla uočiti stopa promjene na višegodišnjoj vremenskoj ljestvici. Hoće li se stopa promjene uključiti ili ne u konačni model testirano je usporedbom varijance reziduala (razlika modeliranih vrijednosti i mjerenih vrijednosti) s varijancom mjerenih vrijednosti. Navedene vrijednosti se stave u omjer te se tako formirana vrijednost označava s r^2 . Ukoliko se r^2 poveća dodavanjem stope promjene, tada možemo smatrati da on doprinosi boljem opisu podataka. Ukoliko to nije slučaj, stopa promjene se ne uključuje u konačni model.

Idući način na koji je korišteno usrednjavanje bilo je usrednjavanje po volumenu kako bi se dobila vrijednost reprezentativna za cijelo jezero. Dakle, svaki vertikalni profil pripremljen je tako da ga predstavlja jedan podatak u vremenskom nizu. Ova metoda primijenjena je na podatke S, OK i RSS. Naime, u postupku opisanom u prethodnim odlomcima korišteni su podaci pri površini i pri dnu, gdje se u gruboj aproksimaciji može pretpostaviti da je svaki sloj oblika valjka (odnosno, da je s promjenom dubine površina presjeka približno ista). No, korito ZO-a je zapravo oblika lijevka, stoga, kada se razmatra cijeli stupac bolje je uzimati prosjek po volumenu. Pogledajmo sliku 1.7 na kojoj je prikazana batimetrija ZO-a; ondje se lijepo vidi kako se površina horizontalnog presjeka znatno mijenja od površine prema dnu. Kako bi se našla srednja vrijednost parametra za cijelo jezero na datum mjerenja vertikalnog profila, napravljen je volumni srednjak za taj datum, odnosno, opet je primijenjeno prostorno usrednjavanje. Matematički, postupak glasi:

$$\overline{X}^V = \frac{1}{V_{[0,12]}} \int_{-H}^0 X(z) dV(z), \quad (2.1)$$

to jest, u diskretnom obliku:

$$\overline{X}^V \approx \frac{1}{V_{[0,12]}} \sum_{i=0}^N X(h_i) A(h_i) \Delta h_i, \quad (2.2)$$

gdje je X oznaka za S, OK ili RSS, $X(h_i)$ je mjerenje na dubini h_i , $V_{[0,12]}$ je 79861 m^3 (volumen jezera od površine do dubine 12 m prema Mihelčić i sur., 1996), $A(h_i)$ površina presjeka na dubini h_i te je $\Delta h_i = \frac{(h_{i+1} + h_i)}{2} - \frac{(h_i + h_{i-1})}{2}$, odnosno, procjena širine sloja u kojem je izmjereno $X(h_i)$.

Posljednji način usrednjavanja koji je korišten u ovom dijelu istraživanja bilo je usrednjavanje po vremenu. Usrednjavanji su oborina, prosječni salinitet po volumenu (iz prethodnog odlomka) i parametri stabilnosti (o kojima će biti više riječi u potpoglavlju 2.1.2.2) za svaku godinu iz razdoblja 1996. – 2020. Odnosno, računata je prosječna godišnja vrijednost za navedene parametre (zbroy svih vrijednosti za jednu godinu podijeljen brojem vrijednosti u toj godini). Iako je za oborinu uobičajeno gledati kumulativnu oborinu za svaku godinu, za ovaj dio istraživanja je kumulativna godišnja oborina podijeljena brojem mjeseci u godini. Naime, kako smo već naveli (potpoglavlje 2.1.1.2), u nizu podataka oborine nedostaju vrijednosti za jedan mjesec u 2000.-oj godini i jedan mjesec u 2015.-oj godini pa bi korištenje kumulativne godišnje oborine značilo da je oborina u 2000.-oj i 2015.-oj godini potcijenjena u odnosu na druge godine. Zato je za svaku godinu izračunata kumulativna suma koja je zatim podijeljena brojem dostupnih mjeseci kako bi se umanjio utjecaj mjeseca koji nedostaju. Stoga, u analizi je korišten niz prosječnih godišnjih oborina izraženih po mjesecu.

Kombinacija pristupa iznesenih u prethodnim odlomcima primijenjena je pri razmatranju višegodišnjeg kretanja oksičnog volumena u jezeru. U Simonović *i sur.* (2023) primijećeno je kako dubina kemokline postaje manja, odnosno, granica oksija – anoksija se primiće bliže površini. Kad se uz to razmotri i batimetrija jezera sa slike 1.7, prirodno je postaviti pitanje koliki je uopće omjer anoksičnog dijela jezera i oksičnog, to jest, koliko je vode dostupno za aerobni dio ekosustava u ZO-u. U svrhu odgovaranja na ovo pitanje, iz podataka batimetrije i dubine kemokline (V_{kem}) procijenjen je volumen oksičnog (V_{oks}) dijela jezera koji je potom stavljen u omjer naspram volumena cijelog jezera od površine do dna (V_0 ; 90 692 m³ prema Panda, 2020) za svaku godinu u razdoblju 1996. – 2022. Zatim je razmatrano kakav bi model mogao prikazati promjenu ovog omjera kroz godine te je odabrana funkcija arkus tangens pri čemu je pretpostavljeno da je dubina kemokline u daljoj prošlosti bila zapravo dubina jezera ($V_{oks}(t \rightarrow -\infty) = V_0$), a da će u dalekoj budućnosti granica biti na površini, odnosno, jezero će se sve sporijom brzinom približavati potpunoj anoksiji ($V_{oks}(t \rightarrow +\infty) = 0$). Prednosti i mane ovog modela će biti diskutirane u potpoglavlju 2.3.1.

2.1.2.2 Analiza gustoće i raslojavanja

S obzirom na to da su za jezero dostupni podaci saliniteta i temperature, bilo je moguće analizirati i gustoću vode. Gustoća je računa pomoću Python paketa *seawater* koji koristi jednadžbe UNESCO 1981 i UNESCO 1983 (opaska – paket *seawater* u trenutku pisanja ove disertacije više nije podržan pa je preporuka koristiti paket *gsw*, što i jest rađeno za izračune u trećem i četvrtom poglavlju). Općenito se za slana jezera ne može koristiti ista jednadžba kao za morsku vodu, već treba koristiti posebno razvijane alate i modele u kojima se u obzir uzima specifičan sastav iona karakterističan za to jezero (Dietz, Lessmann i Boehrer, 2012). No, Zmajevsko jezero je morsko jezero i sastav vode s obzirom na glavne makroelemente je sličan sastavu u Jadranskom moru pa je korištenje jednadžbe za morsku vodu prikladno. Ovako izračunate gustoće dalje su analizirane na tri načina.

Najprije je razmatrana hidrostatska stabilnost cijelog vodenog stupca korištenjem Schmidtovog indeksa stabilnosti (SSI). SSI je mjera energije potrebne da se raslojeni vodeni stupac sasvim izmiješa bez dodavanja ili oduzimanja energije iz sustava. Pristup se često koristi u istraživanjima stabilnosti jezera (npr. Kraemer *i sur.*, 2015; Oleksy i Richardson, 2021). U istraživanjima hrvatskih jezera SSI je dosad primjenjivan samo na slatkovodna jezera (Šarović i Klaić, 2023) te je ovo ujedno i prvi put da se koristi za morsko jezero, iako povremeno nalazi svoju primjenu i u oceanografskim istraživanjima (npr. Terzić, Gardiol i Vilibić, 2025). SSI računamo koristeći diskretnu formu definiranu prema (Idso, 1973):

$$SSI \approx \frac{g}{A_0} \sum_{i=0}^N (h_i - h_{cm})(\rho(h_i) - \rho_u)A(h_i)\Delta h_i, \quad (2.3)$$

gdje je g gravitacijsko ubrzanje na Zemlji ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), A_0 površina jezera ($9\,904 \text{ m}^2$ prema Panda, 2020), h_i dubina gdje je mjereno i -to mjerjenje, h_{cm} dubina centra mase, $\rho(h_i)$ gustoća na dubini h_i , ρ_u gustoća kad jezero nije raslojeno, a $A(h_i)$ i Δh_i su oznake kao i prije u tekstu. Iz jednadžbe (2.3) uočava se da SSI nije neovisan parametar, to jest, on ovisi o površini jezera te se stoga ne smije koristiti za međusobnu usporedbu hidrostatske stabilnosti raznih jezera – za tu svrhu preporuča se razmatrati razliku gustoće između dna i površine (usmena korespondencija, dr. sc. Bertram

Boehrer). No, kako ovdje razmatramo vremensku promjenu za jedno jezero (usporedba ZO-a samog sa sobom tijekom vremena), korištenje SSI je primjereno.

Granica oksija – anoksija (kemoklina) se u meromiktičnim jezerima obično podudara s piknoklinom (Boehrer, von Rohden i Schultze, 2017), a takav slučaj je i u ZO-u. Piknoklina je zanimljiva jer, ukoliko je izražena, otežava razmjenu tvari i energije između sloja iznad i ispod. Kako bi se ti procesi što realističnije uključili u numeričke modele bitno je dobro modelirati piknoklinu, što se obično radi putem vertikalnog koeficijenta difuzije, a koji u najčešćoj parametrizaciji ovisi o BVF (npr. Boehrer i Schultze, 2008; Tasnim *i sur.*, 2021). Upravo zato smo u ovom istraživanju odlučili razmotriti BVF na piknoklini. BVF u ovom radu označena je kao N_{kem}^2 i računata korištenjem sljedeće formule:

$$N_{kem}^2 \approx \frac{g}{\rho_{kem}} \frac{\rho(h_{ispod}) - \rho(h_{iznad})}{h_{ispod} - h_{iznad}}, \quad (2.4)$$

gdje su h_{ispod} i h_{iznad} redom dubina mjerenja T i S izmjerenih netom ispod i netom iznad kemokline, $\rho_{kem} \equiv \frac{\rho(h_{ispod}) - \rho(h_{iznad})}{2}$ (odnosno, prosječna gustoća piknokline), a g je kao i prije. Kako je piknoklinu teže numerički odrediti nego kemoklinu, iskoristili smo činjenicu da se u ZO-u one poklapaju i kao uvjet detekcije dubine piknokline stavili $OK < 1,0 \text{ mg L}^{-1}$. Uvjet je takav, a ne jednakost $0,0 \text{ mg L}^{-1}$, zato što senzor za otopljeni kisik u anoksičnom dijelu ne može doista očitati vrijednost nula, već daje vrlo male vrijednosti između 0 i 1 mg L^{-1} .

Kako je ZO morsko jezero, u razmatranju stabilnosti jezera zanimalo nas je i koliki su termalni i halini doprinosi gustoći kroz godišnji i višegodišnji ciklus. S obzirom na nelinearnost jednadžbe stanja za morsku vodu, u radu je korištena njena linearna aproksimacija:

$$\rho_P \approx \rho_D + \frac{\delta\rho}{\delta T} (T_P - T_D) + \frac{\delta\rho}{\delta S} (S_P - S_D), \quad (2.5)$$

gdje P i D označavaju redom vrijednosti mjerene pri površini i pri dnu. Konkretno, u ovom radu, $P = 0 \text{ m}$ i $D = -H$, u skladu s oznakama iz jednadžbe (2.1). Jednadžba stanja ovisi i o tlaku, no za plitka i slana jezera poput ZO-a taj član je zanemariv naspram preostalim članova. Za jednostavnije referiranje, u potpoglavljima 2.2 i 2.3 koriste se oznake $\Delta\rho_T \left(\equiv \frac{\delta\rho}{\delta T} (T_P - T_D) \right)$ za termalni doprinos gustoći i $\Delta\rho_S \left(\equiv \frac{\delta\rho}{\delta S} (S_P - S_D) \right)$ za halini doprinos gustoći.

Zadnji dio vezan uz istraživanje gustoće i stabilnosti ZO-a bila je analiza sezonalnosti jezera po pitanju miješanja. Pri prvom crtanju grafova za $\Delta\rho_T$ i $\Delta\rho_S$ uočena je pojava da $\Delta\rho_T$ mijenja predznak tijekom godine, dok je $\Delta\rho_S$ doprinos uvijek pozitivan, no poprima godišnje minimume (više o tome u potpoglavlju 2.3.4). Za svaki takav događaj u nizu 1996. – 2022. određen je datum (iz dostupnih mjerenja) te mu je pridružen dan u godini brojen od 1. siječnja godine u pitanju (npr. ako je promjena predznaka za $\Delta\rho_T$ uočena na mjerenju 2. rujna 1996., onda je toj promjeni pridružen broj 246, to jest, zabilježeno je da se dogodila 246. dan u godini). Potom je iz niza izračunat prosječni dan i standardna devijacija kada se ta promjena događa tijekom 27 godina, što je procijenjeni indikator kada u godini ZO postaje manje hidrostatički stabilno.

Svi izračuni za ovo poglavlje rađeni su korištenjem programa u Python-u napisanih za svrhe ovog istraživanja.

2.2 Rezultati

2.2.1 Koncentracija RSS i OK

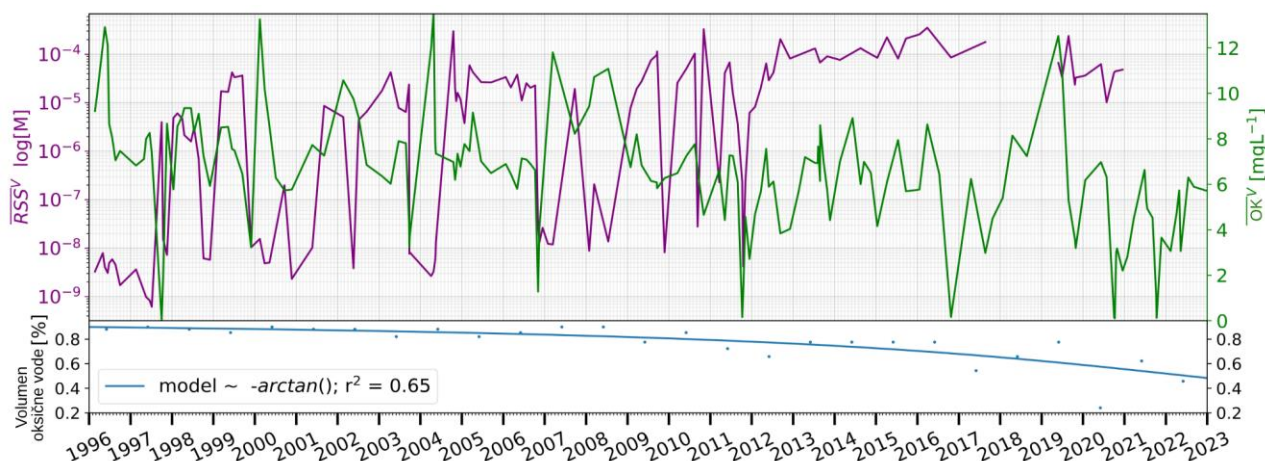
Kao pregled stanja jezera, razmotrimo najprije dugoročni niz podataka o koncentraciji RSS i OK (slika 2.1). Ono što se na prvi pogled vidi jest opći porast koncentracije RSS (uprosječno po vodenom stupcu; oznaka $\overline{RSS^V}$ na grafu) i njegova varijabilnost kroz godine. RSS koncentracije su bile vrlo niske (otprilike $10^{-9} - 10^{-8}$ M; logaritamska ljestvica na y-osi) između veljače 1996. godine, kada je pokrenuto sezonsko profiliranje ZO-a, i rujna 1997. godine, kada je zabilježeno prvo miješanje s potpunom anoksijom. Nakon tog razdoblja, koncentracija RSS znatno raste (do $10^4 - 10^5$ puta), pri čemu vrijednosti ostaju visoke tijekom godina. No, valja uočiti kako od 1997. do 2011. gotovo svake godine u jesen dolazi do naglog pada koncentracije RSS, što prati i pad u OK-u (uprosječno po vodenom stupcu; oznaka $\overline{OK^V}$ na grafu), koji pak ima maksimum mjesec ili dva poslije.

Nakon anoksične holomiksije 2011. godine nije primjetan znatan pad koncentracije RSS te se on izgledno nastavlja nakupljati u jezeru dok koncentracija OK pada (primijećeno i u Ciglencečki i sur., 2015). Korištenjem činjenice da pri anoksičnom miješanju (koje je obično brzo) OK padne na vrijednosti bliske nuli, na slici 2.1 lako se uočavaju godine u kojima je do njih došlo: 1997., 2011., 2016., 2020. i 2021. godina. Primjetno je kako takvi događaji postaju sve češći tijekom godina.

Istovremeno, zanimljivo i zabrinjavajuće je uočiti i da je volumen oksične vode u jezeru s 90,1% u 1996. godini pao na 46,7% u 2022. godini. To jest, volumen anoksične vode u jezeru je s 9,9% tijekom 27 godina narastao na više od pola volumena jezera. Kako je najavljeno u potpoglavlju 2.1.2.1, omjer oksične vode u jezeru stavljen je u omjer s volumenom jezera i modeliran čime je dobiven sljedeći izraz:

$$\frac{V(t)}{V_0} = \left(0,5 - \frac{1}{\pi} \arctan(0,1143t - 0,9851\pi) \right), \quad (2.6)$$

gdje je t iskazano u godinama od početka kontinuiranog monitoringa jezera (1996. godina). Ovaj model ukazuje na to da je točka infleksije, nakon koje se očekuje usporavanje napredovanja anoksije u jezeru, dostignuta u ljeto 2022. Ipak, model je valjan pod pretpostavkama navedenima u potpoglavlju 2.1.2.1.

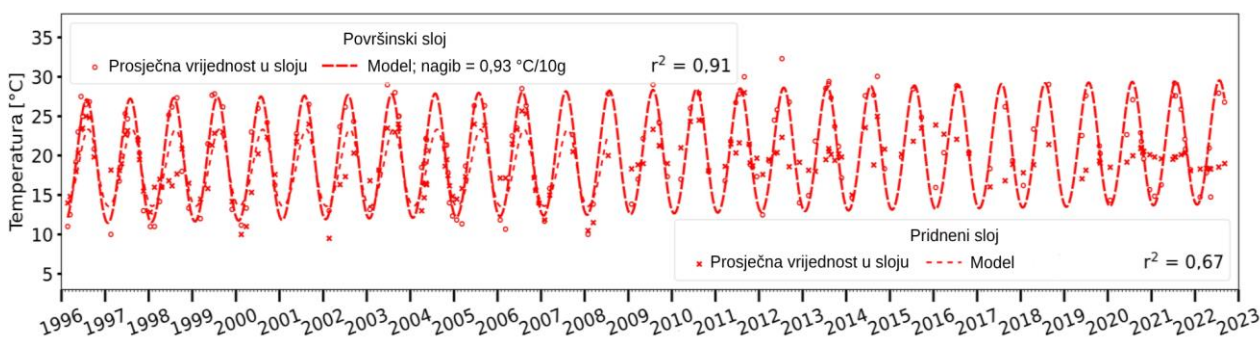


Slika 2.1. Prikaz višegodišnjih koncentracija RSS i OK uprosječenih po volumenu jezera (gore) te volumen oksičnog dijela jezera u odnosu na ukupni volumen jezera (prikazan u postocima; dolje). Za modeliranje volumena oksičnog dijela jezera korištena je funkcija arkus tangens (opisano u potpoglavlju 2.1.2.1).

2.2.2 Temperatura i salinitet

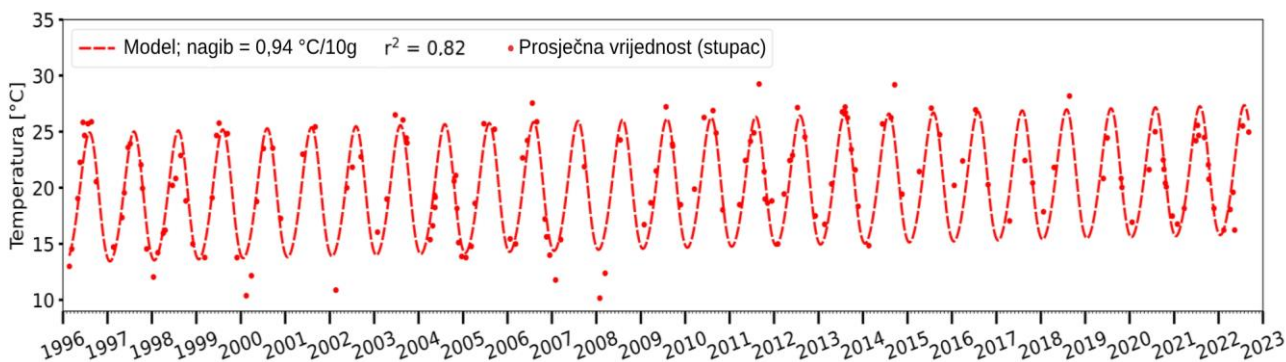
Površinska temperatura ($[0, 5]$ m) ima robustan godišnji signal što ukazuje na blisku vezu površine jezera s atmosferskom varijabilnosti (slika 2.2). Amplituda godišnjeg signala je 7,86 °C sa stopom zagrijavanja od 0,93 °C po desetljeću. Ovaj se model vrlo dobro slaže s podacima ($r^2 = 0,91$). S

druge strane, kada se isti postupak primijeni na pridneni sloj ($\overline{[10,12]}$ m), r^2 poprima vrijednost 0,42, što ukazuje na to da je povećani dio rezidualnog signala loše opisan modelom koji ima sezonski signal i stopu porasta. Kako je ova metoda korištena u prethodnim istraživanjima na ZO-u (Ciglencečki *i sur.*, 2015; Čanković *i sur.*, 2019), bilo je razumno za očekivati da je model primjenjiv do nekog razdoblja. Stoga, testirali smo model na isječcima cijelog niza (prvi segment 1996. – 2006., drugi segment 1996. – 2007., ...) te tražili nakon koje godine se r^2 počinje smanjivati – indikator da model lošije opisuje podatke. Prijelomna godina je 2008. (slika 2.2; crtkana linija) stoga je za pridneni sloj model ucrtan samo do te godine.



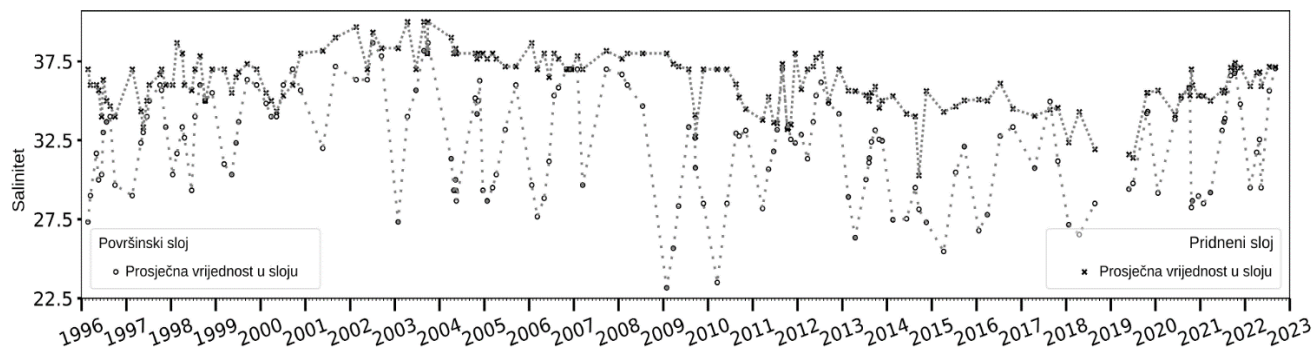
Slika 2.2. Prikaz višegodišnjih promjena temperature u površinskom i pridnenom sloju. Površinski sloj modeliran je sezonskim signalom i linearnom stopom promjene (nagib pravca; model opisan u potpoglavlju 2.1.2.1), dok za pridneni sloj model sadrži samo sezonski signal do 2008. godine.

Amplituda godišnjeg signala do 2008. godine u pridnenom sloju je 4,93 °C, što ukazuje da se izmjena godišnjih doba odražava i u dubljim slojevima, no u manjoj mjeri. Nakon toga, sezonski signal gubi značaj. Također je zanimljivo istaknuti da temperatura pridnenog sloja općenito postaje manje varijabilna te se bliži konstantnoj vrijednosti od oko 20 °C. Također smo modelirali i temperaturu za cijeli vodeni stupac (kao običan srednjak, a ne otežani), te je amplituda tako određenog signala 5,74 °C sa stopom zagrijavanja od 0,94 °C ($r^2 = 0,82$; slika 2.3). Zagrijavanje stupca očito dolazi od plićih slojeva jer smo pokazali kako donji dio jezera postaje sve više stagnantan.



Slika 2.3. Prikaz višegodišnjih prosjeka temperature u cijelom vodenom stupcu (neotežani srednjak). Model sadrži sezonski signal i nagib linearnog pravca (model opisan u potpoglavlju 2.1.2.1).

Isti postupak napravljen je za površinski i pridneni salinitet (slika 2.4). Salinitet nije modeliran jer je bilo kakvo nametanje sezonskog/godišnjeg ciklusa davalo male r^2 , odnosno, takav model nije davao ništa bolje rezultate od onoga što bi se dobilo s modelom koji je srednjak niza. To se vidi i vizualno; nema uočljive stope promjene kao s podacima temperature na slikama 2.2 i 2.3. Ipak, valja prokomentirati varijabilnost niza. Na prvi pogled može se uočiti dugogodišnja oscilacija (vremenska ljestvica 20 – 30 godina) prisutna u signalu. I površinski i pridneni sloj pokazuju porast saliniteta od 1996. do 2003. godine, onda pad tijekom narednih 16 godina, a zatim ponovno porast u zadnje 3 godine.

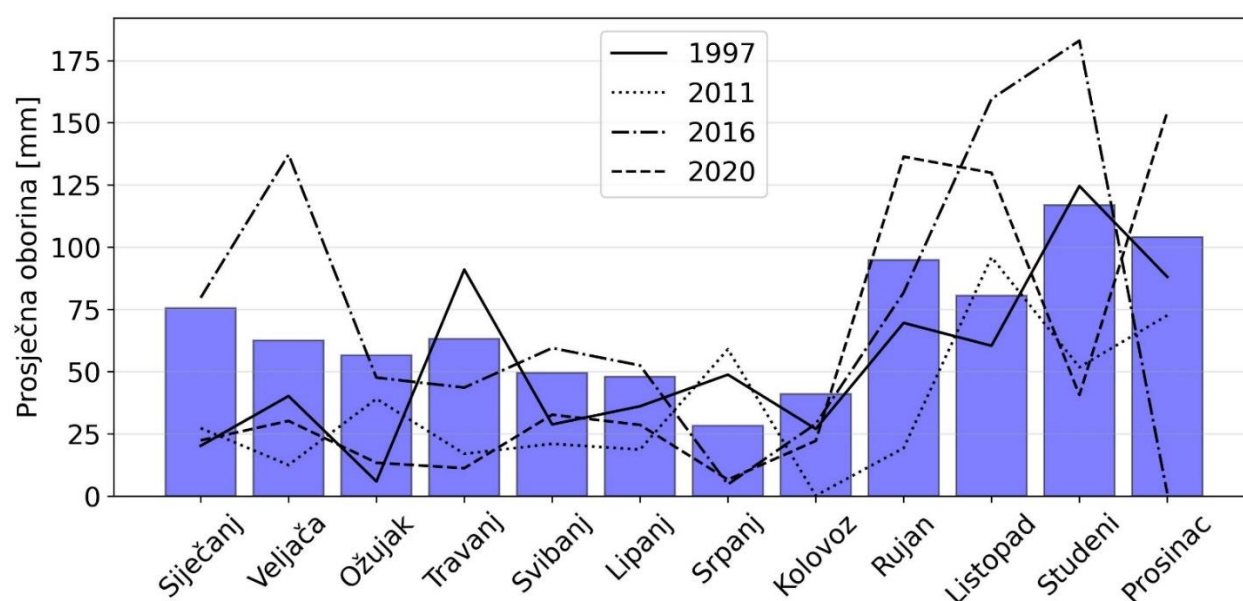


Slika 2.4. Prikaz višegodišnjih promjena saliniteta u površinskom i pridnenom sloju.

2.2.3 Oborina i hidrostatska stabilnost

Razmotrimo naprije sliku 2.5 gdje je prikazana klimatologija oborine za postaju Šibenik, a temeljena na podacima za razdoblje 1996. – 2020. godina tijekom kojega su vršena sezonska

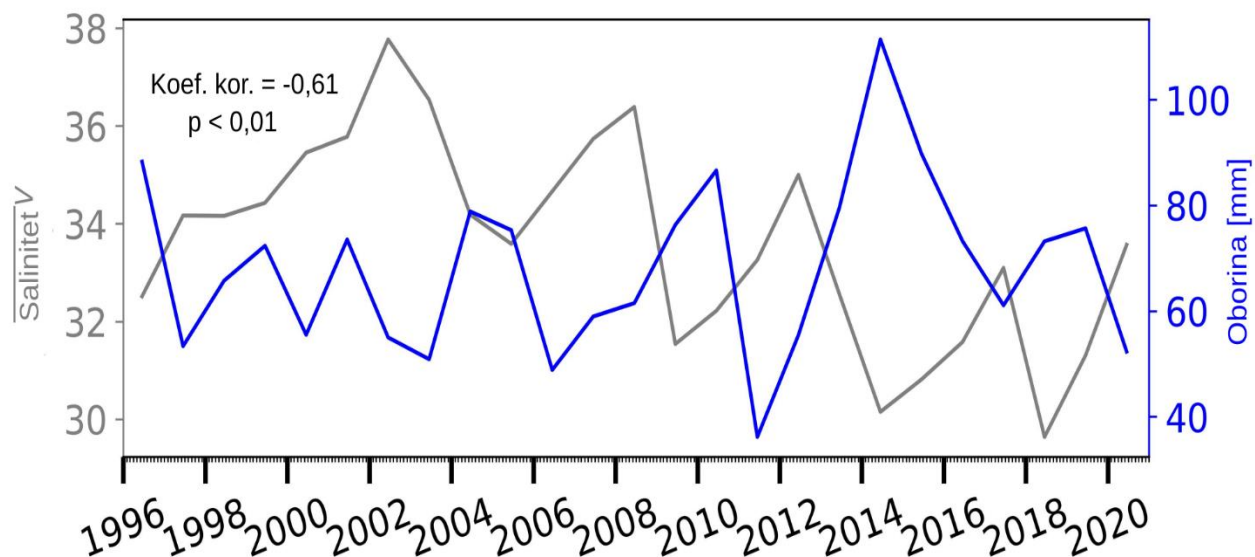
mjerenja fizičko – kemijskih parametara na ZO-u. Možemo primijetiti da je srpanj najsušniji mjesec, dok je studeni najvlažniji mjesec u kojem padne četiri puta više oborine nego u srpnju. Općenito, jesen i zima kišniji su od toplijih mjeseci. Uz podatke o klimi nacrtane su i vrijednosti za svaku od godina u kojima je zabilježeno anoksično miješanje ZO-a: 1997., 2011., 2016. i 2020. S iznimkom 2016. godine, vidljivo je kako je u godinama miješanja oborina u prvom dijelu godine većinom ispod očekivanog prosjeka. No, 2016. godina je podbacila tijekom srpnja kada je palo tek 4,7 mm kiše. Nakon iznimno sušnog srpnja uslijedio je kolovoz koji je također bio 30% sušniji od prosjeka za 1996. – 2020. Što se tiče 2020. godine, ona je tijekom proljeća i ljeta bila vrlo sušna, dok su jesen i zima bili iznimno vlažni.



Slika 2.5. Prosječna mjesečna oborina tijekom razdoblja 1996. – 2020. (stupčasti prikaz) te mjesečne oborine tijekom godina 1997., 2011., 2016. i 2020. (linijski prikaz) za postaju Šibenik.

Za bolje razumijevanje višegodišnje stope promjene saliniteta (slika 2.4) razmotrili smo oborinu i salinitet (usrednjen po volumenu) tijekom razdoblja između 1996. i 2020. godine, pri čemu su oba skupa podataka pripremljena na način opisan u potpoglavlju 2.1.2.1. Odnos oborine i saliniteta prikazuje slika 2.6. Odmah su uočljive oscilacije u nizu podataka koje oblikom sličje za oba parametra, a korelacija među nizovima je negativna i značajna: $-0,61$ ($p < 0,01$). Čini se da je količina soli u vodenom stupcu uglavnom upravljana promjenama u režimu oborine, naročito nakon 2003. godine. Dugogodišnja varijabilnost oborine može biti proces koji je u pozadini

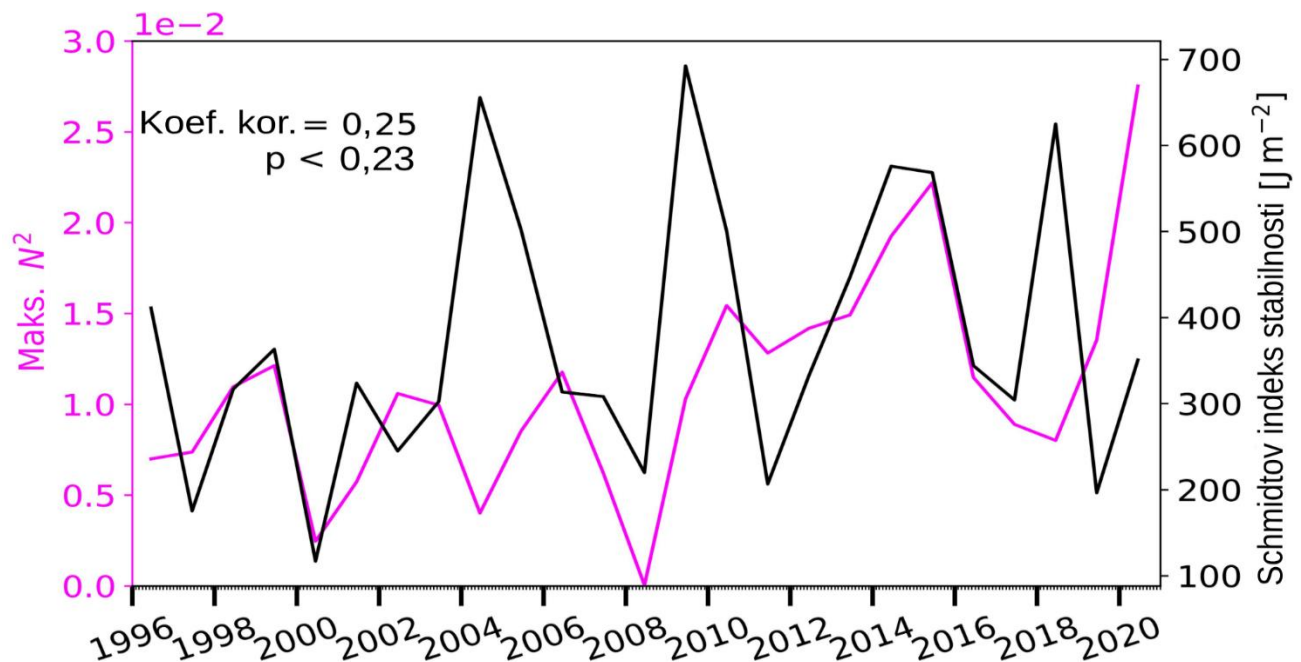
dugogodišnjih oscilacija uočenih u salinitetu (slika 2.4) s tim da je bitno gledati odnose među susjednim godinama za razliku od razmatranja na slici 2.5.



Slika 2.6. Prikaz prosječnog godišnjeg saliniteta u jezeru i prosječne godišnje oborine po mjesecu za svaku od godina tijekom razdoblja 1996. – 2020.

S obzirom na to da su uočeni zagrijavanje površinskog sloja i stagnacija pridnenog sloja, ako se još tome pridoda i primijećena varijabilnost saliniteta od godine do godine, prirodno je pogledati kako se u tom razdoblju kretala hidrostatička stabilnost (raslojenost) vodenog stupca u ZO-u. U tu svrhu računata je BVF na granici oksija – anoksija za svako uzorkovanje te je u graf ucrtana maksimalna vrijednost za svaku godinu, kao indikator najjače granice na piknoklini za tu godinu. Također smo izračunali i SSI kako bi se, uz stabilnost piknokline, razmotrila i prosječna stabilnost cijelog vodenog stupca za svaku od godina (slika 2.7). SSI nalikuje nizu prosječnih saliniteta na slici 2.6, što također odražava uočenu varijabilnost oborine u razmatranom razdoblju. Dodatno, jezero prolazi kroz godine visoke stabilnosti (maks. vrijednosti 1999., 2001., 2004., 2009., 2014./2015. i 2018. godine) i niske stabilnosti (min. vrijednosti 1997., 2000., 2002., 2006./2007./2008., 2011., 2016./2017. i 2019. godine). I ovdje se može uočiti prijelazna godina, 2003., kao godina u kojoj se mijenja odnos minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Naime, u razdoblju 1996. – 2003. SSI poprima vrijednosti iz raspona $[117, 364] \text{ J m}^{-2}$, dok su tijekom razdoblja 2003. – 2020. vrijednosti iz šireg raspona, pri čemu je donja granica viša nego prije: $[196, 693] \text{ J m}^{-2}$. Pri tome maksimalna godišnja vrijednost BVF na granici oksija – anoksija ne pokazuje

sličnu periodičnost kao SSI te su općenito oba niza slabo korelirana (ili nekorelirana; 0,25 pri $p < 0,23$). Uz to, vidljivi porast u maksimalnoj godišnjoj BVF ukazuje na jačanje granice oksija – anoksija u ZO-u tijekom godina, to jest, sve otežaniji prijenos energije i tvari kroz piknoklinu.

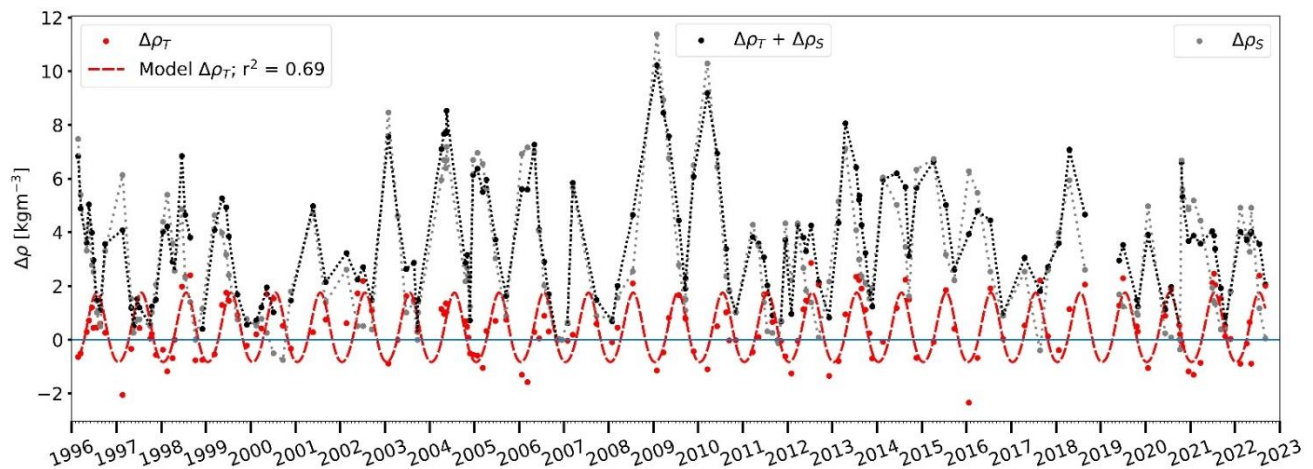


Slika 2.7. Prikaz maksimalne godišnje BVF na kemoklini i prosječnog godišnjeg SSI za razdoblje 1996. – 2020.

2.2.4 Termalni i halini doprinosi gustoći i hidrostatsčkoj stabilnosti

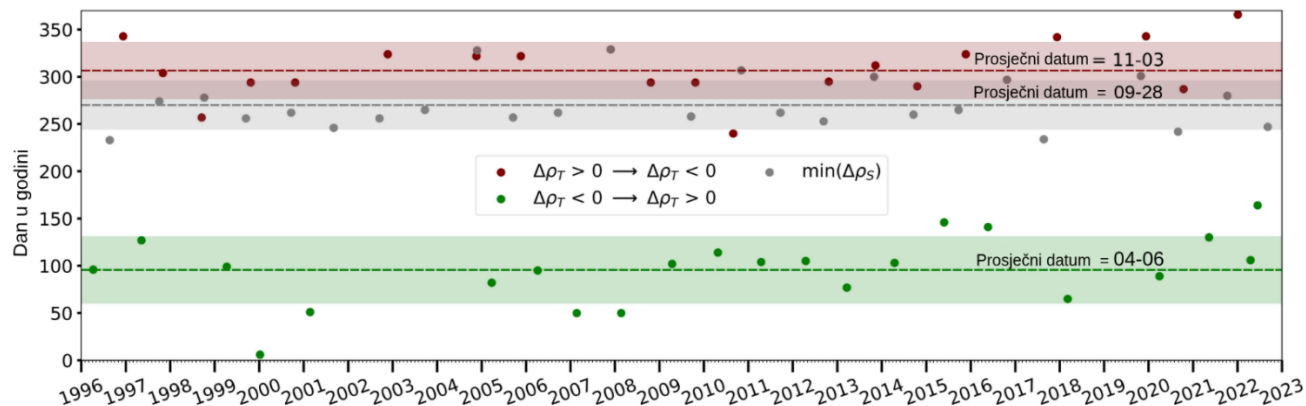
Kako su za analizu gustoće u ZO-u bitni i salinitet i temperatura, za ispitivanje razlika između površinskog i pridnenog sloja najprije je izračunata ukupna razlika u gustoći između površine i dna, a zatim je ispitivan zasebni doprinos saliniteta i temperature, odnosno, halini ($\Delta\rho_S$) i termalni ($\Delta\rho_T$) doprinosi razlikama u gustoći korištenjem linearne aproksimacije jednadžbe stanja za morsku vodu (jednadžba 2.5). Slika 2.8 prikazuje ove doprinose tijekom 27 godina. Halini doprinosi su uglavnom pozitivni, s iznimkom kasnog ljeta 2000., 2011., 2012., 2014., 2017. i 2020. godine. Ovakva situacija – slaniji sloj iznad slađeg sloja (inverzija saliniteta) – moguća je ako je gornji sloj znatno topliji od donjeg. Općenito, takva situacija ukazuje na smanjenu stabilnost vodenog stupca. Doprinosi kroz godine ukazuju na sezonalnost, no ona nije izrazito pravilna te pokazuje veliku razliku u amplitudi između godina (npr. 2000. godine raspon doprinosa je $2,5 \text{ kg m}^{-3}$, dok je 2008. i 2009. godine $10 - 11 \text{ kg m}^{-3}$). S druge strane, predznaci termalnih doprinosa se

redovno (sezonski) mijenjaju kroz godinu te je termalni doprinos bilo moguće i modelirati slično kao što je to napravljeno s nizom temperature, ali bez linearne stope promjene ($r^2 = 0,69$). Amplituda termalnih doprinosa kroz godinu je oko 2 kg m^{-3} . Razdoblje u godini u kojem se promjena predznaka događa prilično je pravilno (listopad/studeni): tijekom 7 mjeseci (travanj – studeni) temperatura dodatno stabilizira vodeni stupac, dok tijekom 5 mjeseci (studeni – travanj) smanjuje hidrostatičku stabilnost vodenog stupca, iz čega se vidi i da je razdoblje u kojem je površina toplija od pridnenog sloja dva mjeseca dulje nego trajanje obrnutog režima. Na istu sliku s halinim i termalnim doprinosima ucrtani su i ukupni doprinosi (crna crtkana linija) iz čega se vidi da u ZO-u salinitet ima od 2 do 5 puta veći utjecaj na hidrostatičku stabilnost od termalnog doprinosa.



Slika 2.8. Doprinos saliniteta i temperature, to jest, halini ($\Delta\rho_S$) i termalni ($\Delta\rho_T$) doprinosi razlikama u gustoći. Godišnji signal modeliran je linearnim modelom opisanim u potpoglavlju 2.1.2.1.

Na slici 2.9 prikazani su procijenjeni srednji dani u godini kada $\Delta\rho_S$ poprima minimalnu vrijednost i kada $\Delta\rho_T$ mijenja predznak. Kada se dan u godini pretvori u datum, može se očekivati da jezero ima topliji površinski sloj od 6. travnja do 3. studenog, odnosno, ono što se već moglo naslutiti iz slike 2.8, ali sada još datumski preciznije. Primicanjem kraju ljeta halini doprinos ima sve manji značaj te svoj minimum postiže u prosjeku na dan 28. rujna. Dakle, u većini slučajeva halini doprinos poprimi minimum mjesec dana prije nego što temperaturni doprinos promijeni predznak, stoga je jezero tijekom listopada najnestabilnije.



Slika 2.9. Dani u godini u kojima termalni doprinos mijenja predznak i dani godini u kojima halini doprinos poprima minimum. Horizontalne linije prikazuju srednje vrijednosti za razdoblje 1996. – 2022., dok je standardna devijacija iskazana osjenčanim područjem oko srednje vrijednosti.

2.3 Diskusija

2.3.1 Širenje anoksičnog dijela jezera

Na slici 2.1 može se uočiti kako je do 2012. godine u jesen ili zimu prisutan nagli pad u koncentraciji RSS ($10^3 - 10^4$ puta) dok takva pojava poslije nije zabilježena. Uz to, prisutan je i pad u koncentraciji OK-a, iako ona uglavnom ne pada ispod 1 mg L^{-1} , osim u posebnim slučajevima anoksične holomiksije 1997. i 2011. godine. To se može objasniti time da prilikom miješanja – kada se gubi piknoklina koja razdvaja dijelove jezera te služi kao barijera tvarima – OK dolazi u kontakt s RSS pri čemu oni reagiraju (pad koncentracije oba parametra), no dovoljno se kisika unosi u sustav naspram produkcije RSS da ipak prevladava aeracija jezera. Izgleda da se jezero običavalo miješati svake godine u jesen/zimu, no stupnjevito i bez prevladavanja anoksičnih uvjeta, to jest, podaci upućuju na to da se jezero regeneriralo. Takav proces je inače uobičajen za slatkovodna jezera u umjerenim širinama kada se miješanjem kisik donosi u dublje slojeve, a nutrijenti akumulirani pri dnu u pliće dijelove gdje ima dovoljno svjetlosti pa ih primarni proizvođači mogu koristiti. No, nakon 2012. godine slijedi akumulacija RSS (slika 2.1) te izgleda da količina kisika ili brzina kojom se unosi u jezero nije dovoljna da bi se jezero regeneriralo te koncentracija RSS ostaje visoka kroz sva godišnja doba. Prijašnja istraživanja ukazuju i na to da

se jedan dio RSS otpušta u atmosferu u obliku plina sumporovodika (Cvitešić Kušan, Frka i Ciglencečki, 2019), a neugodan miris osjeti i prilikom posjeta jezeru nakon anoksičnih holomiksija. Takva brza izmješavanja u kojima reakcija RSS s OK dovodi do potrošnje kisika i stvaranja oksidiranih formi sumpora poput koloidnog sumpora (Bura-Nakić *i sur.*, 2009) što je i vidljivo i u promjeni boje jezera (slika 1.6) naglo donesu velike količine nutrijenata u površinske slojeve što uzrokuje pojačano cvjetanje fitoplanktona nakon anoksične holomiksije kao i u narednim mjesecima (Barić *i sur.*, 2003; Ciglencečki *i sur.*, 2015; Marguš *i sur.*, 2023). Cvjetanje fitoplanktona ima dva učinka na ZO: najprije poveća količinu kisika te su u jezeru česti maksimumi kisika koji su prelazili granice detekcije senzora ($OK > 20 \text{ mg L}^{-1}$), a zatim se znatno poveća njegova potrošnja kako bi se sva ta novoproducirana organska tvar mogla razgraditi (Simonović *i sur.*, 2023), što je zapravo mehanizam pozitivne povratne sprege koji doprinosi propadanju ekosustava jezera. Vertikalno miješanje obično povezujemo s obnavljanjem ekosustava, no za ZO recentna istraživanja pokazuju kako miješanje stavlja dodatan pritisak na ekosustav.

U Simonović *i sur.* (2023) pokazano je kako se dubina kemokline smanjuje alarmantnom brzinom od otprilike 2,32 m po desetljeću (slika 1.7). Budućnost dubine kemokline bez uporabe klimatskog modela može se samo nagađati. Ipak, očekuje se da će se dubina nastaviti smanjivati zbog zagrijavanja površinskog sloja i posljedičnog smanjenja topljivosti OK-a te diskutiranog porasta potražnje kisika radi visokih koncentracija organske tvari. Pri modeliranju pada volumena oksične vode u jezeru (slika 2.1) pretpostavili smo da će u dalekoj budućnosti jezero postati sasvim anoksično. No, to je vrlo ekstreman scenarij jer, dok god ima kisika u atmosferi, vjerojatnije je da će se postizati neka ravnotežna dubina koja je određena brzinom produkcije RSS-a u dubljim slojevima i brzinom regeneracije OK-a u pličim dijelovima. S druge strane, lijeva asimptota također nije sasvim realistična zbog toga što je radi relativno brze sedimentacije jezero u daljoj prošlosti bilo dublje nego sada (Mihelčić, 1994). Za model bi bila realističnija asimptota $V_{kem}(+\infty) = V_{ekv}$, gdje je V_{ekv} volumen oksične vode kada je postignuto ravnotežno stanje. Opravdanje za ovakav model leži u opažanju da je tijekom 27 godina istraživanja unos kisika iz atmosfere i njegova produkcija u jezeru uvijek bila dovoljna da se kisik regenerira u površinskim slojevima, čak i nakon anoksične holomiksije. Nakon takvih događaja izmjena plinova s atmosferom čini se ključnim procesom jer dopušta obnovu malih aerobnih organizama koji pomažu oksigenirati površinske slojeve, iako se nakon anoksične holomiksije jezero nikad u potpunosti ne vrati na prijašnje stanje s obzirom na biološka svojstva (Bakran-Petricioli, Petricioli i Požar-

Domac, 1998; Ciglencečki *i sur.*, 2015, 2017). Nadalje, primijećeno smanjenje oksične vode u jezeru i akumulacija RSS-a predstavljaju ključne procese u razumijevanju naglih miješanja jezera i njegove degradacije. Svakako se čini da koncentracije OK-a u godinama 1997., 2011., 2016., 2020. i 2021. nisu bile dovoljne da kisik u jezeru „izdrži“ kontakt s RSS-om iz dubljih, anoksičnih slojeva prilikom nestajanja piknokline. Stoga, čak i neekstremni meteorološki događaji manje energije mogli bi u budućnosti biti dovoljni da uzrokuju anoksičnu holomiksiju, za razliku od prije kada je ona diskutirana isključivo kao posljedica ekstremnih pojava u atmosferi (Ciglencečki *i sur.*, 2015). Naposljetku, zabrinjavajuće saznanje iz razmatranja koncentracije OK-a, RSS-a i volumena oksične vode jest da je aerobnim organizmima u jezeru 2022. bilo dostupno samo 50% životnog prostora kojeg su imali na raspolaganju 1996. godine, stoga je i za očekivati da se takav drastičan rezultat očituje u budućim istraživanjima sastava zajednica i brojnost vrsta u ZO-u.

2.2.2 Zagrijavanje površinskog sloja i stagnacija pridnenog sloja

Prijašnji radovi na temu ZO-a pokazali su prisutnost zagrijavanja kroz vodeni stupac: Ciglencečki *i sur.* (2015) su ustanovili pozitivnu linearnu stopu promjene od 1,72 °C po desetljeću za razdoblje 1996. - 2012., Čanković *i sur.* (2019) pokazali su da se na dubini 12 m vodeni stupac zagrijavao u prosjeku s 0,7 °C po desetljeću tijekom razdoblja 1996. – 2015., dok Simonović *i sur.* (2023) ukazuju na to da se srednja temperatura vodenog stupca (neotežani srednjak) od 1996. do 2020. povećavala brzinom od 1,31 °C po desetljeću. U ovom istraživanju ponovljena je ista metoda korištena u navedenim radovima na dopunjenom skupu podataka, odnosno, za razdoblje 1996. – 2022., radi razmatranja kako su se te stope mijenjale kroz 27 godina, a veća duljina niza omogućava i diskutiranje višegodišnjih (tzv. *interannual*) varijabilnosti. Ono što je prvo zamijećeno jest kako je u pridnenom sloju godišnji signal slabo promjenjiv nakon 2008. godine. Također, kada je u linearni model dodana sezonska sastavnica te model zatim primijenjen najprije na cijeli niz, a zatim na njegove kraće segmente (1996. – 2022., 1996. – 2021., ..., 1996. – 2006.), uključivanjem sezonskog dijela model nije ništa bolje opisivao mjerene podatke ako su u obzir uzimana mjerenja nakon 2008. godine. Odnosno, sezonalnost nakon 2008. godine nije bila dovoljna izražena da bi se njenim uključivanjem u model smanjio rezidual. Ovaj zaključak podupire i položaj kemokline koji je bio iznad 10 m od 2008. godine (osim u kratkim razdobljima nakon anoksične holomiksije 2016., 2020. i 2021. godine), ukazujući na to da je od tada pridneni sloj odsječen od ostatka jezera, pa

tako i površine. S amplitudom 7,86 °C godišnji signal u površinskom sloju i dalje je izražen, što predstavlja iznimne vrijednosti za jedan morski sustav i pokazuje da je površina ZO-a pod znatnim utjecajem godišnjih varijabilnosti u atmosferi (izrazito temperature zraka koja ima sličan raspon u središnjem dijelu istočne Jadranske obale, Zaninović *i sur.*, 2008). Ukupno gledano, mjereni raspon temperatura u površinskom sloju je 6 – 33 °C, to jest, 27 °C (Ciglencečki *i sur.* 2017), što implicira da je ukupna varijabilnost oko dva puta veća od sezonskog ciklusa. Također, s obzirom na tako veliki raspon zagrijavanja koje pak vrlo malo ili nimalo ne dopire do pridnenog sloja, može se zaključiti da je razmjena topline između dva dijela jezera otežana i smanjena. To je također mehanizam pozitivne povratne sprege jer otežana razmjena energije dovodi do toga da se dolazna energija apsorbira uglavnom u površinskom sloju što pak dovodi do daljnjeg zagrijavanja tog sloja. Ovdje treba napomenuti da je sloj kemokline vrlo turbidan i ne dopušta prodor Sunčevog zračenja u anoksični dio. Dakle, ako je kemoklina plića, to dodatno potpomaže zagrijavanju oksičnog sloja. Ista analiza za prosječnu temperaturu u vodenom stupcu pokazuje kako se cijeli vodeni stupac zagrijava, što je bilo i za očekivati prema rezultatima rada Simonović *i sur.* (2023). Ono što je zanimljivo za razmotriti jest da se stopa zagrijavanja, i za površinski sloj i za vodeni stupac, mijenja. Naime, stopa promjene za površinski sloj temeljen na nizu duljine 17 godina (razdoblje 1996. - 2012.; Ciglencečki *i sur.*, 2015) bila je 85% veća nego stopa promjene izračunata u ovome radu temeljem 27 godina (slika 2.3). Vjerojatno se radi o klimatskoj varijabilnosti koja nije razlučena u modelu, kao što je npr. ona koja potječe od Atlantske multidekadske oscilacije (engl. *Atlantic Multidecadal Oscillation*, Wang *i sur.*, 2017) i za koju se zna da utječe na površinsku temperaturu Sredozemlja (Marullo, Artale i Santoleri, 2011). Studije u budućnosti bi trebale izdvojiti utjecaje ovakvih oscilacija visokog perioda i kvantificirati stope promjene generirane antropogenim klimatskim promjenama.

2.3.3 Oborina kao dugogodišnji pokretač varijabilnosti saliniteta

Varijabilnost saliniteta u više izoliranom pridnenom sloju (slika 2.4) podržava već iznesenu tezu da se klimatska varijabilnost očituje u nizu temperature. Naime, kako je pridneni anoksični sloj prilično izoliran od ostatka jezera, salinitet u njemu može služiti kao indikator događanja na višegodišnjoj ljestvici. Kada se niz razmotri vizualno, vidi se stopa porasta saliniteta u razdoblju 1996. – 2003., zatim tendencija pada tijekom sljedećih 15 godina, nakon čega pak slijedi porast u

novije doba (2018. – 2020. godina). Prosječna godišnja oborina po mjesecu i prosječni godišnji salinitet jezera su visoko i negativno korelirani, dok oba niza pokazuju periodičnost na ljestvici 4-5 godina. Nije neobično da specifično poklapanje u vremenu dva ili više procesa koji utječu na klimatsku varijabilnost uzrokuje pozitivan, negativan ili neutralizirajući učinak na uobičajenu sezonsku prirodu saliniteta (npr. Li *i sur.*, 2021; Matić *i sur.*, 2022). U trenutku izrade ovog dijela istraživanja za ZO nije bilo indikacija da postoje podzemni dotoci slatke vode. Stoga, moglo se pretpostaviti da je jedini unos slatke vode u ZO direktno oborinom koja padne na njegovu površinu ili putem površinskog otjecanja tijekom i nakon oborine. Ako uz to još uzmemo u obzir malu površinu i volumen jezera, sasvim je logično zaključiti kako ZO brzo reagira na sezonske promjene u režimu oborine što se na količini soli u jezeru odražava već unutar godine. Sličan princip vrijedi i za višegodišnju varijabilnost oborine jer stopu promjene oborine možemo povezati i s padom saliniteta u razdoblju 2003. – 2018. i porastom zadnjih godina, dok se međugodišnje promjene oborine mogu povezati s nižim salinitetom.

Utjecaj klimatske varijabilnosti uočen je i u već spomenutom jezeru Jellyfish koje je također morsko jezero s anoksijom ispod 13 m dubine. Martin *i sur.* (2006) ustanovili su da se ciklusi ENSO-a mogu pratiti temeljem podataka iz jezera te da se anomalija temperature može pripisati izmjeni ciklusa. Ono što treba zamijetiti jest da, za razliku od jezera Mir (npr. Mlakar *i sur.*, 2015), u ZO-u nije zabilježen salinitet viši od onoga u Jadranu. Stoga je vodna bilanca ZO-a uvijek pozitivna, odnosno dotok slatke vode putem oborina i eventualno kršem je konstantno veći od isparavanja, rezultat koji su nagovijestili Ciglencečki *i sur.* (2017). No, u ovom istraživanju nije se detaljno istraživao svaki mogući uzročnik pada saliniteta te, iako je iz rezultata izgledno da velik dio nosi klimatska varijabilnost, ne može se isključiti utjecaj direktnog antropogenog djelovanja (u okolini jezera prostor je djelomično prenamijenjen za turističke djelatnosti) koji vjerojatno modulira klimatske utjecaje kroz, na primjer, povećanje ili smanjenje površinskog otjecanja. Osobito je značajna promjena tijekom 2003. nakon koje je jezero povezanije s ciklusom oborine, a što do danas nije uspješno razjašnjeno nekom klimatskom varijabilnosti. No, bez dužeg niza podataka prije 2003. godine nije moguće detaljnije razmotriti uzročnike. Iako je očita uloga oborine u varijabilnosti saliniteta ZO-a, a iz slike 2.5 se može uočiti generalna tendencija niže oborine tijekom proljeća i ljeta, godine u kojima se jezero miješalo i postalo sasvim anoksično ne pokazuju izražene zajedničke karakteristike. Stoga, preduvjeti za anoksično miješanje – ujednačenost

saliniteta u vodenom stupcu – mogu biti ili kraćeg trajanja (npr. jedan sušni mjesec) ili dužeg trajanja (npr. više sušnih mjeseci), što će biti predmet budućih istraživanja.

2.3.4 Varijabilnost hidrostatske stabilnosti

Zagrijavanje površinskog sloja, stagnacija pridnenog sloja i odnos salinitet – oborina dali su naslutiti da će i hidrostatska stabilnost imati izraženu sezonsku i višegodišnju varijabilnost. Na slici 2.7 vidi se kako je maksimalna BVF na kemoklini porasla od 1996. godine, a također je zamjetno da ima i veće međugodišnje amplitude. 2020. godine BVF je bila otprilike 4 puta veća nego 1996. godine, kada su motrenja jezera započela. Primijećena stopa promjene nije linearna te je moguće da je BVF također podložna nerazlučenoj klimatskoj varijabilnosti. Ipak, kako je BVF indikator intenziteta piknokline, njeno povećanje je u skladu s primijećenom stagnacijom pridnenog sloja. Dakle, može se reći da je fizička barijera između oksičnog i anoksičnog dijela jezera jača u godinama kad je piknoklina intenzivnija (odnosno, BVF veća). Tijekom razmatranog razdoblja godišnja amplituda SSI – pokazatelja stabilnosti cijelog vodenog stupca – se povećala te jezero oscilira između vrlo stabilnih i vrlo nestabilnih uvjeta tijekom godine. Ciklusi kojima SSI oscilira sličje ciklusima godišnjih oborina što nanovo ukazuje da je salinitet doista ključni parametar koji određuje hidrostatsku stabilnost ZO-a. S druge strane, kako maksimalne godišnje BVF ne pokazuju iste cikluse kao oborina i SSI, moguće je da stabilnost kemokline (to jest, granicu oksija – anoksija) održava kombinacija gradijenata saliniteta i temperature.

Na slici 2.8 prikazani su razdvojeni halini i termalni doprinosi razlici gustoća površinskog i pridnenog sloja. Da je ZO slatkovodno jezero, bilo bi za očekivati da se izmiješa u ono vrijeme u godini kada se površina jezera toliko ohladi da raslojenost iščezne, odnosno postane nestabilna (slika 2.9). No, kako se radi o morskom jezeru, halina raslojenost u većoj mjeri određuje kada će se tijekom godine jezero izmiješati. Kako se jezero nalazi u području mediteranske klime (suha, vruća ljeta; Zaninović *i sur.*, 2008), oborina je rijetka tijekom ljetnih mjeseci (lipanj, srpanj, kolovoz), a isparavanje znatno. S početkom jeseni, haloklina djelomično ili sasvim nestaje, što znači da vodeću ulogu u stabilnosti jezera preuzima termalni doprinos, što smanjuje ukupnu raslojenost jezera. Tada, mogućnost miješanja ovisi primarno o atmosferskim uvjetima. Na primjer, u rujnu 2003. godine jezero se polako miješalo tijekom nekoliko dana pri čemu je u jednom trenutku postalo hipoksično, ali nije postalo zamućeno i potpuno anoksično (Žic, Carić i Ciglenečki, 2013). 2011. godine je pak zabilježeno sasvim drugačije miješanje – u listopadu se

jezero potpuno izmiješalo, promijenilo boju, postalo anoksično te su se na površini mogli vidjeti uginuli organizmi, što se povezuje s puhanjem bure i naglim padom temperature zraka tijekom jedne noći (Ciglenečki *i sur.*, 2015). I 2003. i 2011. godina bile su godine s lokalnim minimumom po pitanju prosječne godišnje oborine (slika 2.7). Stoga, slabljenje halokline tijekom ljeta može se smatrati preduvjetom u oba slučaja. Nadalje, istraživanja su pokazala kako je tijekom 2011. godine bilo oko 30% manje oborine nego 2003. godine (redom 434 mm naspram 611 mm; prosječne godišnje vrijednosti pomnožene brojem mjeseci), što je rezultiralo time da se u jesen 2011. ZO izmiješalo gotovo kao da se radi o slatkovodnom jezeru, odnosno, kao da salinitet nema utjecaj (jednolik salinitet u vodenom stupcu). Zanimljivo je primijetiti da se u ZO-u povremeno javljaju (kao i u Jadranu, Terzić, Gardiol i Vilibić, 2025) situacije inverznog saliniteta, odnosno, slučajeva u kojima je salinitet pri površini neznatno viši od onoga pri dnu (slika 2.8). To su rijetke situacije u kojima je površina u tolikoj mjeri zagrijanja u odnosu na pridneni sloj, a isparavanje toliko jako, da termalni doprinos gustoći prevlada halini doprinos. Takva situacija, ako se javi, nastaje u drugoj polovici ljeta te je privremenog trajanja i kratkotrajno uzrokuje manju stabilnost vodenog stupca. U općoj situaciji, ZO je najnestabilnije krajem rujna/tijekom listopada, što je u skladu s već primijećenim za jezera umjerenih širina.

Moguće je da varijabilnost raslojavanja na višegodišnjoj ljestvici uzrokuje ista ona nerazlučena klimatska varijabilnost uočena na grafu površinskog i pridnenog saliniteta (slika 2.4). Već je prije utvrđena slična veza za barem jedno morsko jezero. Naime, kada je u prosincu 1998. u jezeru Jellyfish nestala populacija meduza po kojoj je ono i dobilo ime, znanstvenici su ispitivanjem nekoliko parametara – saliniteta, temperature, količine kreme za sunčanje i količine fitoplanktona kojima se meduze hrane – ustvrdili da je izražena hidrostatska stabilnost i posljedično zagrijavanje površine uzrok nestanka meduza (Dawson, Martin i Penland, 2001). Daljnjim ispitivanjem utvrđeno je da ciklus ENSO utječe na jezero (te godine radilo se o izraženom *La Niña* dijelu ciklusa). Međugodišnja varijabilnost utječe i na intenzitet kemokline te može objasniti promjene u vrstama koje čine bakterijsku zajednicu na granici oksija – anoksija (iz ljubičastih bakterija u zelene, i obratno), kako je primijećeno 2011./2012. te 2015./2016. (Pjevac *i sur.*, 2015; Čanković *i sur.*, 2019, 2020). Na sličan način (kao biološki indikator) može se koristiti i SSI čije su visoke vrijednosti u nedavnom istraživanju povezane s visokom koncentracijom RSS-a (*non-volatile* dijela) i aktivnosti ljubičastih sumpornih bakterija (Mateša *i sur.*, 2025).

3 KRATKOROČNA ISTRAŽIVANJA ZMAJEVOG OKA I NJEGOVA IZMJENA VODE S MOREM I KRŠEM

U prethodnoj cjelini istraživanja ispitana je varijabilnost fizičko – kemijskih svojstava ZO-a na dugoročnoj vremenskoj skali za što su korišteni vertikalni profili koji su mjereni na prilično visokoj rezoluciji u prostoru, ali niskoj u vremenu (otprilike jednom po svakom godišnjem dobu od 1996. godine). Kako bi se dodatno testirale postavljene hipoteze napravljena su kratkoročna ispitivanja dinamike ZO-a te njegove izmjene vode s morem i kršem na višoj vremenskoj rezoluciji. Cilj istraživanja u ovoj cjelini bio je odgovoriti na treću i četvrtu hipotezu te doprinijeti saznanjima o izmjeni vode ZO – krš – more koja bi se u budućnosti koristila u 3D modeliranju ZO-a. Problemu je pristupljeno na sličan način kao i u kratkoročnim istraživanjima jezera Jellyfish (što je predstavljeno u potpoglavlju 1.6.2): angažiran je profesionalni ronilac, korišteni su samostalni sakupljači kontinuiranih podataka (*data loggeri*; dalje u tekstu: uređaji ili instrumenti), napravljena je kvalitativna i kvantitativna analiza prikupljenih podataka, a rađeno je i uzorkovanje vode u jezeru i moru. Detaljna metodologija istraživanja opisana je u potpoglavlju 3.2.

3.1 Materijali i metode

Istraživanje u ovom poglavlju rađeno je u nekoliko etapa, pri čemu je svaka iduća etapa ovisila o rezultatima one prethodne. Sve je počelo s uređajima za mjerenje temperature koji su postavljeni na nekoliko lokacija u ZO-u tijekom ljeta 2020. i koji su bili u jezeru do ljeta 2021. godine. Pregledom i analizom tih podataka odlučili smo napraviti još jedan skup mjerenja u ljeto 2021. godine, ali ovaj put postaviti i jedan uređaj u obližnju morsku uvalu te mjeriti istovremeno temperaturu vode i razinu vode. Takav eksperiment je bio postavljen tri dana, odnosno, tijekom trajanja jednog od redovnih terenskih radova na ZO-u, ali su mjerenja uzimana većom frekvencijom nego u prethodnom mjernom postavu. Stoga, iako kratak, niz je u sebi nosio nove informacije te smo odlučili ponoviti takav eksperiment, ali ovaj put u trajanju od nekoliko mjeseci. Također, usporedbom nizova iz 2020. i 2021. godine te opažanja kolege ronioca tijekom nekoliko

zarona u ZO-u, odlučeno je kako za potvrdu i proširenje dijela znanja o vezi more-ZO treba uzorkovati vodu na prije određenim lokacijama u jezeru i moru. Iz financijskih razloga za to je trebalo pričekati neko vrijeme, ali su onda oba skupa mjerenja napravljena 2023. godine. Analiza tog niza potvrdila je neke od rezultata iz 2021. godine, ali otvorila i nova pitanja o kojima će više riječi biti dalje u tekstu. Diskusijom rezultata s kolegama nađena je još jedna zanimljivost: razina vode u jezeru i moru već je mjerena u dva navrata, 1999. (Cvitković, 2001) i 2013. godine. Kolege su nam mjerenja ustupili za analizu te smo njihovom obradom shvatili da usporedbom nizova iz 1999., 2013. i 2023. godine možemo dobiti dodatne informacije o razvoju veze more – jezero kroz godine pa je napravljen i taj dio istraživanja. Zadnji dio istraživanja, provođen je tijekom prve polovice 2025. godine. Ideja tog istraživanja bila je ponoviti mjerenja razine u moru i jezeru, sistematično i usporedivo s mjerenjima iz 2013. i 2023. godine, te dodatno pratiti hidrostatičku stabilnost vodenog stupca u razdoblju mjerenja. No, od dijela eksperimenta smo na žalost morali odustati. Naime, uređaj postavljen u siječnju 2025. godine u obližnju uvalu nije pronađen. Stoga, zadnji rezultati prikazani u ovom radu bit će oni temeljem mjerenja 2025. godine, provedenih isključivo u jezeru i na kopnu.

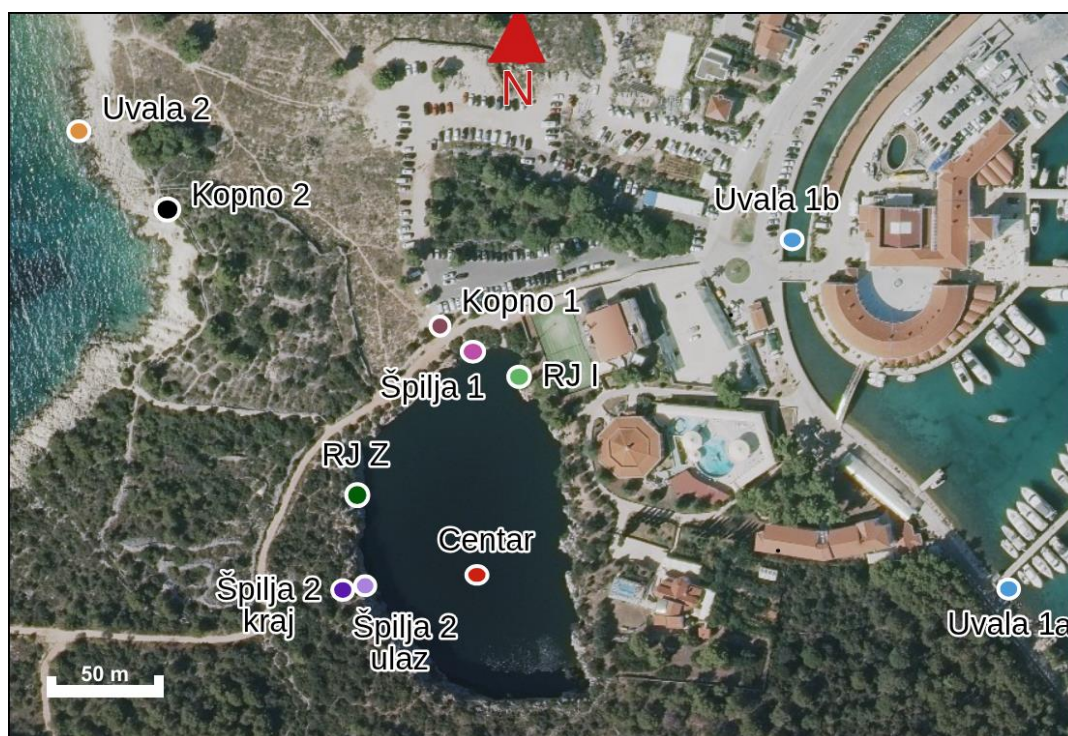
3.1.1 Materijali

3.1.1.1 Uređaji korišteni za kontinuirana mjerenja

Materijale (podatke) ćemo iznijeti onim redom kako su provedena mjerenja, to jest, počevši s 1999. godinom kada je prvi put mjerena razina vode u ZO-u. Istovremeno je mjerena i razina mora u obližnjoj uvali Soline (*Uvala 1*; slika 3.1). Ovo je mjerenje provedeno sličnim postupkom kao mjerenje razine na jezeru Jellyfish koje je opisano u potpoglavlju 1.6.2. Po jedna mjerna daska postavljena je okomito na površinu vode u jezero ZO i u uvalu Soline. Troje kolega s usklađenim satovima se tijekom 24 sata izmjenjivalo i bilježilo razinu vode na obje lokacije. Ovaj pothvat je tim impresivniji jer kolege nisu imali mobitele, dakle bilo je ključno imati pouzdan sat i biti koncentriran tijekom cijele svoje smjene. Rezolucija tako bilježenih mjerenja bila je $\pm 0,5$ cm. Sljedeći skup mjerenja rađen je 2013. godine. Tada su već bili široko dostupni uređaji na baterije koji neko vrijeme mogu raditi samostalno u jezeru. Njih je potrebno povremeno održavati (radi obraštaja i promjene baterija) te odgovarajućim programima skidati podatke na računalo. Na ovaj način je puno lakše mjeriti, a omogućeno je i skupljanje dužeg niza kontinuiranih podataka. 2013.

godine korišteni su uređaji Sensus Ultra Dive Data Recorder proizvođača ReefNet (slika 3.2). Ovi uređaji bilježe dubinu i temperaturu vode. Rezolucija je, redom za razinu vode i temperaturu, 0,5 inča ($\sim 1,27$ cm) i $0,01$ °C, dok je preciznost 1 stopa ($\sim 30,48$ cm) i $0,8$ °C. Uređaji su bili postavljeni na slične lokacije kao mjesta gdje je bila daska 1999. godine, odnosno, u jezero i u uvalu Soline (*Uvala 1*; slika 3.2). Za mjerenja temperature tijekom 2020. – 2021. korišten je model Pendant MX Temperature/Light Data Logger MX2202 proizvođača Onset (slika 3.2). Rezolucija ovih uređaja je $\pm 0,04$ °C, a preciznost $\pm 0,5$ °C. Tijekom mjerenja temperature na više lokacija u jezeru bilo je bitno gdje se nalazi koji uređaj pa su lokacije posebno naznačene na slici 3.1 (*RJ I* – rub jezera istok, *RJ Z* – rub jezera zapad, *Špilja 1*, *Špilja 2 ulaz* te *Špilja 2 kraj*). U ljeto 2021. godine za postav trodnevnog eksperimenta korišteni su uređaji HOB0 U20-001-01-Ti Titanium Water Level Data Logger koje je također proizveo Onset (slika 3.3). Ovi uređaji imali su rezoluciju $\pm 0,2$ cm i preciznost $\pm 0,5$ cm za mjerenja razine, a rezoluciju $\pm 0,1$ °C i preciznost $\pm 0,44$ °C za mjerenje temperature. U ovom postavu je radi mjerenja temperature u jezeru opet bila važna lokacija mjerenja pa su sve lokacije označene na slici 3.1. Kako uređaji zapravo mjere hidrostatički tlak, postavili smo jedan takav uređaj i na kopno (*Kopno 1*; slika 3.1), a jedan uređaj bio je postavljen i u obližnju uvalu Koprišće (*Uvala 2*; slika 3.1). Tijekom ljeta 2021. godine proveden je još jedan eksperiment u centru jezera (nekoliko uređaja na istoj lokaciji, ali na različitim dubinama; engl. *thermistor chain*), pa su kolege ustupili mjerenja s jedne od dubina kako bismo za usporedbu imali i mjerenja s lokacije koja nije uz rub jezera. Ta su mjerenja vršena uređajem kao tijekom mjerenja 2020. – 2021. (Pendant MX Temperature/Light Data Logger MX2202). Nakon tih mjerenja uslijedila su mjerenja 2023. godine kada su opet korišteni uređaji HOB0 U20-001-01-Ti Titanium Water Level Data Logger s istim karakteristikama. Jedan uređaj je bio postavljen u uvalu Soline (*Uvala 1a*; slika 3.1), dok je drugi bio postavljen u jezero. Zadnji skup podataka mjeren je 2025. godine kada su korišteni uređaji proizvođača Solinst – modeli 3001 Levellogger 5 i Barologger 5 (slika 3.2). Ovaj je postav bio nešto drugačiji. Naime, Levellogger 5 ima dvije verzije – jednu koja mjeri vodljivost, razinu vode i temperaturu i drugu koja mjeri samo razinu vode i temperaturu. Stoga je postav bio takav da su na jednoj lokaciji u jezeru (*Centar*; slika 3.1) bila postavljena dva uređaja koja mjere i vodljivost (za potrebe kasnijeg razmatranja hidrostatičke stabilnosti) na različitim dubinama. Na lokaciji uz rub jezera bio je postavljen uređaj koji mjeri razinu i temperaturu vode, dok je drugi takav uređaj bio postavljen u uvali Koprišće (na žalost uređaj u uvali Koprišće je izgubljen). Zadnji uređaj, Barologger 5, koji mjeri tlak i temperaturu zraka, bio

je postavljen na lokaciji *Kopno 2* (slika 3.1). Ovi uređaji imaju rezoluciju 0,003 °C, 0,002% FS i $\pm 0,1 \text{ uS cm}^{-1}$ za redom temperaturu, razinu vode i vodljivost. Preciznost im je, istim redom, $\pm 0,05 \text{ °C}$, $\pm 0,5 \text{ hPa}$ i $0,75 \text{ mS cm}^{-1}$. Uređaji su navedeni i u tablici 3.1 gdje se nalazi više informacija o mjerenjima za koja su korišteni.



Slika 3.1. Karta s lokacijama gdje su provođena mjerenja tijekom 26 godina istraživanja (1999. – 2025. godina). Lokacija u moru u uvali Soline označena je kao „Uvala 1“, dok je ona u uvali Koprišće označena s „Uvala 2“. „RJ I“ označava lokaciju uz istočni rub jezera, dok „RJ Z“ označava lokaciju uz zapadni rub jezera. „Špilja 1“ i „Špilja 2“ su podvodne špilje uz rubove jezera, a lokacija „Centar“ je lokacija blizu najdublje točke jezera na kojoj se sezonski uzorkuje od 1994. godine. Uređaji su bili postavljeni i na kopnu te su njihove lokacije označene s „Kopno 1“ i „Kopno 2“. Izvor pozadinske karte: <http://preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web>.



Slika 3.2. Uređaji korišteni u eksperimentima (s lijeva na desno): Sensus Ultra Dive Data Recorder (ReefNet), Pendant MX Temperature/Light Data Logger MX2202 (Onset), HOB0 U20-001-01-Ti Titanium Water Level Data Logger (HOB0) te 3001 Levellogger 5 (Solinst) i Barologger 5 (Solinst). Izvor slika zadnja dva uređaja su službene stranice proizvođača: <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/>.

3.1.1.2 Uzorkovanje vode

Temeljem podataka prikupljenih 2020. i 2021. godine te izvještaja ronioca odabrane su lokacije *Špilja 1* i *Špilja 2 ulaz* kao moguća mjesta na kojima voda ulazi u jezero, o čemu će biti više riječi u potpoglavlju 3.2 jer je to ujedno i jedan od rezultata ove cjeline. Na te dvije lokacije te na dvije referentne lokacije (*Centar* – za jezero – i *Uvala 2* – za more) ronilac je prikupio uzorke vode 29. svibnja 2023. godine. Temperatura vode pri kojoj su prikupljeni uzorci mjerena je *in situ* uređajem koji je dio ronilačke opreme, dok su OK i S mjereni u laboratoriju sondom HQ40d proizvođača Hach Lange i koja ima rezoluciju redom $\pm 0,1$ mg/L i $\pm 0,01$. Način obrade uzoraka bit će opisan u narednom potpoglavlju.

3.1.2 Metode

3.1.2.1 Analiza kontinuiranih mjerenja

U tablici 3.1 navedeni su svi prikupljeni vremenski nizovi zajedno s važnim informacijama vezanima za te nizove (intervali uzorkovanja, uređaji opisani u potpoglavlju 3.1.1.1 te lokacije i dubine na kojima su uređaji bili postavljeni, a koje su označene na slici 3.1). U nekim slučajevima niz je nešto kraći od trajanja mjernog postava, primjerice jedan senzor za vodljivost postavljen u siječnju 2025. godine počeo je raditi, iz nepoznatih razloga, tek sredinom veljače, nakon čega je kontinuirano radio. Stoga, nizovi su bili svedeni na najkraću zajedničku duljinu za sve analize gdje je bilo potrebno da su nizovi iste duljine, to jest, dulji nizovi su skraćeni na duljinu najkraćeg niza

iz tog eksperimenta. Također, prikupljeni vremenski nizovi prošli su postupak kontrole kvalitete. Svaki je niz pregledan najprije vizualno te su podaci koji su odskakali od niza na način koji se nije mogao objasniti nijednim prirodnim procesom zamijenjeni vrijednostima NaN (engl. *Not a Number*). Na primjer, u slučaju vodljivosti, povremeno su se javljala mjerenja koja su imala vrijednost 0 mS cm^{-1} , što je ukazivalo na zakazivanje uređaja u trenutku mjerenja. Općenito, u ovom i drugim sličnim istraživanjima na ZO-u najnepouzdanijima su se pokazali upravo uređaji za kontinuirano mjerenje vodljivosti/saliniteta (različitih proizvođača), a slično su prijavili i kolege koji rade na drugim slanim/morskim jezerima/lagunama (usmena i pismena korespondencija, dr. Georgiy Kirillin, dr. Javier Vidal-Hurtado), s iznimkom skupljih modela koji pak predstavljaju financijski izazov kada je potrebno

Tablica 3.1. Sažeti prikaz mjernih postava korištenih u kratkoročnim istraživanjima.

Trajanje mjernog postava	Mjereni parametri	Interval uzorkov. [min]	Korišteni uređaji	Lokacija (prema slici 3.2) i dubina [m]
19. – 20.8. 1999.	Razina vode	8-32	Mjerna daska, sat	<i>Uvala 1b</i> <i>Blizu Špilje 1</i>
8.7. – 26.9. 2013.	Razina vode	15	Sensus Ultra Dive Data Recorder	<i>Uvala 1a</i> (2,3) <i>RJ Z</i> (3,3)
29.6. 2020. – 13.1.2021.	Temperatura vode	15	Pendant MX Temperature/Light Data Logger MX220	<i>RJ I</i> (2,8) <i>RJ Z</i> (2,8) <i>Špilja 1</i> (0,7) <i>Špilja 2 ulaz</i> (2,8) <i>Špilja 2 kraj</i> (1,5)
24.6. – 27.6. 2021.	Razina vode Temperatura vode Temperatura zraka Tlak zraka	1	HOBO U20-001-01-Ti Titanium Water Level Data Logger (HOBO)	<i>Uvala 1a</i> (0,5) <i>Uvala 2</i> (0,5) <i>Špilja 1</i> (0,7) <i>Špilja 2 ulaz</i> (2,8) <i>Špilja 2 kraj</i> (1,5) <i>Kopno 1</i> (-)

Tablica 3.1. Sažeti prikaz mjernih postava korištenih u kratkoročnim istraživanjima (nastavak).

Trajanje mjernog postava	Mjereni parametri	Interval uzorkov. [min]	Korišteni uređaji	Lokacija (prema slici 3.2) i dubina [m]
24.6. – 27.6. 2021.	Temperatura vode	60	Pendant MX Temperature/Light Data Logger MX220	Centar (0,5)
2.3. – 12.7. 2023.	Razina vode Temperatura vode	15	HOBO U20-001-01-Ti Titanium Water Level Data Loggers	Uvala 1b (1,3) Blizu Špilja 1 (1,3)
17.1. – 9.7. 2025.	Razina vode Temperatura vode Vodljivost Temperatura zraka Tlak zraka	15 60	3001 Levellogger 5 3001 Barologger 5	Špilja 1 (1,3) Kopno 2 (-) Centar (1,6) Centar (10,2)

mjeriti na više lokacija istovremeno. Iz tih razloga i razloga svojstvenih ekosustavu (npr. obilan obraštaj u ZO-u) velik je naglasak u istraživanju stavljen upravo na pravilno i pravovremeno održavanje uređaja te na kasniju kontrolu kvalitete.

Pri analizi prikupljenih vremenskih nizova korištena su dva pristupa: kvalitativni i kvantitativni. U sklopu kvalitativnog pristupa proučavan je svaki vremenski niz zasebno te zatim kraći segmenti svakog niza traženjem ponavljajućih ili neobičnih uzoraka, razmatrani su minimumi i maksimumi, vizualno su uspoređivani različiti nizovi, a potom su doneseni zaključci vezani za svaki skup podataka. Kvantitativni pristup ovisio je o razmatranom vremenskom nizu i koje smo informacije iz određenog niza željeli saznati.

3.1.2.1.1 Razina vode

Dio uređaja za mjerenje razine vode u uputstvima i specifikacijama na internet stranicama navodi kako uređaji mjere dubinu, no to zapravo nije sasvim točno. Naime, oni mjere hidrostatski tlak,

no dio proizvođača uređaje preprogramira tako da se prepostavi atmosferski tlak koji se automatski oduzima od svakog mjerenja. Kada je cilj bio usporediti razine u jezeru i moru, atmosferski tlak nije bio ključan jer je on približno isti na površini mora i na površini jezera. No, za razmatranje svake razine posebno, npr. da bi se utvrdile pojedine oscilacije prisutne u nizu, preporuka je najprije ukloniti atmosferski tlak te smo upravo to i napravili za nizove prikupljene 2021. i 2025. godine. Zatim smo iz tih nizova izračunali razinu vode h iznad uređaja koristeći jednadžbu za hidrostatski tlak $h = \frac{p}{\rho g}$, gdje je p hidrostatski tlak stupca vode iznad uređaja, ρ procjenjena gustoća na toj lokaciji (iz mjerenja T i S , na isti način kao i u drugom poglavlju), a g ubrzanje gravitacijske sile na površini Zemlje ($9,81 \text{ m/s}^2$). Potom je izračunata srednja vrijednost niza kao prosječna dubina na kojoj je uređaj bio postavljen te je takav srednjak oduzet iz niza za daljnju analizu.

Za nizove iz 1999., 2013., 2021. i 2023. godine cilj je bio usporediti kašnjenje jezerskog signala u odnosu na morski signal u nizovima prikupljenima tijekom 24 godine mjerenja (s razmacima između pojedinih mjerenja). Kako 1999. godine niz nije uzorkovan istim intervalom, taj je niz sveden na minutni niz pri čemu su podaci koji nedostaju zamijenjeni kubno interpoliranim vrijednostima iz podataka koji su im susjedni. S tako pripremljenim nizom mogla se provesti daljnja analiza. Ostala tri niza uzorkovana su jednolikim intervalom pa nije bila potrebna slična predobrada. Zatim su nizovi filtrirani Butterworth filtrom pri čemu su periodi odsjecanja bili 6 i 36 sati kod primjene na nizove iz 2013. i 2025. godine (odnosno, primijenjen je pojasno propusni filter), a za nizove iz 1999. i 2021. godine period odsjecanja bio je samo onaj od 6 sati radi kratkoće niza (to jest, primijenjen je niskopropusni filter). Ovaj korak je napravljen kako bismo dobili što jasniji signal na plimnim frekvencijama. Zatim, za svaku godinu i za svaki par jezero-more izračunate su korelacije između nizova. Za ovaj korak analize nizovi iz 2013. i 2023. godine su svedeni na minutne nizove kako bi se mogli usporediti s nizovima iz 1999. i 2021. godine, a zatim su svi nizovi filtrirani Butterworth filtrom tako da se iz nizova uklone kratkoperiodičke oscilacije. Najprije je izračunata korelacija za nizove kada je posmak među njima 0 minuta (posmak 0 min; odnosno, kako je i mjereno), zatim 1 minuta (posmak 1 min), zatim 2 minute (posmak 2 min), itd. (korelogram). Na taj način dobivene su korelacije u ovisnosti o posmaku između vremenskih nizova. Iz takvog grafa mogao se očitati za koji vremenski posmak su nizovi najviše korelirani, što ujedno predstavlja i procjenu kašnjenja signala u odnosu na morski signal. Kako su svi nizovi različitih duljina, ovakav postupak je napravljen najprije s nizovima duljine kako jesu, a zatim su

nizovi iz 2013., 2021. i 2023. godine skraćeni na duljinu 1 dan (za usporedbu s nizom iz 1999. godine), potom su nizovi iz 2013. i 2023. godine skraćeni na 3 dana radi usporedbe s nizom iz 2021. godine, a zadnja usporedba je rađena skraćivanjem niza iz 2023. godine na duljinu 79 dana kako bi bio usporediv s nizom iz 2013. godine. Na taj način mogli smo razmotriti kakav utjecaj na procjenu kašnjenja ima duljina niza te kakav je odnos kašnjenja među nizovima iz različitih godina kada su svedeni na istu duljinu.

Za uzorkovanja u proljeće 2023., kada je ronilac prikupljao uzorke, bilo je potrebno dati procjenu prognoze plime i oseke u jezeru jer smo htjeli usporediti uzorke prikupljene na samom početku plime u jezeru s onima prikupljenima pred kraj plime, kako bismo dobili uvid u to kakva su fizičko – kemijska svojstva vode koja iz stijena ulazi u jezero. Tu smo informaciju mogli dobiti analizom niza razine vode. Za izračun prognoze plime i oseke korišten je niz iz 2013. godine koji je u vrijeme planiranja uzorkovanja bio najduži dostupan niz mjerenja. On je podvrgnut plimnoj analizi pomoću programskog paketa *t_tide* (Pawlowicz, Beardsley i Lentz, 2002) čime su dobivene pojedine sastavnice te njihova amplituda i faza. Općenito, za Jadran je pokazano kako za pravilnu rekonstrukciju plimnog signala treba imati informaciju o sedam plimnih sastavnica (Cushman-Roisin, Malačić i Gačić, 2001): tri dnevne (K1 – Mjesečeva dnevna, O1 – glavna Mjesečeva dnevna i P1 – glavna Sunčeva dnevna) te četiri poludnevne (M2 – glavna Mjesečeva, S2 – glavna Sunčeva, K2 – Mjesečevo-Sunčeva i N2 – veća Mjesečeva eliptična). Kako su i dnevne (period ~ 24 h) i poludnevne (period ~ 12 h) međusobno bliskih perioda, potreban je dug niz podataka o razini da bi se sve sastavnice dobro razlučile i koristile u prognozi. Program *t_tide* je u nizu iz 2013. godine uspješno razlučio pet od sedam sastavnica: K1, O1, M2, S2 i N2 stoga su te sastavnice korištene za prognozu plime i oseke u jezeru, što se, iako ograničeno, u praksi pokazalo dovoljno dobrim za planiranje uzorkovanja.

Za vremenske nizove mjerene istovremeno u moru i jezeru 2023. godine provedena je spektralna analiza. Najprije su izračunati spektar gustoće snage i spektar kvadratne koherence za svaki niz zasebno. Potom je izračunat spektar razlike u fazi između mora i jezera te omjera snage u jezeru i u moru za svaku od frekvencija. Za izračune je korišten 10-dnevni prozor Hamming s preklapanjem od 80%. Također, za nizove iz 2023. godine napravljena je analiza volumena vode koja ulazi i izlazi iz jezera. Analiza je provedena na sljedeći način. Najprije je niz razine vode filtriran kliznim srednjakom duljine prozora 2h radi uklanjanja visokofrekventnih oscilacija. Cilj je bio konstruirati

niz razine vode u kojemu su prisutne oscilacije uzrokovane oscilacijama razine mora. Nakon toga, niz je podijeljen na manje nizove duljine 24 sata. Primjerice, prvi isječak je obuhvatio podatke prikupljene u razdoblju 2. ožujka 00:00 – 2. ožujka 23:59, drugi je obuhvatio one iz razdoblja 2. ožujka 00:15 – 3. ožujka 00:14, treći isječak podatke iz razdoblja 2. ožujka 00:30 – 3. ožujka 00:29, itd. (interval uzorkovanja 2023. godine je bio 15 minuta). Za svaki takav 24-satni isječak izračunata je maksimalna i minimalna vrijednost razine vode (dakle, minimalna i maksimalna razina unutar 24 sata). Zatim je izračunata razlika tih vrijednosti za svaki isječak. Rezultat ovog postupka je po jedna vrijednost (promjena razine vode u jezeru) za svaki isječak od 24 sata čime je konstruiran novi niz. Takav niz pokazuje apsolutnu promjenu razine vode tijekom 24-satnih razdoblja. Radi razmatranja volumena, niz promjena razine vode pomnožen je površinom jezera $9\,904\text{ m}^2$ (Panda, 2020), dakle konačni niz pokazuje apsolutnu promjenu volumena tijekom 24-satnih razdoblja ($|\Delta V_{24h}|$). Dodatno, razmatrana je i veličina $\frac{A_0(h(t)-\bar{h}(t))}{V_0}$, gdje je A_0 površina jezera ($9\,904\text{ m}^2$ prema Panda, 2020), V_0 ukupni volumen jezera ($90\,691\text{ m}^3$ prema Panda, 2020) a $h(t) - \bar{h}(t)$ odstupanje razine vode u odnosu na srednju razinu tijekom razdoblja ožujak – srpanj 2023. Tako konstruirani niz prikazuje relativne promjene volumena kako bi se stekao dojam o količini vode koju jezero izmijeni s okolišem radi svoje veze s morem.

Vremenski niz razine vode mjeren 2025. godine na lokaciji *Špilja I* (slika 3.1) ujedno je i najduži niz razine vode analiziran u ovom istraživanju. Kako je istovremeno s mjerenjima razine mjerena i vodljivost na lokaciji *Centar* (slika 3.1), na sličnoj dubini na kojoj je bio i uređaj za mjerenje razine, bilo je moguće izračunati gustoću, što je detaljnije objašnjeno u potpoglavlju 3.1.2.1.3. Ta je gustoća, umjesto procjene temeljem sezonskih mjerenja T i S pomoću CTD sonde kao u prethodnim analizama, ovdje korištena za izračun promjena razine vode. Kako su podaci o vodljivosti i temperaturi prikupljeni intervalom uzorkovanja 1 sat, a podaci o razini vode intervalom 15 min, trebalo je svesti niz razine vode na satne vrijednosti. To je napravljeno tako što je niz najprije filtriran 1-satnim kliznim srednjakom, a zatim je za konačni izračun uzeta vrijednost u svaki puni sat, kako bi niz razine vode bio u skladu s onima vodljivosti i temperature. Analizi razine vode i tlaka pristupljeno je na dva načina. Najprije je izračunata promjena razine vode iz izraza za hidrostatski tlak $p(t)$:

$$h(t) = \frac{p(t)}{\rho(t)g}, \quad (3.1)$$

gdje su oznake kao i prije. Zatim je izraz za hidrostatski tlak razložen na nekoliko doprinosa pri čemu su razina vode, tlak i gustoća raspisani kao zbroj srednje vrijednosti (označene $\bar{}$) i odstupanja (označenog $\prime$), to jest, $p = \bar{p} + p'$, $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ i $h = \bar{h} + h'$. Slični postupci se često koriste (npr. primijenjeno i u Dominović, 2020). Kada se tako raspisani članovi uvrste u jednadžbu za hidrostatski tlak, dobije se izraz:

$$\bar{p} + p'(t) = \bar{\rho}g\bar{h} + \rho'(t)g\bar{h} + \bar{\rho}gh'(t) + \rho'(t)gh'(t). \quad (3.2)$$

U tom izrazu mogu se izdvojiti članovi $\bar{p} = \bar{\rho}g\bar{h}$ i $p'(t) = \rho'(t)g\bar{h} + \bar{\rho}gh'(t) + \rho'(t)gh'(t)$, odnosno, odstupanja tlaka od srednje vrijednosti se mogu opisati s tri člana čiji su doprinosi i omjeri računati kako bi se mogao razmotriti baroklini (širenje i skupljanje vodenog stupca radi promjena temperature i/ili saliniteta) i barotropni doprinos (donos ili odnos vode u vodeni stupac) promjeni razine u jezeru, a o čemu će dodatno riječi biti kod prikaza rezultata ove cjeline (potpoglavlje 3.2).

3.1.2.1.2 Temperatura

Nizovi temperature su analizirani kvalitativno (nizovi prikupljeni tijekom 2020. i 2021. godine), dok je za niz mjeren 2023. godine napravljena spektralna analiza, to jest, izračunati su spektar gustoće snage i spektar kvadratne koherence. Ostale dvije spektralne analize koje su rađene za niz razine vode nisu rađene za niz temperature jer smo zaključili da između temperature u moru i jezeru ne postoji uzročno – posljedična veza kao što postoji između razine vode u moru i razine u jezeru.

3.1.2.1.3 Vodljivosti, salinitet i gustoća

Tijekom 2023. godine na lokaciji *Centar* (slika 3.1) bila su postavljena dva uređaja za mjerenje temperature, razine vode i vodljivosti. Jedan uređaj bio je postavljen tako da mjeri u površinskom sloju (dubina $\sim 1,6$ m), dok je drugi bio postavljen tako da mjeri u pridnom sloju (dubina $\sim 10,2$ m). Vodljivost i temperatura su mjereni kako bi se mogao izračunati salinitet, što je i napravljeno pomoću funkcije iz Python paketa *gsw.conversions*. Salinitet je potom razmatran zasebno kao mjereni parametar, a zatim je korišten za izračun gustoće, također pomoću funkcije iz paketa *gsw*, ali ovaj put iz podmodula *gsw.density*. Gustoća je također razmatrana zasebno za svaku od dvije dubine na kojima je mjereno, a potom je izračunata razlika u gustoćama između površine i dna kao

pokazatelj intenziteta hidrostatske stabilnosti vodenog stupca. Gustoća dobivena pomoću podataka s uređaja u površinskom sloju korištena je za izračun promjene razine vode, kako je opisano u potpoglavlju 3.1.2.1.1.

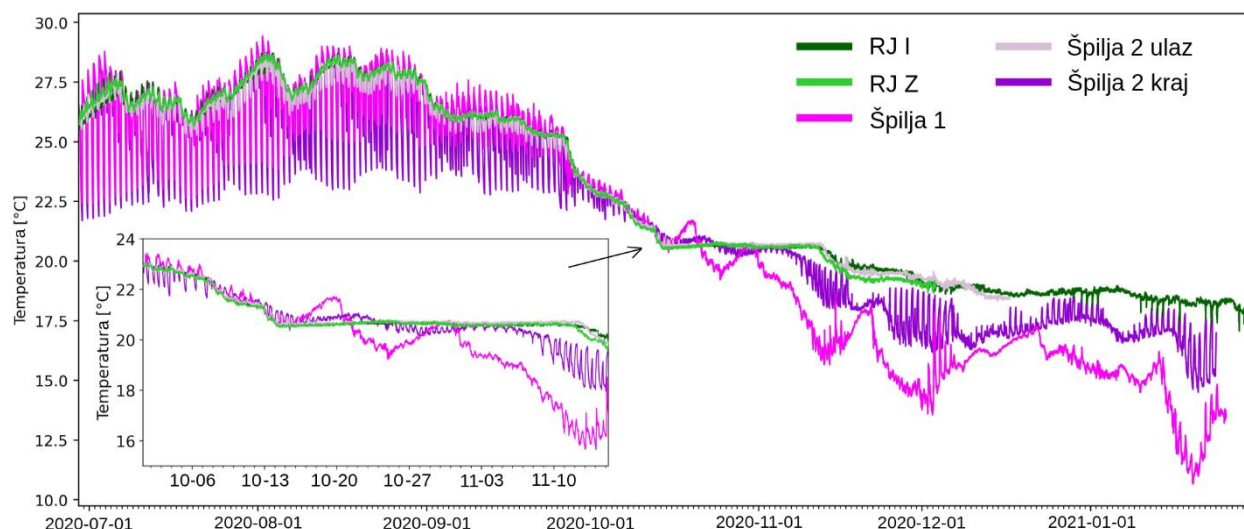
3.1.2.2 Ostali fizičko – kemijski podaci

U sklopu istraživanja na dan 29. svibnja 2023. godine provedeno je uzorkovanje vode na tri lokacije u jezeru (*Centar*, *Špilja 1* i *Špilja 2 kraj*; slika 3.1) te na jednoj lokaciji u moru (*Uvala 2*; slika 3.1). Uzorkovanja na lokacijama *Špilja 1* i *Špilja 2 kraj* napravljena su jednom nakon početka plime u jezeru, kada se očekuje početak ulaska vode u jezero, te jednom pred sam kraj plime, odnosno, kada se očekuje kraj ulaska vode u jezero. Vremenski plan uzorkovanja određen je temeljem plimne prognoze koja je pojašnjena u potpoglavlju 3.1.2.1.1, a koja je i grafički prikazana na slici 3.22 u sljedećem potpoglavlju. Ovakav postav eksperimenta napravljen je zbog postavljene hipoteze da na početku plime ulazi mješavina jezerske i morske vode koja se nalazi u stijenama između, dok pred kraj plime već ulazi voda koja po salinitetu odgovara morskoj vodi. Vodi uzorkovanoj na ovaj način izmjerena je temperatura (*in situ*, to jest, pomoću uređaja koji je ronilac imao na sebi), dok je salinitet izmjeren CTD sondom po dolasku u laboratorij. Također, kako je fizičko – kemijski otisak vode i koncentracija nutrijenata u njoj bitno svojstvo, provedena je i ta analiza. Koncentracija nutrijenata je mjerena u svježim, nefiltriranim uzorcima u razdoblju 48 sati od uzorkovanja. Provedena je spektrofotometrijska analiza UV-Vis korištenjem spektrofotometra Specord 200 plus (proizvođača AnalytikaJena) u 1-centimetarskoj kvarcnoj kivet. Metodom prema Stricklandu i Parsons (1972) određena je koncentracija amonijevih iona (NH_4^+), nitrita (NO_2^-), ortofosfata (PO_4^{3-}) i silikata (SiO_4^{4-}). Koncentracija nitrata (NO_3^-) određena je metodom prema Pai i sur. (2021). Ovu analizu provela je kolegica dr.sc. Marija Marguš.

3.2 Rezultati

3.2.1 Temperatura

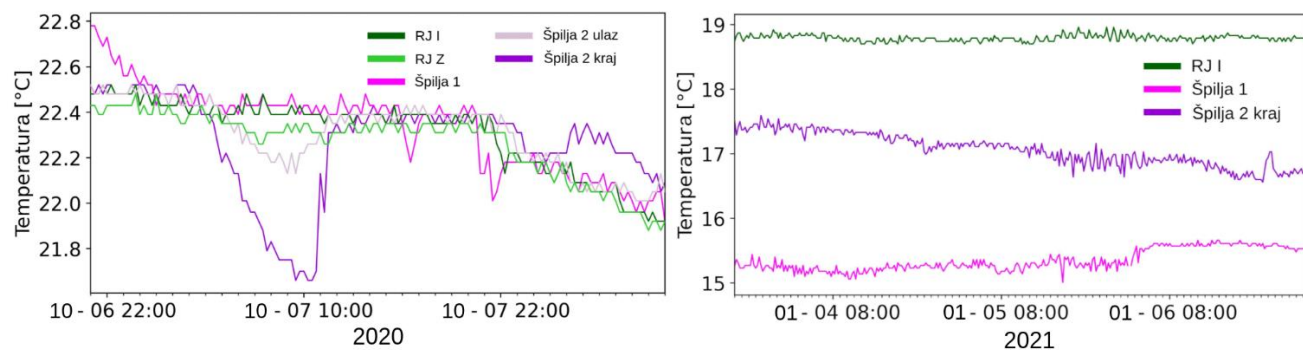
Slika 3.3 pokazuje vremenski niz temperature vode mjerene na pet lokacija u jezeru od lipnja 2020. do prosinca 2020./siječnja 2021. godine. Dnevne promjene temperature vode najviše su izražene na lokaciji *Špilja 2 kraj*. U razdoblju od srpnja do listopada temperatura vode na lokaciji *Špilja 2 kraj* pokazuje dnevne oscilacije koje su intenzivnije od onih uz rub jezera (*RJ I* i *RJ Z*; slika 3.1). Ulazna voda je u *Špilji 2* bila 4 do 5 °C hladnija tijekom većine ljeta, nakon čega se amplituda temperature postepeno snižava sve do ranog listopada, nakon čega na svim lokacijama temperature postaju sličnih vrijednosti. Temperatura mjerena u *Špilji 1* pokazuje sličan dnevni hod, ali s 20-50% manjom amplitudom. Maksimalan dnevni raspon temperatura izvan špilja bio je 1,3 °C na 2,8 m dubine (6. lipnja 2020.; lokacija *RJ I*), dok je u špiljama bio znatno veći, osobito tijekom srpnja i kolovoza kad je raspon dosegao vrijednosti i do 6,4 °C stupnjeva. No, takav dnevni hod temperature u *Špilji 2* postoji tek na njenom kraju te se učinak s udaljenošću od stijena gubi, pa tako na ulazu u istu (*Špilja 2 ulaz*) maksimalni dnevni hod u kolovozu iznosi 1,6 °C, iako je uređaj bio postavljen 1 m dublje nego uređaj na kraju *Špilje 2*. Razdoblje tijekom jeseni – 13. listopada do 12. studenog – je uvećano na slici 3.3. To je razdoblje nakon holomiksije i potpune anoksije u vodenom stupcu koja se dogodila početkom listopada 2020. Na početku ovog razdoblja temperatura na svim lokacijama bila je slična, no na lokacijama *Špilja 2 kraj* i *Špilja 1* temperatura se počinje snižavati krajem listopada i početkom studenog te su temperature ondje bile redom 2 do 5 °C i 1 do 3 °C niže nego temperature mjerene na drugim lokacijama. Ovakve razlike tijekom zime vjerojatno se mogu povezati s različitim dubinama uređaja te manjkom miješanja površinskog sloja, moguće radi velikih količina oborina zabilježenih u tom razdoblju (DHMZ, postaja Šibenik). Tijekom zarona u svrhu postavljanja uređaja ronilac je potvrdio kako uz rubove jezera nema tunela kroz koji se može proći niti nekog očitog podvodnog tunela koji spaja more i jezero (kao što je slučaj kod palauških jezera), već samo povremeno iz stijena izbija voda drugačijih optičkih svojstava, što je najuočljivije na lokaciji *Špilja 2 kraj*.



Slika 3.3 Temperatura vode mjerena na pet lokacija u ZO-u (karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1) tijekom 2020. i 2021. godine. Razdoblje 6. listopada – 10. studenog, tijekom kojega se jezero vertikalno izmiješalo, prikazano je uvećano.

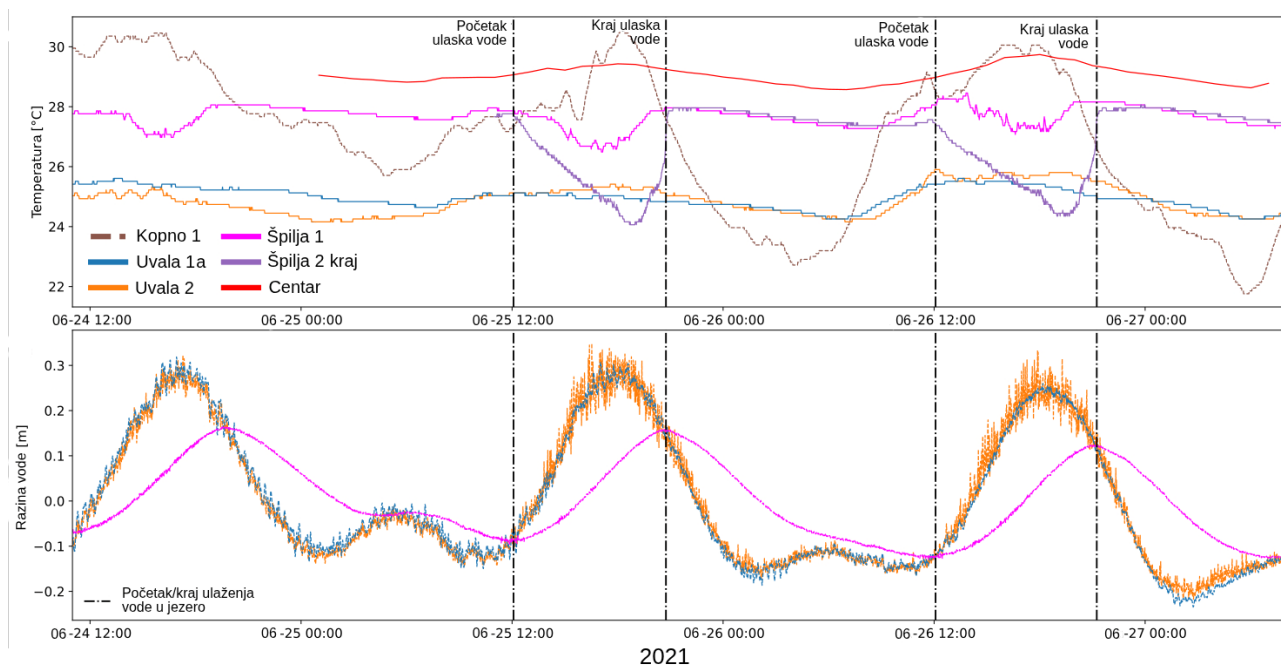
Slika 3.4 prikazuje dva dodatna uvećana isječka iz niza temperatura mjerenih 2020. – 2021.: lijevi isječak s temperaturama netom nakon miješanja jezera u listopadu 2020. godine te desni isječak koji pokazuje jake prostorne temperaturne gradijente i vrlo slabe promjene temperature tijekom tri dana u siječnju 2021. godine. U jutarnjim satima 7. listopada na lokaciji *Špilja 2 kraj* temperatura je još uvijek primjetno niža u usporedbi s ostalim lokacijama. No, tijekom dana temperature se ujednačavaju neovisno o prostornoj raspodjeli i dubinama mjernih uređaja. Ubrzo nakon, već tijekom večeri istog dana, javljaju se razlike te je na lokaciji *Špilja 2 kraj* temperatura za 0,3 °C viša nego na drugim lokacijama. Ako pogledamo ponovno sliku 3.3, vidjet ćemo kako takva situacija traje još kojih tjedan dana, a nakon toga temperatura na lokaciji *Špilja 2 kraj* znatno pada. Također, zanimljiv je i porast temperature na lokaciji *Špilja 1*. Sve do kraja ovog skupa mjerenja, odnosno, do siječnja 2021., uređaj na lokaciji *Špilja 1*, koji je ujedno bio i najpliće postavljen (0,7 m), pokazuje izraženiji dnevni signal u usporedbi s uređajem postavljenim dublje (1,5 m), na lokaciji *Špilja 2 kraj*. Takav dnevni signal ne može se objasniti izmjenom topline kroz površinu jezera te se već iz slika 3.3 i 3.4 može naslutiti kako je u jezeru, barem u *Špilji 1* i *Špilji 2 kraj*, prisutan još neki proces koji utječe na temperaturu vode. Razmotrimo i jednu stabilniju situaciju tijekom siječnja 2021. godine (slika 3.4, desno). Tijekom razmatrana tri dana nije bilo izraženih dnevnih oscilacija. Kako su sva tri uređaja, koja su još uvijek radila u siječnju 2021. godine, bila

na različitim dubinama (*Špilja 1* – 0,7 m; *Špilja 2 kraj* – 1,5 m; *RJ I* – 2,8 m), očita je visoka termalna raslojenost jezera i izraženi gradijenti, pri čemu je pristuna i temperaturna inverzija, to jest, na najdubljoj lokaciji temperatura je ujedno bila i najniža.



Slika 3.4 Uvećani isječci iz mjerenja temperature vode (karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1) za razdoblje 6. – 7. listopada 2020. (lijevo) i 4. – 6. siječnja 2021. (desno).

Iz mjerenja u jesen i zimu 2020./2021. bilo je jasno da u jezeru postoje barem dvije lokacije uz njegov rub (*Špilja 1* i *Špilja 2 kraj*) na kojima temperaturu određuje još neki proces koji se odvija na dnevnoj ljestvici, a koji nije vezan za dnevno hlađenje i zagrijavanje s površine. Stoga, u ljeto 2021. godine tijekom tri dana mjerena je istovremeno i razina vode, a za usporedbu, oba su parametra mjerena i u moru u obližnjim uvalama (*Uvala 1a*, *Uvala 2*; slika 3.1). Razmatrana je i temperatura mjerena u centru jezera (lokacija *Centar*; slika 3.1) koja je također mjerena u površinskom sloju (0,5 m), a koja se nalazi dovoljno daleko od rubova jezera (> 35 m). Ipak, u ovom postavu mjerena je i temperatura zraka (lokacija *Kopno 1*; slika 3.1) kako bi se dodatno provjerila tvrdnja da uz rubove postoji dodatni utjecaj na temperaturu. Navedena mjerenja prikazana su na slici 3.5.

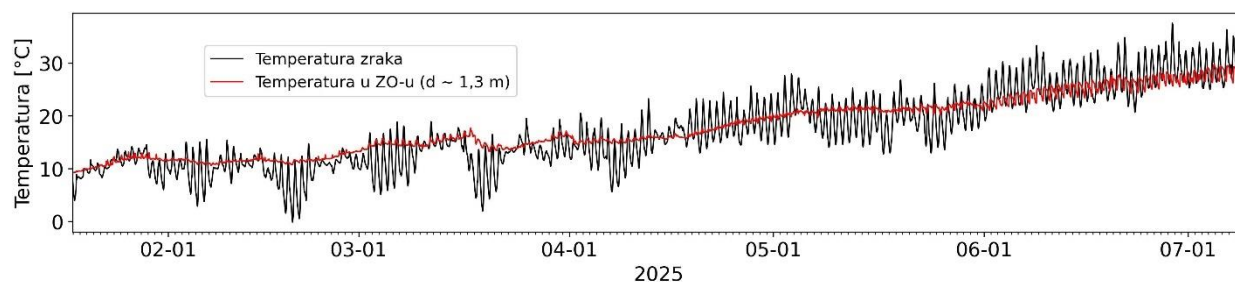


Slika 3.5 Mjerenja temperature na tri lokacije u jezeru, dvije u moru i jednoj na kopnu (gore) te mjerenja razine vode na dvije lokacije u moru i jednoj u jezeru (dolje) u lipnju 2021. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1. Vertikalne linije označavaju trenutak kada voda počinje i prestaje ulaziti u jezero.

Na slici 3.5 možemo uočiti kako se temperature mjerene u dvjema uvalama vrlo malo razlikuju po iznosu ($\sim 1^\circ\text{C}$) i to samo povremeno, dok je dnevni hod sličnog oblika te on prati dnevni hod temperature zraka. Raspon temperatura u uvalama je $1,4^\circ\text{C}$ i $1,7^\circ\text{C}$ redom za *Uvalu 1* i *Uvalu 2*. Također, temperatura u centru jezera je raspona oko $1,2^\circ\text{C}$ i odražava blagi dnevni hod temperature zraka. Dakle, sve tri lokacije odlikuje izraženo ljetno zagrijavanje tijekom dana. No, temperature na lokacijama *Špilja 1* i *Špilja 2 kraj* vidljivo odstupaju od dnevnog hoda temperature zraka. Odnosno, u dijelu dana kada bi bilo za očekivati najvišu dnevnu temperaturu vode, javlja se obrnuta pojava – nagli pad temperature od čak $3,9^\circ\text{C}$ tijekom 6 sati u *Špilji 2*, dok je u pojava nešto ublažena na lokaciji *Špilja 1* ($\sim 2,0^\circ\text{C}$). Usporedbom s mjerenjima razine vode (slika 3.5, dolje), uočava se kako u trenutku kada nastupa porast razine vode u jezeru ujedno natupa i nagli pad temperature u špiljama. Na dijelu grafa koji se odnosi na 26. lipnja oko podneva vidi se i kako u objema špiljama počinje porast temperature – ono što bismo i očekivali – no ta je tendencija prekinuta čim nastupa plima u jezeru. Situacija se vrlo brzo mijenja nakon postizanja maksimuma razine vode u jezeru te se temperatura stabilizira na onoj temperaturi koju ima voda iz tog sloja,

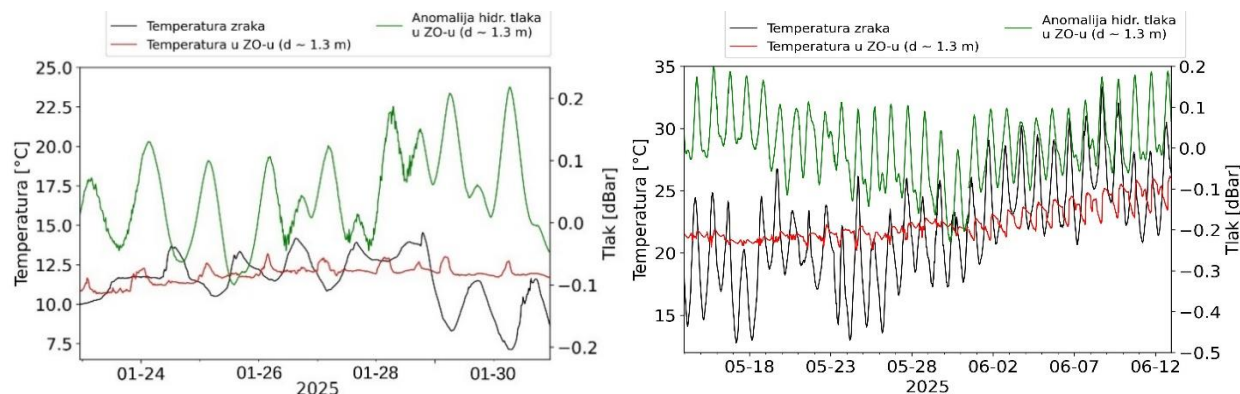
proces koji je izrazito izražen na lokaciji *Špilja 2 kraj*. Kako bi uočene pojave bilo što lakše proučiti, na grafove smo dodali vertikalnu liniju koja označava početak i prestanak plime u jezeru.

Tijekom 2025. godine u razdoblju siječanj – srpanj mjereni su istovremeno temperatura zraka (lokacija *Kopno 2*; slika 3.1) i temperatura vode (lokacija blizu *Špilje 1*, također uz rub jezera). Ovi nizovi prikazani su na slici 3.6. Ono što se može uočiti je da je tijekom hladnijih mjeseci (siječanj – travanj) temperatura vode u prosjeku viša od srednje dnevne temperature zraka, dok je



Slika 3.6 Temperatura mjerena na jednoj lokaciji u jezeru (blizu Špilje 1) i na kopnu (Kopno 2) tijekom 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

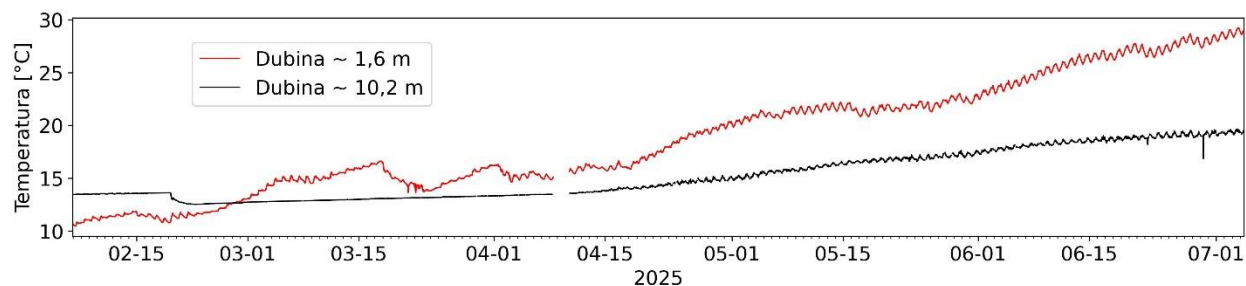
tijekom toplijih mjeseci temperatura vode niža. Također je zanimljivo razmotriti raspon temperatura. U 5,5 mjeseci temperatura je porasla za ~ 20 °C prateći generalnu promjenu temperature zraka te je temperatura na 1,3 m pod direktnim utjecajem temperature zraka. Kada se niz poveća, vide se još dvije pojave (slika 3.7). U isječku trajanja sedam dana u siječnju (slika 3.7 lijevo) vidi se kako temperatura ne pokazuje dnevni hod (koji je prigušen tijekom siječnja; raspon 2,5 – 3,0 °C), već u vrijeme više visoke vode u jezeru na nekoliko sati pokazuje porast temperature od ~ 1 °C. Dakle, čini se kako tijekom siječnja povremeno tijekom plime ulazi i malo toplija voda u jezero. Ako pogledamo



Slika 3.7 Uvećani isječci mjerenja temperature zraka (Kopno 2) te temperature vode i anomalije hidrostatičkog tlaka (blizu Špilje 1) mjereni 23. siječnja – 1. veljače (lijevo) i 15. svibnja – 13. lipnja (desno) 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

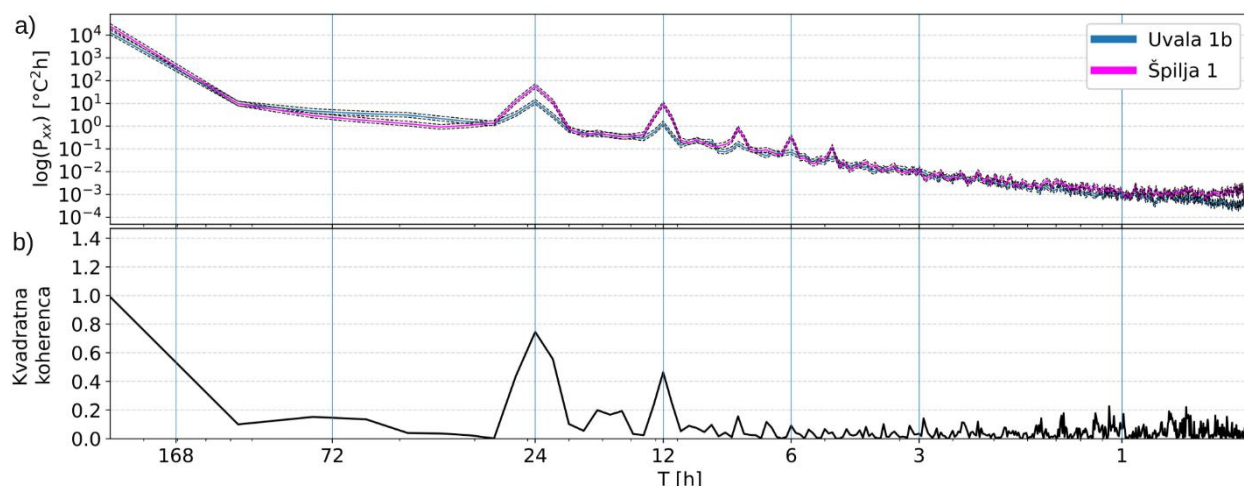
isječak s prijelaza sa svibnja na lipanj (slika 3.7 desno), čini se kako je dnevni signal temperature vode nešto jači i uočljiviji u lipnju nego što je u svibnju. Ta je pojava sasvim slučajno izmjerena. Naime, 30. svibnja s uređaja su skinuti podaci i on je vraćen na lokaciju gdje je bio. Kako je to bilo pred sam početak turističke sezone, odlučeno je da se uređaj postavi još bliže rubu jezera – neznatno (~ 20 cm) – kako bi ga stijena uz rub jezera što više zaklonila od pogleda kupaca i slučajnih prolaznika. Izgleda da je upravo takva mala razlika u lokaciji značila veći dnevni utjecaj ($1 - 2$ °C) promjene temperature uzrokovane ulaskom vode, a koja se očituje u hidrostatičkom tlaku koji je također prikazan na slici. Kada se pogleda učinak vode koja ulazi na temperaturu, vidimo kako u lipnju temperatura vode raste s porastom temperature zraka, ali u jednom trenutku nastupa kratkotrajno sniženje temperature koje nije istog iznosa svaki dan. Radi toga dnevni hod nije uobičajen već ima dva „brijega“. Prije razmatranja spektra snage temperature, razmotrimo još temperaturu mjerenu na dvije dubine na lokaciji *Centar* (slika 3.8). Raspon temperatura na dubini 1,6 m sličan je onome na lokaciji uz rub jezera, na sličnoj dubini (slika 3.6), dok je raspon na dubini 10,2 m tri puta manji – $6,1$ °C. U veljači vidimo najprije kako u drugoj polovici temperatura na dubini 10,2 naglo pada za oko 1 °C. Također je prisutna temperaturna inverzija, koja, barem što se tiče odnosa površinskog i pridnenog sloja, iščezava krajem veljače i ne javlja se do kraja vremenskog niza. Ono što je u vremenskim nizovima neobično jest to što i temperatura na 10,2 m ima dnevni hod čiji se signal pojačava prijelazom iz proljeća u ljeto. Takav dnevni hod je vjerojatno uzrokovan pomicanjem plutače za koju je vezan lanac s uređajima, a koji je pod utjecajem plimnih oscilacija u jezeru. Stoga, uređaj koji je (u prosjeku) na dubini 10,2 m, u doba godine kada je jezero

termalno vrlo raslojeno, dio dana mjeri temperaturu sloja koji je nešto iznad njega (topliji) i nešto ispod njega (hladniji). Sličan proces utječe i na uređaj na dubini 1,6 m. U ovom nizu prisutan je prekid 10. – 12. travnja tijekom kojeg su uređaji izvađeni radi redovnog održavanja, a koji se odražava i na nizove prikazane na kasnijim slikama (3.16, 3.17, 3.18, 3.19 i 3.20).



Slika 3.8 Temperatura vode mjerena na dvije dubine tijekom 2025. godine na lokaciji Centar (karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1).

Nakon razmatranja vremenskih nizova, izračunat je spektar gustoće snage i spektar kvadratne koherence za temperaturu u jezeru i moru (slika 3.9), pri čemu su mjerenja na lokaciji *Uvala 1b* predstavljala morska mjerenja, a mjerenja na lokaciji *Špilja 1* jezerska mjerenja. Za analizu spektara korišten je niz iz 2023. godine kao najduži dostupan vremenski niz temperature vode u trenutku izrade ovog dijela istraživanja. I morski i jezerski spektar gustoće snage imaju maksimume na periodima 24 sata i 12 sati, odražavajući već uočeno dnevno zagrijavanje i hlađenje te (u slučaju jezera) plimne učinke na temperaturu uz rub jezera. Snaga je veća na oba maksimuma za jezerski signal, osobito za 12-satni period. No, na grafu se vide još tri dodatna maksimuma: na 8, 6 i 4,8 sati. Kako je za te periode koherencija signala neznatna, radi se o pojavi koja je prisutna na jednoj od mjernih lokacija, dok na drugoj nije. S obzirom na to da je na lokaciji *Špilja 1* prisutan utjecaj plime na temperaturu, koji izgledom podsjeća na pola perioda kosinus funkcije (slika 3.5) – to jest, signal je nepravilan – u domeni perioda (frekvencija) to se očituje višim harmonicima baznog 24-satnog signala. Signali u moru i jezeru su visokokoharentni i za duge periode što govori o vezi signala jezera i mora na sinoptičkim i dužim vremenskim ljestvicama.

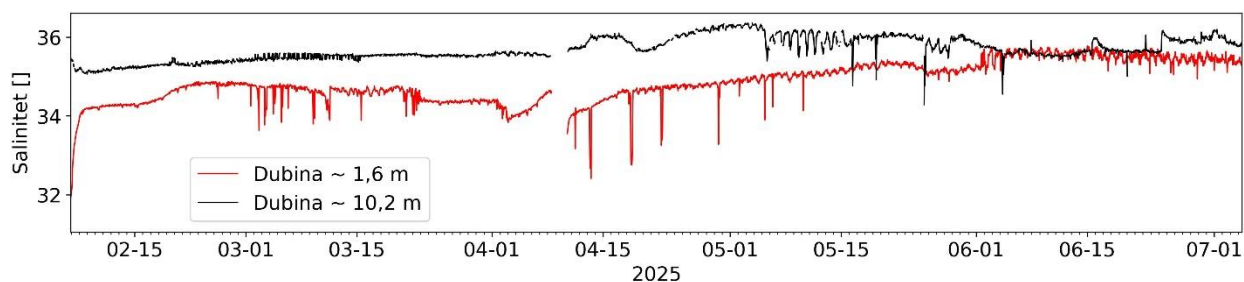


Slika 3.9 Spektar gustoće snage P_{xx} (a) i kvadratne koherence (b) za mjerenja temperature na lokaciji u moru (Uvala 1b) i jezeru (Špilja 1) tijekom 2023. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

3.2.2 Salinitet

Kako u morskoj vodi gustoća znatno ovisi o salinitetu, temeljem mjerenja temperature i vodljivosti izračunat je salinitet za razdoblje veljača – srpanj 2025. godine (slika 3.10). Salinitet u pridnom sloju tijekom razmatranog razdoblja kretao se između 35,1 i 36,4 pri čemu se vidi polagani porast prema sredini proljeća koji se tijekom lipnja prekida, pri čemu se vrijednost stabilizirala na približno 35,5. Krajem lipnja ponovno nastupa blagi porast za 0,3 – 0,4 jedinice. Povremeno se javljaju nagli porasti saliniteta (npr. sredina lipnja) koji se ne mogu direktno povezati s kolebanjima hidrostatskog tlaka (to jest, morske razine). No, u nizu se povremeno vide blage dnevne oscilacije koje ne prelaze 0,1 – 0,2 jedinice i vjerojatno su uzrokovane, kao i one u nizu temperature (slika 3.9), promjenama morske razine. Osobito se ističe razdoblje 5. – 15. svibnja kada su oscilacije saliniteta bile i do 0,7 tijekom 24 sata što se ponavljalo svaki dan tijekom deset dana. Kako na žalost nemamo mjerenja CTD sonde tijekom tog razdoblja (najbliži mjereni vertikalni profili su na datume 10. travnja i 9. srpnja), možemo samo pretpostaviti što se događalo. Vjerojatno je blaga haloklina tijekom tog razdoblja bila vrlo blizu uređaja tako da su plimne oscilacije izdizale i spuštale uređaj kroz haloklinu koja je tijekom mjerenja 10.4. zabilježena na 11 m. Još jedno zanimljivo razdoblje u pridnom sloju je prva polovica ožujka u kojoj se uočavaju nepravilnosti u nizu koje su vrlo malog raspona ($\sim 0,1$). U površinskom sloju je pri početku

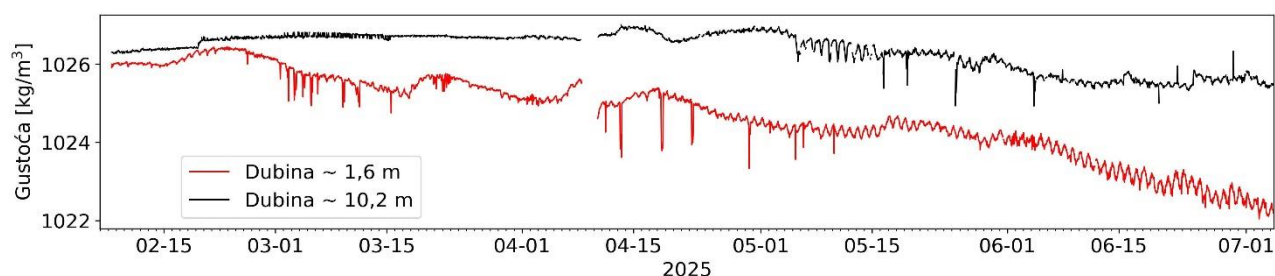
mjerenja znatna promjena saliniteta ($\sim 2,1$) nakon čega slijedi stabilnije razdoblje. Stoga, za pretpostaviti je da je uređaju trebalo neko vrijeme za prilagodbu na okoliš u kojem mjeri, iako nije jasno zašto slična pojava nije zabilježena i za uređaj u pridnenom sloju. Kako smo komentirali u potpoglavlju 3.1.2.1, kontinuirana mjerenja vodljivosti općenito su vrlo izazovna za provedbu i analizu, a to je posebno izraženo u visokoraslojenim sustavima poput ZO-a. Osim toga, u mjerenjima u površinskom sloju također vidimo dnevne oscilacije koje su više izražene nego u pridnenom sloju (do $\sim 0,6$), a općenito se vidi blaga stopa porasta saliniteta od veljače do srpnja ($\sim 1,2$). Najzanimljivija pojava u površinskom nizu jesu povremeno bilježeni niži saliniteti. Mjerenja kod kojih se radi o točkastoj pojavi, to jest, gdje samo jedno mjerenje odstupa, možda se i mogu pripisati grešci rada uređaja. No, ovi niži saliniteti povremeno traju i po nekoliko sati, kao što je bio slučaj 13., 18. i 22. travnja. Također, pojava se tijekom prve polovice ožujka ponavljala nekoliko dana za redom s dnevnim periodom. Kako se radi o površinskom sloju i snižavanju saliniteta, uzrok ove pojave vjerojatno je priljev slatke vode u površini – oborinom ili površinskim otjecanjem – koja snizi salinitet, ali ne do dovoljne dubine ili dovoljno dugo, već toliko da uređaj povremeno bilježi pad saliniteta od maksimalno 1,8. Tijekom razdoblja 4.6. – 15.6. salinitet je i u pridnenom i u površinskom sloju bio $\sim 35,7$ što može značiti da nije bilo halokline, tj. da je vodeni stupac bio uniforman po pitanju saliniteta. No, znamo da na gustoću utječe i temperatura, iako znatno manje. Ponovnim uvidom u niz temperatura za oba sloja, prikazanom na slici 3.8, vidimo kako je pridneni sloj tijekom spomenutog razdoblja bio $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ hladniji od površinskog. Dakle, čak i da je vodeni stupac doista bio uniforman (što, na žalost, ne možemo potvrditi radi nedostatka podataka o slojevima između površine i dna), hidrostatičku stabilnost vodenog stupca održavala bi termalna raslojenost. Pogledajmo kako su se temperatura i salinitet odrazili na gustoću (slike 3.11 i 3.12), a koju je bilo moguće izračunati koristeći podatke prikazane na slikama 3.8 i 3.10.



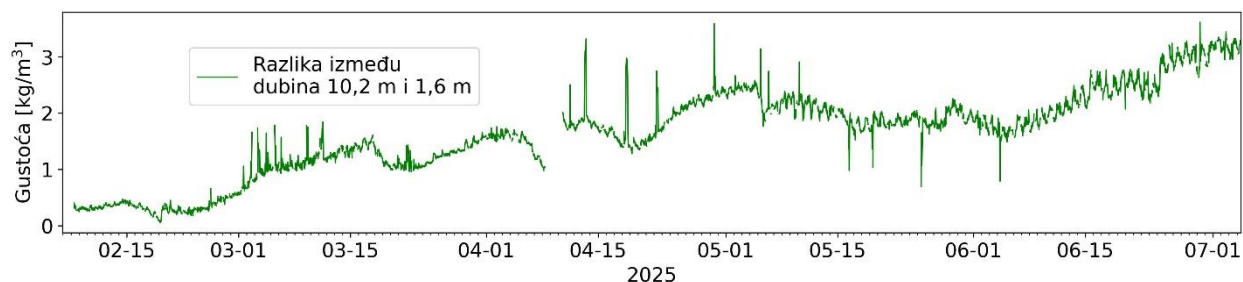
Slika 3.10 Salinitet za dvije dubine u jezeru na lokaciji Centar tijekom 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

3.2.3 Gustoća

Ako usporedimo gustoće slojeva prikazane na slici 3.11 s nizom temperatura na slici 3.8 i nizom saliniteta na slici 3.11, odmah se može uočiti velika sličnost u izgledu nizova po pitanju dnevnih, tjednih i višemjesečnih promjena. U hladnijem dijelu godine na gustoću više utječu dnevne oscilacije u salinitetu, dok su u toplijem dijelu godine tijekom dana više izraženi temperaturni utjecaji koji se izrazito vide u površinskom sloju. Također, iako se i saliniteti i temperature razlikuju među slojevima, vidimo da razlika od $\sim 2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ i 1 jedinicu saliniteta zapravo podrazumijeva vrlo hidrostatički labilnu situaciju te su početkom veljače dva sloja prilično slična po pitanju gustoće (razlike $0,3 - 0,4\text{ kg m}^{-3}$; slika 3.12), to jest, stupac nije izrazito raslojen. S početkom ožujka se razlika u salinitetu nešto smanjila (slika 3.10), no površinski sloj se počinje ubrzano zagrijavati – brzinom koji zagrijavanje u donjem sloju ne može pratiti (slika 3.8) – te se razlika u gustoći do sredine ožujka povećala na $1,5\text{ kg m}^{-3}$. Kako se zagrijavanje nastavlja kroz proljeće i početak ljeta, gustoća u površinskom sloju znatno pada te je razlika tijekom pet mjeseci 4 kg m^{-3} . I pridneni sloj se zagrijava, ali u manjoj mjeri te je raspon gustoće tijekom razmatranog razdoblja otprilike $0,5\text{ kg m}^{-3}$. Dakle, jezero postaje sve više hidrostatički stabilno i to primarno radi razlike u temperaturi među slojevima jer je salinitet tijekom prve polovice lipnja bio čak jednak u oba sloja (slika 3.10) – pojava koja se u razlici gustoća odrazila neznatno i samo nakratko te je razlika u gustoćama nastavila rasti do kraja trajanja vremenskog niza.



Slika 3.11 Gustoća vode za dvije dubine u jezeru na lokaciji Centar tijekom 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

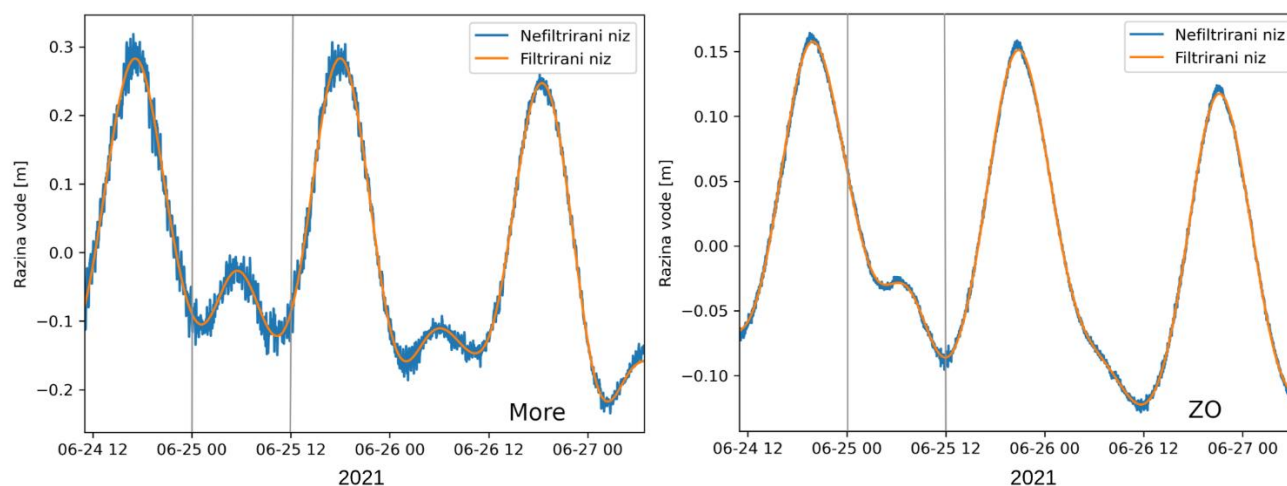


Slika 3.12 Razlika gustoće vode na dvjema dubinama u jezeru (lokacija Centar) tijekom 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

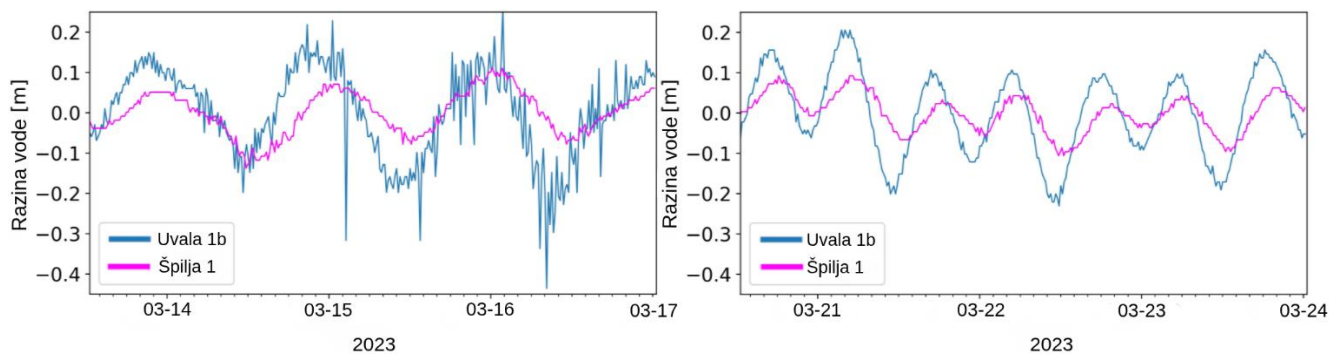
3.2.4 Razina vode

U ovom potpoglavlju razmatrat ćemo razinu vode u moru i u jezeru. Za početak, promotrimo osnovne značajke odnosa razina na primjeru minutnih nizova mjerenih u lipnju 2021. godine (slika 3.13). Za lakšu usporedbu dodane su dvije vertikalne linije i na grafički prikaz za more (slika 3.13 lijevo) i na grafički prikaz za ZO (slika 3.13 desno). Ono što se prvo može uočiti jest odnos ljestvica veličina na y-osi. Tijekom razmatrana tri dana maksimalni raspon promjena morske razine tijekom jednog dana bio je ~ 48 cm, dok je u jezeru promjena bila skoro dvostruko manja i iznosila je ~ 26 cm. Također, vidi se fazni pomak izmeđuorskog i jezerskog signala za kojeg je procjena iz grafičkog prikaza otprilike 3 sata, odnosno, jezerski signal kasni za morskim signalom za otprilike četvrtinu perioda poludnevniplimnih oscilacija. Na slici 3.13 uz originalni vremenski niz mjeren uređajima prikazan je i niz filtriran niskopropusnim Butterworth filtrom (opisano u potpoglavlju 3.1.2.1.1). U morskom nizu su prisutne visokofrekventne oscilacije kojih nema ili ima vrlo malo u nizu mjerenom u ZO-u. Stoga, razlika između filtriranog i nefiltriranog niza je vrlo mala za jezerski niz te se može zaključiti da stijene kroz koje prolazi voda kako bi došla do jezera djeluju kao niskopropusni filter. Kako su mjerenja u lipnju 2021. godine provedena tijekom terenskog rada u trajanju tri dana možemo potvrditi da je tijekom sva tri dana vrijeme bilo stabilno, što se u nizu razine vjerojatno očituje u dobrom poklapanju s filtriranim nizom, to jest, signal uglavnom čine plimne oscilacije. Kako bismo provjerili ovu hipotezu, promotrimo dva isječka iz 15-minutnih mjerenja 2023. godine, a koja su vremenski bliska (među isječcima je sedam dana razlike; slika 3.14). Ova dva isječka dobar su prikaz kako se dvije različite vrste vremenskih uvjeta odražavaju na razinu vode. Prema dostupnim klimatskim podacima s DHMZ postaja Split Marjan i Šibenik na

dan 15. ožujka 2023. godine na tom području palo je otprilike 20 mm oborine, dok je dan bio oblačan, a srednja dnevna temperatura se snizila 5 do 7 °C u usporedbi s prethodnim danom te je ostala tako sniženom nekoliko dana. Dakle, nastupila je promjena vremena, vrlo vjerojatno pred nailazak hladne fronte preko područja gdje se nalazi i ZO, a što obično podrazumijeva i snažnije vjetrove te promjene u tlaku zraka. Možemo pretpostaviti da je vrijeme bilo nestabilno, što se zatim odrazilo i na signal u moru, dok je jezerski signal bio pod manjim utjecajem (slika 3.14 lijevo), radi već utvrđenog učinka filtriranja okolnih krških stijena (slika 3.13). Ipak, vidljivo je kako u jezeru stupnjevito raste maksimalna dnevna razina vode te je 16. ožujka ona ~ 5 cm viša od one zabilježene 14. ožujka, možda i zbog pojačanih slatkovodnih dotoka. Nekoliko dana kasnije, kada je nastupilo stabilno vrijeme, jezerski signal izgleda slično kao i u tjednu prije, dok se u morskom signalu vidi kako je manje visokofrekventnih oscilacija nego ranije. Tijekom stabilnog vremena u nizu uzorkovanom svakih 15 minuta nema vizualno očite razlike po pitanju visokofrekventnih oscilacija između mjerenja u jezeru i moru kao što je to slučaj s nizovima koji su uzorkovani minutnom frekvencijom (slika 3.13). No, kako vizualni pregled daje tek osnovne informacije, za nizove mjerene 2023. godine u moru i jezeru napravljena je analiza spektra gustoće snage (slika 3.15).

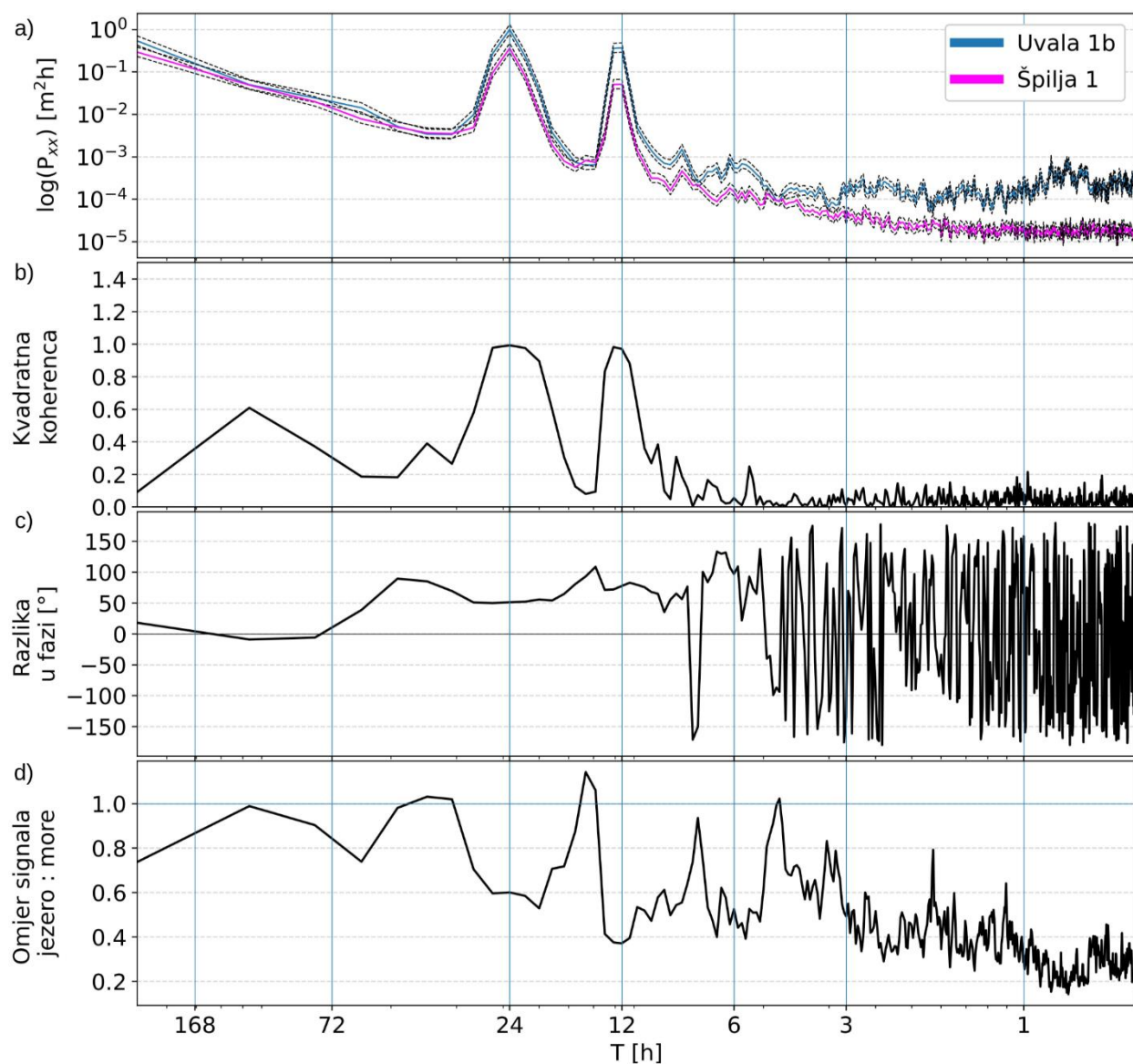


Slika 3.13 Mjerenja razine vode na lokaciji u moru (Uvala 1a; lijevo) i jezeru (Špilja 1; desno) tijekom lipnja 2021. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.



Slika 3.14 Mjerenja razine vode za razdoblje 14. – 17. (lijevo) i 21. – 24. (desno) tijekom ožujka 2023. godine na lokacijama u moru (Uvala 1b) i jezeru (Špilja 1). Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

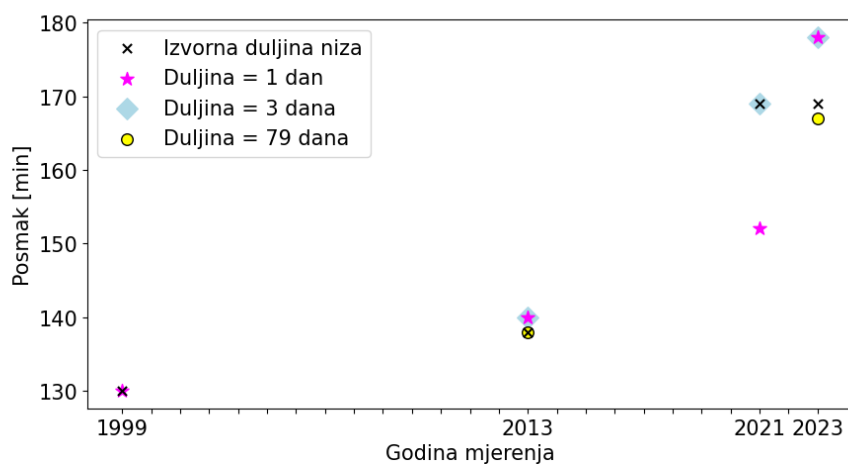
Analiza spektara gustoće snage za vremenski niz razine vode napravljena je korištenjem niza iz 2023. godine, kao što je to bio slučaj za analizu temperature (slika 3.9). Ponovno se uočava najveća snaga i koherencija na periodima oko 24 i 12 sati (slike 3.15 a i b) što u ovom slučaju ne odgovara zagrijavanju i hlađenju, već periodima plimnih oscilacija. Vidljivo je uobičajeno nakupljanje energije na dugim periodima, a ističu se i dva manja maksimuma na periodima oko 8 i 6 sati. Prvi maksimum je vjerojatno viši harmonik bazne diurnalne plimne oscilacija (Medvedev, Vilibić i Rabinovich, 2020), dok je drugi vjerojatno 2. mod jadranskog seša (period 6,7 sati; Šepić *i sur.*, 2022). Također, jezerski signal ima manje energije na plimnim periodima, što je u skladu s prigušenjem signala kojeg smo već razmatrali (slika 3.13). Iz ovog prikaza vidimo i da je prigušenje snažnije za visokofrekventne oscilacije (omjeri su 0,14 i 0,36 redom za poludnevnu i dnevnu sastavnicu) nego što je za one dužeg perioda. Prigušenje se još bolje uočava na grafu omjera signala u jezeru i moru (slika 3.15 d) gdje se omjer smanjuje prema kratkoperiodičkom dijelu spektra. Razlika u fazi je 51° za dnevne i 78° za poludnevne sastavnice (odnosno, redom 3,4 i 2,6 sati), što odgovara procjeni koju smo napravili grafički temeljem nizova na slici 3.13. Također, nizovi su niskokoherentni (ili sasvim nekoherentni) na periodima kraćim od 5 sati (slika 3.15 b) što ukazuje da oscilacije u moru na tim periodima ne prodiru ili slabo prodiru u ZO.



Slika 3.15 Spektar gustoće snage P_{xx} (a), kvadratne koherence (b), razlike u fazi (c) i omjera signala jezero:more (d) za mjerenja razine vode na lokaciji u moru (Uvala 1b) i jezeru (Špilja 1) tijekom 2023. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

Od prvog mjerenja razine vode 1999. godine do trenutka pisanja disertacije za analizu su bila dostupna četiri para vremenskih nizova more – jezero. Nizovi su različitih duljina i uzorkovani različitim intervalima uzorkovanja, no njihovom usporedbom ipak možemo saznati nove informacije. Slika 3.16 prikazuje vremenski posmak za koji je korelacija između mjerenja morske razine u moru i jezeru najveća (za svaki od četiri para nizova razmatranih u ovom istraživanju). Upravo zbog različite prirode nizova postupak je napravljen za nekoliko dužina nizova: duljina 1

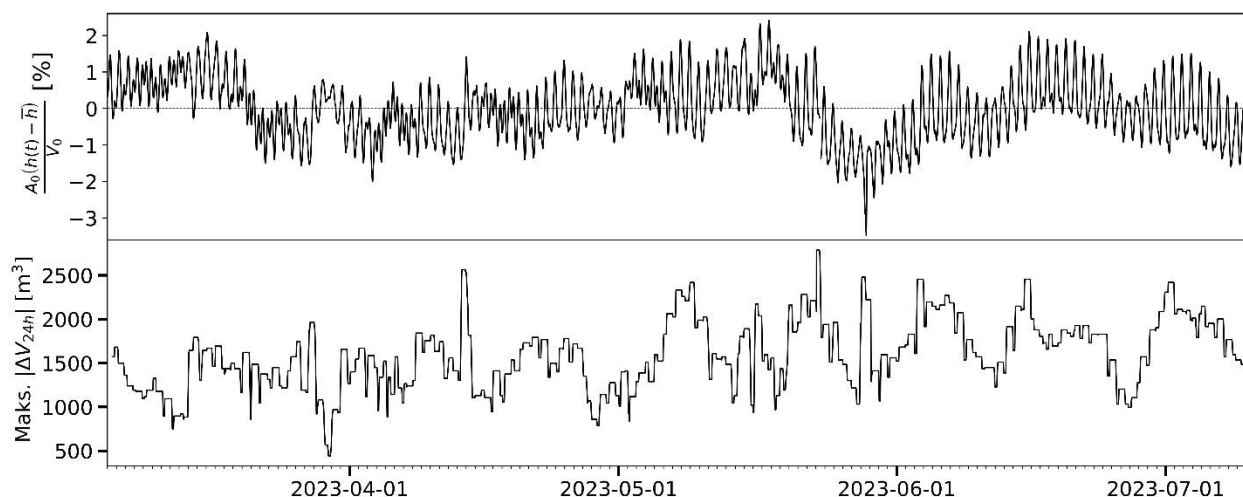
dan, 3 dana i 79 dana. Najprije razmotrimo posmake za nizove izvorne duljine (oznaka crni križić; slika 3.16). Korelacije među nizovima su tada najveće za 130, 138, 169 i 169 minuta (redom za nizove iz 1999., 2013., 2021. i 2023. godine). Rezultati navode na zaključak da se kašnjenje tijekom 22 godine (1999. – 2021.) povećalo za gotovo četvrtinu sata. No, u ovom razmatranju nizovi nisu iste duljine, stoga razmotrimo što se dogodi kada nizove iz 2013., 2021. i 2023. godine skratimo te u obzir uzmemo samo prvi dan mjerenja za svaki niz (oznaka ružičasta zvjezdica; slika 3.16). Sada su kašnjenja redom 130, 140, 152 i 178 minuta (opet kronološki redoslijed godina). Iako su se vrijednosti nešto promijenile za ovako skraćene nizove, primjećujemo da su vrijednosti za svaki od nizova slične te da je porast kašnjenja svejedno prisutan. Za nizove skraćene na duljinu tri dana (oznaka plavi romb; slika 3.16), vrijednosti su 140, 169 i 178 minuta (redom za 2013., 2021. i 2023. godinu – niz iz 1999. godine sada je prekratak za usporedbu). Vrijednosti su opet slične, a stopa porasta kašnjenja je i u ovom slučaju prisutna. Završimo, razmotrimo kako se rezultat mijenja ako razmatramo samo nizove duljine 79 dana (oznaka žuti krug; slika 3.16). Sada je korelacija maksimalna za posmak od 138 minuta za niz iz 2013. godine, a za niz iz 2023. godine je maksimalna za posmak 167 minuta. Dakle, vrijednosti posmaka nešto variraju ovisno o duljini niza, no porast kroz godine je očuvan te možemo reći da je kašnjenje između jezera i mora tijekom 24 godine (1999. – 2023.) poraslo za minimalno 37 (za nizove duljine 79 dana) i maksimalno 48 minuta (za nizove duljine tri dana). Također, kašnjenje dobiveno iz podataka mjerenih tijekom 2023. godine u skladu je s onime što je izračunato iz spektra gustoće snage za isti niz (slika 3.15).



Slika 3.16 Vremenski posmak za koji je korelacija između filtriranih mjerenja razine vode u moru i jezeru najveća za četiri različite duljine vremenskih nizova.

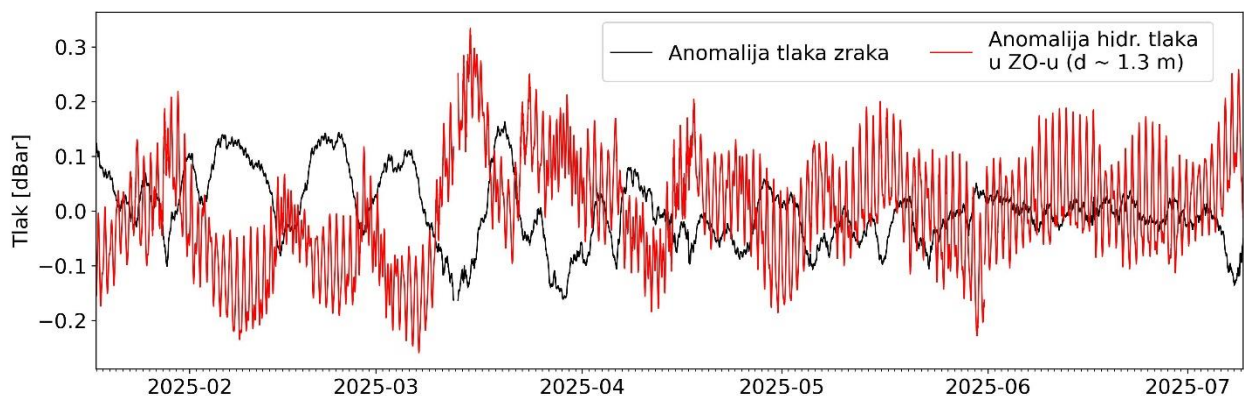
Za kraj razmatranja mjerenja prikupljenih do 2023. godine, razmotrimo još sliku 3.17. Na njoj je prikazana relativna promjena volumena u jezeru (slika 3.17, gore), to jest, odstupanja volumena u odnosu na prosječnu razinu vode u jezeru (skalirano ukupnim volumenom jezera prema Panda, 2020; detaljnije opisano u potpoglavlju 3.1.2.1.1). Zanimljivo je primijetiti kako jezero nije primalo jednaku količinu vode tijekom razmatranih pet mjeseci. Ne postoji određena stopa pada ili rasta niti vizualno očita periodičnost (osim na dnevnoj ljestvici), no vrijednosti se ipak kreću oko srednje vrijednosti s razdobljima kada je nešto više vode bilo u jezeru (ožujak; prva polovica svibnja; sredina lipnja i početak srpnja) te razdoblja kada je nešto manje vode bilo u jezeru (kraj ožujka; početak travnja; izraženi minimumi krajem svibnja). No, ukupno izmjenjena voda tijekom svih razmatranih mjeseci uvijek je bila unutar 5% ukupnog volumena jezera, odnosno $\sim 4500 \text{ m}^3$. Nakon dodatne pripreme niza na način pojašnjen u potpoglavlju 3.1.2.1.1, izračunato je kako je maksimalna apsolutna promjena volumena tijekom 24-satnih razdoblja iznosila 2785 m^3 ($\sim 3,1\%$ ukupnog volumena jezera), a zabilježena je u razdoblju 22. svibnja 10:43 – 23. svibnja 10:42 2023. godine. Najmanja promjena je bila 441 m^3 ($\sim 0,5\%$ ukupnog volumena jezera), a zabilježena je u razdoblju 29. ožujka 01:43 – 30. ožujka 01:42 (slika 3.17, dolje). Kako bismo istražili uzroke ovakvih promjena volumena, a koje su izračunate iz promjena u tlaku, razmotrimo vremenski niz iz 2025. godine kada je istovremeno s mjerenjima tlaka u jezeru mjeren i prizemni tlak zraka (slika 3.18). Tijekom prvog razdoblja mjerenja (siječanj – ožujak) tlak zraka ima izraženu periodičnost te se ističu razdoblja visokog tlaka zraka te razdoblja niskog tlaka zraka, a čija je izmjena u prosjeku svakih sedam dana. To se inverzno odražava na hidrostatski tlak te, u razdobljima kad je promjena tlaka zraka pozitivna, promjena hidrostatskog tlaka je negativna. Ova pojava je općepoznata, pa, ipak, zanimljivo je uočiti koliko se pojava koja zapravo dolazi iz morskog signala očituje i u signalu jezera. Iako za 2025. godinu nije dostupan vremenski niz morske razine, iz razmatranja slike 3.15 bila je očita visoka koherencija nizova morske razine na sinoptičkoj vremenskoj ljestvici i to se doista nanovo vidi na slici 3.18. Ako razmotrimo sredinu ožujka, uočavamo kako se atmosferski tlak spustio za 0,25 dBara, što je uzrokovalo porast hidrostatskog tlaka u jezeru za $\sim 0,5$ dBara, što bi otprilike odgovaralo promjeni razine Δh od 50 cm. Ta promjena odgovarala bi ulasku vode koja čini otprilike 5,5% ukupnog volumena jezera ($\frac{\Delta h \cdot A_0}{V_0} = \frac{0,5 \text{ m} \cdot 9\,904 \text{ m}^2}{90\,692 \text{ m}^3} \approx 5,5\%$; morfometrijski podaci iz potpoglavlja 2.1.2.1 i 2.1.2.2). Ovakve izmnimne količine vjerojatno su, uz znatnije promjene tlaka zraka, dodatno potpomognute izdizanjem morske razine zbog puhanja jakog juga,

a što je povremena pojava na Jadranskoj obali u tom dijelu godine (tzv. olujni uspor, engl. *storm surge*).



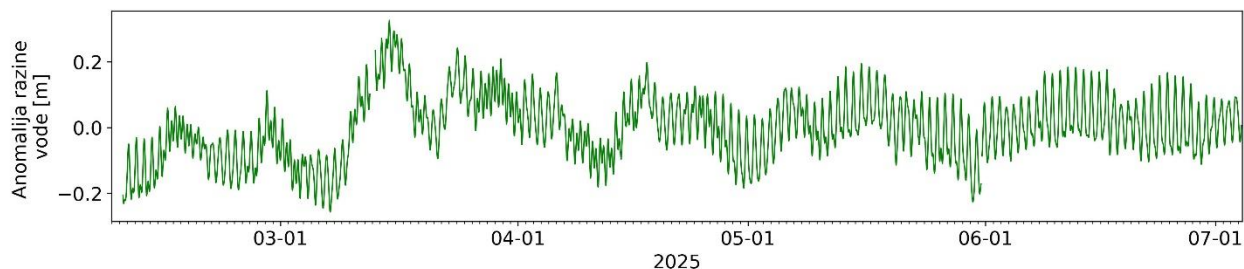
Slika 3.17 Relativna promjena volumena (skalirano volumenom jezera V_0 prema Panda, 2020.; gore). Apsolutna promjena volumena u 24-satnim razdobljima (dolje). Razina vode mjerena na lokaciji Špilja 1 (karta s označenom lokacijom nalazi se na slici 3.1).

Nadalje, razmotrimo preostali dio niza, odnosno, razdoblje od travnja do sredine srpnja. U tom dijelu godine u ukupnom signalu hidrostatskog tlaka više se ističu dnevne oscilacije, signal je pravilniji te se više kreće oko srednje vrijednosti. Promjene u tlaku zraka su manje izražene te također i manje utječu na promjenu hidrostatskog tlaka u jezeru. Već iz vrijednosti hidrostatskog tlaka može se razmatrati kretanje razine vode u jezeru te je to i napravljeno za niz iz 2023. godine. No, iz jednadžbe (3.1) jasno je da za točnije određivanje razine vode treba imati i informaciju o gustoći vode. Sada kada imamo podatke o hidrostatskom tlaku (slika 3.18) i gustoći vode na dubini približnoj onoj dubini gdje se nalazio uređaj za mjerenje tlaka (slika 3.11; površinski sloj), možemo izračunati razinu vode u jezeru koristeći jednadžbu (3.1). Rezultat ovoga dijela rada prikazan je na slici 3.19. Vidimo da je izgledom grafički prikaz gotovo identičan onome za hidrostatski tlak te da se zaključci doneseni temeljem grafa za tlak mogu prenijeti i na promjene razine vode. Ono što je zanimljivo jest to da je prosječna razina vode tijekom proljeća nešto viša od one tijekom zime. Obzirom na istaknute plimne oscilacije, za pretpostaviti je da jezero s okolnim kršem i morem u prosjeku izmijeni sličnu količinu vode tijekom dnevnog ciklusa.



Slika 3.18 Anomalija tlaka zraka mjenog na lokaciji Kopno 2 i anomalija hidrostatčkog tlaka mjenog u jezeru na lokaciji blizu Špilje 1 tijekom 2025. godine. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

Stoga, za podizanje ukupne razine vode u jezeru potrebno je da kroz duže razdoblje voda više ulazi u jezero nego što izlazi, a takvo razdoblje može se uočiti u drugoj polovici mjernog razdoblja, odnosno, tijekom istog razdoblja koje smo već komentirali vezano za sliku 3.15 pri analizi veze s tlakom zraka. Nakon razdoblja više razine vode u jezeru, od 15. ožujka do kraja svibnja 2025. godine, razina vode pada, ali se ni u jednom trenutku mjerenja ne vrati na najnižu razinu koja je zabilježena 7. ožujka. Preostali zaključci slični su onima za hidrostatčki tlak stoga ih nećemo ovdje ponavljati. No, podatak o razini vode omogućava jedan dodatni korak koji nije bilo moguće napraviti samo s podacima o hidrostatčkom tlaku. U potpoglavlju 3.1.2.1.1 u jednadžbi (3.2) rapisali smo odstupanja



Slika 3.19 Anomalija razine vode mjerene u jezeru na lokaciji Špilja 1 tijekom 2025. godine. Karta s označenom lokacijom nalazi se na slici 3.1.

hidrostatčkog tlaka od srednje vrijednosti na tri doprinosa: jedan uzrokovan promjenama gustoće vodenog stupca iznad mjerne točke ($\rho'(t)g\bar{h}$), drugi uzrokovan promjenom visine vodenog stupca

$(\bar{\rho}gh'(t))$ i treći, „miješani“ član, drugim riječima, kombinacija utjecaja promjena gustoće i razine vode ($\rho'(t)gh'(t)$). Ovi utjecaji nisu sasvim neovisni jer promjena visine vodenog stupca $h'(t)$ podrazumijeva i promjene gustoće. Ovdje možemo razmoriti koliki utjecaj ima koji član na promjene hidrostatskog tlaka. Iz podataka sa slike 3.15 možemo izračunati p' (odstupanje hidrostatskog tlaka od srednje vrijednosti $\bar{p}$), dok podaci sa slike 3.19 služe za izračun h' (odstupanja razine vode od srednje vrijednosti $\bar{h}$). Kada za svako od tih odstupanja izračunamo prosjek i stavimo ga u omjer s ukupnim odstupanjem tlaka, dobijemo sljedeće vrijednosti (tablica 3.2):

Tablica 3.2 Omjer prosječne vrijednosti svakog od članova jednadžbe za anomaliju hidrostatskog tlaka i ukupne anomalije hidrostatskog tlaka temeljem mjerenja iz 2025. godine na lokaciji Špilja 1. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

1. član: $\frac{\rho'(t)g\bar{h}}{p'}$	2. član: $\frac{\bar{\rho}gh'(t)}{p'}$	3. član: $\frac{\rho'(t)gh'(t)}{p'}$
3,65	96,27	0,08

Odnosno, kada se 1. i 3. član stave u omjer s 2. članom, dobije se da 2. član doprinosi redom 362 i 6809 puta više. Stoga, pri izračunu promjena hidrostatskog tlaka 3. član je zanemarivo malen i može se izostaviti, što i jest česta praksa u sličnim analizama (npr. Dominović, 2020). Kada zanemarimo 3. član, jednadžba (3.2) može se svesti na:

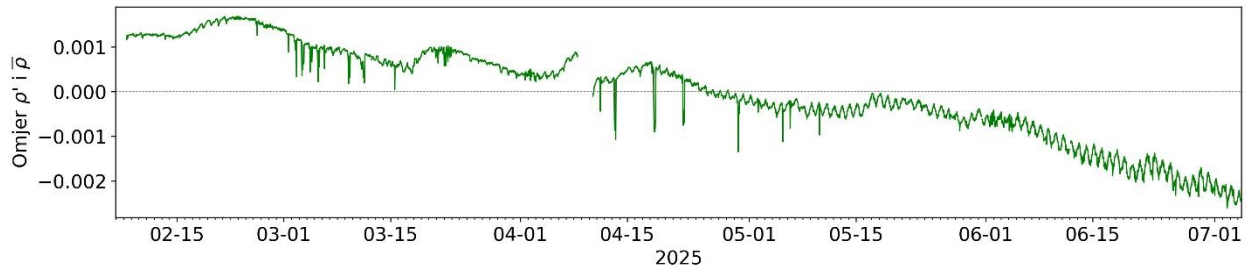
$$p'(t) = \rho'(t)g\bar{h} + \bar{\rho}gh'(t) \quad (3.3)$$

iz čega proizlazi da je promjena razine vode jednaka

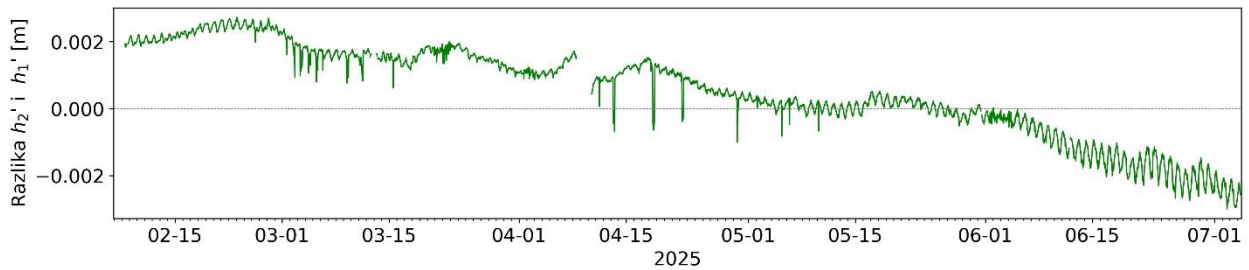
$$h'(t) = \frac{p'(t)}{\bar{\rho}g} - \bar{h} \frac{\rho'(t)}{\bar{\rho}g} \quad (3.4)$$

Kako je $\bar{h}$ u ovom slučaju jednak 1,3 m (odnosno, blizak vrijednosti 1), o tome koliko drugi član jednadžbe (3.4) doprinosi promjenama razine vode najviše govori omjer odstupanja gustoće i srednje vrijednosti gustoće (slika 3.21). Taj omjer mijenja predznak sredinom proljeća, stoga je i doprinos h' neznatno veći tijekom ljeta nego što je tijekom zime, upravo zbog širenja vodenog stupca zagrijavanjem. Po apsolutnom iznosu je doprinos ~ 4 puta manji krajem ljeta nego što je tijekom zime. Ipak, taj omjer pomnožen s $\bar{h}$, koji je u ovom slučaju ~ 1 m, čini doprinos od tek nekoliko milimetara. Stoga, razmotrimo kakav bi utjecaj na rezultat bio ako bi svi doprinosi koji

dolaze od promjene gustoće bili zanemareni, to jest, usporedimo $h_1'(t) \equiv \frac{p(t)}{\rho(t)g} - \frac{\overline{p(t)}}{\overline{\rho(t)}g}$ (odnosno, promjene razine vode izračunate direktno korištenjem mjerenja hidrostatskog tlaka i izračunate gustoće, prema jednadžbi 3.1) i $h_2'(t) \equiv \frac{p'(t)}{\bar{\rho}g}$ (to jest, promjene razine vode izračunate temeljem korištenja samo 2. člana iz tablice 3.2). Razlika promjena razine vode u jezeru mjerena na ova dva načina prikazana je na slici 3.21. Dakle, ako računamo promjene razine vode u jezeru i pritom zanemarimo promjenu gustoće u vodenom stupcu, tijekom siječnja, ožujka i dijela travnja precijenit ćemo razinu za do $\sim 1,5$ mm, dok ćemo ju za preostale mjesece, zaključno s početkom srpnja, potcijeniti za $\sim 2,5$ mm. Ove vrijednosti su upravo ljestvica veličine procjene pogreške izračuna za nizove razine vode iz 2013., 2021. i 2023. godine kada je za izračun bila dostupna samo srednja vrijednost gustoće, odnosno, nismo imali kontinuirana mjerenja na raspolaganju, već sezonske CTD profile.



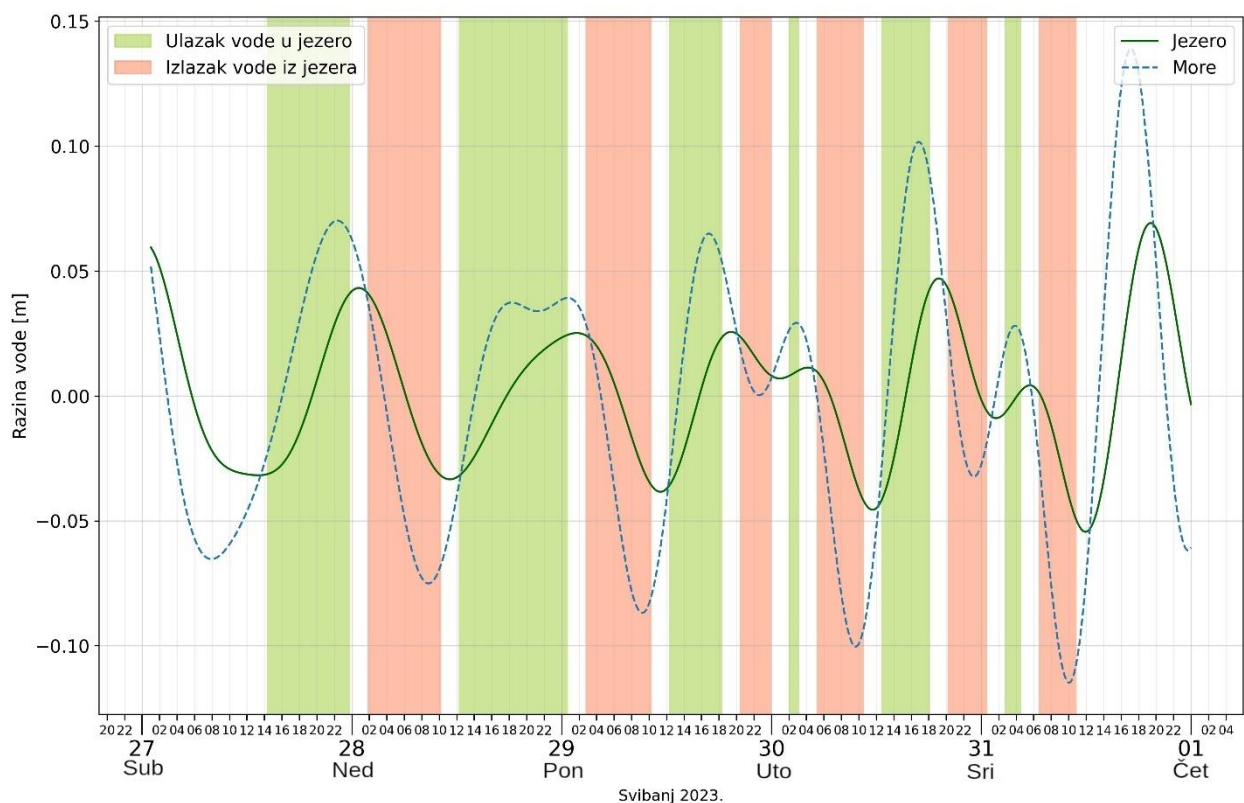
Slika 3.20 Omjer anomalije gustoće vode i srednje vrijednosti gustoće vode tijekom 2025. godine za jezero ZO na dubini $\sim 1,3$ m.



Slika 3.21 Razlika anomalije razine vode računate temeljem anomalije hidrostatskog tlaka i srednje vrijednosti gustoće temeljem mjerenja CTD sondom ($h_2'(t) \equiv \frac{p'(t)}{\bar{\rho}g}$) i anomalije razine vode računate direktno iz vremenskog niza anomalije hidrostatskog tlaka i vremenskog niza gustoće vode ($h_1'(t) \equiv \frac{p(t)}{\rho(t)g} - \frac{\overline{p(t)}}{\overline{\rho(t)}g}$) za jezero ZO.

3.2.5 Fizičko – kemijska svojstva uzorkovane vode

Za svibanj 2023. godine je bilo u planu uzrokovanje analizom kojeg bi se ispitale fizičko – kemijske karakteristike vode. Ta voda, kako je zaključeno temeljem analize razine vode, u jezero ulazi svakodnevno i u količinama koje su, iako male, ipak usporedive s ukupnim volumenom jezera. Temeljem analize nizova temperature prikazanih na slikama 3.3, 3.5 i 3.8 zaključeno je kako su lokacije *Špilja 1* i *Špilja 2 kraj* (slika 3.1) jedna od mjesta na kojima voda ulazi u jezero u dovoljnim količinama da se njeni učinci osjete na uređajima za mjerenje temperature. Stoga, upravo su te lokacije odabrane za ispitivanje fizičko – kemijskih svojstava ulazne vode. Voda je uzorkovana na četiri lokacije: u *Uvali 2*, pokraj *Špilje 1*, na kraju *Špilje 2* te u centru ZO-a (slika 3.1). Kako smo opisali u potpoglavlju 3.1.2.2, uzorci su u špiljama prikupljeni jednom pri početku podizanja razine vode u jezeru (nakon početka toka vode iz stijena u jezero) i jednom pred kraj izdizanja razine (pred kraj toka vode iz stijena u jezero). Uzorci na lokaciji *Centar* i *Uvala 2* prikupljeni su kao referenca s kojom će se uspoređivati preostala četiri uzorka. Za prikupljanje uzoraka napravljena je prognoza plimnih oscilacija u jezeru, a prikazana je skupa s onom za more na slici 3.22. Zeleno su osjenčana razdoblja kada se u jezeru očekuje smjer toka prema jezeru, dok su crveno osjenčana razdoblja kada se očekuje tok suprotnog smjera, odnosno izlazak vode iz jezera. Ronilac koji je prikupljao uzorke je dobio uputu da uzorke treba prikupiti netom nakon nastupa jednog od zelenih područja i netom prije kraja istog zelenog područja u kojem je uzet prvi uzorak u špiljama. Prijelazna razdoblja nisu osjenčana radi mogućih grešaka prognoze (sjetimo se – temeljem niza razine vode iz 2013. bilo je moguće odrediti pet od sedam plimnih sastavnica, to jest, djelomični plimni signal) te je stoga ostavljen prozor od ~ 2 sata između razdoblja u kojima tok vode ima suprotan smjer kako bi povećali šanse da će uzorkovanje biti tijekom smjera toka koji smo željeli. Obzirom na vremensku prognozu za uzorkovanje je odabran dan 29. svibnja te su tako prvi uzorci u špiljama prikupljeni nešto iza podneva, dok su drugi prikupljeni između 17 i 18 sati. Zatim su uzorci obrađeni na način opisan u potpoglavlju 3.1.2.2 te su rezultati prikazani u tablici 3.3.



Slika 3.22 Prognoza plimnih oscilacija za jezero i more temeljem mjerenja razine vode iz 2013. godine. Osjenčana područja označavaju razdoblja tijekom kojih se ronioncu preporuča (zeleno) i ne preporuča (crveno) ronjenje u Špilji 2 (karta s označenom lokacijom nalazi se na slici 3.1). Uzimanje uzoraka provedeno je 29. svibnja 2023. nakon početka zelenog razdoblja i prije njegovog isteka.

Učinak ulazne vode na temperaturu, koji je bio vrlo očit na slici 3.5, vidi se i u točkastim mjerenjima. U trenutku uzimanja uzoraka na početku plime temperatura je niža u Špilji 1 nego u Špilji 2, no do kraja plime situacija se obrnula te je na kraju Špilje 2 temperatura gotovo 1 °C niža nego u Špilji 1. Također, zanimljivo je da je u Špilji 2 prevladala stopa pada temperature između dva uzorkovanja, dok je u Špilji 1 temperatura do drugog uzorkovanja porasla. No, to je isto u skladu s onime zamjećenim na slici 3.5. – učinak vode koja dolazi ili količina vode koja dolazi je manja u Špilji 1 u odnosu na lokaciju Špilja 2 kraj. Općenito, temperature na svim lokacijama – pa čak i u špiljama – su više nego u plicini mora u uvali. Salinitet je u moru bio iznimno nizak (34,3) u usporedbi s uobičajenim vrijednostima za Jadransko more (~ 38), no radi se o plicini u blizini obale gdje su mogući povremeno niži saliniteti (pismena korespondencija, Edi Gljuščić). Također,

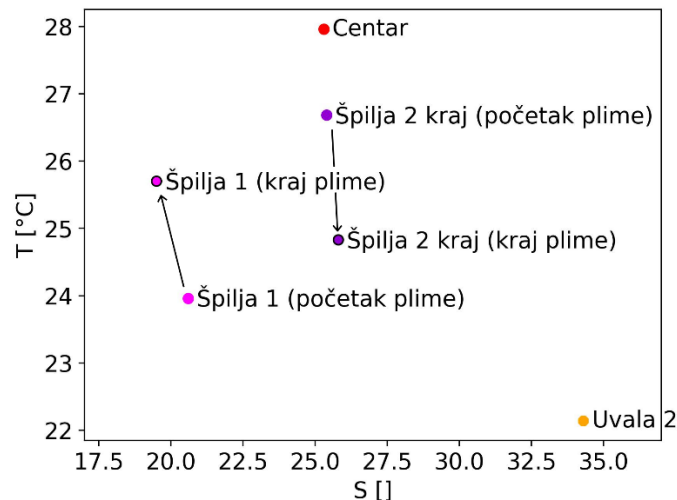
na području Šibenika bilo je oborine dan prije uzorkovanja, no ista nije zabilježena u Splitu (klimatološke postaje Split Marjan i Šibenik, <https://meteo.hr>), stoga je moguće da se radilo o mjestimičnim lokalnim pljuskovima. U prilog ovakvom zaključku ide i sniženi salinitet pri površini u centru jezera (25,3). Na početku plime u *Špilji 1* salinitet je niži nego u centru jezera, dok je na kraju *Špilje 2* gotovo jednak onome u centru. No, do kraja plime u *Špilji 1* se salinitet snizio za jednu jedinicu, dok je na kraju *Špilje 2* porastao, ali neznatno – za 0,4. Ovaj rezultat je svojevrsno iznenađenje jer ne samo da pred kraj plime u jezero ne ulazi morska voda, već se način promjene parametara od početka do kraja plime razlikuje za dvije lokacije koje su obje uz rub jezera i udaljene tek 80-ak metara. Što se tiče koncentracije OK-a, ona je bila najviša u centru jezera (15,2 mg L⁻¹), dok je u moru izmjerena ~30% niža koncentracija, odnosno, 10,4 mg L⁻¹. Na početku plime koncentracija OK bila je znatno niža na obje lokacije u usporedbi s onom mjerenom na lokaciji *Centar*. Pred kraj plime na obje lokacije je vrijednost OK-a nešto niža, no to ne možemo direktno povezati s vodom koja protječe jer OK ima svoj dnevni hod zbog Sunčevog zračenja te je moguće da su vrijednosti u predvečerje nešto niže upravo iz tog razloga. Vrijednosti fosfata (c(PO₄³⁻)) i silikata (c(SiO₄⁴⁻)) u špiljama usporedive su s onima mjerenima u centru jezera, a plimne oscilacije ih znatno mijenjanju. Koncentracija fosfata se do kraja plime blago smanji, dok je za silikate drugačija situacija. Naime, u *Špilji 1* se koncentracija silikata do kraja plime povećala za ~16%, dok se u *Špilji 2* smanjila za ~16%. Vrijednosti nitrata (c(NO₃⁻)) i nitrita (c(NO₂⁻)) su znatno veće u špiljama u usporedbi s centrom jezera. To se osobito ističe po pitanju koncentracije nitrata, čija je koncentracija u *Špilji 1* na početku plime dvadeset puta veća, dok je na kraju plime u *Špilji 2* deset puta veća. Zanimljivo da se s krajem plime koncentracija znatno smanji na obje lokacije. Zadnji razmatrani parametar je bila koncentracija amonijevih iona (c(NH₄⁺)) čija je koncentracija u *Špilji 1* bila dvanaest puta viša nego ona u susjednoj uvali. S krajem plime koncentracija se na obje lokacije više nego udvostručila.

Temeljem vrijednosti iz tablice 3.3 bilo je moguće nacrtati *T-S* dijagram (slika 3.23). Ovaj način prikaza obično se koristi za stabilnije vodene mase, no i u ovom slučaju nosi korisne informacije. Vidimo da je na početku plime voda na kraju *Špilje 2* sličnija vodi u centru jezera, dok je voda u *Špilji 1* drugačija i od vode u uvali i od vode u centru. Ono što je zanimljivo jest to da s protokom vode iz stijena tijekom plime voda dobiva svojstva takva da se na *T-S* dijagramu pomiče u lijevo. Kako su glavne „vodene mase“ razmatrane u istraživanju ona jezerska i morska, jasno je da mora postojati i treća vodena masa, koja trenutno nije poznata, a koja miješanjem s jezerskom i morskom

vodom rezultira vodom koja prolazi kroz špilje tijekom plime u jezeru. Ta voda također treba biti manjeg saliniteta te nešto hladnija. Kad se uzme u obzir i analiza nitrata iz tablice 3.3, ovo potpoglavlje možemo dovršiti uz zaključak kako voda koja dolazi iz krša nije voda svojstvima identična jezerskoj ili morskoj vodi, već zasebna voda koja može biti mješavina jezerske i morske vode, ali uz očit utjecaj slatke podzemne vode.

Tablica 3.3 Vrijednosti temperature, saliniteta te koncentracije otopljenog kisika, fosfata, amonijaka, nitrita, nitrata i fosfata za uzorke prikupljene tijekom 29. svibnja 2023. na tri lokacije u jezeru i jednoj lokaciji u moru. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

Parametar	Jedinica	More		Jezero			
		Uvala 2	Centar	Špilja 1	Špilja 1	Špilja 2 kraj	Špilja 2 kraj
		Ref.	Ref.	Početak ulaska vode	Kraj ulaska vode	Početak ulaska vode	Kraj ulaska vode
T	°C	22,14	27,96	23,96	25,70	26,68	24,83
S	-	34,3	25,3	20,6	19,5	25,4	25,80
OK	mg/L	10,37	15,22	7,03	7,64	10,72	11,23
c(PO_4^{3-})	μM	0,113	0,317	0,334	0,298	0,457	0,448
c(NH_4^+)	μM	0,575	6,279	2,960	6,195	1,293	3,135
c(NO_2^-)	μM	<GD	0,038	0,114	0,200	0,206	0,231
c(NO_3^-)	μM	1,006	0,898	20,773	5,584	10,449	4,713
c(SiO_4^{4-})	μM	2,640	18,422	16,754	19,436	16,052	13,569



Slika 3.23 T-S dijagram za uzorke prikupljene na lokacijama Špilja 1, Špilja 2 i Centar (u jezeru) te na lokaciji Uvala 2 (u moru) na dan 29. svibnja 2025. Karta s označenim lokacijama nalazi se na slici 3.1.

3.3 Diskusija

3.3.1 Interpretacija vremenskih nizova temperature vode

Podaci prikazani na slici 3.3 otkrivaju iznimno velik raspon temperatura na samom kraju Špilje 2, dok je raspon na ulazu u Špilju 2 približno četiri puta manji. Takva razlika ne može se objasniti isključivo dnevnim zagrijavanjem i hlađenjem, već nedvojbeno upućuje na to da ovdje djeluje dodatni proces – ulazak vode iz krša. Kasniji pad temperature, koji se javlja u hladnijem dijelu godine, vjerojatno je posljedica činjenice da su Špilja 2 kraj i Špilja 1 na manjim dubinama od ostalih lokacija, čime su podložnije dolasku vode čija je temperatura sličnija ambijentalnoj temperaturi stijena (to jest, hladnija nego na referentnoj točki u centru jezera). To dodatno potvrđuje i usporedba s razinom vode: čak i ako bi netko pretpostavio da je veći dnevni hod temperature uzrokovan postavljanjem senzora na manju dubinu, takva pretpostavka ne bi mogla objasniti zabilježene prekide dnevnog zagrijavanja koji se javljaju istodobno s promjenom smjera plimnog toka, a koji su izraženi ljeti. Zanimljivo, u hladnijem dijelu godine upravo dublje postavljeni uređaj (lokacija Špilja 2 kraj) bilježi jači dnevni temperaturni signal od uređaja na

manjoj dubini (*Špilja 1*), što dodatno naglašava da dinamiku ne određuje samo dnevno zagrijavanje, već i hidrodinamika u špiljicama te njihov odnos s krškim pukotinama koje ih okružuju. Slika 3.4 potvrđuje valjanost pretpostavke o horizontalnoj prostornoj homogenosti temperature kada se mjerenja promatraju na istim dubinama – ali samo ako se radi o lokaciji koja je, ili nešto dalje od ruba jezera, ili uz rub jezera, ali dalje od mjesta kontakta na kojima ulazi voda iz stijena. Uređaji postavljeni na jednaku dubinu uz rub jezera, no na različitim lokacijama, bilježe gotovo identične temperature, izrazito u zimskim mjesecima. U siječnju na desnom isječku (slika 3.4) ne uočavaju se dnevne oscilacije, što ukazuje da temperatura ulazne vode nije bila različita od temperature jezerske vode. Na slikama 3.8 i 3.4 (desno) vidi se temperaturna inverzija koja se javlja tijekom zime: toplija voda nalazi se pri dnu, dok se površinski sloj hladi. Ta je inverzija stabilna i onemogućuje dublje miješanje, što je situacija nemoguća u slatkovodnim jezerima, ali moguća u sustavima gdje salinitet ima važnu ulogu u raslojavanju, što smo potvrdili rezultatima drugog poglavlja. Za razliku od spektra razine vode, energija na 24-satnom periodu je veća za jezerski signal, odnosno, dnevni hod temperature je više izražen u jezeru, a to se vidi i iz grafičkog prikaza vremenskog niza - površina jezera se znatno brže grije i znatno brže hladi od morske. Također, promjene temperature uz površinu tijekom 2023. godine su bile vrlo izražene (~ 20 °C), što je u skladu s rezultatima drugog poglavlja gdje je raspon sezonskog signala temperature u sloju 0 – 5 m otprilike 16 °C.

3.3.2 Uloga plime u dinamici temperature uz rub jezera

Na slikama 3.5 i 3.7 ističe se razlika u brzinama spuštanja i dizanja temperature u špiljama. Brze promjene događaju se u trenutku kada plimni tok promijeni smjer i kada voda iz stijena ulazi u špilju, naglo donoseći topliju (zimi) ili hladniju (ljeti) vodu prema senzoru. Kada je razina u ZO-u viša od one u moru i tok se obrne, temperatura u *Špilji 2 kraj* se vrlo brzo vraća na ambijentalnu vrijednost. Smanjivanje utjecaja ulazne vode već na vrlo malim udaljenostima od ruba (slika 3.7 desno – promjena položaja uređaja krajem svibnja 2025. godine) sugerira da je učinak izrazito lokaliziran uz prostor blizak poroznim kanalima u kršu. Dakle, kako je bilo za pretpostaviti iz dosadašnjih saznanja o ZO-u, ono prema Hamner i Hamner (1998) doista spada u drugi tip jezera kod kojih je veza s morem slaba i manjeg utjecaja na procese miješanja u jezeru. Pri tome, smjer djelovanja ulazne vode ovisi o dijelu godine: ljeti ulazna voda hladi, dok zimi zagrijava kraj špilje.

Također, jačina tog učinka izrazito ovisi o lokaciji, pa je tako za lokacije razmatrane u ovom istraživanju učinak najizraženiji na lokaciji *Špilja 2 kraj*. Promjene u gustoći mogu se uočiti i vizualno tijekom ronjenja, kako je prijavio kolega koji je prikupljao uzorke. Zanimljiv je povremeni izostanak ove stope pada temperature tijekom plimnih oscilacija. Na drugim lokacijama izostanak dnevnog hoda temperature može se objasniti povremenim izostankom dnevnog hoda u temperaturi zraka (npr. oblačan dan tijekom jeseni i zime). No, na lokaciji *Špilja 2 kraj* koja se nalazi na dubini 1,5 m (tablica 3.1) i sasvim je zaklonjena od direktnog utjecaja Sunca (jer se proteže nekoliko metara u stijene) izostanak dnevnog hoda ne može se pojasniti na taj način. Puno je vjerojatnije da je tijekom takvih razdoblja u jezero ulazila ili voda koja je imala temperaturu sličniju onoj u špilji, pa se ulazak vode nije mogao zabilježiti na senzoru temperature, ili su ta razdoblja bila okarakterizirana manjom izmjenom vode. Utjecaj oscilacija razine vode u jezeru vidi se i na mjerenjima temperature u centru jezera na različitim dubinama. Kako se plutača koja je držala postav uspravnim gibala zajedno s razinom vode, a ZO je vrlo raslojeno, to se očitovalo i u blagim dnevnim oscilacijama temperature koje su na prvi pogled bile neobične. Naime, tijekom dana kada očekujemo zagrijavanje površinskog sloja, dnevni hod je povremeno bio obrnut, to jest, temperatura je poprimala minimum u popodnevnim satima. Tek razmatranjem i povezivanjem djelovanja oscilacija razine vode je ova pojava pojašnjenja. Mjerni uređaj je povremeno bilježio temperaturu sloja koji je nešto iznad ili ispod njega (ovisno o fazi plimnih oscilacija) te bi zapravo mjerio u sloju u kojem je temperatura nešto niža nego na dubini na koju je postavljen. Ovaj je uređaj bio postavljen u centru jezera, za potrebe drugog eksperimenta, pa je bio vezan užetom za bovu. Preostali su uređaji u istraživanju bili učvršćeni za kamenje, stoga je pad temperature, koji nije u skladu s dnevnim hodom zagrijavanja zraka, povezan s ulaskom vode u jezero. No, ovi učinci vertikalnog gibanja na temperaturu su bili zanemarivi te je, po pitanju temperature vode, ipak puno značajniji horizontalni donos vode u sustav, a koji se odvija iz smjera stijena prema ZO-u i obrnuto.

3.3.3 Koherentnost signala u jezeru i moru

Jadransko more ima miješani režim plimnih oscilacija (Cushman-Roisin, Malačić i Gačić, 2001), stoga se u nizovima mjerenja razine vode većinu vremena tijekom mjeseca ističe niža visoka voda i viša visoka voda, što je i razlog zašto na slici 3.5 u *Špilji 2* vidimo jedan nagliji pad temperature i drugi prilično ublažen. Dakle, promjena temperature uzrokovana vodom koja ulazi iz stijena bit

će najveća tijekom živih morskih mijena. Slika 3.9 pokazuje da su nizovi temperature vode u moru i jezeru koherentni tek na dužim periodima (≥ 12 sati), iako ta veza vjerojatnije pokazuje ovisnost temperature u oba sustava o meteorološkim parametrima, a ne uzročno – posljedičnu vezu između sustava. S druge strane, slika 3.13 otkriva vidljivo kašnjenje u fazi između razine vode u jezeru i moru, pri čemu su razine povezane hidrostatskim tlakom (razlika u tlaku utječe na promjene razine u jezeru). Takva pojava zabilježena je i u drugim krškim sustavima, uključujući i jezero Jellyfish te Veliko i Malo jezero na Mljetu. Ovo kašnjenje posljedica je filtracijskog djelovanja krškog vodonosnika, što je potvrđeno i analizom spektra na slici 3.15. gdje se vidi fazni pomak jezerskog signala u odnosu na morski te prigušenje kratkoperiodičkih oscilacija iz mora, od kojih je jezero i zaštićeno. Vizualni dojam na slikama 3.13 i 3.14 mogao bi navesti na zaključak da signal ne prolazi u jezero samo za raspon perioda između 1 minute i 15 minuta. Međutim, analiza spektra gustoće snage (slika 3.15) pokazuje da je koherencija slaba već za periode ispod približno 5 sati, odnosno, prigušenje uzrokovano kršom učinkovito filtrira i oscilacije dužih perioda od 15 minuta. Visokofrekventne oscilacije, koje se ponekad bilježe u moru (slika 3.14), u jezeru su iznimno slabe ili potpuno izostaju. Stoga, jezero je zaštićeno od djelovanja visokofrekventnih oscilacija morske razine koje inače imaju velik udio u morskom signalu (npr. Ruić *i sur.*, 2023), izrazito za vrijeme takvih ekstremnih poremećaja (Šepić *i sur.*, 2015). Iako je koherencija na 12-satnom i 24-satnom periodu izgledom slična i za temperaturu i za razinu vode, uzroci su posve drugačiji. Kod temperature, energija u 24-satnom periodu potječe od dnevnog ciklusa zagrijavanja i hlađenja zbog sunčevog zračenja, dok je kod razine vode to rezultat izmjene plime i oseke i, povremeno, osnovnog Jadranskog seša perioda 21,5 h (npr. Šepić *i sur.*, 2022) koje su, kako smo spomenuli, uzročno – posljedično povezane (plima u moru uzrokuje s odmakom plimu u jezeru). Kraći periodi (oko 6 sati) ponekad izgledaju slični u oba signala, no njihovi fizički uzroci su različiti: kod temperature je riječ o artefaktu analize, dok je kod razine vode riječ o višem modu seša Jadranskog mora. Zanimljivo je da se prvi mod seša ($\sim 10,9$ h; npr. Šepić *i sur.*, 2022) ne ističe u signalima, vjerojatno radi geografskog položaja Rogoznice koja se nalazi na srednjem Jadranu, odnosno blizu čvrne linije seša. Ono što se također može zaključiti razmatranjem isječaka razine vode (npr. slike 3.14 i 3.19), jest da je u kasnu zimu i rano proljeće meteorološka situacija nestabilnija, a što se odražava na razinu vode kao smanjeni udio plimnog signala u ukupnom signalu. Iz slike 3.17 i 3.18 uočava se da u određenim razdobljima u jezero ulazi znatna količina vode – do 5,5% ukupnog volumena jezera. Ovakav povećan ulaz vode posljedica je kombiniranog djelovanja atmosferskog

tlaka i vjetra (izrazito jakog juga u sklopu pojave olujnih uspora). Prosječna izmjena volumena u razmatranom razdoblju iznosi 1,8% ukupnog volumena jezera. Iako se čini kao vrlo malen udio, ako uzmemo u obzir da je jezero vrlo raslojeno i da voda (barem kako je nađeno u ovom istraživanju) ulazi u površinskom dijelu, ta ulazna voda može činiti znatan volumen sloja u kojeg ulazi. Stoga, pitanje jest kakva je njena potencijalna uloga u naglom miješanju koje je zabilježeno tijekom nekoliko jeseni od početka istraživanja. Ovakav utjecaj mogao bi se ispitati nastavkom istraživanja pomoću 3D numeričkog modela. Treba istaknuti da je niz mjerenja razine vode iz 2025. godine dosad najduži neprekinuti niz razine vode mjeren na ZO-u, a nadamo se da će biti i duži obzirom da se mjerenja nastavljaju. Time će biti omogućena preciznija prognoza plime i oseke te zadavanje rubnih uvjeta za numerički model (kojim se bavi četvrto poglavlje).

3.3.4 Kašnjenje plimnog signala u jezeru u odnosu na more

Iz rezultata na slikama 3.15 i 3.16 razmatrali smo, međuostalim, i kašnjenje između signala u moru i jezeru za dio spektra za kojeg je pokazano postojanje koherencija među nizovima (to jest, dugoperiodički dio spektra). Temeljem spektra gustoće snage za niz iz 2023. godine plimni signal u jezeru kasni između 2,6 i 3,4 sata za onim u moru. Kada to za isti niz razmotrimo temeljem korelograma, dobijemo da je kašnjenje u prosjeku 2,8 sati. Korelogram u obzir uzima sve sastavnice niza tako da su ova dva rezultata međusobno u skladu, a također su u skladu i s onime što je nađeno za mnoga palauška jezera, što smo razmatrali u uvodu ovog poglavlja. Ono što je zanimljivo jest da od početka mjerenja 1999. godine kašnjenje između morskog i jezerskog signala više kasni, odnosno, čini se da vodi treba više vremena da dođe od mora do jezera naspram prije. Ovdje se može dati barem dva prigovora: 1) nizovi tijekom godina nisu bili iste duljine (pa su tako zahvatili i različite dijelove plimnog ciklusa) i 2) nizovi su uzorkovani različitim frekvencijama uzorkovanja. No, ako usporedimo nizove iste duljine – 2013. (duljine 79 dana) i 2023. (skraćen na duljinu 79 dana), a koji su izvorno uzorkovani istom frekvencijom (15 minuta), vidimo da je i dalje kašnjenje za pola sata veće u 2023. godini nego što je bilo u 2013. godini. Stoga, čak i u deset godina kašnjenje se nešto izmijenilo. Pitanje jest što bi moglo uzrokovati takvu promjenu. Jedan čimbenik koji doprinosi duljem zadržavanju vode u kršu između mora i jezera može biti povećani udio suspendirane tvari u jezeru koja se potencijalno taloži u krškim porama gdje vladaju anoksični

uvjeti i djelomična razgradnja, uključujući koloidni i partikularni sumpor koji se taloži za vrijeme anoksične holomiksije (Bura-Nakić *i sur.*, 2009; Marguš *i sur.*, 2015; Simonović *i sur.*, 2023). Drugi čimbenik može biti prenamjena okoliša (npr. betoniranje) u neposrednoj blizini ZO-a za koji nikada sa sigurnošću nije utvrđeno kako utječe na izmjenu vode između jezera i mora. Treći čimbenik može biti klimatologija vodne leće između mora i jezera, to jest, različita količina vode koja zatim otežava ili olakšava prijenos vode između dva sustava. Dio ovih pitanja odgovorila bi hidrogeološka mjerenja u okolini ZO-a i ispitivanje veze jezero-more označivačima vode (engl. *tracers* ili *markers*) zajedno s praćenjem razine vodne leće, za koju je temeljem rezultata ovog rada očito da mora postojati u prostoru između mora i jezera, a koja mora biti prostorno (temeljem uzorkovanja; tablica 3.3 i slika 3.23) i vremenski (temeljem međugodišnjeg režima oborine; slika 2.6) vrlo heterogena. Na kraju, takva mjerenja su rađena za jezero Solar (Cohen *i sur.*, 1977) koje ima sličnu vezu s morem, a kojima je utvrđena različita fizičko – kemijska veza tijekom različitih sezona. Dakle, za prognozu plimnih oscilacija u ZO-u bilo bi dobro imati što recentnija mjerenja, jer se korištenjem prognoze temeljem podataka starijeg vremenskog niza razine vode unosi greška u prognozu koja je približna iznosu pola sata.

3.3.5 Salinitet i hidrostaticka stabilnost

Kao što smo pokazali u prethodnom poglavlju, salinitet je ključan parametar koji vodi dinamiku miješanja i općenito hidrostaticke stabilnosti u ZO-u. Ipak, prije nego nastavimo razmatranje uloge saliniteta u vezi ZO-a i mora, treba istaknuti kako je salinitet mjeren tek sporadično te na žalost nemamo na raspolaganju kontinuirana mjerenja vodljivosti u moru, dok su za ZO dostupna tek za dio istraživanja iz 2025. godine (kada pak nedostaju mjerenja razine vode u moru). Za detaljniju diskusiju veze ZO-more trebalo bi imati kontinuirana mjerenja i vodljivosti i razine vode mjerena istovremeno u jezeru i moru. No, razmotrimo sve dostupne podatke saliniteta u ovom istraživanju. Salinitet je mjeren na tri lokacije u jezeru (*Špilja 1*, *Špilja 2 kraj* i *Centar*; slika 3.1) te na jednom mjestu u moru (*Uvala 2*; slika 3.1). Ova mjerenja, iako sa svojim ograničenjima, ukazuju na znatno niži salinitet u jezeru u odnosu na more, a na dan uzorkovanja u svibnju 2023. godine salinitet je bio niži no što smo očekivali i u plićini uvale gdje smo uzorkovali more. Općenito, niske vrijednosti saliniteta dalje od očitih uzroka (npr. rijeka, potoka) obično znače postojanje podvodnog izvora

koji se u krškom obalnom reljefu mogu aktivirati čak i nakon manjih količina oborina (npr. Bejannin *i sur.*, 2020). U slučaju mora u blizini ZO-a, moguće je da upravo voda koja ide iz smjera ZO-a prema moru tijekom plime smanjuje salinitet u obližnjim uvalama.

U drugom poglavlju razmatrali smo hidrostatičku stabilnost jezera temeljem sezonski mjerenih CTD profila. Po prvi put, otkad se istražuje ZO, za razmatranje su dostupni i kontinuirani podaci o salinitetu na dvije dubine. Slika 3.10 nam otkriva kompleksnu sezonalnost saliniteta. Tijekom ljeta salinitet raste, djelomično zbog isparavanja, ali i mogućeg stanjivanja prijelazne vodene leće između mora i jezera u kojoj je u toplijim mjesecima zasigurno manji udio slatke vode (no to ne možemo sa sigurnošću znati bez daljnjih studija podzemnih voda). Iznenađni, kratkotrajni padovi saliniteta u površinskom sloju mogu se objasniti površinskim dotjecanjem oborinske slatke vode. To su nam potvrdili lokalni stanovnici koji redovno šetaju oko ZO-a, a koji su uočili povremene potoke koji se slijevaju u jezero tijekom kišnih razdoblja. Očekivano, salinitet u ZO-u je niži nego u Jadranu i ima veću sezonsku varijabilnost, ali i višegodišnju, ako se u obzir uzmu vrijednosti iz drugog poglavlja. Na primjer, 2025. godine tijekom mjerenja u površinskom sloju nije zabilježen salinitet niži od 32, dok je u nekim godinama bilježen salinitet 26 u površinskom sloju.

Izražena hidrostatička stabilnost koju prikazuju slike 3.11 i 3.12 govore da, u godinama bliskih saliniteta pri dnu i površini, kao što je to bilo 2025. godine, u ZO dinamiku hidrostatičke stabilnosti vodi izrazita termalna raslojenost (slika 3.8). K tome, u veljači je raslojenost bila vrlo slaba, dok se u ožujku višestruko pojačala zbog površinskog zagrijavanja. Ova dinamika nalikuje dinamici u estuarijima, premda je varijabilnost tijekom godine veća u ZO-u. Do kraja mjerenja jezero je bilo 9 – 10 puta hidrostatički stabilnije nego što je to bilo na početku mjerenja, tijekom zime. Slika 3.23 ($T-S$ dijagram) sugerira da u proces izmjene vode tijekom plime i oseke mora biti uključena dodatna komponenta slatke vode. To je suprotno očekivanjima temeljem prethodnih radova gdje se pretpostavljalo da su jedini izvori slatke vode u jezeru voda koja u njega dođe direktno oborinom i ona koja dođe površinskim otjecanjem (npr. Ciglencečki *i sur.*, 2017). No, oborina zasigurno ima veliki utjecaj: uz snažnu međugodišnju varijabilnost (slika 2.6) vjerojatno regulira količinu slatke vode koja prolazi kroz krš i utječe na debljinu vodne leće. Općenito, granica slana – slatka voda u podzemlju određena je procesima na minutnoj, dnevnoj, mjesečnoj i višegodišnjoj ljestvici (npr. Michael, Charette i Harvey, 2011) te o izrazitom utjecaju količine oborine (Yu *i sur.*, 2017). Stoga se $T-S$ dijagram, ali i sama veza ZO-more, zasigurno razlikuju ovisno o godini i dobu u godini.

Takva prostorna heterogenost i sezonalnost predstavljaju izazov za 3D numeričko modeliranje jer rubni uvjeti nisu konstantni, a protoci nisu kanalizirani (za razliku od sustava poput jezera Jellyfish, ili pak jezera Hot Water, koja su s morem spojena direktnim tunelima).

3.3.6 Korištenje aproksimirane jednadžbe za razinu vode

U ovom poglavlju razmatrali smo i utjecaj mjerenja gustoće na kvalitetu izračuna promjena razine vode u ZO-u (slike 3.20 i 3.21; tablica 3.2). Kao što se moglo i očekivati, u hladnijem dijelu godine stupac je nešto uži nego u toplijem dijelu godine radi velikog raspona temperature vode koji je bio gotovo 20 °C od početka do kraja mjerenja u 2025. godini (slika 3.8; površinski sloj). Ovo je utjecalo na to da je vodeni stupac bio otprilike 5 mm uži u siječnju nego u srpnju te je apsolutna greška u odnosu na izračun promjene razine vode korištenjem procijenjene gustoće bila ~ 2,5 mm. To predstavlja ljestvicu pogreške procjene kada se u izračunu ne koristi gustoća mjerena istovremeno kada i tlak vodenog stupca, već samo srednja vrijednost gustoće temeljem najbližih mjerenja CTD sondom. Ova greška će biti nešto manja ako su CTD mjerenja bliža. No, iz logističkih razloga vertikalno profiliranje CTD sondom se vrši sezonalno, cijena uređaja za (kvalitetno) mjerenje vodljivosti je barem dva do tri puta veća nego cijena uređaja koji mjere tlak i temperaturu vode, dok je za održavanje uređaja potrebna jedna osoba više nego kad se radi samo CTD profil te, ovisno o lokaciji, i ronilac. Stoga, izračuni s procijenjenom gustoćom su dovoljno dobri i financijski sasvim prihvatljivi ako nas zanima, na primjer, kašnjenje između signala i jezera. Ako je od interesa precizna promjena volumena jezera ili maksimalnih razina vode tijekom godina, za takva istraživanja ipak bi trebalo mjeriti i vodljivost, odnosno, imati češću informaciju o salinitetu, unatoč financijskim izazovima takvih istraživanja.

3.3.7 Nutrijenti i kemijski parametri

Prognoza temeljem podataka iz 2013. godine pokazala se dovoljno dobrom za planiranje uzorkovanja iako je korišteni niz bio dužine 79 dana te se iz njega moglo izdvojiti pet od sedam plimnih sastavnica. Razmatranjem analize prikupljenih uzoraka u tablici 3.3 vidi se da su sve

koncentracije nutrijenata u jezeru veće nego u moru, osim nitrata. S obzirom na oligotrofni karakter Jadrana (npr. Dautović *i sur.*, 2026) i eutrofni karakter ZO-a (Ciglencečki *i sur.*, 2017), ovakvi odnosi su očekivani, ali i dalje vrlo zanimljivi. Ključne zabilježene razlike u ulaznoj vodi su: 9 puta viša koncentracija silikata u jezeru, 12 puta viša koncentracija amonijaka, 3 puta viša koncentracija fosfata te 50% viša koncentracija kisika u jezeru nego što je u moru. Nalazi vezani za nutrijente u skladu su s onime što je poznato za podzemne vodonosnike u priobalnom području (npr. Tait *i sur.*, 2013). Naime, kada se počne dizati razina vode u moru, razlika u tlaku tjera vodu koja se nalazi u stijenama. U jezero najprije ulazi voda koja ima kraće vrijeme boravka u stijenama, dok u kasnijem dijelu plime dolazi voda koja je zarobljena dublje u vodonosniku te je samim time provela više vremena u anoksičnim uvjetima. Stoga, ta voda u sebi nosi više amonijaka, a prolazenjem kroz stijene vjerojatno ispire i silikate. U literaturi je već nađeno da podzemni izvori u moru mogu znatno obogaćivati okoliš nutrijentima na mjestima gdje se ulijevaju u more pri tome imajući i do nekoliko puta veći koncentracijski doprinos nutrijenata nego obližnje rijeke (npr. Bejannin *i sur.*, 2020). Dakle, vrlo je moguće da ulazna voda doprinosi eutrofikaciji jezera, no taj učinak je vjerojatno lokaliziran kao i učinak na temperaturu vode. Naime, usni otvori mješčičnica (organizama koji se hrane filtracijom) u špiljama su okrenuti prema jezeru (pismena korespondencija, Donat Petricioli; kolega ronilac koji je prikupljao uzorke za potrebe istraživanja). Stoga, organizmi očekuju više nutrijenata kada je tok usmjeren iz jezera prema moru, a ne obrnuto. Što se tiče kisika, u jezeru je viša koncentracija najvjerojatnije zbog izraženih biogeokemijskih procesa – u jezeru ima dovoljno nutrijenata i svjetlosti koja pogoduje primarnoj produkciji. Ipak, najvažniji rezultat ovog dijela istraživanja jest činjenica da u ZO *ni u jednom razmatranom dijelu plimnog ciklusa nije ulazila čista morska voda*. Čak i pri kraju plime salinitet i kemijski parametri ne dostižu vrijednosti izmjerene u moru. No, iako izgleda da more ne utječe direktno u jezero i ne mijenja znatno salinitet (kao što je problem s Vranskim jezerom; Rubinić *i sur.*, 2010) podizanje srednje morske razine koje je 2008. (Barić, Grbec i Bogner, 2008) teorijski ramatrano, a 2023. godine klimatskim modelom i pokazano za određene dijelove hrvatske obale (Denamiel i Vilibić, 2023), predstavlja određenu ugrozu za ZO. Sustavi koji danas nisu toliko ugroženi od djelovanja mora bili bi u većoj opasnosti prilikom ekstremnih vremenskih prilika (u ZO-u već povremeno ulazi veći volumen vode), kao što su izraženi olujni uspori. Uslijed olujnog uspora može doći do prodiranja slane vode dublje u vodonosnik što dovodi do lateralnih intruzija slane vode. Obzirom na to da se u budućoj klimi očekuje i dodatno zaslanjivanje Jadranskog mora (Verri *i sur.*, 2024),

u kombinaciji s izmijenjenim režimom oborine posljedično je za očekivati i češće izmjene faza vrlo visokog i vrlo niskog površinskog saliniteta u jezeru.

3.3.8 Prijedlozi za daljnja istraživanja

Buduća istraživanja po pitanju veze ZO-more trebala bi se koncentrirati na kontinuirana mjerenja parametara razmatranih u ovom poglavlju. Također, treba ih mjeriti istovremeno u moru i jezeru, ali tijekom dužih razdoblja, kako bi se obuhvatilo nekoliko cjelogodišnjih ciklusa i stekao uvid u unutargodišnju i međugodišnju varijabilnost. Takva mjerenja trebalo bi detaljno logistički isplanirati – od korištenja prikladnih (dovoljno kvalitetnih – preciznih i izdržljivih – uređaja) do čestine popratnih uzorkovanja i trajanja mjernih kampanja. Također, trenutni interdisciplinarni istraživački tim trebalo bi dodatno proširiti uključivanjem znanstvenika i inženjera iz struke građevine i geologije (za npr. pijezometrijska mjerenja, praćenje ulazne vode mjerenjima hidroizotopa, itd.) te bi se tako mogla precizno odrediti i vodna bilanca ZO-a. Nadalje, trebalo bi 3D numeričkim modelom ispitati kako ulazna voda različitih svojstava utječe na ZO, u kojoj mjeri, po pitanju kojih procesa i do koje dubine. Takvim modelom moglo bi se pomoći u utvrđivanju kakav tunel bi bio prikladna zamjena za vezu jezero – more, za dobar omjer između pothvata koji se poduzimaju za očuvanje ZO-a i onih koji se poduzimaju za gospodarski razvoj u njegovoj neposrednoj okolini. Priroda kontakta jezero – more mogla bi se dodatno ispitati radnjem eksperimenta s označivačima vode. Npr. u palauškom jezeru Goby su Hamner i Hamner (1998) radili eksperiment s puštanjem boje tijekom oseke u jezeru pri čemu su se nadali vidjeti gdje voda, nakon nekog vremena, izlazi u moru. Na žalost, to nisu uspjeli vidjeti, no bilo je zanimljivo što se obojana voda nakon još jednog plimnog ciklusa vratila u jezero, to jest, ostala je zarobljena u prostoru između mora i jezera te se sa sljedećom plimom se vratila u jezero. No, ovakav eksperiment se može raditi i pomoću npr. teške vode ili praćenjem prirodnog radija kao označivača (npr. Michael, Charette i Harvey, 2011; Bejannin *i sur.*, 2020).

U nekoliko navrata dosad diskutirana je izgradnja tunela koji bi spajao jezero i more, baš kao što takvi tuneli (ali prirodni) spajaju mnoga od palauških jezera s okolnim morem. Takvi tuneli pomogli bi pri oksigenaciji jezera i izmjeni tvari, no također treba ih pažljivo isplanirati. Naime, ekosustav u ZO-u se znatno razlikuje od onoga kojeg nalazimo u samo stotinu metara udaljenim

uvalama Soline (*Uvala 1*; slika 3.1) i Koprišće (*Uvala 2*; slika 3.1), kako po pitanju vrsta koje u njima obitavaju, tako i po njihovim relativnim zastupljenostima (Bakran-Petricioli, Petricioli i Požar-Domac, 1998; Malešević *i sur.*, 2015; Pjevac *i sur.*, 2015; Ciglencečki *i sur.*, 2017). Dakle, lokacija, veličina i održavanje tunela (koje nije financijski zanemarivo radi velikih količina obraštaja) treba biti detaljno isplanirano i to od strane interdisciplinarnog stručnog tima (morski biolozi, kemičari i fizičari, hidrotehničari, hidrogeolozi, ...). Slične studije već su rađene za zatvorene akvatorije (npr. Carević *i sur.*, 2019) pa se u budućnosti mogu primijeniti i na ZO.

4 MODELIRANJE DINAMIKE JEZERA

Dugoročna i kratkoročna mjerenja fizičko – kemijskih svojstava ZO-a daju informaciju o termohalinom stanju vodenog stupca samo kada su mjerenja dostupna, što u slučaju sezonskih vertikalnih profila znači jednom po sezoni (drugim riječima, jednom po godišnjem dobu). U slučaju kontinuiranih mjerenja iz trećeg poglavlja informacija je poznata za kraća razdoblja mjerenja, koja su bila vrlo nedavno, te za one dubine na kojima su instrumenti bili postavljeni. Tako za vodljivost, odnosno salinitet, imamo kontinuirane podatke samo za prvu polovicu 2025. godine i to na dvije dubine (površina i dno), što znači da hidrostatičko stanje vodenog stupca možemo razmatrati isključivo temeljem tih dviju dubina – dakle prostorno uprosječeno ili prostorno lokalizirano (u površinskom i pridnom sloju) stanje vodenog stupca. Numeričko modeliranje se često koristi u geofizici i srodnim strukama, među ostalim, i za proučavanje procesa za koje su dostupni podaci nedovoljne prostorno – vremenske rezolucije. Rezultati kratkoročnih istraživanja su pokazali da su plimne oscilacije u jezeru bitan proces koji kontinuirano unosi i odnosi vodu iz sustava te utječe na fizičko – kemijske parametre. Stoga, zaključeno je kako za ZO treba uspostaviti numerički model i to 3D model koji može reproducirati promjene na finoj prostornoj i vremenskoj skali. Također, zbog bitne biogeokemijske veze s fizičkim procesima, za ZO je bilo poželjno postaviti model koji bi u budućim istraživanjima bilo moguće spojiti s drugim modulima (proces poznat pod pojmom „sprezanje modela“; engl. *coupling*). Model koji udovoljava navedenim zahtjevima je Delft3D FM (tvrtka Deltares) koji ima module FLOW (hidrodinamika), WAQ (za modeliranje parametara kvalitete vode; engl. *water quality*) i WAVE (za modeliranje utjecaja valova). Model Delft3D rješava Navier – Stokes jednadžbe za plitki, nestlačivi fluid u tri dimenzije uz Boussinesqovu aproksimaciju (Deltares, 2023). Uz to, „FM“ u imenu modela označava „Flexible Mesh“ (prilagodljivu mrežu) što omogućuje izradu realistične mreže modela koja se prilagodi nepravilnoj obali i topografiji razmatranog područja. Delft3D se često koristi u istraživanjima estuarija (npr. Mendes *i sur.*, 2021; Castro-Olivares *i sur.*, 2024), laguna (npr. Martyr-Koller *i sur.*, 2017; Sowińska *i sur.*, 2025) te rezervoara i jezera (npr. Kranenburg *i sur.*, 2020; Gai *i sur.*, 2024; Kacikoc, Dadaser-Celik i Beyhan, 2025), što su sustavi s kojima ZO dijeli dio fizičko – kemijskih značajki. U narednom potpoglavlju je detaljnije opisan proces postavljanja modela te njegova prva primjena na ZO.

4.1 Materijali i metode

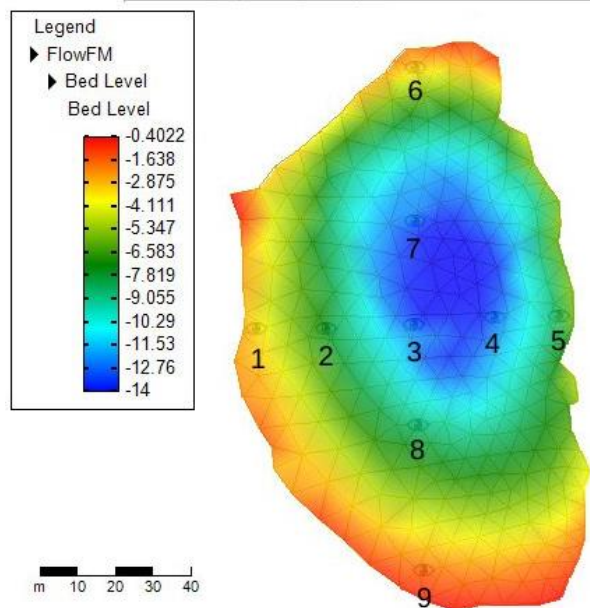
U ovom radu korištena je verzija 2023.02 modela Delft3D FM, modul FLOW. Ovaj model se kontinuirano nadograđuje pa je u trenutku pisanja rada aktualna verzija bila već 2025.01. Razlike među verzijama su obično u načinu uključivanja ključnih riječi te formatu datoteka za forsiranje modela. Simulacije predstavljene u ovom poglavlju mogu se raditi i novijim verzijama modela uz prikladnu prilagodu parametara iz postavki simulacija, a o čemu se više može naći u dokumentaciji za korištenje modela Delft3D FM na stranicama tvrtke Deltares koja razvija model.

Osim prikladnosti za modeliranje ZO-a, Delft3D FM je odabran za ovo istraživanje jer je prikladan za početnike u numeričkom modeliranju radi korisnički prijateljskog grafičkog sučelja Delft3D FM Suite kojim se definiraju početne postavke, rade kratke testne simulacije i izrađuje numerička mreža modela. U početku ovog istraživanja korištena je verzija sučelja 2023.02 HMWQ te je model radio na osobnom računalu. Kasniji dio istraživanja, predstavljen u potpoglavlju 4.2, rađen je na superračunalu Hawk bez grafičkog sučelja, odnosno s terminala uz pomoć potrebnih ulaznih datoteka (model je radio u serijskom načinu rada).

4.1.1 Opće postavke modela

Prvi korak u postavljanju modela bila je izrada mreže (engl. *grid*). Za izradu 3D mreže korišten je program RFGRID tvrtke Deltares i ista batimetrija kao i u drugom poglavlju, drugim riječima, iz rada Mihelčić i sur. (1996). Batimetrija je iz grafičkog oblika prebačena u tekstualni uz pomoć besplatnog programa Blue Kenue. Time je napravljena mreža s 525 elementa na površini jezera pri čemu je brid najmanjeg trokuta duljine 2,9 m, a brid najvećeg trokuta 10,9 m. Za 100 vertikalnih slojeva, kako je korišteno u modelu, to je značilo 52 500 3D elemenata ukupno, od kojih je ~ 30 000 bilo aktivnih elemenata (korištenih u izračunu temeljem batimetrije). Ovako fina numerička mreža je definirana zbog izrazito velikih gradijenata u jezeru i nepravilnog ruba jezera. Za potrebe

analize definirano je 9 postaja (engl. *stations*) uzduž i poprijeko ZO-a, pri čemu je postaja 3



Slika 4.1. Batimetrija jezera ZO i raspodjela mreže. Prilagođena slika iz programa RFGRID.

korištena kao glavna postaja za analize i usporedbu s mjerenjima (slika 4.1). Za testove osjetljivosti, rađene za razdoblje rujan – listopad 2023. godine, korištena je uniformna raspodjela po vertikalnoj osi (tzv. z-slojevi; engl. *z-layers*) definirani opcijom *Layertype* (Tablica A1) sa 100 vertikalnih slojeva (opcija *Kmx*; Tablica A1), odnosno, vertikalna rezolucija mreže bila je 0,14 m. Za simulirano razdoblje srpanj – listopad 2021. godine korištena je dodatna opcija *Numtopsig* (Tablica A1) kojom je definirano 10 tzv. σ -slojeva (engl. σ -layers ili *terrain-following coordinates*) iznad 90 z-slojeva. Ovako

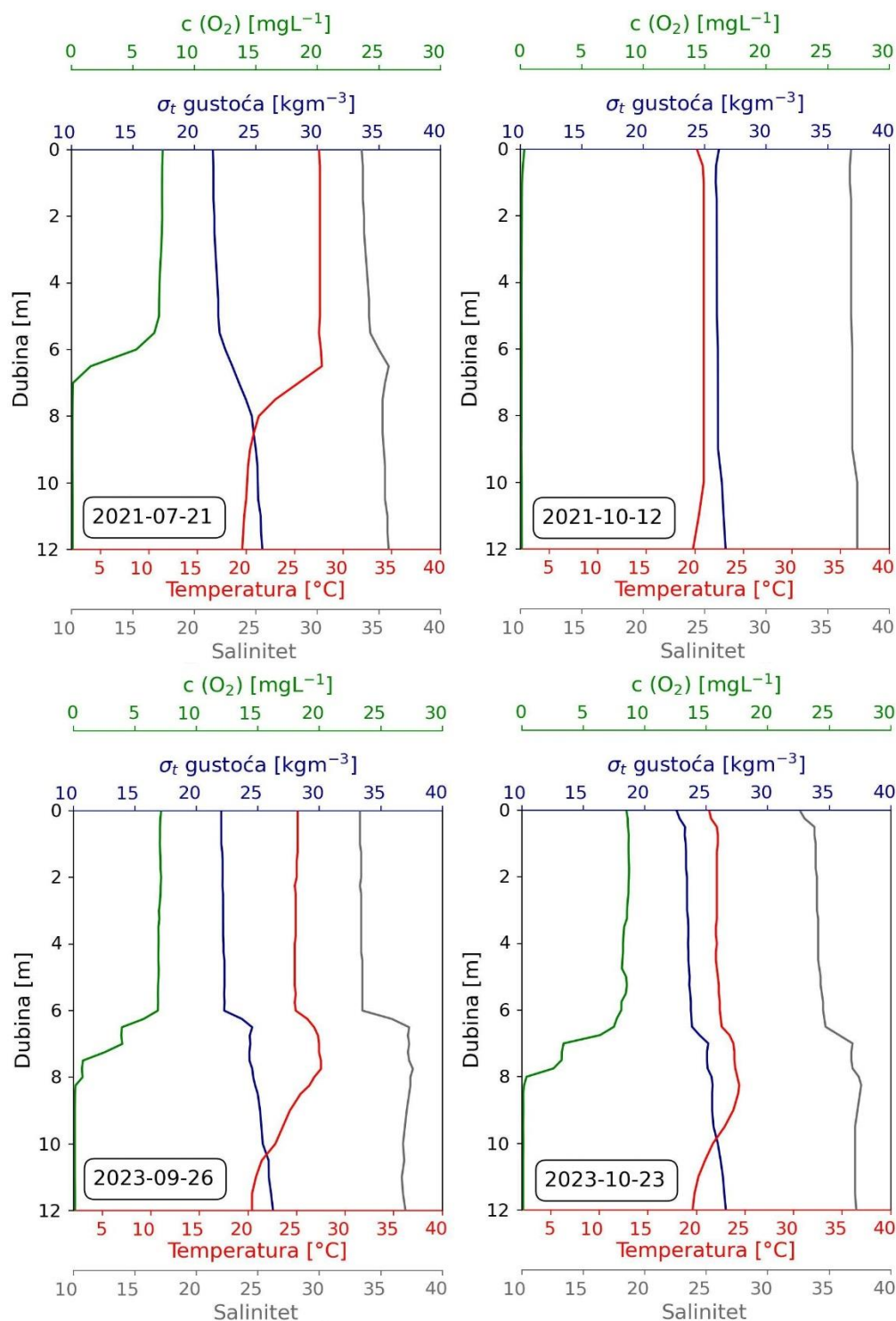
konstruirani vertikalni slojevi korišteni su jer se, kod simulacija koje obuhvaćaju duže ljetno razdoblje, javljala numerička nestabilnost uzrokovana stanjivanjem površinskog sloja uslijed izraženog isparavanja. Rezultati simulacija spremeni su u datoteke nastavka *_his.nc s vremenskom rezolucijom 5 minuta. Ovaj tip Delft3D datoteka čuva informaciju o vrijednostima na odabranim postajama u modelu, a ne za cijelo razmatrano područje, što znatno smanjuje spremišni prostor potreban za čuvanje rezultata modela. Vremenski korak se računa u Delft3D modelu tijekom simulacije, a korisnik zadaje najveći dopušteni vremenski korak, što je u ovom slučaju bilo 30 sekundi.

4.1.2 Početni uvjeti i rubni uvjeti (forsiranje modela)

U svim simulacijama početni uvjeti bili su vertikalni profili T i S mjereni u ZO-u na isti način kako je opisano u drugom poglavlju. Na slici 4.2 prikazani su korišteni vertikalni profili T i S zajedno s profilima OK i σ_t gustoće (stvarna gustoća od koje je oduzeto $1\,000\text{ kg m}^{-3}$), da bi se lakše uočio anoksični dio jezera i lokacija piknokline (slika 4.2). Kako je rezolucija modela bila različita od rezolucije mjerenih profila, mjerenja (profili 21. srpnja 2021. i 26. rujna 2023.; slika 4.2 lijevi

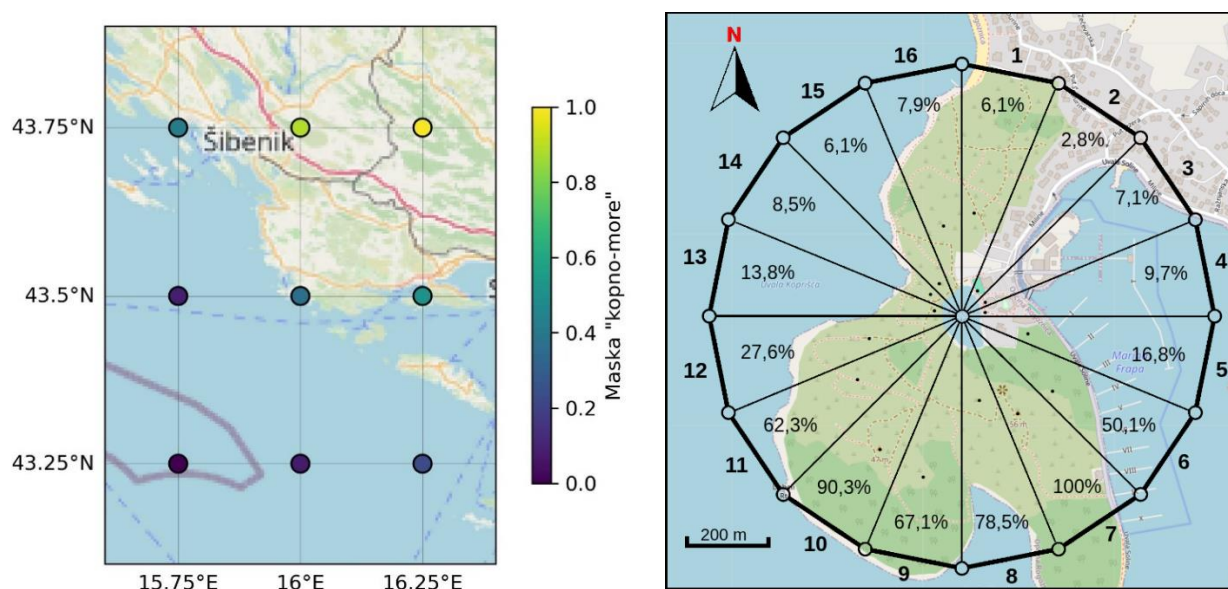
stupac) su linearno interpolirana na mrežu modela te je isto napravljeno i za profile temeljem kojih je vršena verifikacija modela (profili 12. listopada 2021. i 23. listopada 2023.; slika 4.2 desni stupac). Vertikalni profili su na ZO-u mjere između 10 i 12 sati (prije podne) pa su na odabrane datume uspoređivani s vrijednostima modela u 11 sati. Testovi osjetljivosti su rađeni za razdoblje rujna – listopada 2023. iz dva razloga. Prvo, te godine se ZO nije sasvim izmiješalo pa jesen 2023. godine predstavlja situaciju u kojoj je raslojavanje očuvano. Drugo, te godine je mjeren dodatni vertikalni profil, između redovnog ljetnog i jesenskog CTD profila, pa je bilo potrebno simulirati samo 27 dana, što je znatno skratilo vrijeme računanja.

Za meteorološko forsiranje korišteni su podaci relativne vlažnosti te temperature zraka i rosišta na visini 2 m, brzine i smjera vjetera na visini 10 m te ukupne naoblake i oborine iz ERA5 reanalize (Hershbach i sur., 2020; slike A1.1 – A2.2). Podaci iz ove reanalize dostupni su sa satnom vremenskom rezolucijom pa se za potrebe simulacija linearno interpolirane na rezoluciju pet minuta. Prostorna rezolucija ERA5 mreže je $0,25^\circ$ (geografske dužine i širine), što u našim geografskim područjima iznosi otprilike 30 km. Iako je točka mreže koordinata ($43,50^\circ$ $16,00^\circ$) najbliža Zmajevom oku, nije nužno slijedilo i da je to najpogodnija točka za forsiranje modela radi različitih odnosa kopno-more („maska kopno-more“; engl. *land-sea mask*, ili skraćeno: LSM; usmena korespondencija, prof. Dario Gaiotti). Stoga je prvi test osjetljivosti rađen za devet najbližih točaka (slika 4.3 lijevo), nakon čega su odabrane dvije najbolje točke čiji su podaci korišteni za forsiranje modela u preostalim testovima osjetljivosti. Općenito, vrijednost LSM u ERA5 reanalizi veća od 0,5 označava uglavnom kopno s eventualnom mješavinom kopna i kopnene vode, dok vrijednost manja od 0,5 označava vodenu površinu. U testu osjetljivosti vjetera, o čemu će više riječi biti u narednom potpoglavlju, izvorni podaci iz ERA5 množeni su koeficijentima iz raspona od 0,0 do 1,0 s korakom 0,1. Dodatno, jedan set ulaznih podataka pripremljen je na način da je u obzir uziman i smjer iz kojeg puše vjetar. Za ovaj korak prostor oko Zmajevog oka podijeljen je na šesnaest sektora te je svakom sektoru pridružena visina najviše točke u tom sektoru. Najviša točka određena je korištenjem besplatnog internetskog alata za određivanje visine topografije (<https://www.freemaptools.com/elevation-finder.htm>).



Slika 4.2. Vertikalni profili T , S , OK (oznaka $c(O_2)$) i σ_t gustoće korišteni za početne uvjete modela (lijevo) i usporedbu s modelom (desno) za simulacije 21.7. – 12.10.2021. (gore) i 26.9. – 24.10.2023. (dolje).

Najprije je svakoj brzini vjetra temeljem smjera puhanja pridružen odgovarajući sektor. Zatim je logaritamskim zakonom procijenjeno koliki je bio iznos brzine u najvišoj točki svakog od sektora na način: $w(H_i) = w(10\text{ m}) \frac{\ln(\frac{H_i}{z_0})}{\ln(\frac{10\text{ m}}{z_0})}$, gdje je $w(H_i)$ brzina vjetra u najvišoj točki H_i sektora i , $w(10\text{ m})$ brzina vjetra na visini 10 m (iz ERA5 reanalize), a parametar z_0 postavljen na 1 m. Zatim je svaka vrijednost množena koeficijentom prigušenja vjetra h_i određenim na način $h_i = (H_7 - H_i)/H_7$ gdje i opet označava redni broj pripadnog sektora, H_7 visinu najviše točke u području oko ZO-a (u sektoru 7; $H_7 = 49,3\text{ m}$), a H_i najviša visina u i -tom sektoru. Na slici 4.3 (desno) prikazana je raspodjela sektora oko ZO-a te su u postocima iskazana pripadna prigušenja brzine vjetra.



Slika 4.3. Maska „kopno-more“ za točke ERA5 mreže korištene u simulacijama (lijevo) i sektorizacija okoline ZO-a s pripadnim prigušenjem (desno) korištenim za skaliranje vjetra ovisno o smjeru puhanja vjetra (oznaka koeficijenta: `coeffScale_dir`) za svaki od sektora i označenom najvišom točkom svakog od sektora (crne točke).

U Tablici 4.1 prikazane su relativne čestine vjetra za dva razmatrana razdoblja u 2021. i 2023. godini za dvije točke iz ERA5 mreže koje su korištene u većini simulacija. Najčešći vjetar u svim slučajevima je bio onaj sjeveroistočnog smjera.

Tablica 4.1. Čestina vjetra za svaki od sektora (slika 4.3 desno) za dva simulirana razdoblja i za dvije točke iz ERA5 mreže.

Sektor	Čestina [%]			
	21.7. – 12.10.2021.		26.9. – 24.10.2023.	
	43,75° 16,00°	43,75° 16,25°	43,75° 16,00°	43,75° 16,25°
1	9,2	7,2	6,7	5,5
2	26,6	26,1	24,1	20,9
3	10,4	14,9	13,2	19,6
4	4,7	4,9	5,7	6,7
5	5,8	5,5	5,9	4,0
6	5,6	4,7	8,1	6,2
7	4,0	3,4	9,3	10,7
8	2,7	3,0	3,8	3,8
9	2,1	2,4	3,3	4,3
10	2,2	2,6	1,9	2,6
11	5,3	6,0	3,0	3,1
12	6,6	6,2	3,5	4,0
13	5,2	4,8	2,7	2,5
14	3,0	2,8	3,8	2,6
15	2,7	2,5	2,2	1,8
16	3,9	2,9	2,9	1,6

4.1.3 Opis simulacija

Kako je spomenuto u uvodu ovog potpoglavlja, simulacije opisane u narednim odlomcima rađene su na superračunalu Hawk, u sklopu suradnje s prof. Peterom Robinsom sa Sveučilišta Bangor (Wales, Ujedinjeno Kraljevstvo). U svim simulacijama korištena je opcija Temperature = 5 što znači da je korišten oceanski model koji je ugrađen u Delft 3D FM za izračun bilance energije. Pri korištenju ove opcije model ne ispisiye gustoću u datoteke s rezultatima simulacija pa je ona

računata na isti način kao i u prethodnom poglavlju, iz vrijednosti T i S pomoću funkcije iz Python paketa *gsw.density*.

4.1.3.1 Testovi osjetljivosti

U ovom istraživanju rađeno je šest različitih testova osjetljivosti pri čemu je za svaki test napravljen različit broj za test potrebnih simulacija. Najprije je napravljen test osjetljivosti na odabir točke iz ERA5 modela čiji se podaci koriste za meteorološko forsiranje modela. Korišteno je devet točaka iz potpoglavlja 4.1.2. Za svaku točku je na grafičkom prikazu naznačena i pripadna maska kopno-more (LSM). Temeljem tih testova odabrane su dvije točke koje su korištene za daljnje testove. U drugom se testu ispitivala osjetljivost modela na iznos brzine vjetra. U tu svrhu vjetar je množen koeficijentima iz raspona od 0,0 do 1,0, gdje 0,0 predstavlja simulaciju bez vjetra, dok koeficijent 1,0 predstavlja simulaciju u kojoj se koriste izvorne vrijednosti vjetra iz ERA5 reanalize. U nazivu svake od simulacija naznačen je koeficijent oznakon „coeff N “ gdje je N koeficijent kojim je vjetar množen. Dodatno, napravljene su i simulacije za skalirani vjetar, odnosno, simulacije gdje je svaka brzina vjetra množena pripadnim koeficijentom ovisno o sektoru iz kojeg vjetar puše prema jezeru. Svrha ovih simulacija bila je utvrđivanje osjetljivosti modela na uvažavanje okolne topografije. Ove simulacije u nazivu imaju oznaku „coeffScale_dir“. U opisanim simulacijama nisu bili uključeni procesi isparavanja i oborine, dok je vertikalna turbulencija parametrizirana $k - \epsilon$ modelom zatvaranja. Trećim skupom simulacija ispitivana je osjetljivost modela na uključivanje i isključivanje procesa isparavanja i oborine. U nazivu svake od simulacija naznačena je skraćenica procesa te je li proces uključen. Za isparavanje je oznaka bila evap N , dok je za oborinu bila rain N pri čemu $N=1$ označava uključeni proces, dok $N=0$ označava isključeni proces. U svim je simulacijama korišten coeff1.0, odnosno, izvorni vjetar iz ERA5 reanalize. Četvrtim skupom simulacija ispitivana je osjetljivost modela na količinu oborine, što je u nazivu simulacija naznačeno oznakom rain1_x N , gdje je N koeficijent kojim je množena oborina. U ovim simulacijama N je bio iz skupa [1, 2, 3, 4] pa je tako u zadnjoj simulaciji iz ovog skupa testova oborina bila četverostruko veća od izvorne oborine iz ERA5 reanalize. Navedeno skaliranje oborine je rađeno jer su prethodni rezultati ukazali na mogućnost da oborina koja direktno pada u jezero nije količinom dovoljna da se reproducira površinska haloklina čije nastajanje vjerojatno potpomažu i drugi procesi (npr. površinsko otjecanje, plimna izmjena vode). Proces isparavanja je

bio uključen, a vjetar izvorni (coeff1.0). Peti skup simulacija ispitivao je utjecaj odabira metode zatvaranja jednadžbi za vertikalnu turbulenciju na rezultate simulacija. Za razliku od prethodne tri testne skupine, u ovim je simulacijama korištena samo točka (43,75° 16,25°) iz ERA5 mreže jer je temeljem prethodnih testova bilo zaključeno kako odabir točke neće biti znatno vezan za odabir metode parametrizacije turbulencije. Delft3D FM nudi pet metoda za parametrizaciju: opcija 0 (turbulencija duž vertikalne osi se zanemaruje; samo je molekularna difuzija uključena), opcija 1 (VTD je konstanta), opcija 2 (algebarski izračun), opcija 3 (koristi se $k - \epsilon$ sustav jednadžbi) i 4 (koristi se $k - \tau$ sustav jednadžbi). Koja je metoda korištena za pojedinu simulaciju naznačeno je oznakom Turbulence_ N u nazivu simulacije, pri čemu je N broj korištene metode. Procesi isparavanja i oborine su bili isključeni, a vjetar izvorni iz ERA5 reanalize. Zadnji skup simulacija iz testova osjetljivosti ispitivao je osjetljivost modela na odabir vrijednosti parametra *dicovv* koji pri odabiru opcije 1 za vertikalnu turbulenciju predstavlja iznos VTD, a koja je u modelu s tvorničkim postavkama jednaka $1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Osnovna vrijednost parametra *dicovv* množena je koeficijentom N iz skupa [0,1 , 1, 10, 100, 1000], što je u nazivu svake od simulacija naznačeno oznakom Turbulence_1_x N . Pri tome procesi isparavanja i oborine su bili uključeni, a vjetar izvorni iz ERA5 reanalize.

Sve simulacije iz ovog potpoglavlja imale su za početni uvjet vertikalni profil T i S mjeren na dan 26. rujna 2023. godine, a uspoređivane su s vertikalnim profilom mjerenim na dan 23. listopada 2023. godine (slika 4.2 gore). Za usporedbu mjerenih i simuliranih vertikalnih profila računati su korijeni srednjih kvadratnih pogrešaka (engl. *root mean squared error*; RMSE), uobičajena metoda korištena u numeričkom modeliranju (npr. Castro-Olivares *i sur.*, 2024; Gai *i sur.*, 2024; Kacikoc, Dadaser-Celik i Beyhan, 2025; ...). RMSE je računat tako da su za datum mjerenih vertikalnih profila iz modelskih simulacija izvađene vrijednosti za T i S po dubini za prijepodne (točnije, 11:00 sati, što je otprilike vrijeme u danu kada se mjere vertikalni profili). Zatim su simulirane vrijednosti linearno inteprolirane na dubine na kojima su mjereni T i S na datum mjerenja. U zadnjem koraku primijenjena je funkcija RMSE za mjerene i modelske vrijednosti po dubini stoga je za svaku simulaciju dostupna po jedna vrijednost RMSE za svaki razmatrani parametar. U Tablici 4.2 navedena su pojašnjenja spomenutih modelskih parametara, dok se u Tablicama B1 – B6, C1 i C2 (Dodatak B; Dodatak C) nalazi popis svih izračunatih vrijednosti RMSE.

Tablica 4.2. Pojašnjenje oznaka u nazivima simulacija. Radi duljine, potpuni nazivi svih simulacija dani su u Tablici A2 (Dodatak A).

Oznaka parametra u nazivu simulacije	Pojašnjenje	Vrijednosti N
coeff N	Koeficijent kojim su množeni podaci vjetra iz ERA5 reanalize	0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 Scale_dir
rain_ N	Uključenost/isključenost procesa oborine	0 ili 1
evap_ N	Uključenost/isključenost procesa isparavanja	0 ili 1
rain1_x N	Koeficijent kojim su množeni podaci oborine iz ERA5 reanalize	1 2 3 4
Turbulence_ N	Redni broj metode korištene za zatvaranje jednadžbi vertikalne turbulencije	0 1 2 3 4
Turbulence1_x N	Koeficijent kojim je množen parametar $dicovv=1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pri odabiru opcije Turbulence_1	0,1 1 10 100 1000

4.1.3.2 Simulacije miješanja 2021. godine

Nakon testova osjetljivosti rađenima za kraće vremensko razdoblje (rujan – listopad 2023.) simulirano je razdoblje srpanj – listopad 2021. kako bi se, uz samo vertikalno miješanje zabilježeno u listopadu 2021. godine, razmotrilo i nekoliko mjeseci koji su prethodili miješanju. Kako bi se ispitao utjecaj oborine i vjetra na preduvjete i samo miješanje u jesen, napravljeno je nekoliko različitih simulacija ljeta/jeseni 2021. godine. Najprije je napravljena simulacija u kojoj su uključeni proces oborine i vjetra (rain1_x1, coeff1.0/coefficientScale_dir), a zatim su redom isključivani

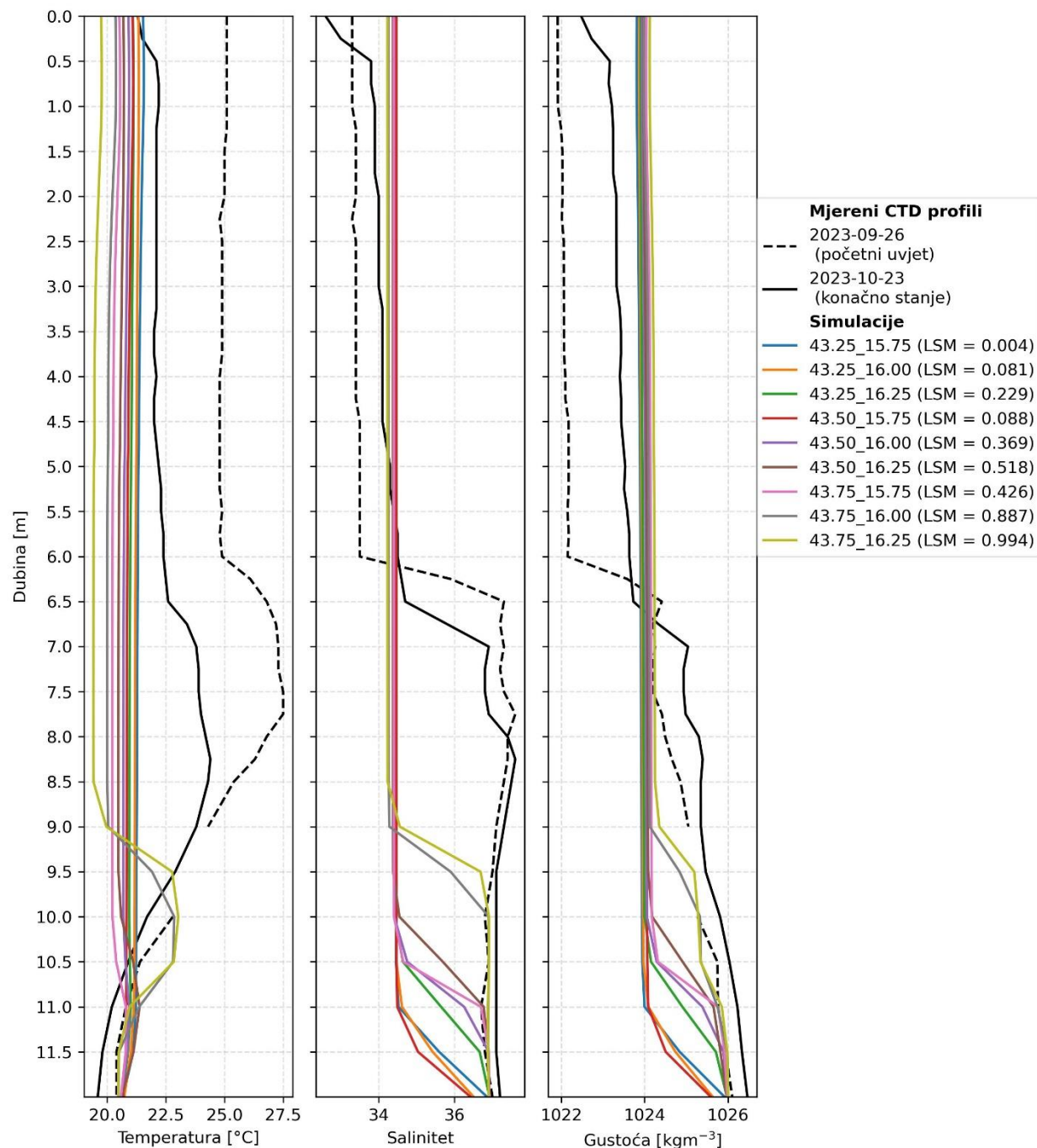
oborina (rain1_x0) pa vjetar (coeff0.0). U svim je simulacijama bio uključen proces ispravanja, dok je model zatvaranja vertikalnih jednadžbi turbulencije bio $k - \epsilon$. Simulacije su nazivane prema ključu iz Tablice 4.2 (potpuni nazivi simulacija nalaze se u Tablici A2), dok je za potrebe grafičkog prikaza na svakoj slici u gornjem dijelu naveden dio naziva koji je bio najbitniji (odnosno, dio naziva koji se odnosio na parametre koji su se razlikovali među simulacijama).

4.2 Rezultati

4.2.1 Testovi osjetljivosti

4.2.1.1 Utjecaj odabira točke iz ERA5 mreže

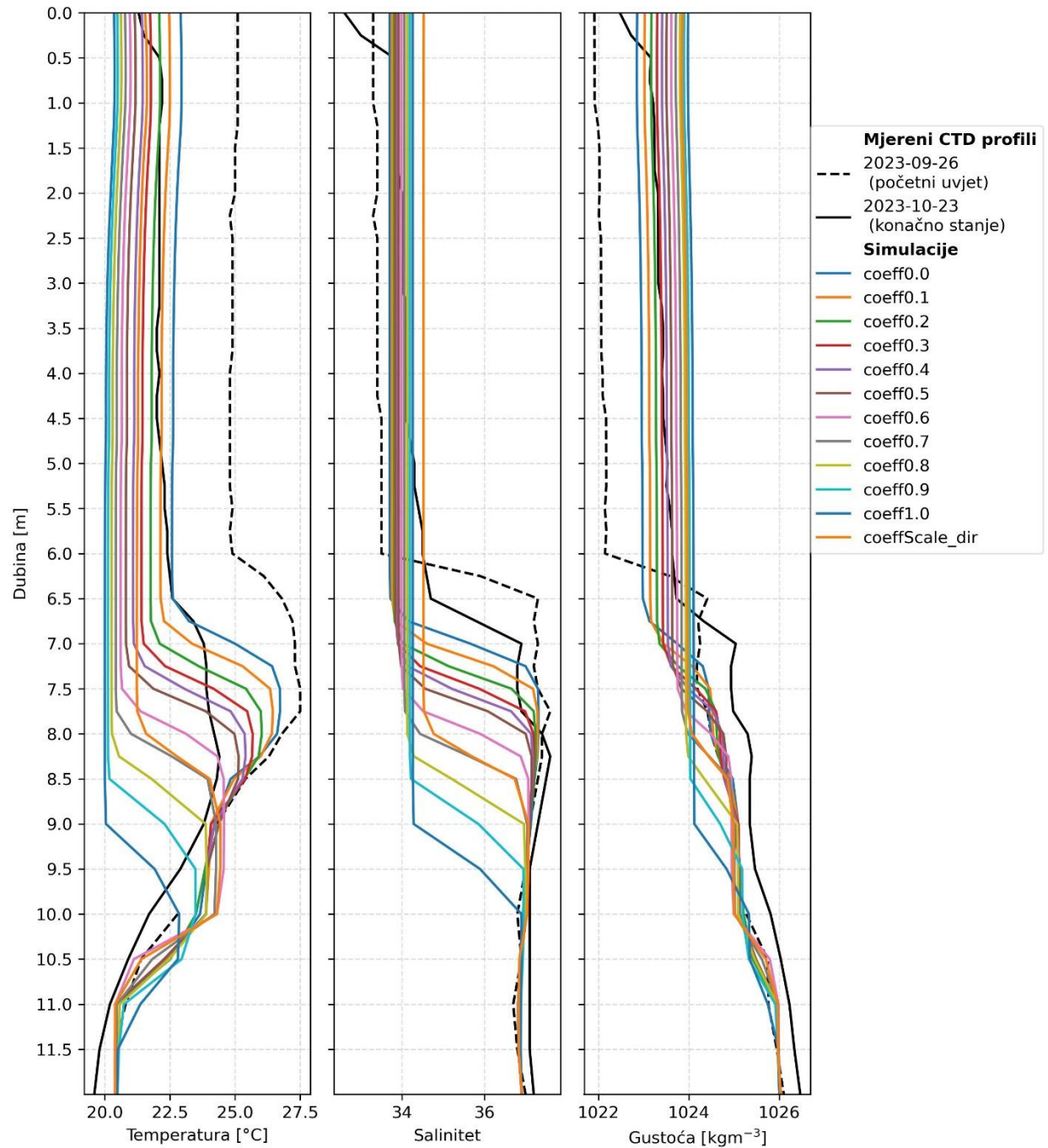
Na slici 4.4 može se vidjeti utjecaj odabira točke iz ERA5 mreže na vertikalni profil na dan 23. listopada 2023. godine. Ono što se odmah uočava za sve simulacije jest da je proces miješanja precijenjen u svim simulacijama te se to odražava i na temperaturu i na salinitet. Prema obliku krivulje, jedino je forsiranjem podacima za točke ($43,75^\circ$ $16,00^\circ$) i ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$) uspješno reproducirana dubinska termoklina, drugim riječima, očuvan potpovršinski temperaturni maksimum, ali 3 m preduboko. No, u plićim dijelovima vodenog stupca upravo točka ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$) najviše potečenjuje temperaturu. Što se tiče vertikalnog profila saliniteta, haloklina je očuvana za svih devet točaka, no opet se s točkama ($43,75^\circ$ $16,00^\circ$) i ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$) najpreciznije simulira dubina halokline, iako je dubina opet precijenjena za približno 3 m, što se odražava i na piknoklinu. Površinska termoklina i haloklina nije reproducirana ni u jednoj simulaciji na dan 23. listopada, a čemu uzrok može biti precijenjeno vertikalno miješanje i neuključivanje oborine u model. Zanimljivo je da su i točka ($43,75^\circ$ $16,00^\circ$) i točka ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$), koje su se pokazale kao najprikladnije, u ERA5 reanalizi označene kao kopnene točke (LSM je redom 0,89 i 0,99). Vrijednosti RMSE (Tablica B1) za salinitet i gustoću su najniže upravo za te dvije točke, dok je za temperaturu RMSE najniža za točku ($43,25^\circ$ $15,75^\circ$). Uvidom u oblik krivulje, koja oslikava fizičke procese, uviđa se da je RMSE niži za temperaturu za točku ($43,25^\circ$ $15,75^\circ$), koja je u modelu morska (LSM = 0,0), zbog toga što je kroz stupac temperatura za tu točku najbliža mjerenim vrijednostima, iako dubinska termoklina nije sačuvana do kraja simulacije. Stoga, odlučeno je da se daljnji testovi osjetljivosti rade s podacima iz točke ($43,75^\circ$ $16,00^\circ$) i točke ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$).



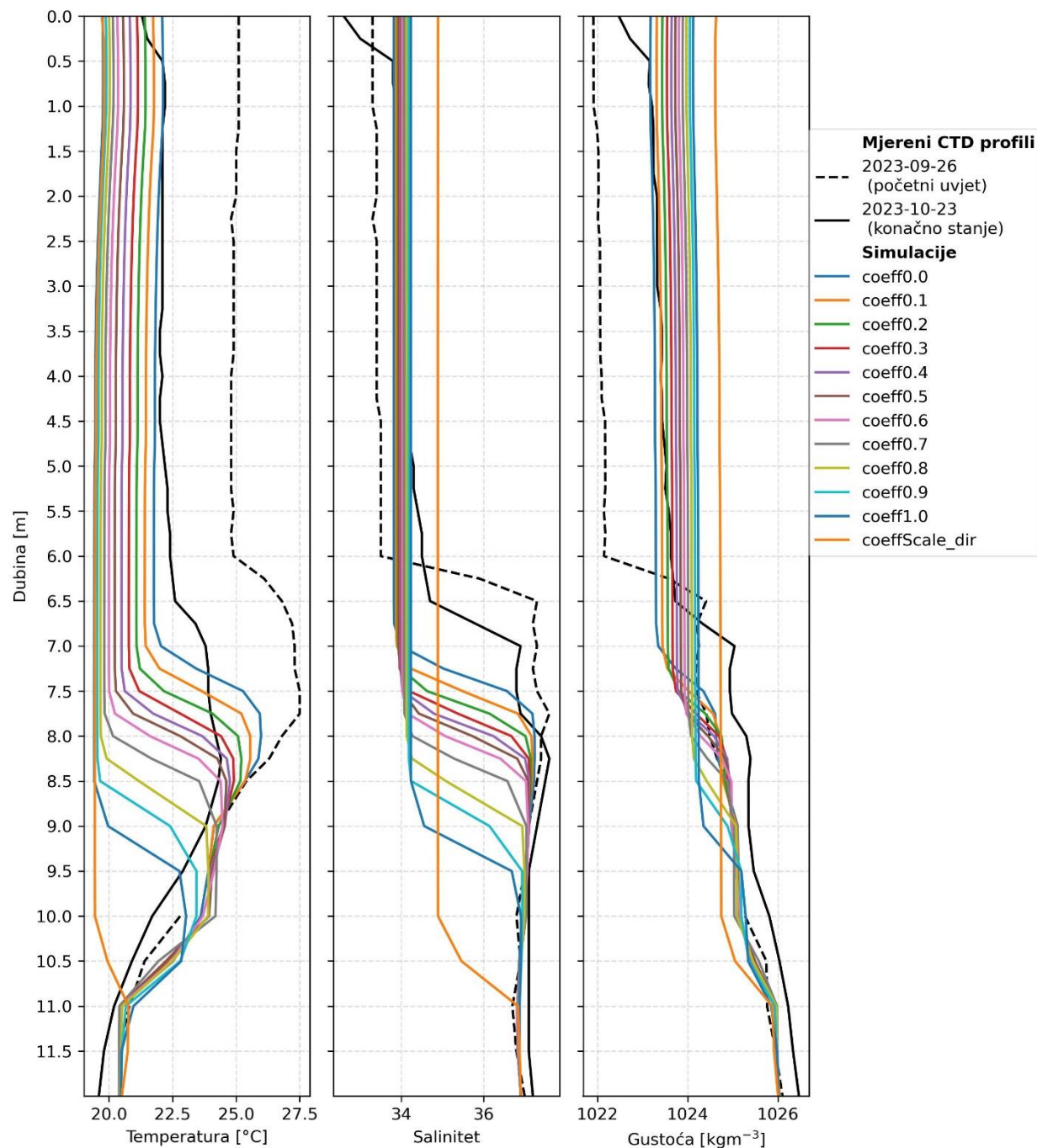
Slika 4.4. Testovi osjetljivosti modela na odabir ERA5 točke mreže za vjetar za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1.0 (coeff1.0). Kraj naziva svake od simulacija u zagradi je dana vrijednost LSM za točku korištenu u toj simulaciji. Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

4.2.1.2 Skaliranje brzine vjetra

Nakon simulacija za devet točaka iz ERA5 mreže uslijedile su simulacije za vjetar skaliran koeficijentima iz raspona $[0, 1]$ s korakom 0,1 za dvije odabrane točke (slike 4.5 i 4.6). Iz grafičkog prikaza vidljivo je kako vjetar množen koeficijentom 0,0 (odnosno, simulacija bez vjetra) najbolje reproducira dubinu dublje termokline i halokline (6,5 – 7,0 m), dok je temperatura u slojevima plićim od termokline neznatno precijenjena (0,1 – 0,2 °C). Razlika u korištenju dvije točke postoji, no nije znatna. Točka (43,75° 16,25°) dubinu dublje termokline reproducira 0,5 m dublje od točke (43,75° 16,00°) te daje otprilike 0,5°C niže temperature u vodenom stupcu u odnosu na točku (43,75° 16,00°). Prema RMSE, za točku (43,75° 16,25°) najbolje je skaliranje koeficijentom 0,0 (Tablica B2.2). Za točku (43,75° 16,00°) je zaključak isti po pitanju saliniteta, dok je po pitanju temperature najbolji koeficijent 0,2 (Tablica B2.1) što se vjerojatno može pripisati većoj podudarnosti temperature od dubine 0,5 m do dublje termokline korištenjem te točke. Zanimljivo je razmotriti što se događa u simulacijama u kojima se koristi vjetar skaliran prema smjeru puhanja (oznaka: *coeffScale_dir*). Za točku (43,75° 16,25°) je ta simulacija najgore reproducirala i T i S profile, a isto pokazuje i mjera RMSE. No, za točku (43,75° 16,00°) to nije slučaj te simulacija sa *coeffScale_dir* prema RMSE zauzima sredinu u usporedbi sa simulacijama gdje je koeficijent 0,0 – 1,0, a fizikalno održava termoklinu i haloklinu, iako na otprilike 2 m većim dubinama od onih mjerenih. Iz ovih rezultata čini se kako predložena metoda uvažavanja topografije oko ZO-a najviše odgovara za vjetar u točki (43,75° 16,00°). Što se tiče površinske termokline i halokline, ni za jedan par točke i koeficijenta skaliranja one nisu dobro simulirane. Stoga se može zaključiti da se radi o nekom drugom procesu, a ne miješanju vjetrom, koji je ključan za njihovu reprodukciju modelom.



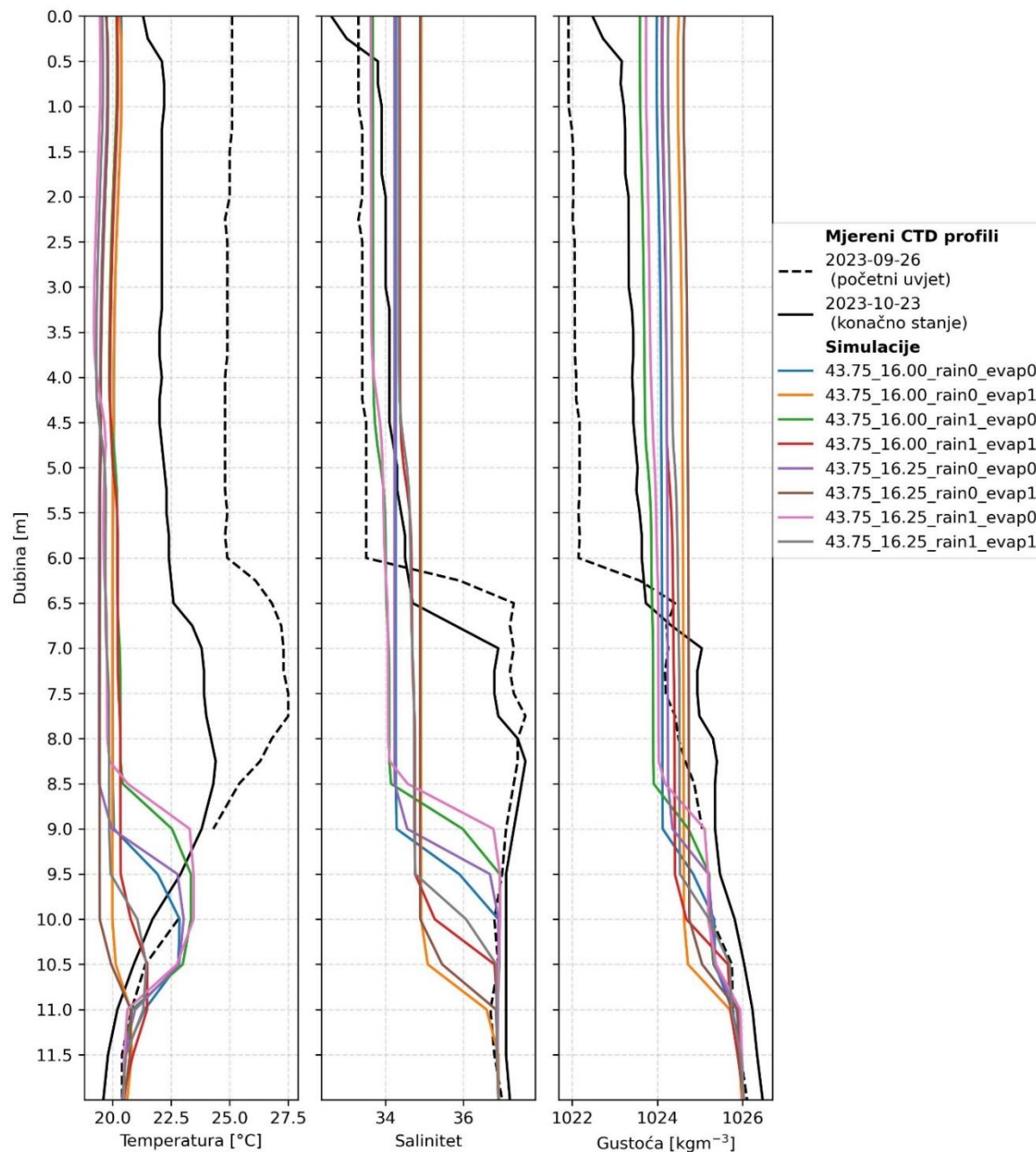
Slika 4.5. Testovi osjetljivosti modela na brzinu vjetra za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,00°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen nalazi se u nazivu simulacije (coeff N) pri čemu je $N = \text{Scale_dir}$ vjetar skaliran prema smjeru puhanja. Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila *Turbulence_3*.



Slika 4.6. Testovi osjetljivosti modela na brzinu vjetra za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen nalazi se u nazivu simulacije (coeff N) pri čemu je $N = \text{Scale_dir}$ vjetar skaliran prema smjeru puhanja. Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

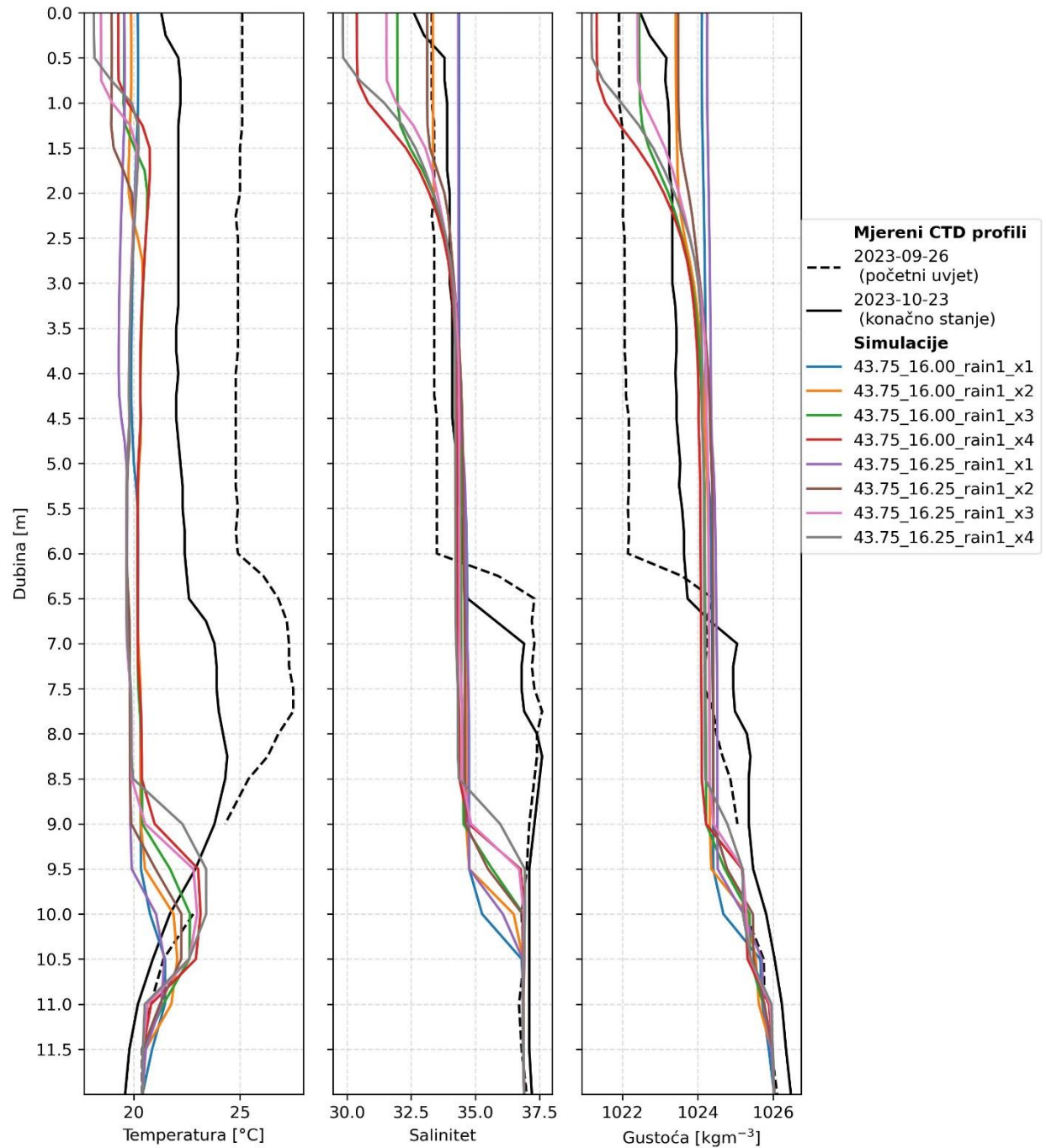
4.2.1.3 Procesi oborine i isparavanja

Kao logičan korak, u sljedećim simulacijama testirana je osjetljivost modela na uključivanje procesa oborine i isparavanja, što je prikazano na slici 4.7. Dubina termokline i halokline, pa tako i piknokline, najbolje je simulirana kada je uključen proces oborine, a isključen proces isparavanja, za obje ERA5 točke mreže, pri čemu je ($43,75^{\circ}$ $16,25^{\circ}$) neznatno bolja. Salinitet je u stupcu u svim simulacijama bio oko stvarne vrijednosti za slojeve pliće od mjerene halokline na način da je za isključen proces isparavanja uz uključenu oborinu salinitet za 0,1 – 0,2 potcijenjen, dok je u preostalim simulacijama precijenjen. Najveća je razlika (za otprilike jednu jedinicu) u slučaju kada nema oborine, ali je proces isparavanja uključen. Temperatura je u svim simulacijama potcijenjena za 1 – 2 °C, osim na dubini potpovršinskog temperaturnog maksimuma gdje simulacije u kojima je isparavanje isključeno imaju približno isti iznos maksimuma, ali na prevelikoj dubini. Niti jedna simulacija ne reproducira površinsku termoklinu i haloklinu što može ukazivati da je vjetar i dalje prejak ili da je oborina iz ERA5 reanalize nedovoljna, drugim riječima, potcjenjuje stvarnu količinu slatke vode koja je u razdoblju 26. rujna – 23. listopada 2023. dospjela na površinu jezera. Prema RMSE vrijednosti (Tablica B3), simulacije temperature pokazuju veće razlike (5,59 – 9,04), no utjecaj saliniteta je takav da se RMSE za gustoću vrlo malo razlikuje među simulacijama (0,41 – 1,29).



Slika 4.7. Testovi osjetljivosti modela na procese oborine i isparavanja za ERA5 točke s koordinatama (43,75° 16,00°) i (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Uključenost/neuključenost procesa oborine u nazivu simulacije je označena s rain1/rain0, dok je uključenost/neuključenost procesa isparavanja u imenu označena s evap1/evap0. Koeficijent N kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1.0 (coeff1.0). Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama je bila Turbulence_3.

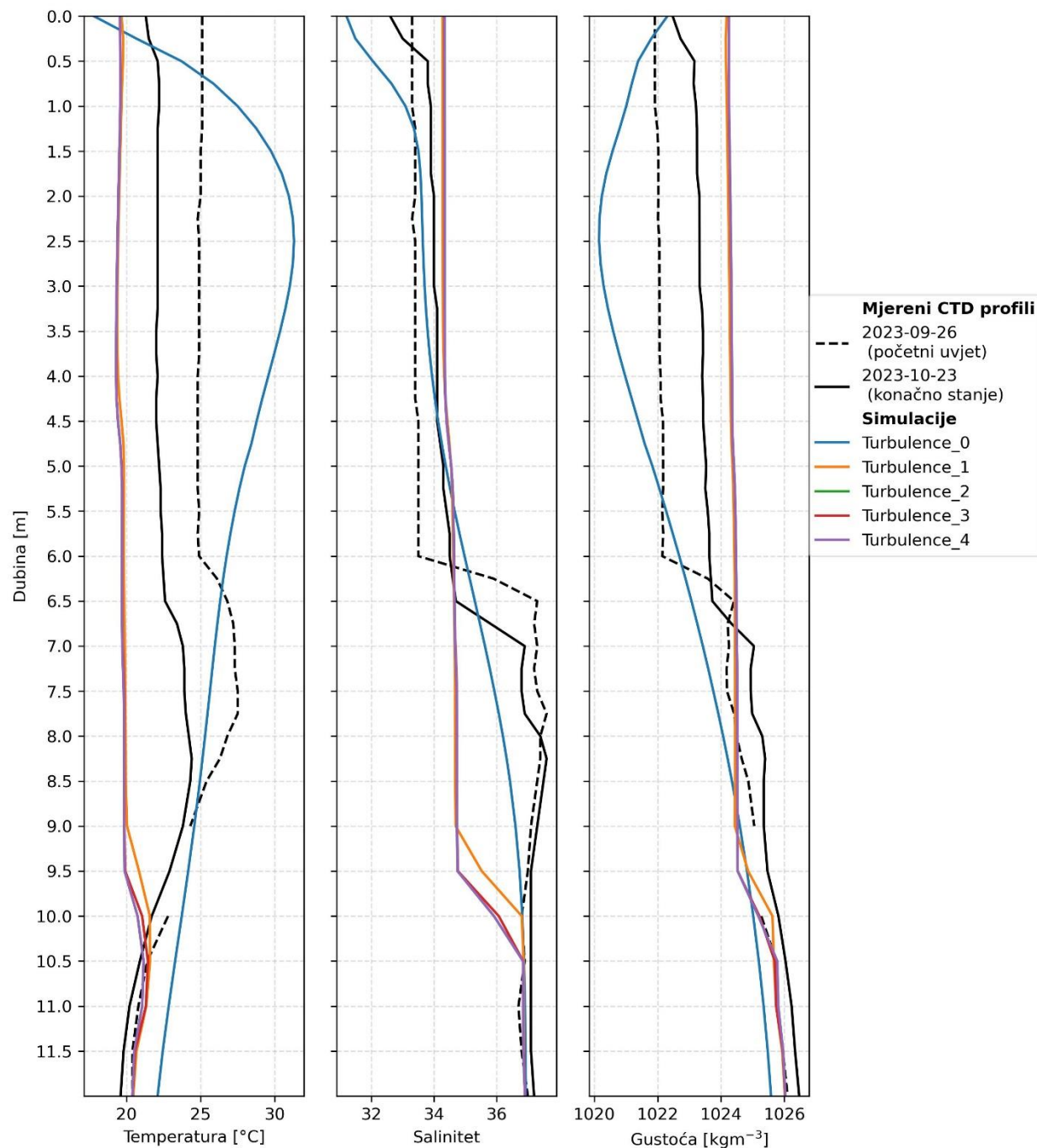
Na slici 4.8 prikazane su simulacije u kojima je oborina iz ERA5 reanalize množena koeficijentom 1, 2, 3 i 4. Prema RMSE vrijednostima za gustoću (Tablica B4), najboljima se pokazuju simulacije u kojima je 2 i 3 puta više oborine nego što je u izvornim ERA5 podacima. Optički je odmah uočljivo kako povećanjem količine oborine model uspješno reproducira površinsku termoklinu i haloklinu. Salinitet je dobro reprezentiran oblikom, no obje halokline su preduboke u usporedbi s mjerenjima. Osim u slučaju dvostruko veće oborine, simulacije potcjenjuju salinitet na površini. Rezultati ovih simulacija daju naslutiti da modelu treba više oborine u usporedbi s ERA5 reanalizom te nešto slabiji vjetar. Ipak, kroz cijeli vodeni stupac miješanje je precijenjeno što je navelo na potrebu ispitivanja modeliranja vertikalne turbulencije, a što je prikazano na slikama 4.9 i 4.10.



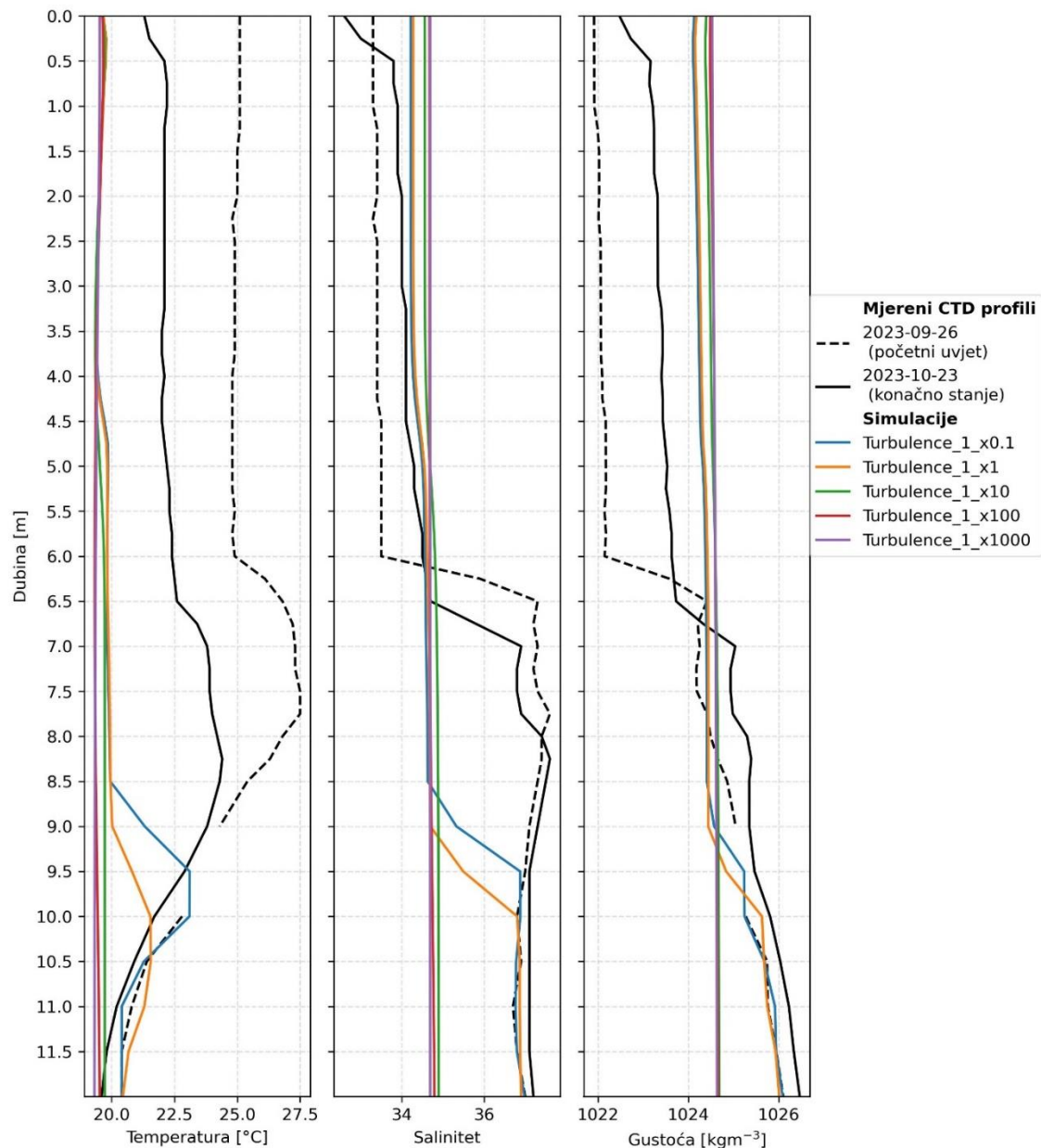
Slika 4.8. Testovi osjetljivosti modela na količinu oborine za ERA5 točke s koordinatama (43,75° 16,25°) i (43,75° 16,00°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je oborina množena nalazi se u nazivu simulacije (rain1_xN). Koeficijent N kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1.0 (coeff1.0) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja. Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama je bila Turbulence_3.

4.2.1.4 Vertikalna turbulencija

Isključivanjem vertikalne turbulencije simulirani profil gustoće je nefizikalan i ima visok RMSE za gustoću i temperaturu (Tablica B5). No, RMSE za salinitet je najniži u toj simulaciji, a površinska haloklina se reproducira iako je oborina izvorna iz ERA5 reanalize, odnosno, količina oborine nije povećavana. Preostale četiri opcije modeliranja vertikalne turbulencije daju slične rezultate; razlikuje se jedino opcija 1 pri kojoj je VTD konstantna i jednaka $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (dubina termokline i halokline je približno 0,5 m plića u usporedbi s ostalim simulacijama). Dodatni testovi osjetljivosti za uključenu opciju 1 napravljeni su skaliranjem VTD (slika 4.10). Zanimljivo je da vrijednost RMSE (Tablica B6) monotonno raste povećavanjem VTD za sva tri parametra (T, S i gustoća). Jedino VTD iznosa 10^{-6} i $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ reproduciraju dublju pinksoklinu, no obje su previsoke za reproduciranje površinske termokline i halokline. Kako Delft3D FM nema opciju postavljanja različitih vrijednosti VTD u prostoru i vremenu, za simulacije miješanja 2021. godine korištena je tvornički postavljena opcija 3.



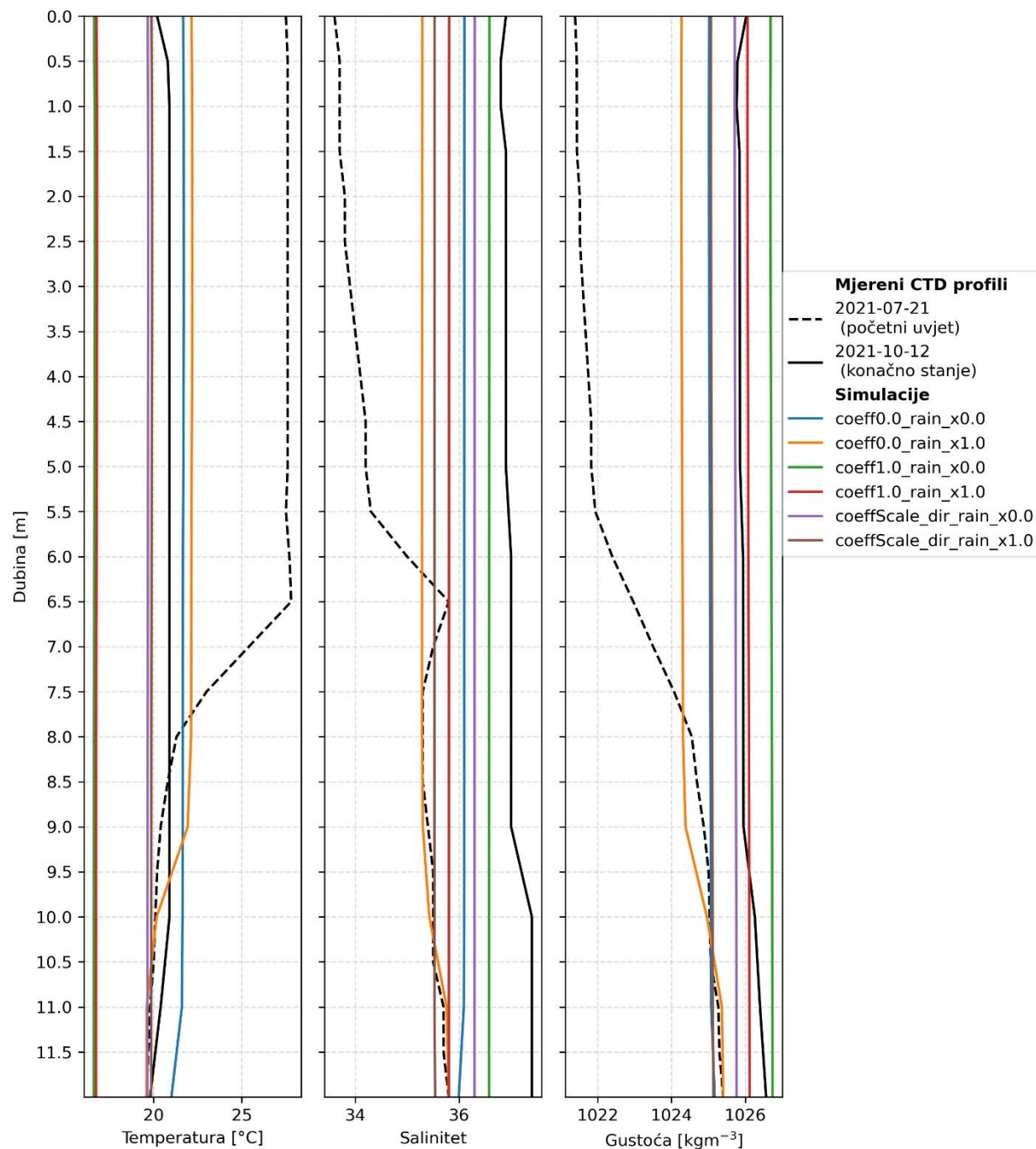
Slika 4.9. Testovi osjetljivosti modela na odabir metode uključivanja procesa turbulencije za ERA5 točku s koordinatama (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijenti N kojima su množeni vjetar i oborina bili su u svim simulacijama jednaki 1.0 (redom coeff1.0 i rain1_x1) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja.



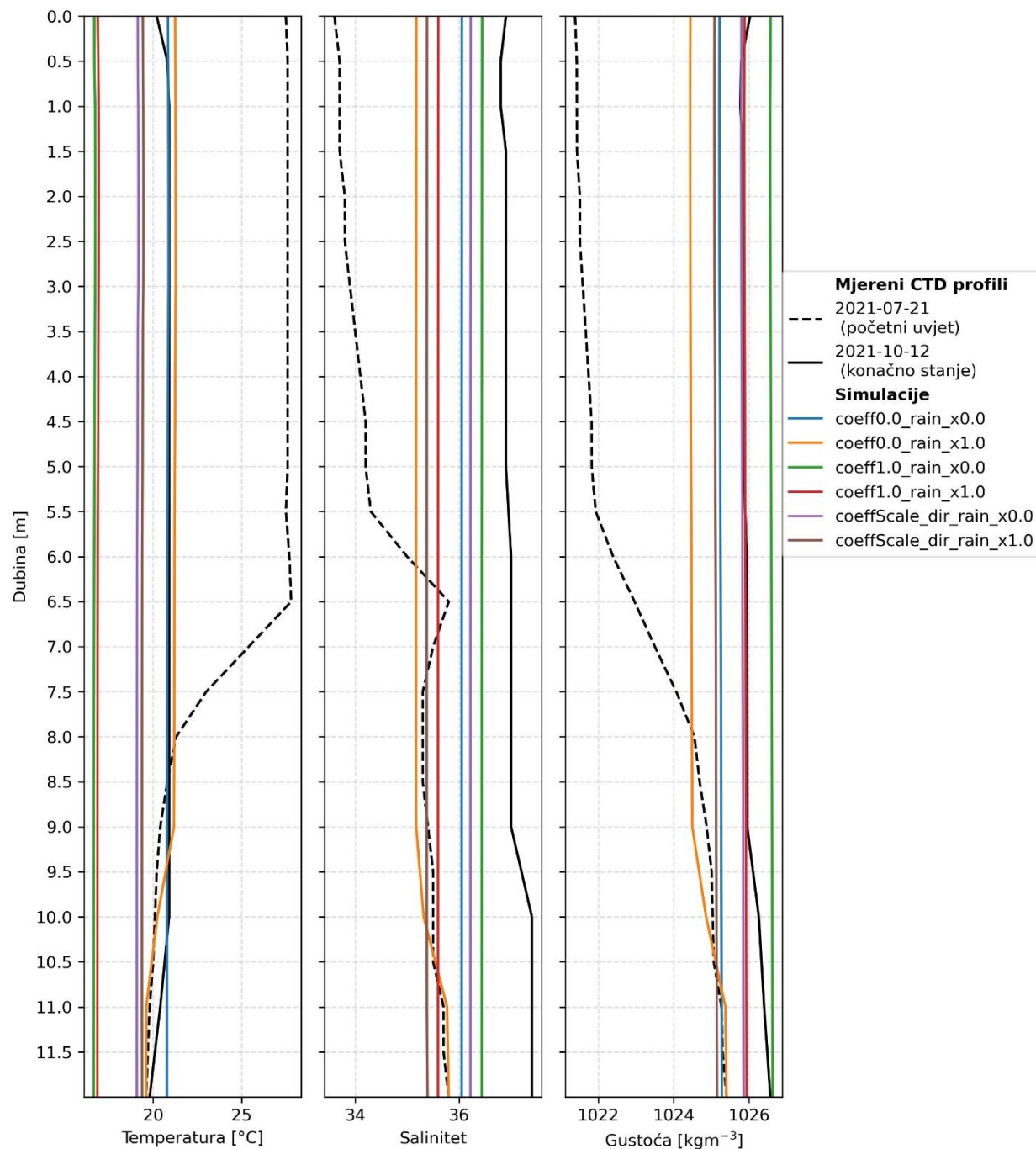
Slika 4.10. Testovi osjetljivosti modela na parametar modela dicoww (VTD) pri korištenju metode uključivanja procesa turbulencije Turbulence_1 za ERA5 točku s koordinatama (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Parametar je mijenjan na način da se uobičajena vrijednost koja se koristi u modelu ($0.000001 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) množila koeficijentom N koji se nalazi u nazivu simulacije (Turbulence_1_x N). Koeficijenti N kojima su množeni vjetar i oborina bili su u svim simulacijama jednaki 1.0 (redom coeff1.0 i rain1_x1) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja. Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama je bila Turbulence_1 (konstantna vrijednost parametra dicoww).

4.2.2 Simulacije vertikalnog miješanja u listopadu 2021. godine

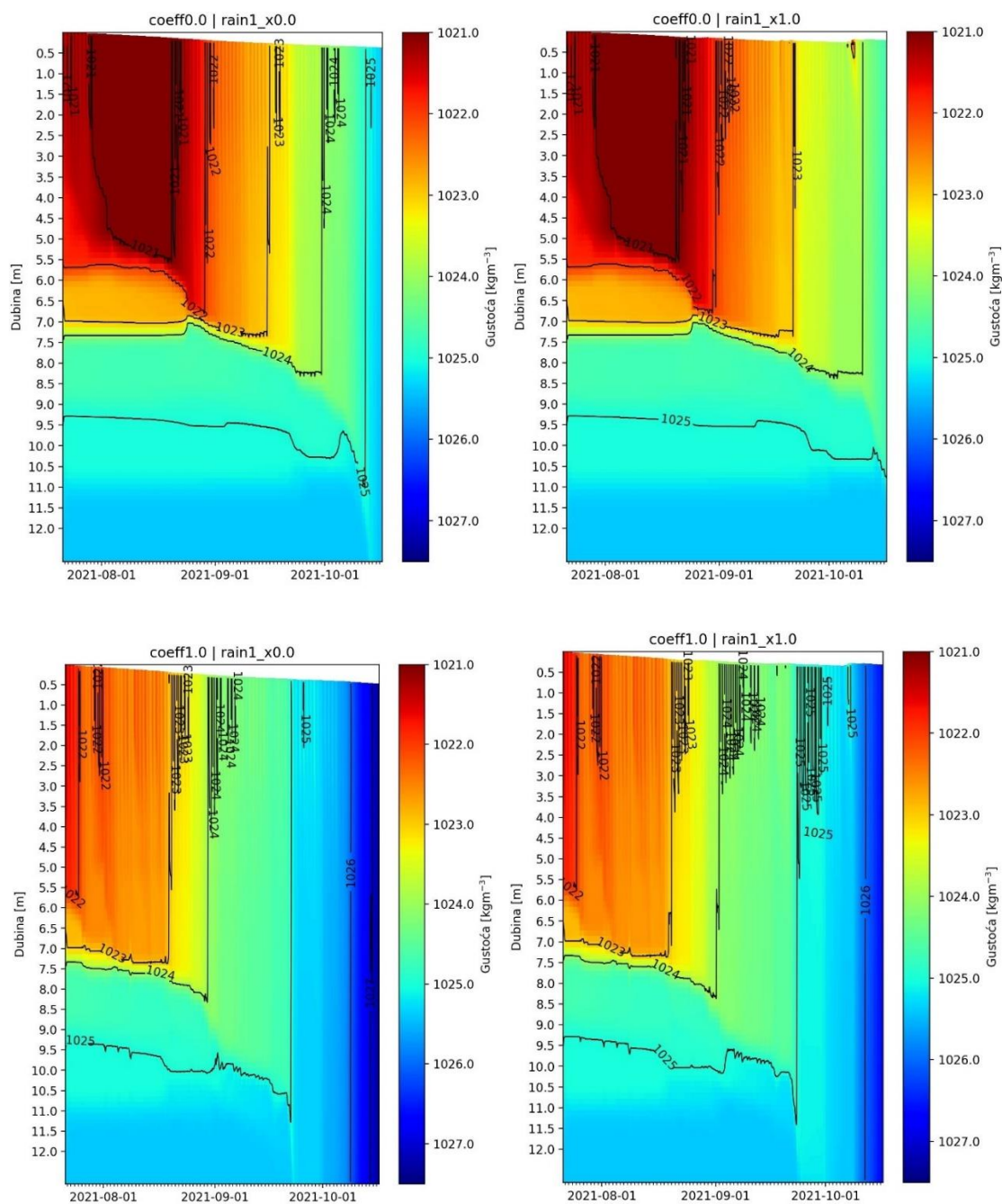
Za razliku od slika 4.4 – 4.10, gdje je simulirano očuvanje raslojavanja u jesen, na slikama 4.11 i 4.12 uspoređeno je modelsko reproduciranje potpunog miješanja vertikalnog vodenog stupca s mjerenjima na dan 12. listopada 2021. godine gdje su simulacije bile: s izvornim vjetrom iz ERA5 reanalize, sasvim bez vjetra te sa vjetrom skaliranim ovisno o smjeru puhanja, za opciju s oborinom i bez oborine. Odmah se može uočiti da sve simulacije uspješno reproduciraju miješanje vertikalnog stupca do dubine na kojoj je i jezero bilo izmiješano na dan 12. listopada. Na dan mjerenja u listopadu bile su prisutne blago izražene termoklina i haloklina između dubine 9 i 10 m koje jedino simulacija bez vjetra, ali s uključenom oborinom, donekle dobro reproducira. Razlika između korištenja dvije točke ERA5 reanalize je vrlo mala te se tek prema RMSE za gustoću (Tablice C1 i C2) uočava blaga prednost korištenja točke ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$) naspram korištenja točke ($43,75^{\circ}$ $16,25^{\circ}$). Sve simulacije potcjenjuju salinitet: najviše potcjenjuje simulacija u kojoj nema vjetra, a ima oborine, dok je salinitet najbliži mjerenom u simulaciji gdje ima vjetra, ali uopće nema oborine. Temperatura je za izvorni vjetar iz ERA5 reanalize potcjenjena za $2,5^{\circ}\text{C}$ i to neovisno u uključivanju ili isključivanju oborine. Preostale simulacije daju prilično realistične vertikalne profile temperature. Što se tiče gustoće, simulacija s oborinom, a bez vjetra, najviše potcjenjuje gustoću u vodenom stupcu, dok simulacija s vjetrom, ali bez oborine najviše precjenjuje gustoću, s time da je precjenjivanje iznosom dvostruko manje od potcjenjivanja. Iz rezultata na slikama 4.11 i 4.12 izgleda da se miješanje modelom može reproducirati u cijelosti bez oborine i vjetra. Kako bi se ovo potvrdilo, razmotrimo razvoj vertikalnog profila u vremenu za svaku od šest simulacija (slike 4.13 i 4.14; salinitet i temperatura su prikazani za simulacije sa skaliranim vjetrom). Razmatranjem razvoja profila gustoće tijekom vremena (slika 4.13) očito je da vertikalno miješanje ne nastupa datumski istovremeno, iako je jezero u svim simulacijama i dalje izmiješano na dan 12. listopada kad se uspoređuje s mjerenjima (slike 4.11 i 4.12), čak i u simulacijama gdje vjetar nije uključen. Oborina koja je pala u prvoj polovici listopada ima dijelom funkciju hidrostatskog stabiliziranja vodenog stupca (snižavanje saliniteta 1 do 2 jedinice), no dijelom ga i destabilizira radi spuštanja temperature za $\sim 2^{\circ}\text{C}$. Također, korištenje izvornog ERA5 vjetra uzrokuje prerano izmješavanje jezera. Usporedbom temperature (slika 4.14) za simulaciju s oborinom i bez oborine vidi se kako uključivanje oborine utječe na zadržavanje termokline na 11 m dubine, dok se bez uključivanja oborine jezero u potpunosti izmiješa.



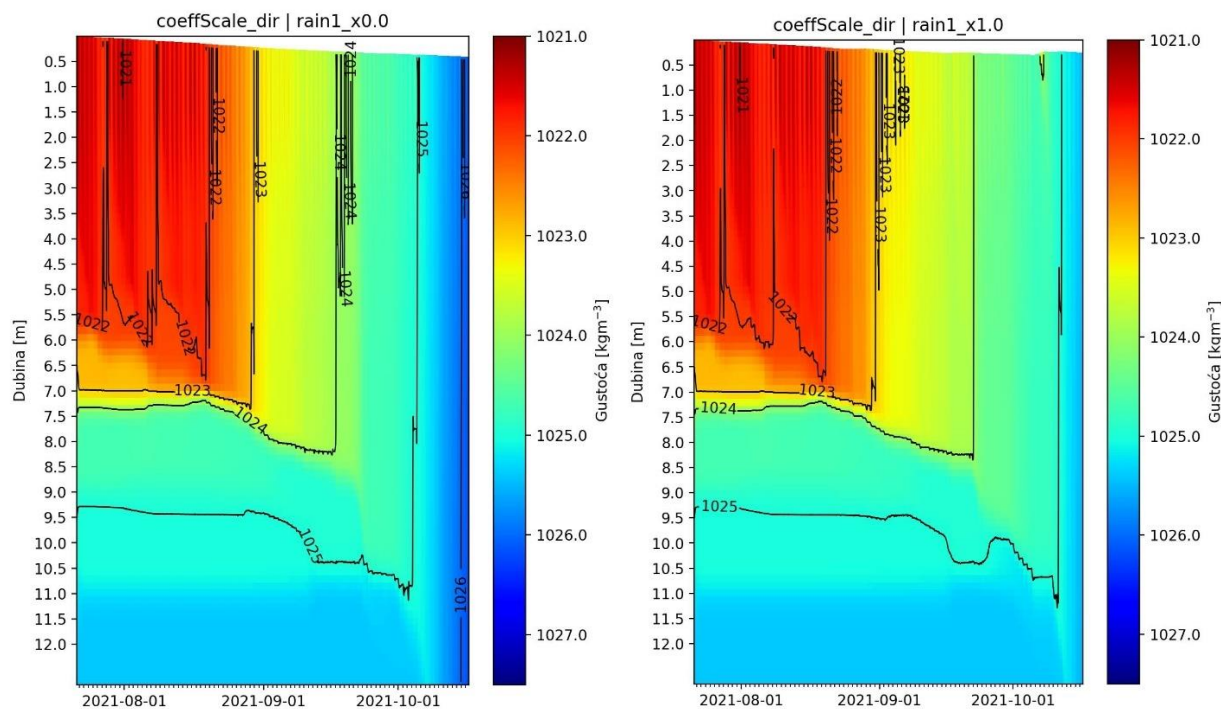
Slika 4.11. Simulacije u kojima je korištena ERA5 točka koordinata ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$) za razdoblje 21.7. – 12.10.2021. Uključivanje/neuključivanje vjetra označeno je s *coeff1.0/coeff0.0*, a procesa oborine s *rain_x0/rain_x1*. Skaliranje vjetra prema smjeru puhanja označeno je s *coeffScale_dir*. U svim je simulacijama bio uključen proces isparavanja, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila *Turbulence_3*.



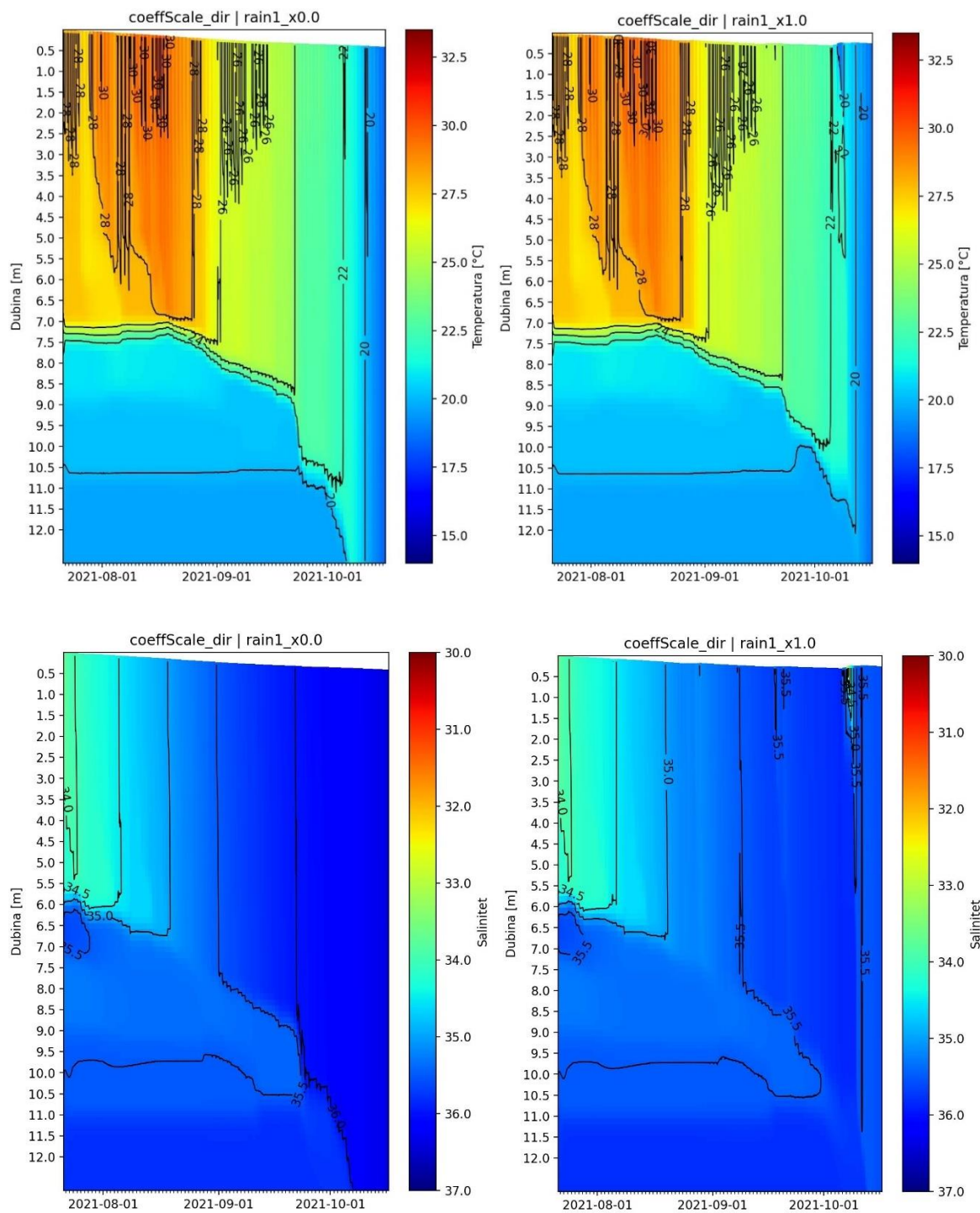
Slika 4.12. Simulacije u kojima je korištena ERA5 točka koordinata (43,75° 16,25°) za razdoblje 21.7. – 12.10.2021. Uključivanje/neuključivanje vjetra označeno je s *coeff1.0/coeff0.0*, a procesa oborine s *rain_x0/rain_x1*. Skaliranje vjetra prema smjeru puhanja označeno je s *coeffScale_dir*. U svim je simulacijama bio uključen proces isparavanja, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila *Turbulence_3*.



Slika 4.13. Gustoća temeljem simulacija temperature i saliniteta za razdoblje 21.7. – 12.10.2021. Oznake simulacija su sljedeće: Coeff0.0 – forsiranje vjetrom je isključeno, Coeff1.0 – forsiranje vjetrom je uključeno (vrijednosti su neskalirane ERA5 vrijednosti), rain1_x0.0 – forsiranje oborinom je isključeno, rain1_x1.0 – forsiranje oborinom je uključeno (vrijednosti su neskalirane ERA5 vrijednosti).



Slika 4.13. Gustoća temeljem simulacija temperature i saliniteta za razdoblje 21.7. – 12.10.2021. Oznake simulacija su sljedeće: Coeff.0 – forsiranje vjetrom je isključeno, Coeff1.0 – forsiranje vjetrom je uključeno (vrijednosti su neskalirane ERA5 vrijednosti), rain1_x0.0 – forsiranje oborinom je isključeno, rain1_x1.0 – forsiranje oborinom je uključeno (vrijednosti su neskalirane ERA5 vrijednosti) (nastavak).



Slika 4.14. Simulacije temperature (gore) i saliniteta (dolje) za razdoblje 21.7. – 12.10.2021. pri čemu su postavke modela bile: `coeffScale_dir` i `Turbulence_3`. Korištena je ERA5 točka koordinata ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$) te je proces isparavanja bio uključen. Model je forsiran vjetrom skaliranim prema smjeru (`coeffScale_dir`), a forsiranje oborinom je bilo uključeno (`rain1_x1.0`).

4.3 Diskusija

4.3.1 Testovi osjetljivosti – opći pregled

Temeljem testova osjetljivosti prikazanima na slikama 4.4 – 4.12 uočava se nekoliko stvari. Najprije, model je vrlo osjetljiv na odabir točke forsiranja iz ERA5 reanalize te su se povoljnijima pokazale točke koje su u reanalizi kopnene, a ne najbliža točka ZO-u ($43,50^{\circ}$ $16,00^{\circ}$). Između točaka ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$) i ($43,75^{\circ}$ $16,25^{\circ}$) nije uočena očita razlika, tek neznatno niži RMSE za simulacije za 2021. godinu i bolji odziv na skaliranje po smjeru metodom opisanom u potpoglavlju 4.2 za točku ($43,50^{\circ}$ $16,00^{\circ}$). Razlog boljih rezultata korištenjem kopnenih točki vjerojatno je to što vjetar nad morem nesmetano puše (pa je stoga brzina još i veća), dok je amplituda temperature zraka znatno manja. Kod korištenja kopnenih točaka temperaturna amplituda je nešto bliža mjerenim vrijednostima (slika 3.5), odnosno dnevna amplituda temperature zraka neposredno kraj ZO-a je bila $\sim 8^{\circ}\text{C}$. No, čak i bez vjetra, koji je izgledno prejak i sa skaliranjem, ne reproduciraju se površinska termoklina i haloklina. Tek se s udvostručenom oborinom javljaju mjereni profili pri površini ZO-a, no i oni su previše izmješani što ukazuje da je turbulentna difuzija vjerojatno prejaka u modelu (barem za površinski sloj). To se vidi i iz simulacije gdje je VTD jednak nuli (slika 4.9), odnosno gdje je uključena samo molekularna difuzija, jer se površinska haloklina uspješno reproducira. Za vertikalno raslojena jezera već je pokazano da VTD može varirati i nekoliko redova veličine duž vodenog stupca (npr. Dong *i sur.*, 2020) pa je moguće da u površinskom sloju treba VTD koji je 10 – 100 puta manjeg iznosa od onog u ostatku vodenog stupca. Simulacije dublje piknokline su oblikom zadovoljavajuće, a greška se javlja samo po pitanju dubine piknokline, stoga je za pretpostaviti da je VTD u području piknokline dobrog iznosa. Nadalje, zanimljivo je uočiti kako sve simulacije za 2021. godinu, koje su dva mjeseca duže od simulacija za 2023. godinu, potcjenjuju salinitet, što upućuje na to da je u razdoblju ljeto/početak zime bitan unos vode plimnim oscilacijama, koje u ovom istraživanju još nisu uključene. Skaliranjem oborine čini se da oborina iz ERA5 reanalize potcjenjuje količinu slatke vode koja dospjeva na površinu jezera, ali ne nužno uvijek. Naime, u godini kada se jezero nije sasvim izmiješalo (2023. godine) salinitet je u vodenom stupcu bio precijenjen i oborina iz ERA5 činila se nedovoljnom za simuliranje stvarnog unosa slatke vode. Odnosno, moguće da je te godine površinsko otjecanje ili unos vode plimom imalo znatan doprinos, ili pak da je proces isparavanja bio potcijenjen. S druge strane, u simulacijama

kada se jezero sasvim izmiješalo (2021. godine), salinitet je bio potcijenjen te se činilo da nedostaje unos slanije vode, ili da je isparavanje potcijenjeno, ili pak da je oborina precijenjena. Moguće je da je unos vode iz krške okoline, za čiji smo salinitet u trećem poglavlju diskutirali da vjerojatno ovisi o sezoni i godini (to jest, o vodnoj leći), upravo „karika koja nedostaje“ u modelu kako bi se realistično simulirao salinitet u jezeru. Realistično simuliranje saliniteta ključno je u slučaju ZO-a, što su pokazali rezultati iz prethodna dva poglavlja, ali i simulacije u ovom poglavlju (primjerice, slika 4.7).

4.3.2 Utjecaj oborine na simulaciju miješanja 2021. godine.

U radu Ciglencečki i sur. (2015) sugerirano je kako se naglo anoksično miješanje 1997. i 2011. dogodilo nakon toplih i suhih ljeta, no dugoročni podaci oborine nisu razmatrani. U drugom poglavlju temeljem slike 2.5 vidimo kako ljeta 1997. i 2011. godine nisu bila izrazito suha u odnosu na prosjek za 1996. – 2020., dapače, srpanj obje godine bio je barem 50% kišniji od prosjeka za to razdoblje. No, ako razmotrimo sliku 2.6 možemo uočiti da su obje godine bile sušne u odnosu na susjedne godine. Tu se opet ističe važnost razmatranja cijele godine i nestajanja halokline krajem ljeta kao preduvjeta za brzo miješanje. Na slikama 4.13 i 4.14 vidimo da je i 2021. godine bilo tako – u trenutku nailaska meteorološkog poremećaja u prvoj polovici listopada (slike A1.1 – A2.2), vodeni stupac stabilnim je držala jedino temperatura. Uslijed pada temperature zraka od 15 °C tijekom razdoblja 5. – 10. listopada i oblačnog vremena, koje je spriječilo površinsko zagrijavanje, labilno raslojavanje se narušava i jezero se miješa nakon 10. listopada. Oborina koja je pala u tom razdoblju nije bila dostatna da stabilizira jezero, iako jest utjecala na odgodu miješanja od nekoliko dana i na dubinu dosega miješanja, koji je u simulacijama s uključenom oborinom bio plići (slika 4.13). No, čak i s oborinom doseg miješanja je svejedno dovoljan da rastvori piknoklinu i granicu oksija – anoksija koja inače sprječava trošenje OK u reakcijama s RSS. Naime, usporedbom s OK iz početnih uvjeta (slika 4.2 lijevo gore) vidimo da je granica oksija – anoksija bila na dubini oko 7 m, dakle dovoljno plitko da bude izmiješana čak i ako jezero ispod 11 m ostane raslojeno u listopadu. Također, oborina je tijekom usmenih diskusija na temu miješanja ZO diskutirana kao stabilizirajući čimbenik, no simulacije za listopad 2021. godine (slika 4.14) pokazuju da se uključivanjem oborine javlja pad temperature od približno 2 °C koji utječe na vodeni stupac do dubine 2 do 2,5 m. Dakle, oborina može djelovati i kao čimbenik koji doprinosi miješanju, što je

već pokazano za nekoliko plićih jezera (Holgerson *i sur.*, 2022) te se ponovno javlja pitanje ravnoteže dvaju procesa: hlađenja i smanjenja saliniteta, o čijim doprinosima ovisi miješanje ZO-a (slika 2.8). Ipak, usporedbom simuliranih gustoća za 2021. godinu (slika 4.13) čini se da je korištenje izvornog ERA5 vjetra bez oborine, makar prejakog, manja greška nego korištenje izvorne oborine, a bez vjetra. Drugim riječima, vjetar se čini važnijim kod miješanja od oborine. Zanimljivo je za primijetiti utjecaj oborine i isparavanja na razinu vode u ZO-u. Tijekom srpnja, kolovoza i rujna u simulaciji za 2021. godinu razina vode spustila se za 0,5 m (slika 4.13 i 4.14) – toliko da je uzrokovala numeričku nestabilnost u modelu sa z-slojevima te se morao promijeniti način konstruiranja vertikalne mreže u modelu. Taj nedostatak vode tek je djelomično nadomješten oborinom koja je pala u listopadu. Iako na žalost nemamo zapise razine vode za to razdoblje, oni će uskoro biti dostupni za 2025. godinu (za vrijeme pisanja ovog rada uređaji su bili postavljeni u ZO-u) te će se moći usporediti stvarna promjena razine s onom u modelu, uvažavajući činjenicu da ZO ima vezu s morem, a što nije bilo uključeno u simulacije.

4.3.3 Utjecaj vjetra na miješanje 2021. godine

Jezero je u srpnju 2021. godine bilo gotovo jednako jako raslojeno kao u rujnu 2023. godine ($\sim 4 \text{ kg m}^{-3}$). Uvidom u termohaline procese od srpnja 2021. do rujna 2021. godine uviđamo da je u rujnu jezero puno nestabilnije te je razlika površina – dno $1 \text{ do } 2 \text{ kg m}^{-3}$, pri čemu je salinitet gotovo ujednačen (slika 4.2). Vodeni stupac od izmješavanja spriječavalo je jedino termalno raslojavanje od $\sim 5^\circ\text{C}$, odnosno, razlika temperature između površine i dubljih slojeva. Uvidom u meteorološke podatke iz ERA5 reanalize (slike A1.1 – A2.2) uviđamo da je u razdoblju prije miješanja u listopadu 2021. najprije puhalo jako jugo koje se unutar nekoliko dan promijenilo u buru. U prijašnjem radu koji se bavio numeričkim modeliranjem ZO-a (Ciglencečki *i sur.*, 2015) diskutirano je kako je za naglo miješanje, kada jezero postane sasvim anoksično, bitan vjetar i ekstremna bura, no to možda nije općeniti slučaj (ili barem, više nije) već karakteristika miješanja 1997. i 2011. godine koja su razmatrana u tom istraživanju. Naime, na slici 4.13 vidi se da je miješanje 2021. godine reproducirano bez ikakvog forsiranja vjetrom, i to bez vjetra tijekom nekoliko mjeseci, jer je početni datum simulacije 21. srpnja 2021. godine. Dakle, u općem slučaju čini se da vjetar ipak nije ključan faktor miješanja. No, vjetar, kao i oborina, utječe na vrijeme miješanja pa tako u simulacijama gdje vjetar nije skaliran holomiksija se događa 10 do 15 dana prerano. U svim

simulacijama očito je da je brzina vjetra prevelika. Čak ni vjetar skaliran tako da se uzima u obzir topografija nije sasvim prikladan te bi budući testovi trebali ispitati skaliranje vjetra skaliranog prema smjeru (primjerice, poboljša li se kvaliteta simulacije ako je vjetar 50% onog vjetra koji se dobije korištenjem *coeffScale_dir*; dvostruko skaliranje).

4.3.4 Ostali procesi koji utječu na miješanje

U vlažnim godinama, kakva je bila 2023., osim izražene površinske halokline koja stabilizira vodeni stupac, kao njena posljedica javlja se i potpovršinski temperaturni maksimum. Stoga u vlažnim godinama izgledno je da postoje dva procesa koja utječu na sprječavanje brzog miješanja te se u tim godinama vodeni stupac samo djelomično miješa. Moguće je da su upravo takve godine ključne za akumuliranje RSS u dubljim dijelovima jezera jer se pri miješanju, čak i naglom kada vodeni stupac postaje anoksičan, jezero otplinjava (npr. slika 2.1). U budućim istraživanjima trebalo bi razmotriti utjecaj dvostruke difuzije na miješanje u ZO-u. Izgledno je da se u ZO-u dvostruka difuzija javlja u oba poznata oblika (Turner, 1973). U godinama kada se stvara potpovršinski temperaturni maksimum može doći do situacije da se toplija, slanija voda nalazi ispod hladnije, manje slane vode, što je stabilni slučaj dvostruke difuzije. Takva vertikalna stratifikacija je intenzitetom slabija od slučaja tzv. haline difuzije (engl. *salt fingering*). Taj pak slučaj dvostruke difuzije se može u ZO-u javiti kada se manje slana, hladnija voda nalazi ispod slanije, toplije vode. Uslijed nedostatka kontinuiranih mjerenja saliniteta u visokoj vertikalnoj rezoluciji ovaj proces dosad nije zabilježen u ZO-u, no model pokazuje da se ovakav slučaj potencijalno formira temeljem simulacije za rujun 2021. godine (slika 4.14). Također, rezultati iz prethodnih poglavlja daju naznaku da se procesi dvostruke difuzije povremeno moraju javljati u ZO-u (npr. doprinosi gustoći na slici 2.8 i termalna inverzija na slici 3.4). Dakle, treba mjerenjima provjeriti javlja li se ovaj proces uistinu u ZO-u te koliko on doprinosi miješanju jezera, izrazito u godinama kada već postoje preduvjeti za miješanje (sušne godine). Moguće je da je dvostruka difuzija upravo sekundarni ili tercijarni proces koji u kompleksnoj vezi s utjecajem vjetra, oborine i lateralnog unosa vode određuje na koji se način jezero miješa u prosječno ili natprosječno vlažnim godinama. To bi objasnilo i zašto dosadašnja istraživanja, uključujući i ona u prethodnim poglavljima, nisu uspjela naći jedinstveno objašnjenje pojave potpunog ili djelomičnog miješanja, odnosno izostanak miješanja u pojedinim godinama.

4.3.5 Prijedlozi za daljnji razvoj modela

U Delft3D modelu postoji još jedan parametar koji u testovima osjetljivosti nije razmatran, a za koji je pokazano da ima važnu ulogu u modelskoj izmjeni topline u vodenom stupcu (Baracchini *i sur.*, 2020). Radi se o parametru *Secchidepth* koji je u svim simulacijama imao tvorničku vrijednost 2 m. Ovaj parametar određuje dubinu prodiranja zračenja s površine i najviše utječe na kratkovalno zračenje. Ono se apsorbira u dubljim slojevima te je direktno povezan s prozirnošću vode, a koja u ZO-u može biti vrlo niska (npr. vidjeti sliku 1.6). Također bi se u budućim istraživanjima trebalo više posvetiti reprezentaciji učinaka vjetra u modelu. Pretpostavka korištena za izradu vjetra skaliranog prema smjeru jest da jugo do jezera uopće ne dolazi (prigušenje 100%, slika 4.3), no to ne može biti sasvim točno jer se tijekom terena za vrijeme puhanja juga javljaju mali valovi na površini jezera te vjetar zanosi brod, stoga je vjerojatnije da u tim situacijama orografija samo modificira vjetar. K tome, skaliranje vjetra može se raditi dvostruko, najprije sa *coeffScale_dir*, a zatim testirati s *coeff0.1 – coeff1.0*. Ipak, problem vjetra će se vjerojatno dobro riješiti planiranom ugradnjom meteorološke postaje uz rub jezera i testiranjem pragova utjecaja vjetra, koji se u modelu reguliraju parametrima *Cdbreakpoints* i *Windspeedbreakpoints*. Uz pragove vjetra, Zhang, Chen i Brett (2024) su pokazali i kako parametar *ICdtyp* (koeficijent otpora vjetra; engl. *wind drag*) ima važnu ulogu pri modeliranju parametara kvalitete vode, pa je i to parametar koji bi se mogao razmotriti u budućim testovima osjetljivosti. Također, u budućim istraživanjima mogao bi se trodimenzionalno simulirati vjetar na poluotoku Gradina na maloj prostorno – vremenskoj ljestvici što bi omogućilo forsiranje jezera dvodimenzionalnim poljem vjetra koji uvažava lokalnu topografiju. Nadalje, trebalo bi se posvetiti i reproduciranju površinske termokline/halokline što bi se moglo napraviti ugrađivanjem prostorno promjenjivog VTD. No, to će biti izazov jer ta opcija trenutno nije podržana u službenoj verziji Delft3D modela pa će se morati doraditi izvorni kod modela. Uz to, bilo bi dobro testirati i parametar *vicoww* (vertikalnu viskoznost) te koliko bi ona utjecala na usporavanje procesa konvekcije u vodenom stupcu, koji se trenutno čine prebrzi u slučajevima kada je stratifikacija u jesen očuvana. Zadnje po pitanju modula FLOW bi trebalo biti uključivanje plimnih oscilacija u model te posljedičnih lateralnih doprinosa iz smjera krških stijena, a koji na dužoj vremenskoj ljestvici (~ mjeseci) mogu biti važni za ciklus saliniteta. Bit će zanimljivo razmotriti može li se uključivanjem unosa vode različitih količina soli poboljšati simuliranje saliniteta modelom, koji je u dužim simulacijama (2021. godina) potcijenjen. Nakon navedenih testova osjetljivosti, kalibracija i uključivanja svih važnih hidrodinamičkih procesa,

razvoj modela trebalo bi usmjeriti na povezivanje modula FLOW i WAQ kako bi se istražio biogeokemijski ciklus ZO-a (izrazito RSS i OK). Takav model bi se zatim mogao primijeniti i na druge sustave, prema uzoru na Mendes *i sur.* (2021). Primjerice, na onečišćene hrvatske zaljeve i luke u kojim je primjećena visoka koncentracija organske tvari (Dautović *i sur.*, 2026), ali i Vransko jezero, za koje smo već spominjali u prvom poglavlju da ima probleme s zaslanjivanjem.

5 ZAKLJUČCI DISERTACIJE

U ovom radu analiziran je dugogodišnji niz fizičko – kemijskih podataka kako bi se provjerile prva i druga hipoteza (1. – intenzitet raslojavanja gustoće u vodenom stupcu ZO-a se mijenja ovisno o višemjesečnim i višegodišnjim uvjetima u atmosferi i moru; 2. – uvjeti za potpuno izmješavanje slojeva ZO-a u jesen ili izostanak istog posljedica su fizičko – kemijskih uvjeta u ZO-u u prethodnim mjesecima). Pokazano je kako se ZO sve rjeđe otplinjava od RSS-a te da je u jezeru sve manje kisika, pri čemu se u 27 godina oksični dio jezera smanjio za 50%. Također je potvrđeno zagrijavanje površinskog sloja jezera koje je uočeno u prethodnim istraživanjima, a koje je i dalje iznimno izraženo s 0,93 °C po desetljeću. Diskutirano je i postojanje nerazjašnjene klimatske varijabilnosti na ljestvici otprilike 20 godina koja modulira uočene varijabilnosti T i S. Uz to, rezultati ukazuju na to da je razmjena tvari i energije između površine i dna jezera vrlo slaba, na što uz zagrijavanje i varijabilnost saliniteta vjerojatno utječu i uočeni višegodišnji ciklusi oborine koji, ovisno o godini, doprinose više ili manje hidrostatskoj stabilnosti jezera. Pokazano je kako izmjena kišnijih i sušnijih godina utječe na stvaranje preduvjeta za vertikalno miješanje, to jest, da tijekom sušnijih godina doprinos saliniteta hidrostatskoj stabilnosti slabi prema kraju ljeta. Zbog toga je veća mogućnost potpunog izmješavanja jezera tijekom kratkog vremenskog razdoblja, uz pojavu anoksične holomiksije, te su navedenim rezultatima potvrđene prve dvije hipoteze istraživanja. Dodatno, uočen je i izraženiji utjecaj oborine na jezero nakon 2003. godine čiji uzrok u ovom radu nije razjašnjen. Uočena akumulacija RSS-a te smanjivanje OK-a u jezeru doprinose degradaciji sustava jer radi promjene omjera koncentracija ovih dvaju reaktanta, lakše dolazi do potrošnje kisika u jezeru prilikom miješanja.

U drugom dijelu istraživanja razmatrana su kratkoročna mjerenja na većoj vremenskoj rezoluciji kako bi se odgovorilo na treću i četvrtu hipotezu iz potpoglavlja 1.7, a koje su vezane uz izmjenu vode jezero – krš – more (hipoteze: 3. – izmjena vode jezero – krš – more slabi na višegodišnjoj vremenskoj skali; 4. – izmijenjena voda je drugačijih fizičko – kemijskih svojstava u usporedbi s jezerskom i morskom vodom). Tim istraživanjem utvrđeno je kako ZO nije spojeno tunelom s morem te su nađena dva mjesta na kojima voda ulazi u jezero kroz sitne pukotine u stijenama (*Špilja 1*; *Špilja 2 kraj*). Pri tome je izmjena vode na lokaciji *Špilja 2 kraj* direktnija, odnosno, čini

se da se voda koja dolazi na tom mjestu više miješa s morskom vodom te da, temeljem provedenih mjerenja nutrijenata, ima kraće vrijeme boravka u anoksičnom okolišu. Ovi učinci dovedeni su u direktnu vezu s plimnim oscilacijama u moru. No, plima u ZO-u nastupa ~3 sata nakon one u moru te isto vrijedi i za oseku. Naime, porodne krške stijene između jezera i mora djeluju kao filter koji uzrokuje fazni pomak jezerskog signala, prigušuje njegovu amplitudu i štiti jezero od oscilacija kraćih perioda. Usporedbom četiri skupa mjerenja iz razdoblja 1999. – 2025. ustanovljeno je kako se izmjena vode kroz okolne stijene usporila za otprilike pola sata, što je potvrdilo treću hipotezu istraživanja. Također je nađeno kako temperatura uz rub jezera snažno ovisi o ulaznoj vodi iz krša čiji se volumen mijenja tijekom Mjesečevih mijena, ali i s meteorološkim uvjetima, no temeljem ovog istraživanja čini se kako se taj učinak osjeća samo u blizini mjesta kontakta. U stijenama je izgledno postojanje vodne leće čije se karakteristike mijenjaju ovisno o godišnjem dobu, no ova pretpostavka zahtijeva dodatna ispitivanja. Naime, uz utjecaj na temperaturu, uzorkovanjima je pokazano kako ulazna voda nije čista morska voda čak ni pred kraj ulaska vode u jezero, već je mješavina morske, jezerske i slatke vode te potencijalno doprinosi eutrofikaciji sustava jer je podzemna voda izgledno bogatija nutrijentima. Ovi rezultati direktno odgovaraju na četvrtu hipotezu. Dodatno, volumen vode koja ulazi u jezero čini se neznatnim naspram ukupnog volumena jezera, ali može biti znatan ako se uzme u obzir da voda ulazi u gornjim slojevima koji se s donjim slojevima većinu godine ne miješaju. Također, površina jezera brzo reagira na promjene u okolišnim uvjetima i ima velik raspon sezonskih temperatura. Iako je diurnalni signal jači za more po pitanju razine vode, slabiji je po pitanju temperature vode. U budućnosti bi trebalo uređajima za kontinuirano praćenje izmjeriti jedan cijeli godišnji ciklus mjerenja fizičko – kemijskih karakteristika ulazne vode: razinu vode, vodljivost i temperaturu, a ta mjerenja popratiti sezonskim mjerenjima kemijskih parametara. Također, treba istaknuti važnost kontinuiranih mjerenja kvalitetnim uređajima, pomno planiranje mjernih kampanja, interdisciplinarnost i uključivanje stručnjaka koji trenutno nisu dio istraživačkog tima. Sustav je izrazito heterogen i pokazao se izuzetno izazovnim za određivanje rubnih uvjeta za numerički model. Ipak, to je nužan korak u budućim istraživanjima kako bi se razjasnilo koliki učinak može imati ulazna voda u miješanju jezera u jesensko doba, kad je hidrostatska stabilnost najmanja (rezultat prve cjeline istraživanja), na što ovo istraživanje nije u potpunosti odgovorilo. Izgradnja tunela između jezera i mora može biti rješenje za očuvanje kvalitete jezerske vode, ali ona mora biti pažljivo planirana jer, krivo izvedena, može imati suprotan učinak i doprinijeti degradaciji sustava. Dodatno treba

naglasiti kako je analiza mjerenja razine vode za potrebe druge cjeline istraživanja omogućila izradu plimne prognoze temeljem kojih se mogu planirati daljnja istraživanja ulazne vode u ZO-u. Treća cjelina istraživanja dopunjava rezultate prethodne dvije i postavlja osnovu za izradu klimatskog scenarija za ZO. Iz rezultata simulacija može se zaključiti da postavljeni model ZO-a dovoljno dobro održava raslojavanje (2023. godina) i reproducira vertikalno miješanje (2021. godina). Od razmatranih devet točaka iz mreže ERA5 reanalize, rezultati pokazuju da su za forsiranje modela najbolje kopnene točke ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$) i ($43,75^{\circ}$ $16,25^{\circ}$) te je preporuka koristiti te točke u daljnjim simulacijama, pri čemu trenutna metoda uvažavanja topografije bolje odgovara za točku ($43,75^{\circ}$ $16,00^{\circ}$). Ipak, čak i s pažljivim odabirom točke i konstruiranjem metode uvažavanja topografije, u svim simulacijama brzina vjetra je prevelika, što ukazuje da budući testovi osjetljivosti trebaju biti usmjereni na određivanje prikladnog načina pripreme podataka vjetra. No, rezultati također ukazuju na to da vjetar ne mora biti čimbenik naglog miješanja u jesen već da je i nagla promjena temperature kroz nekoliko dana ključan proces. Uz to, primijećena je uloga oborine u određivanju dubine do koje se jezero miješa i destabilizaciji raslojavanja u jesen, a što dupunjuje rezultat o važnosti preduvjeta halinog raslojavanja u kasno ljeto iz prve cjeline istraživanja. Numeričkim modeliranjem ZO-a po prvi put postoje indikacije da dvostruka difuzija ima ulogu u vertikalnom miješanju vodenog stupca što treba dodatno ispitati modelom i provjeriti mjerenjima T i S visoke rezolucije u prostoru. Također, izgledno je da je vertikalna turbulentna difuzija neprikladnih iznosa kroz vodeni stupac, stoga bi trebalo naći način da se u model uvrsti prostorno promjenjiva vertikalna turbulentna difuzija koja bi bila niska pri površini radi reproduciranja površinske termokline/halokline. Dublja piknoklina je oblikom dobro reprezentirana te je greška jedino u dubini na kojoj se u modelu simulira.

Sve dugoročne promjene u ZO-u koje su potvrđene ovim istraživanjem (zagrijavanje jezera, akumulacija RSS-a, smanjenje oksičnog dijela jezera) i podupiru prethodna istraživanja o nakupljanju organske tvari te pomaku kemokline prema površinskom sloju ukazuju na mehanizam pozitivne povratne sprege koji sve više pogoduje anaerobnom načinu života u jezeru. Općenito, jezero je vrlo plitko i brzo reagira na unutargodišnje promjene u meteorološkim uvjetima, a podaci prikupljeni od 1996. godine predstavljaju vrijedan skup podataka na klimatološkoj vremenskoj ljestvici. Rezultati jasno ukazuju da jezero oscilira nepravilnim ciklusom između faze akumulacije/sprečavanja regeneracije i faze miješanja do kemokline/potpune anoksije u jezeru.

Autorici disertacije nije poznat niti jedan drugi sustav istih karakteristika u svijetu te se svakako nada da ova disertacija doprinosi kontinuitetu i nastavljaju istraživanja ovog prirodnog fenomena.

Literatura

Znanstveni i stručni radovi (abecedno)

Alexe, M. i Serban, G. (2014) The evolution of heliotherm phenomenon in the karstosaline lake Ursu from Sovata, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(2), str. 103–111.

Anchita, Zhupankhan, A., Khaibullina, Z., Kabiye, Y., Persson, K. M. i Tussupova, K. (2021) Health impact of drying aral sea: One health and socio-economical approach. *Water*, 13(22). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/w13223196>.

Bakran-Petricioli, T., Petricioli, D. i Požar-Domac, A. (1998) Influence of isolation and peculiar ecological properties on biodiversity - an example of marine lake Zmajevsko Jezero near Rogornica. *Rapports et proces verbaux des réunions - Commission internationale pour l'exploration scientifique de la mer Méditerranée*, 35, str. 518–519.

Baracchini, T., Chu, P. Y., Šukys, J., Lieberherr, G., Wunderle, S., Wüest, A. i Bouffard, D. (2020) Data assimilation of in situ and satellite remote sensing data to 3D hydrodynamic lake models: A case study using Delft3D-FLOW v4.03 and OpenDA v2.4. *Geoscientific Model Development*, 13(3), str. 1267–1284. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1267-2020>.

Barić, A., Grbec, B., Kušpilić, G., Marasović, I., Ninčević, Ž., Grubelić, I. (2003) Mass mortality event in a small saline lake (Lake Rogoznica) caused by unusual holomictic conditions. *Scientia Marina*, 67(2), str. 129–141. Dostupno na: <https://doi.org/10.3989/scimar.2003.67n2129>.

Barić, A., Grbec, B. i Bogner, D. (2008) Potential implications of sea-level rise for Croatia. *Journal of Coastal Research*, 24(2). Dostupno na: <https://doi.org/10.2112/07A-0004.1>.

Batina, A., Cukrov, N. i Denona, M.Ć. (2025) Spatiotemporal water quality analysis of Vrana Lake, Croatia. *Open Geosciences*, 17(1). Dostupno na: <https://doi.org/10.1515/geo-2025-0817>.

Bejannin, S., Tamborski, J. J., Van Beek, P., Souhaut, M., Stieglitz, T., Radakovitch, O., Claude, C., Conan, P., Pujo-Pay, M., Crispi, O., Le Roy, E. i Estournel, C. (2020) Nutrient fluxes associated with submarine groundwater discharge from karstic coastal aquifers (Côte Bleue, French Mediterranean coastline). *Frontiers in Environmental Science*, 7. Dostupno na: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00205>.

Benović, A., Lucić, D., Onofri, V., Peharda, M., Carić, M., Jasprica, N. i Bobanović-Čolić, S. (2000) Ecological characteristics of the Mljet Islands seawater lakes (South Adriatic Sea) with special reference to their resident populations of medusae. *Scientia Marina*, 64(S1), str. 197–206. Dostupno na: <https://doi.org/10.3989/scimar.2000.64s1197>.

Blanchette, F., Montroy, S., Patris, S. i Dawson, M. N. (2020) Marine lakes as biogeographical islands: a physical model for ecological dynamics in an insular marine lake, Palau. *Frontiers of Biogeography*, 12(4). Dostupno na: <https://doi.org/10.21425/F5FBG47736>.

Boedeker, C., Leliaert, F., Timoshkin, O. A., Vishnyakov, V. S., Díaz-Martínez, S. i Zuccarello, G. C. (2018) The endemic Cladophorales (Ulvophyceae) of ancient Lake Baikal represent a monophyletic group

of very closely related but morphologically diverse species. *Journal of Phycology*, 54(5), str. 616–629. Dostupno na: <https://doi.org/10.1111/jpy.12773>.

Boehrer, B. i Schultze, M. (2008) Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2).

Boehrer, B., von Rohden, C. i Schultze, M. (2017) Physical features of meromictic Lakes: Stratification and circulation. U R.D. Gulati, E.S. Zadereev i A.G. Degermendzhi (ur.) *Ecology of Meromictic Lakes*. Cham: Springer International Publishing, str. 15–34. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_2.

Bonacci, O. (1993) The Vrana Lake hydrology (Island of Cres - Croatia). *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(3), str. 407–417.

Bonacci, O. i Roje-Bonacci, T. (2020) Utjecaj hidrotehničkih zahvata na vodni režim Baćinskih jezera. *Hrvatske vode*, 28, str. 277–290.

Bonacci, O. i Švonja, M. (1984) Promjene vodnog režima Baćinskih jezera. *Građevinar*, 36(2), str. 53–58.

Brkić, Ž. i Larva, O. (2024) Impact of climate change on the Vrana Lake surface water temperature in Croatia using support vector regression. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101858>.

Buljan, M. (1956) Prvi nalazi sumporovodika (H₂S) u vodi Jadrana. *Mornarički glasnik*, 6(2), str. 207–214.

Buljan, M. i Špan, J. (1976) Hydrographical properties of the of sea water »Lakes« on the island of Mljet and the adjoining sea in eastern south Adriatic Sea. *Acta Adriatica*, 6, str. 1–227.

Bura-Nakić, E., Viollier, E., Jézéquel, D., Thiam, A. i Ciglencčki, I. (2009) Reduced sulfur and iron species in anoxic water column of meromictic crater Lake Pavin (Massif Central, France). *Chemical Geology*, 266(3–4), str. 311–317. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.06.020>.

Carević, D., Bujak, D., Lončar, G., Bartolić, I. (2019) Use of culverts for improving exchange of seawater in ports. *Građevinar*, 71(3), str. 197–207. Dostupno na: <https://doi.org/10.14256/JCE.2527.2018>.

Carstensen, J., Andersen, J. H., Gustafsson, B. G. i Conley, D. J. (2014) Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), str. 5628–5633. Dostupno na: <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111>.

Castro-Olivares, A., Des, M., Decastro, M., Pereira, H., Picado, A., Días, J. M. i Gómez-Gesteira, M. (2024) Coupled hydrodynamic and biogeochemical modeling in the Galician Rías Baixas (NW Iberian Peninsula) using Delft3D: Model validation and performance. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/jmse12122228>.

Ciglencčki, I., Kodba, Z., Viličić, D. i Čosović, B. (1998) Seasonal variation of anoxic conditions in the Rogoznica Lake. *Croatia Chemica Acta*, 71(2), str. 217–232.

Ciglencčki, I., Carić, M., Kršinić, F., Viličić, D. i Čosović, B. (2005) The extinction by sulfide—turnover and recovery of a naturally eutrophic, meromictic seawater lake. *Journal of Marine Systems*, 56(1–2). Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.08.006>.

Ciglencečki, I., Carić, M., Kršinić, F., Viličić, D. i Ćosović, B. (2015) Impacts of extreme weather events on highly eutrophic marine ecosystem (Rogoznica Lake, Adriatic coast). *Continental Shelf Research*, 108, str. 144–155. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.05.007>.

Ciglencečki, I., Ljubešić, Z., Janeković, I. i Batistić, M. (2017) Rogoznica Lake, a euxinic marine lake on the Adriatic coast (Croatia) that fluctuates between anoxic holomictic and meromictic conditions. U R.D. Gulati, E.S. Zadereev i A.G. Degermendzhi (ur.) *Ecology of Meromictic Lakes*. Cham: Springer International Publishing, str. 125–154. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_6.

Cohen, Y., Krumbein, W. E., Goldberg, M. i Shilo, M. (1977) Solar Lake (Sinai). Physical and chemical limnology. *Limnology and Oceanography*, 22(4), str. 597–608. Dostupno na: <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0597>.

Cuculić, V., Cukrov, N., Kwokal, Ž. i Mlakar, M. (2011) Distribution of trace metals in anchialine caves of Adriatic Sea, Croatia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 95(1), str. 253–263. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.011>.

Cushman-Roisin, B., Malačić, V. i Gačić, M. (2001) Tides, seiches and low-frequency oscillations. U B. Cushman-Roisin, M. Gačić i P.-M. Poulain (ur.) *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. Dordrecht: Springer, str. 217–240. Dostupno na: [10.1007/978-94-015-9819-4](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9819-4).

Cvitešić Kušan, A., Frka, S. i Ciglencečki, I. (2019) Electrochemical evidence of non-Volatile reduced sulfur species in water-soluble fraction of fine marine aerosols. *Atmosphere*, 10(11), str. 674–688. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/atmos10110674>.

Cvitković, I. (2001) Obnova makrobentosa Rogozničkog jezera nakon anoksije u jesen 1997. godine. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.

Čanković, M., Petrić, I., Marguš, M. i Ciglencečki, I. (2017) Spatio-temporal dynamics of sulfate-reducing bacteria in extreme environment of Rogoznica Lake revealed by 16S rRNA analysis. *Journal of Marine Systems*, 172, str. 14–23. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.03.003>.

Čanković, M. (2018) Molekularna karakterizacija prokariotskih zajednica u euksinom okolišu Rogozničkoga jezera. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.

Čanković, M., Žučko, J., Radić, I. D., Janeković, I., Petrić, I., Ciglencečki, I. i Collins, G. (2019) Microbial diversity and long-term geochemical trends in the euxinic zone of a marine, meromictic lake. *Systematic and Applied Microbiology*, 42(6). Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2019.126016>.

Čanković, M., Petrić, I., Margu, M. i Ciglencečki, I. (2020) Impact of euxinic holomictic conditions on prokaryotic assemblages in a marine meromictic lake. *Aquatic Microbial Ecology*, 84, str. 141-154. Dostupno na: <https://doi.org/10.3354/ame01931>.

Ćosović, B., Ciglencečki, I., Viličić, D. i Ahel, M. (2000) Distribution and seasonal variability of organic matter in a small eutrophicated salt lake. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(6), str. 705-715. Dostupno na: <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0721>.

Dautović, J., Dominović, I., Simonović, N. i Ciglencečki, I. (2026) Organic carbon in the water column and sediment of the eastern Adriatic Sea coastal and transitional waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 329. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109659>.

Dawson, M.N., Martin, L.E. i Penland, L.K. (2001) Jellyfish swarms, tourists, and the Christ-child. *Hydrobiologia*, 451(1), str. 131–144. Dostupno na: <https://doi.org/10.1023/A:1011868925383>.

Deltares (2023) Delft3D-Flow User Manual. Delft, Nizozemska, str. 523.

Denamiel, C. i Vilibić, I. (2023) Next generation atmosphere-ocean climate modelling for storm surge hazard projections. *EGUsphere*, 2023, str. 1–30. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-913>.

Deocampo, D. i Jones, B. (2014) Geochemistry of Saline Lakes. U J.I. Drever (ur.) *Treatise on Geochemistry: Surface and Groundwater, Weathering, and Soils*. 2. izd., str. 437–469. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00515-5>.

Dietz, S., Lessmann, D. i Boehrer, B. (2012) Contributions of solutes to density stratification in a meromictic lake (Waldsee/Germany). *Mine Water and the Environment*, 31(2), str. 129–137.

Dominović, I. (2020) Koherentnost promjena razine mora na Blitvenici i u Splitu. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Dominović, I., Dutour-Sikirić, M., Marguš, M., Bakran-Petricioli, T., Petricioli, D., Geček, S. i Ciglencečki, I. (2023) Deoxygenation and stratification dynamics in a coastal marine lake. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108420>.

Dominović, I., Marguš, M., Bakran-Petricioli, T., Petricioli, D., Ciglencečki, I. i Vilibić, I. (2024) Observing lake-sea tidally driven water exchange in Lake Zmajevsko (Rogoznica, Croatia). *Acta Adriatica*, 65(2), str. 179–192. Dostupno na: <https://doi.org/10.32582/aa.65.2.6>.

Dong, F., Mi, C., Hupfer, M., Lindenschmidt, K. E., Peng, W., Liu, X. i Rinke, K. (2020) Assessing vertical diffusion in a stratified lake using a three-dimensional hydrodynamic model. *Hydrological Processes*, 34(5), str. 1131–1143. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/hyp.13653>.

Džaja, K. (2003) Geomorfološke značajke Dugog otoka. *Geoadria*, 8(2), str. 5–44. Dostupno na: <https://doi.org/10.15291/geoadria.98>.

Jelić, D., Duplić, A., Čaleta, M., Žutinić, P. (2008) *Endemske vrste riba jadranskog sliva*. Zagreb: Agencija za zaštitu okoliša.

Feldbauer, J., Mesman, J. P., Andersen, T. K. i Ladwig, R. (2025) Learning from a large-scale calibration effort of multiple lake temperature models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(4), str. 1183–1199. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/hess-29-1183-2025>.

Fiket, Ž., Mlakar, M. i Kniewald, G. (2018) Distribution of rare earth elements in sediments of the marine Lake Mir (Dugi Otok, Croatia). *Geosciences*, 8(8), str. 301. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/geosciences8080301>.

Fleury, P., Bakalowicz, M. i de Marsily, G. (2007) Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *Journal of Hydrology*, 339(1–2). Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.009>.

Fuke, Y., Musikasinthorn, P., Kano, Y., Tabata, R., Matsui, S., Tun, S., Yun, L.K.C., Touch, B., Thach, P. i Watanabe, K. (2024) Origin of endemic species in a moderately isolated ancient lake: The case of a

snakehead in Inle Lake, Myanmar. *Zoologica Scripta*, 53(1), str. 16–31. Dostupno na: <https://doi.org/10.1111/zsc.12633>.

Gai, B., Boehrer, B., Sun, J., Li, Y., Lin, B. i Shatwell, T. (2024) Vertical water age and water renewal in a large riverine reservoir. *Journal of Hydrology*, 631. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130701>.

Gasse, F. i Fontes, J.-C. (1989) Palaeoenvironments and palaeohydrology of a tropical closed lake (Lake Asal, Djibouti) since 10,000 yr B.P. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 69, str. 67–102. Dostupno na: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90156-9](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90156-9).

Grégoire, M., Oschlies, A., Canfield, D., Castro, C., Ciglencčki, I., Croot, P., Salin, K., Schneider, B., Serret, P., Slomp, C.P., Tesi, T., Yücel, M. (2023) *Ocean oxygen: The role of the ocean in the oxygen we breathe and the threat of deoxygenation*. Future Science Brief No. 10 of the European Marine Board, Ostend, Belgium.

Hammer, U.T. (1986) *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dordrecht: Science & Business Media.

Hamner, W.M., Gilmer, R.W. i Hamner, P.P. (1982) The physical, chemical, and biological characteristics of a stratified, saline, sulfide lake in Palau. *Limnology and Oceanography*, 27(5), str. 896–909. Dostupno na: <https://doi.org/10.4319/lo.1982.27.5.0896>.

Hamner, W.M. i Hamner, P.P. (1998) Stratified marine lakes of palau (Western Caroline islands). *Physical Geography*, 19(3), str. 175–220. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/02723646.1998.10642647>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ..., Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), str. 1999–2049. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Holgerson, M. A., Richardson, D. C., Roith, J., Bortolotti, L. E., Finlay, K., Hornbach, D. J., Gurung, K., Ness, A., Andersen, M.R., Bansal, S., Finlay, J.C., Cianci-Gaskill, J.A., Hahn, S., Janke, B.D., McDonald, C., Mesman, J.P., North, R.L., Roberts, C.O., Sweetman, J.N i Webb, J. R. (2022) Classifying mixing regimes in ponds and shallow lakes. *Water Resources Research*, 58(7). Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2022WR032522>.

Idso, S.B. (1973) On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography*, 18(4), str. 681–683. Dostupno na: <https://doi.org/10.4319/lo.1973.18.4.0681>.

Ilijanić, N. (2014) Minerali glina u jezerskim sedimentima istočno jadranske obale kao pokazatelji promjena okoliša tijekom kasnog pleistocena i holocena. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.

Izhitskiy, A. S., Kirillin, G. B., Goncharenko, I. V., Kurbaniyazov, A. K. i Zavialov, P. O. (2021) The world's largest heliothermal lake newly formed in the Aral Sea basin. *Environmental Research Letters*, 16(11). Dostupno na: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2d66>.

Jane, S. F., Hansen, G. J., Kraemer, B. M., Leavitt, P. R., Mincer, J. L., North, R. L., Pilla, R.M., Stetler, J.T., Williamson, C.E., Woolway, R.I., Arvola, L., Chandra, S., DeGasperi, C.L., Diemer, L., Dunalska, J., Erina, O., Flaim, G., Grossart, H.-P., Hambright, K.D., Hein, C., Hejzlar, J., Janus, L.L., Jenny, J.-P., Jones,

J.R., Knoll, L.B., Leoni, B., Mackay, E., Matsuzaki, S.-I.S., McBride, C., Müller-Navarra, D.C., Paterson, A.M., Pierson, D., Rogora, M., Rusak, J.A., Sadro, S., Saulnier-Talbot, E., Schmid, M., Sommaruga, R., Thiery, W., Verburg, P., Weathers, K.C., Weyhenmeyer, G.A., Yokota, K. i Rose, K. C. (2021) Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861), str. 66–70. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>.

Jansen, J., Simpson, G. L., Weyhenmeyer, G. A., Härkönen, L. H., Paterson, A. M., del Giorgio, P. A. i Prairie, Y. T. (2024) Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nature Climate Change*, 14(8), str. 832–838. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02058-3>.

Kacikoc, M., Dadaser-Celik, F. i Beyhan, M. (2025) Modelling hydrodynamics and water quality in a brackish water lake under scarce data availability – A case study at the Bafa Lake, Türkiye. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(6), str. 373. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07955-7>.

Kirkland, D.W., Bradbury, J.P. i Dean, W.E. (1980) *The Heliothermic Lake: A Direct Method of Collecting and Storing Solar Energy*. US Geological Survey. Dostupno na: <https://doi.org/10.3133/ofr80807>.

Kraemer, B. M., Anneville, O., Chandra, S., Dix, M., Kuusisto, E., Livingstone, D. M., Rimmer, A., Schladow, S. G., Silow, E., M. Sitoki, L., Tamatamah, R., Vadeboncoeur, Y. i McIntyre, P. B. (2015) Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 42(12), str. 4981–4988. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/2015gl064097>.

Kranenburg, W., Tiessen, M., Veenstra, J., de Graaff, R., Uittenbogaard, R., Bouffard, D., Sakindi, G., Umutoi, A., Van de Walle, J., Thiery, W. i van Lipzig, N. (2020) 3D-modelling of Lake Kivu: Horizontal and vertical flow and temperature structure under spatially variable atmospheric forcing. *Journal of Great Lakes Research*, 46(4), str. 947–960. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.012>.

Kršinić, F., Carić, M., Viličić, D., Ciglencečki, I. (2000) The calanoid copepod *Acartia italica* Steuer, phenomenon in the small saline Lake Rogoznica (Eastern Adriatic coast). *Journal of Plankton Research*, 22(8), str. 1441–1464. Dostupno na: <https://doi.org/10.1093/plankt/22.8.1441>.

Lee, M.-C. i Stenstrom, M.K. (2023) Water quality mitigation strategy analysis of the Salton Sea, California, using the Delft-3D modeling suite. *Frontiers in Sustainable Resource Management*, 2. Dostupno na: <https://doi.org/10.3389/fsrma.2023.1178038>.

Legović, T., Gržetić, Z. i Žutić, V. (1991) Subsurface temperature maximum in a stratified estuary. *Marine Chemistry*, 32(2), str. 163–170. Dostupno na: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(91\)90035-U](https://doi.org/10.1016/0304-4203(91)90035-U).

Lerman, A., Imboden, D.M. i Gat, J.R. (ur.) (1995) *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85132-2>.

Li, Z., Lian, T., Ying, J., Zhu, X. H., Papa, F., Xie, H. i Long, Y. (2021) The cause of an extremely low salinity anomaly in the Bay of Bengal during 2012 spring. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(10). Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2021jc017361>.

Mackenzie, F. T., Vink, S., Wollast, R. i Chou, L. (1995) Comparative geochemistry of marine saline lakes. U: A. Lerman, D.M. Imboden i J.R. Gat (ur.) *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer, str. 265–278. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-642-85132-2_9.

Malešević, N., Ciglencečki, I., Bura-Nakić, E., Carić, M., Dupčić, I., Hrustić, E., Viličić, D. i Ljubešić, Z. (2015) Diatoms in an extreme euxinic environment (Rogoznica Lake, eastern Adriatic coast). *Acta Botanica Croatica*, 74(2), str. 333–343. Dostupno na: <https://doi.org/10.1515/botcro-2015-0031>.

Marguš, M., Morales-Reyes, I., Bura-Nakić, E., Batina, N. i Ciglencečki, I. (2015) The anoxic stress conditions explored at the nanoscale by Atomic Force Microscopy in highly eutrophic and sulphidic marine lake. *Continental Shelf Research*, 109, str. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.09.001>.

Marguš, M., Ahel, M., Čanković, M., Ljubešić, Z., Terzić, S., Kobasić, V. H. i Ciglencečki, I. (2023) Phytoplankton pigment dynamics in marine lake fluctuating between stratified and holomictic euxinic conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114931>.

Martin, L. E., Dawson, M. N., Bell, L. J. i Colin, P. L. (2006) Marine lake ecosystem dynamics illustrate ENSO variation in the tropical western Pacific. *Biology Letters*, 2(1), str. 144.-147. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2005.0382>.

Martinić, I., Čanjevac, I., Vučković, I., Buzjak, N. i Valozić, L. (2019) Hidromorfološko stanje prirodnih jezera u Hrvatskoj. U: D. Biondić, D. Holjević, M. Vizner (ur.) *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama*. Zagreb: Hrvatske vode, str. 321.-330.

Martyr-Koller, R. C., Kernkamp, H. W. J., Van Dam, A., van der Wegen, M., Lucas, L. V., Knowles, N., Jaffe B. i Fregoso, T. A. (2017) Application of an unstructured 3D finite volume numerical model to flows and salinity dynamics in the San Francisco Bay-Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 192, str. 86–107. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.04.024>.

Marullo, S., Artale, V. i Santoleri, R. (2011) The SST multidecadal variability in the Atlantic–Mediterranean region and Its relation to AMO. *Journal of Climate*, 24(16), str. 4385–4401. Dostupno na: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3884.1>.

Mateša, S., Dominović, I., Marguš, M. i Ciglencečki, I. (2025) Reduced sulfur species in a marine euxinic environment of Rogoznica Lake – Dragon Eye, Croatia. *Acta Adriatica*, 66(1). Dostupno na: <https://doi.org/10.32582/aa.66.1.1>.

Matić, F., Džoić, T., Kalinić, H., Čatipović, L., Udovičić, D., Juretić, T., Rakuljić, L., Sršen, D. i Tičina, V. (2022) Observation of abrupt changes in the Sea surface layer of the Adriatic Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/jmse10070848>.

Medvedev, I.P., Vilibić, I. i Rabinovich, A.B. (2020) Tidal resonance in the Adriatic Sea: Observational evidence. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8). Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2020JC016168>.

Mendes, J., Ruela, R., Picado, A., Pinheiro, J. P., Ribeiro, A. S., Pereira, H. i Dias, J. M. (2021) Modeling dynamic processes of Mondego Estuary and Óbidos Lagoon using Delft3D. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/jmse9010091>.

Meybeck, M. (1995) Global Distribution of Lakes. U: A. Lerman, D.M. Imboden i J.R. Gat (ur.) *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer, str. 1–35. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-642-85132-2_1.

Michael, H.A., Charette, M.A. i Harvey, C.F. (2011) Patterns and variability of groundwater flow and radium activity at the coast: A case study from Waquoit Bay, Massachusetts. *Marine Chemistry*, 127(1), str. 100–114. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.08.001>.

Mifka, B., Telišman Prtenjak, M., Kuzmić, J., Čanković, M., Mateša, S. i Ciglencečki, I. (2022) Climatology of dust deposition in the Adriatic Sea; A possible impact on marine production. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7). <https://doi.org/10.1029/2021jd035783>.

Mihelčić, G. (1994) Geokemijske i sedimentološke značajke zatvorenog anoksičnog morskog bazena (Rogozničko jezero). Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.

Mihelčić, G., Šurija, B., Juračić, M., Barišić, D. i Branica, M. (1996) History of the accumulation of trace metals in sediments from the saline Rogoznica Lake (Croatia). *Science of the Total Environment*, 182 (1-3), str. 105–115. Dostupno na: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)05058-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)05058-2).

Millero, F.J. (2005) *Chemical Oceanography*. 3. izd. Boca Raton: CRC Press. Dostupno na: <https://doi.org/10.1201/9780429258718>.

Mlakar, M., Fiket, Ž., Geček, S., Cukrov, N. i Cuculić, V. (2015) Marine lake as an in situ laboratory for studies of organic matter influence on speciation and distribution of trace metals. *Continental Shelf Research*, 103, str. 1–11. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.04.024>.

Nezirović, S. (2016) Revitalization of degraded areas of the Tuzla basin and forming artificial lakes in the function of tourism development. *Aerul și Apa: Componente ale Mediului*, str. 241–248. Dostupno na: https://doi.org/10.17378/awc2016_31.

Nezirović, S. i Krdžalić, D. (2024) Pannonian salt lakes in the city of Tuzla as an example of a creative destination in the 21st century tourism. *Journal of Tourism and Hospitality Managements*, 199. Dostupno na: <https://doi.org/10.35666/25662880.2024.10.199>.

Ni, W., Li, M., Ross, A. C. i Najjar, R. G. (2019) Large projected decline in dissolved oxygen in a eutrophic estuary due to climate change. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), str. 8271–8289. Dostupno: <https://doi.org/10.1029/2019JC015274>.

Notaro, M., Holman, K., Zarrin, A., Fluck, E., Vavrus, S. i Bennington, V. (2013) Influence of the Laurentian Great Lakes on regional climate. *Journal of Climate*, 26(3), str. 789–804. Dostupno na: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00140.1>.

Oleksy, I.A. i Richardson, D.C. (2021) Climate change and teleconnections amplify lake stratification with differential local controls of surface water warming and deep water cooling. *Geophysical Research Letters*, 48(5). Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2020GL090959>.

Pai, S. C., Su, Y. T., Lu, M. C., Chou, Y. i Ho, T. Y. (2021) Determination of nitrate in natural waters by vanadium reduction and the griess assay: Reassessment and optimization. *ACS ES&T Water*, 1(6), str. 1524–1532. Dostupno na: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00065>.

Panđa, L. (2020) Geoprostorne tehnologije u modeliranju i promociji zaštićenih područja na primjeru jezera Zmajevo oko. Diplomski rad. Zadar: Sveučilište u Zadru, Odsjek za Geografiju.

Pawlowicz, R., Beardsley, B. i Lentz, S. (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), str. 929–937. Dostupno na: [https://doi.org/10.1016/s0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/s0098-3004(02)00013-4).

Peharda, M. i Vilibić, I. (2008) Modelling the recruitment effect in a small marine protected area: The example of saltwater lakes on the Island of Mljet (Adriatic Sea). *Acta Adriatica*, 49(1).

Pjevac, P., Korlević, M., Berg, J. S., Bura-Nakić, E., Ciglencčki, I., Amann, R. i Orlić, S. (2015) Community shift from phototrophic to chemotrophic sulfide oxidation following anoxic holomixis in a stratified seawater lake. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(1), str. 298–308. Dostupno na: <https://doi.org/10.1128/aem.02435-14>.

Rad, A. M., Kreidler, J., Abatzoglou, J. T., Fallon, K., Roche, K. R. i Sadegh, M. (2022) Anthropogenic stressors compound climate impacts on inland lake dynamics: The case of Hamun Lakes. *Science of The Total Environment*, 829, str. 154419. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154419>.

Råman Vinnå, L., Medhaug, I., Schmid, M. i Bouffard, D. (2021) The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth & Environment*, 2(1). Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>.

Rifaat, A. E., Mohamed, E. E., Deghady, E. M., El-Mamoney, M. H. i Maiyza, H. E. (2023) Hydrodynamic and circulation pattern in Lake Burullus, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 49(2), str. 171–179. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.12.002>.

Rogozin, D., Zadereev, E., Prokopkin, I., Tolomeev, A., Barkhatov, Y., Khromechek, E., Degermendzhi, N., Drobotov, A. i Degermendzhi, A. (2017) Comparative study of the stability of stratification and the food web structure in the meromictic lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia). U: R.D. Gulati, E.S. Zadereev i A.G. Degermendzhi (ur.) *Ecology of Meromictic Lakes*. Cham: Springer International Publishing, str. 89–124. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_5.

Roselli, L., Fabbrocini, A., Manzo, C. i D'Adamo, R. (2009) Hydrological heterogeneity, nutrient dynamics and water quality of a non-tidal lentic ecosystem (Lesina Lagoon, Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(4), str. 539–552. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.07.023>.

Rubinić, J., Katalinić, A., Švonja, M., Gabrić, I., Bušelić, G. i Čuže, M. (2009). Salinisation of Vrana Lake in Dalmatia within the context of anthropogenic influences and climate changes (situation in 2008). U: Bonacci, O. i Juračić, M. (ur.) *International interdisciplinary scientific conference sustainability of the karst environment-Dinaric karst and other karst regions*. Str. 123-124.

Rubinić, J. i Katalinić, A. (2014) Water regime of Vrana Lake in Dalmatia (Croatia): Changes, risks and problems. *Hydrological Sciences Journal*, 59(10), str. 1908–1924. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.946417>.

Ruić, K., Šepić, J., Mlinar, M. i Međugorac, I. (2023) Contribution of high-frequency ($T < 2$ h) sea level oscillations to the Adriatic Sea level maxima. *Natural Hazards*, 116(3), str. 3747–3777. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05834-0>.

Schultze, M., Bohrer, B., Wendt-Potthoff, K., Katsev, S. i Brown, E. T. (2017) Chemical setting and biogeochemical reactions in meromictic lakes. U: R.D. Gulati, E.S. Zadereev i A.G. Degermendzhi (ur.)

Ecology of Meromictic Lakes. Cham: Springer International Publishing, str. 35–59. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_3.

Sheraliev, B., Kayumova, Y., Allayarov, S., Rozimov, A., Komilova, D., Urmonova, D. i Peng, Z. (2022) Length–weight relations of 14 endemic and indigenous freshwater fish species (Actinopterygii) from the Aral Sea basin, Uzbekistan. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 52, str. 239–243. Dostupno na: <https://doi.org/10.3897/aiep.52.89279>.

Shiklomanov, I.A. (1993) World fresh water resources. U: P.H. Gleick (ur.) *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press.

Simonović, N., Dominović, I., Marguš, M., Matek, A., Ljubešić, Z. i Ciglencečki, I. (2023) Dynamics of organic matter in the changing environment of a stratified marine lake over two decades. *Science of the total environment*, 865, str. 161076. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161076>.

Sironić, A., Barešić, J., Horvatinčić, N., Brozinčević, A., Vurnek, M. i Kapelj, S. (2017) Changes in the geochemical parameters of karst lakes over the past three decades – The case of Plitvice Lakes, Croatia. *Applied Geochemistry*, 78, str. 12–22. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.11.013>.

Stanić, I., Kajan, K., Selak, L. i Orlić, S. (2025) Environmental drivers of microbial assembly and stability in lakes across biogeographical regions. *Ecological Indicators*, 172. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113324>.

Strickland, J.D.H. i Parsons, T.R. (1972) *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Ottawa: Fisheries Research Board of Canada. Dostupno na: <https://doi.org/10.25607/OBP-1791>.

Sowińska, W., Dudkowska, A., Matciak, M., Brodziński, W. i Misiewicz, M. M. (2025) Physical drivers of salinity in a southern Baltic coastal lagoon: A selective modeling approach. *Water*, 17(17). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/w17172630>.

Šarović, K. i Klaić, Z.B. (2023) Effect of climate change on water temperature and stratification of a small, temperate, Karstic Lake (Lake Kozjak, Croatia). *Environmental Processes*, 10(4), str. 49. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00663-6>.

Šepić, J., Vilibić, I., Lafon, A., Macheboeuf, L. i Ivanović, Z. (2015) High-frequency sea level oscillations in the Mediterranean and their connection to synoptic patterns. *Progress in Oceanography*, 137, str. 284–298. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.005>.

Šepić, J., Pasarić, M., Međugorac, I., Vilibić, I., Karlović, M. i Mlinar, M. (2022) Climatology and process-oriented analysis of the Adriatic Sea level extremes. *Progress in Oceanography*, 209. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-4090>.

Tait, D. R., Santos, I. R., Erler, D. V., Befus, K. M., Cardenas, M. B. i Eyre, B. D. (2013) Estimating submarine groundwater discharge in a South Pacific coral reef lagoon using different radioisotope and geophysical approaches. *Marine Chemistry*, 156, str. 49–60. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2013.03.004>.

Tasnim, B., Fang, X., Hayworth, J. S. i Tian, D. (2021) Simulating nutrients and phytoplankton dynamics in lakes: Model development and applications. *Water*, 13(15), str. 2088. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/w13152088>.

Terzić, E., Gardiol, C. i Vilibić, I. (2025) Surface saline lakes in the Mediterranean Sea. *Ocean Science*, 21(4), str. 1441–1459. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-3140>.

Turner, J.S. (1973) *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge: Cambridge University Press (Cambridge Monographs on Mechanics). Dostupno na: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608827>.

Verri, G., Furnari, L., Gunduz, M., Senatore, A., Santos da Costa, V., De Lorenzis, A., Fedele, G., Manco, I., Mentaschi, L., Clementi, E., Coppini, G., Mercogliano, P., Mendicino, G. i Pinardi, N. (2024) Climate projections of the Adriatic Sea: Role of river release. *Frontiers in Climate*, 6. Dostupno na: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1368413>.

Vilibić, I., Žuljević, A. i Nikolić, V. (2010) The dynamics of a saltwater marine lake (Big Lake, Island of Mljet, Adriatic Sea) as revealed by temperature measurements. *Acta Adriatica*, 51(2).

Vilibić, I., Zemunik, P., Dunić, N. i Mihanović, H. (2020) Local and remote drivers of the observed thermohaline variability on the northern Adriatic shelf (Mediterranean Sea). *Continental Shelf Research*, 199, str. 104110. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104110>.

Vuletić, A.A. (1953) Structure geologique du fond du Malo jezero et Veliko jezero sur l'isle de Mljet (Geological structure of the bottom of Malo and Veliko jezero on the island of Mljet). *Acta Adriatica*, 6(1), str. 1–63.

Vurnek, M., Brozinčević, A., Kepčija, R. M. i Frketić, T. (2021) Analyses of long-term trends in water quality data of the Plitvice Lakes National Park. *Fundamental and Applied Limnology*, str. 155–169. Dostupno na: <https://doi.org/10.1127/fal/2020/1369>.

Waiser, M. i Robarts, R. (2009) *Saline inland waters*. U: G.E. Likens (ur.) *Encyclopedia of inland waters*. Academic Press, str. 634–644. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00028-4>.

Wang, J., Yang, B., Ljungqvist, F. C., Luterbacher, J., Osborn, T. J., Briffa, K. R. i Zorita, E. (2017) Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate variability over the past 1,200 years. *Nature Geoscience*, 10(7), str. 512–517. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/ngeo2962>.

Wang, J. H., Li, C., Xu, Y. P., Li, S. Y., Du, J. S., Han, Y. P. i Hu, H. Y. (2021) Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed. *Journal of Cleaner Production*, 315. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128144>.

Wang, X., Chen, Y., Li, Z., Fang, G., Wang, F. i Liu, H. (2020) The impact of climate change and human activities on the Aral Sea Basin over the past 50 years. *Atmospheric Research*, 245. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105125>.

Wang, X., Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., Zhang, Y., Wang, W., Iestyn Woolway, R., Piao, S. i Jeppesen, E. (2023) Climate change drives rapid warming and increasing heatwaves of lakes. *Science Bulletin*, 68(14), str. 1574–1584. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.06.028>.

Wetzel, R.G. (2001a) Fate of heat. U: R.G. Wetzel (ur.) *Limnology (Third Edition)*. San Diego: Academic Press, str. 71–92. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50010-1>.

Wetzel, R.G. (2001b) Rivers and lakes - their distribution, origins, and forms. U: R.G. Wetzel (ur.) *Limnology (Third Edition)*. San Diego: Academic Press, str. 15–42. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50007-1>.

Williams, W.D. (1964) A contribution to lake typology in Victoria, Australia. *SIL Proceedings*, 1922-2010, 15(1), str. 158–168. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/03680770.1962.11895517>.

Winter, T.C. (1995) Hydrological processes and the water budget of lakes. U: A. Lerman, D.M. Imboden i J.R. Gat (ur.) *Physics and Chemistry of Lakes*. Berlin, Heidelberg: Springer, str. 37–62. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-642-85132-2_2.

Woolway, R. I. i Merchant, C. J. (2019) Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 12. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x>.

Woolway, R. I., Weyhenmeyer, G. A., Schmid, M., Dokulil, M. T., de Eyto, E., Maberly, S. C., May, L. i Merchant, C. J. (2019) Substantial increase in minimum lake surface temperatures under climate change. *Climate Change*, 155. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02465-y>.

Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M. i Sharma, S. (2020) Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8). str. 388–403. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>.

Woolway, R. I., Sharma, S., Weyhenmeyer, G. A., Debolskiy, A., Golub, M., Mercado-Bettín, D., Perroud, M., Stepanenko, V., Tan, Z., Grant, L., Ladwig, R., Mesman, J., N. Moore, T., Shatwell, T., Vanderkelen, I., A. Austin, J., L. DeGasperi, C., Dokulil, M., La Fuente, S., B. Mackay, E., Schladow, S. G., Watanabe, S., Marcé, R., C. Pierson, D., Thiery, W. i Jennings, E. (2021) Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications*, 12(1), str. 1–11. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>.

Woolway, R.I., Sharma, S. i Smol, J.P. (2022) Lakes in hot water: The impacts of a changing climate on aquatic ecosystems. *BioScience*, 72(11), str. 1050–1061. Dostupno na: <https://doi.org/10.1093/biosci/biac052>.

Xia, P., Peng, J., Gu, T., Yu, S. i Xu, Z. (2025) Lake-related ecosystem services facing social–ecological risks. *People and Nature*, 7(4), str. 734–751. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/pan3.70015>.

Yanina, T., Sorokin, V., Bezrodnykh, Y. i Romanyuk, B. (2018) Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data). *Quaternary International*, 465, str. 130–141. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.003>.

Yu, X., Xin, P., Lu, C., Robinson, C., Li, L. i Barry, D. A. (2017) Effects of episodic rainfall on a subterranean estuary. *Water Resources Research*, 53(7), str. 5774–5787. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/2017WR020809>.

Zadereev, E.S., Gulati, R.D. i Camacho, A. (2017) Biological and ecological features, trophic structure and energy flow in meromictic lakes. U: R.D. Gulati, E.S. Zadereev i A.G. Degermendzhi (ur.) *Ecology of Meromictic Lakes*. Cham: Springer International Publishing, str. 61–86. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49143-1_4.

Zaninović, K., Gajic-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katusin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L. i Vučetić, V. (2008) *Climate atlas of Croatia: 1961-1990. 1971-2000*. Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod.

Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., Bermúdez, M. i Ortega-Sánchez, M. (2023) Measurements and modeling of water levels, currents, density, and wave climate on a semi-enclosed tidal bay, Cádiz (southwest Spain). *Earth System Science Data*, 15(7), str. 3095–3110. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/essd-15-3095-2023>.

Zavialov, P. (2005) *Physical Oceanography of the Dying Aral Sea*. Berlin, Heidelberg: Springer, str. 5–13. Dostupno na: https://doi.org/10.1007/3-540-27234-8_2.

Zhang, C., Chen, L. i Brett, M.T. (2024) Adaptation of wind drag coefficient parameterization: improvement of hydrodynamic modeling by a wave-dependent c_d in large shallow lakes. *Water Resources Research*, 60(5), str. e2023WR035914. Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2023WR035914>.

Žic, V., Truesdale, V.W. i Cukrov, N. (2008) The distribution of iodide and iodate in anchialine cave waters — Evidence for sustained localised oxidation of iodide to iodate in marine water. *Marine Chemistry*, 112(3), str. 168–178. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.09.001>.

Žic, V., Truesdale, V. W., Garnier, C. i Cukrov, N. (2012) The distribution of iodine in the Croatian marine lake, Mir – The missing iodate. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 115, str. 377–387. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.07.026>.

Žic, V., Carić, M. i Ciglencečki, I. (2013) The impact of natural water column mixing on iodine and nutrient speciation in a eutrophic anchialine pond (Rogoznica Lake, Croatia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 133, str. 260–272. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.09.008>.

Korespondencija (kronološki)

Kirillin, G. (srpanj 2023.) Usmena korespondencija
email: georgiy.kirillin@igb-berlin.de

Gljuščić, E. (lipanj 2024.) Pismena korespondencija
email: edi.gljuscic@irb.hr

Boehrer, B. (srpanj 2024.) Usmena korespondencija
email: bertram.boehrer@ufz.de

Vidal-Hurtado, J. (srpanj–listopad 2024.) Usmena i pismena korespondencija
email: javier.vidal-hurtado@edf.fr

Giaiotti, D. (srpanj 2025.) Usmena korespondencija
email: dario.giaiotti@arpa.fvg.it

Petricioli, D. (listopad 2025.) Pismena korespondencija
email: contact@diiv.hr

Ciglencečki-Jušić, I. (siječanj 2026.) Usmena korespondencija
email: irena@irb.hr

Internetski izvori (kronološki)

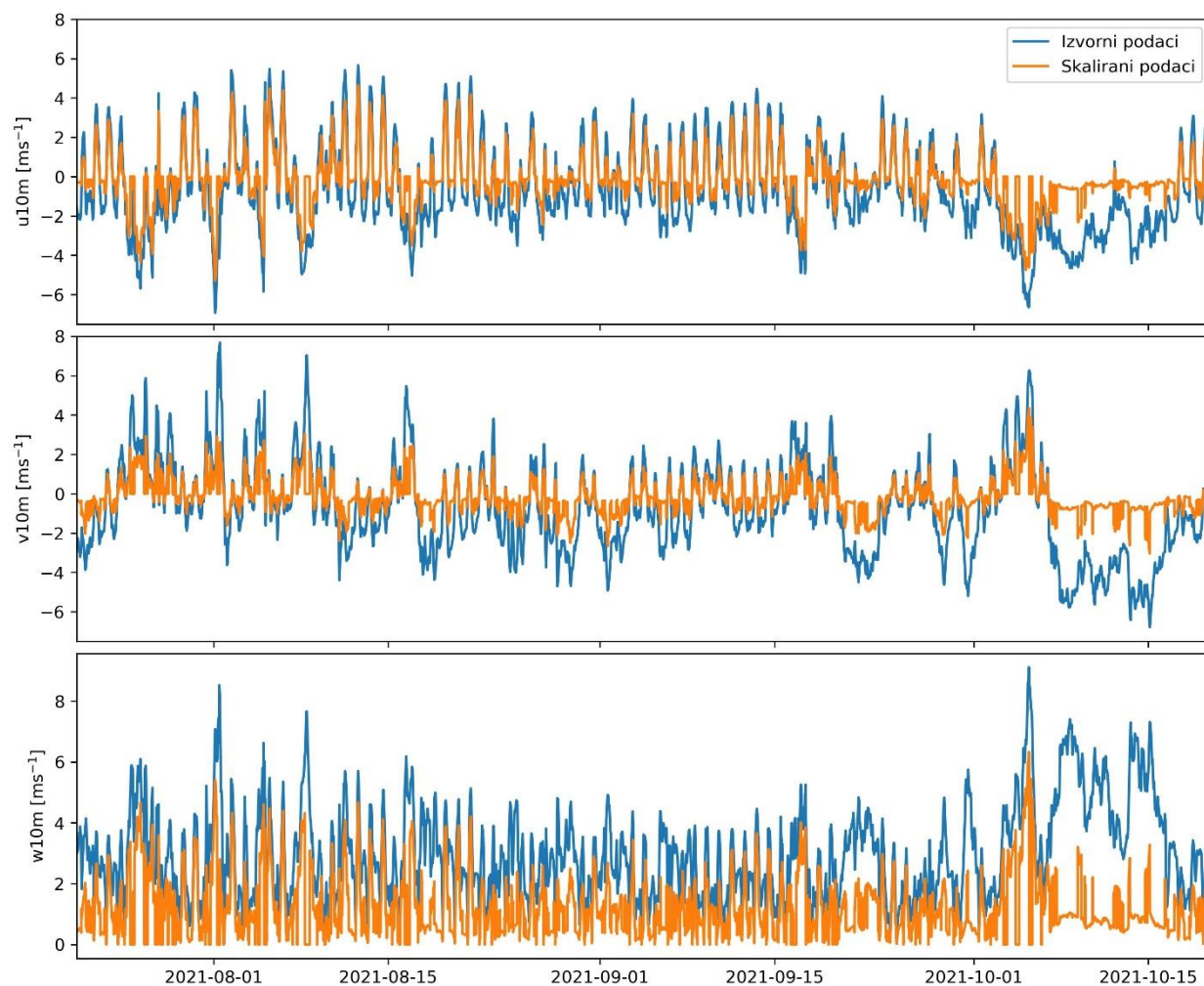
Pozadinska karta za prikaz lokacija mjerenja (slika 3.1). Dostupno na:
<http://preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web> [5. rujna 2024.]

Alat za određivanje nadmorske visine. Dostupno na:
<https://www.freemaptools.com/elevation-finder.htm> [16. srpnja 2025.]

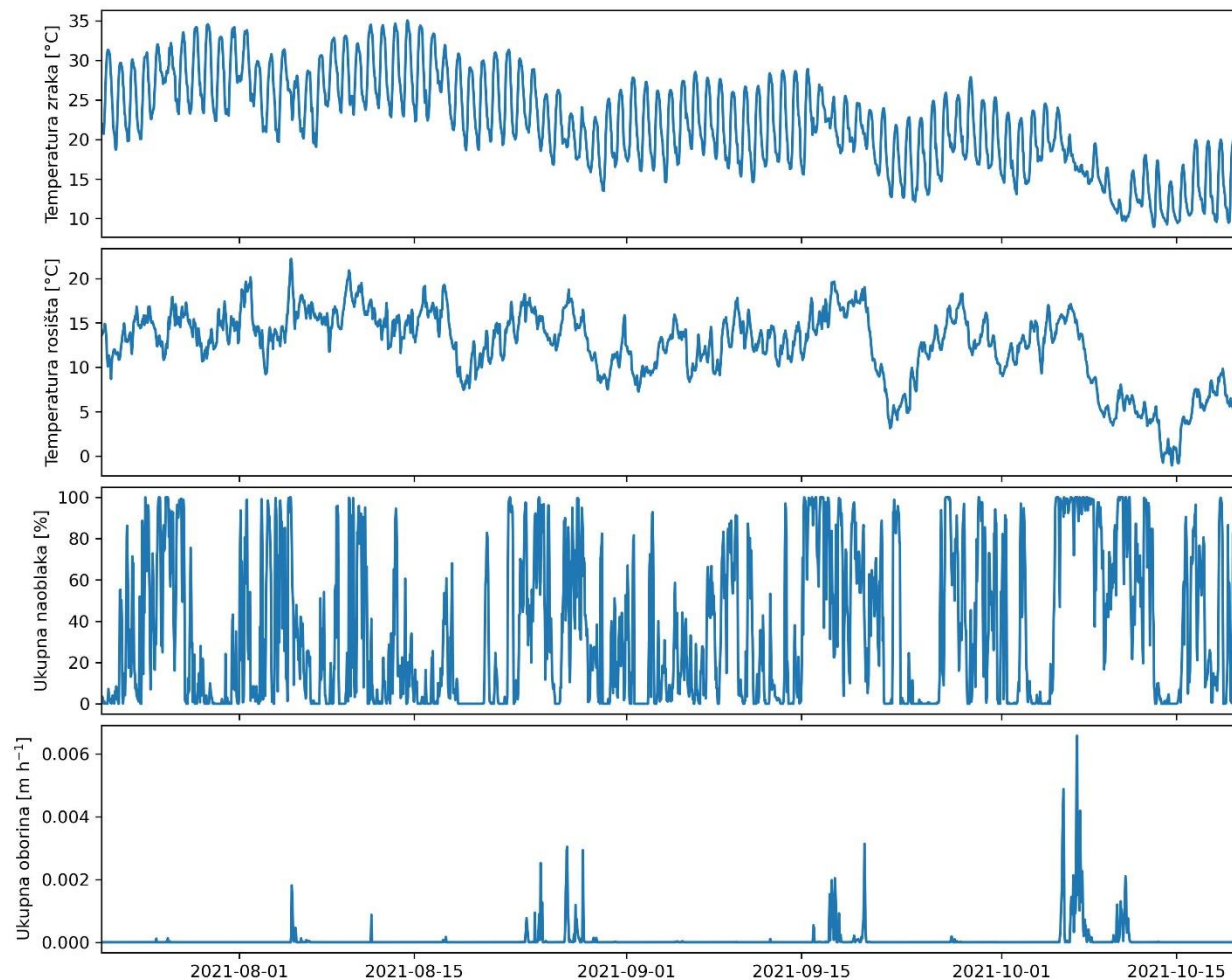
Izvor slika korištenih uređaja proizvođača Solinst (slika 3.3). Dostupno na:
<https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/> [1. listopada 2025.]

Državni hidrometeorološki zavod – klimatološki podaci (Šibenik, Split-Marjan). Dostupno na:
https://meteo.hr/klima.php?section=klima_pracenje¶m=klel [15. listopada 2025.]

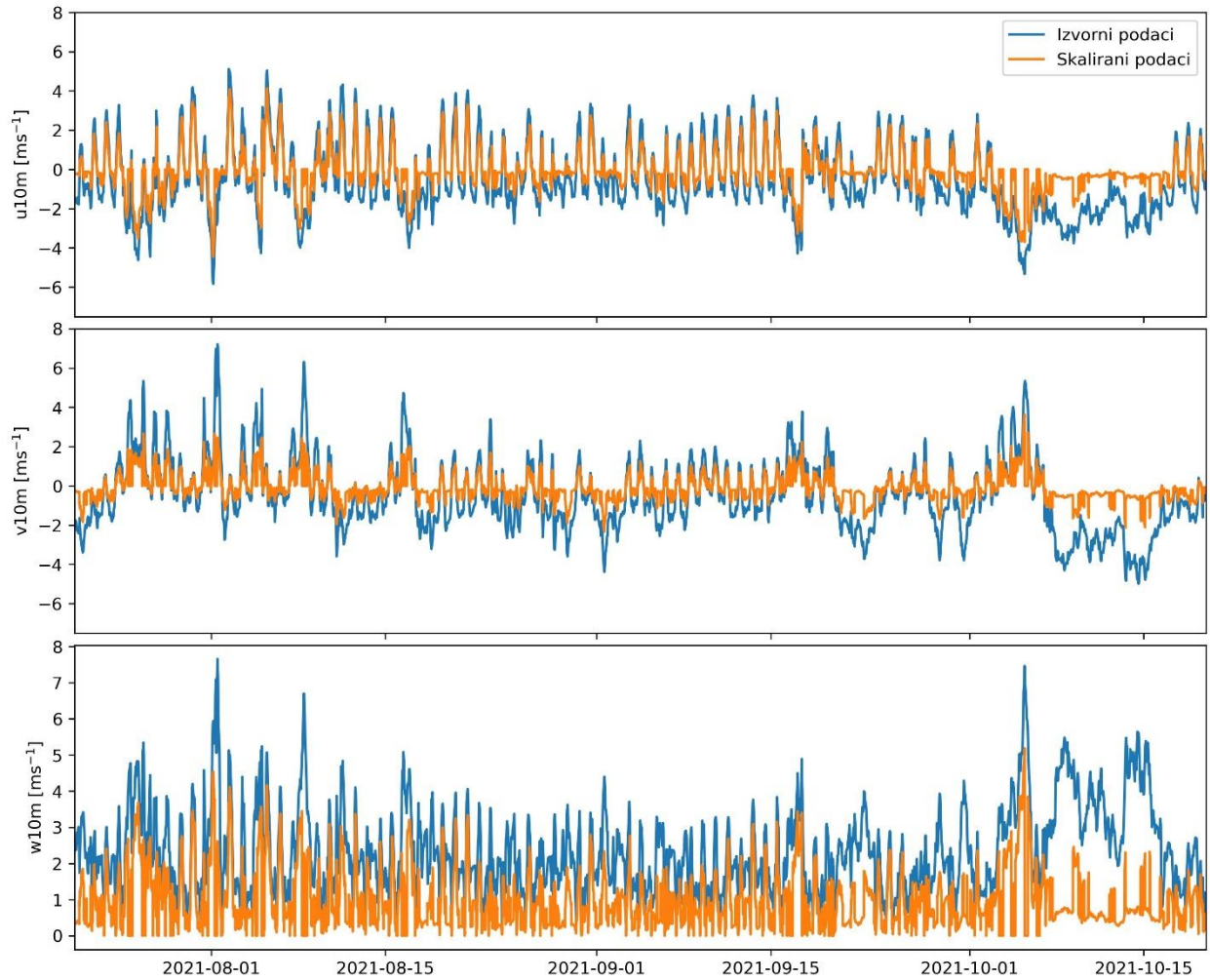
DODATAK A – podaci korišteni za postavljanje i forsiranje modela



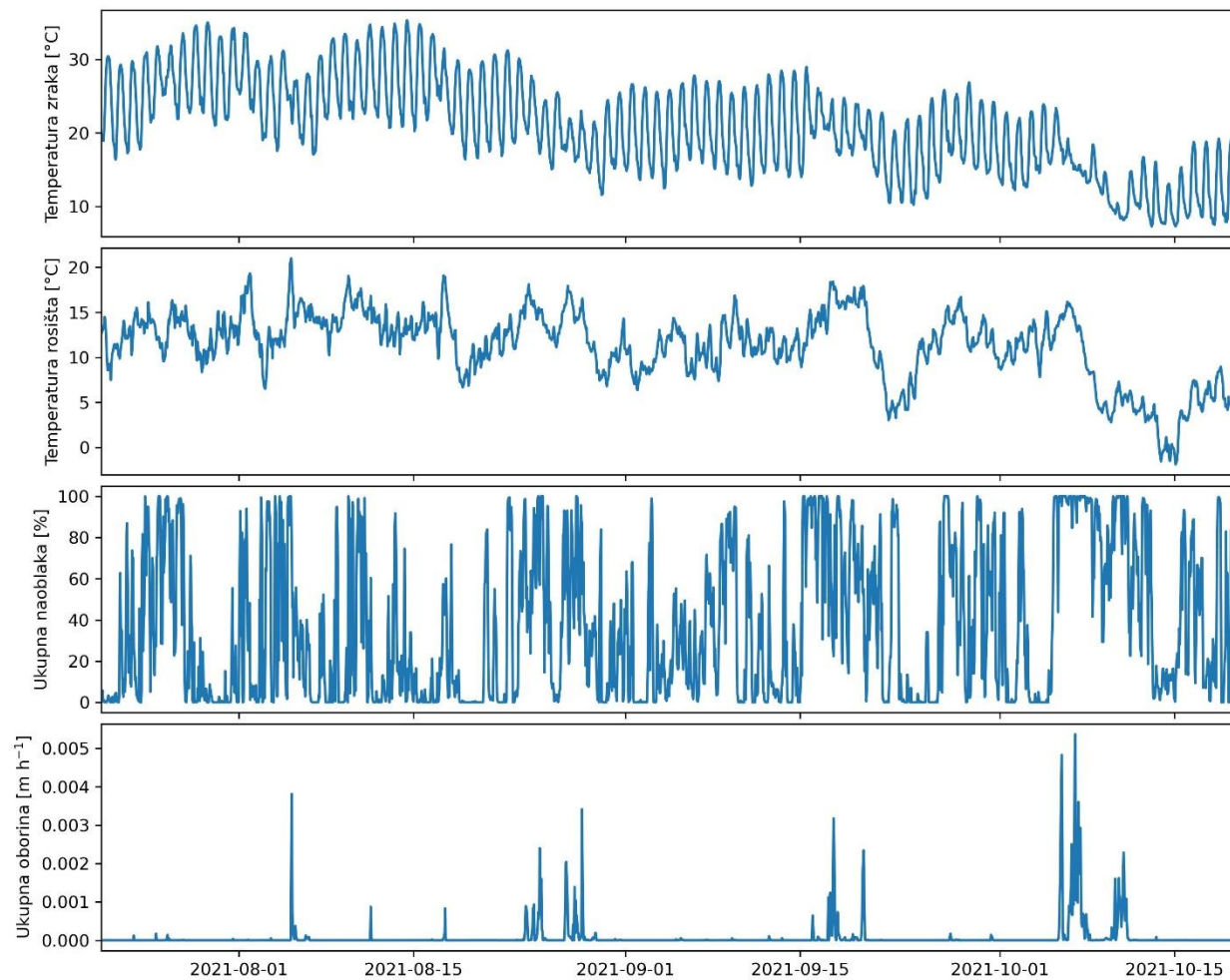
Slika A1.1. Podaci korišteni u simulacijama za 2021. godinu: brzina vjetra na 10 metara visine za sastavnice u (gore; $u10m$) i v (sredina; $v10m$) te ukupna brzina vjetra w (dolje; $w10m = \sqrt{u10m^2 + v10m^2}$) za izvorne ($coeff1.0$) i skalirane vrijednosti ($coeffScale_dir$) za ERA5 točku koordinata ($43,75^\circ$ $16,00^\circ$).



Slika A1.2. Podaci korišteni u simulacijama za 2021. godinu: temperatura zraka i temperatura rosišta na 10 metara visine, ukupna naoblaka i ukupna oborina (redom od vrha prema dolje). Izvorne vrijednosti za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,00°).



Slika A2.1. Podaci korišteni u simulacijama za 2021. godinu: brzina vjetra na 10 metara visine za sastavnice u (gore; u_{10m}) i v (sredina; v_{10m}) te ukupna brzina vjetra w (dolje; $w_{10m} = \sqrt{u_{10m}^2 + v_{10m}^2}$) za izvorne ($coeff1.0$) i skalirane vrijednosti ($coeffScale_dir$) za ERA5 točku koordinata ($43,75^\circ$ $16,25^\circ$).



Slika A2.2. Podaci korišteni u simulacijama za 2021. godinu: temperatura zraka i temperatura rosišta na 10 metara visine, ukupna naoblaka i ukupna oborina (redom od vrha prema dolje). Izvorne vrijednosti za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,25°).

Tablica A1. Popis parametara modela Delft3D FM iz datoteke nastavka *.mdu koji su mijenjani za potrebe ovog istraživanja, a koji su se razlikovali od tvornički zadanih postavki.

Oznaka parametra u *.mdu datoteci	Pojашnjenje	Vrijednosti parametra u simulacijama
<i>Kmx</i>	Broj vertikalnih slojeva	100
<i>Layertype</i>	Vrsta vertikalnih slojeva (2 = z-slojevi; jednolika vertikalna rezolucija)	2
<i>Numtopsig</i>	Broj σ -slojeva iznad z-slojeva	0 10
<i>Turbulencemodel</i>	Model zatvaranja jednadžbi vertikalne turbulencije: 0 (nije uključen), 1 (konstantna VTD), 2 (algebarski), 3 ($k-\epsilon$ model), 4 ($k-\tau$ model). U ovoj notaciji vrijedi: k je trubulentna kinetička energija, τ je vremenska ljestvica turbulencije, a ϵ je stopa disipacije turbulentne kinetičke energije	0 1 2 3 4
<i>Dicoww</i>	VTD za Turbulencemodel = 1	0,1 0 1 10 100 100 ($\times 10^{-6}$) $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
<i>Rainfall</i>	Uključivanje procesa oborine (koja se zatim treba zadati zasebnom datotekom kao meteorološko forsiranje)	0 1
<i>Evaporation</i>	Uključivanje procesa isparavanja	0 1
<i>Temperature</i>	Model za izračun toplinske bilance (5 = oceanski model)	5

Tablica A2. Popis svih simulacija (potpuni nazivi) iz četvrtog poglavlja; dodatak Tablici 4.2.

Potpuni naziv simulacije	Slika	Potpuni naziv simulacije	Slika
coeff1.0_43.25_15.75_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.25_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.25_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.50_15.75_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.50_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.50_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_15.75_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3	4.4	coeff1.0_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain1_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain1_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_3	4.7
coeff0.0_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.1_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.2_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.3_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.4_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.5_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.6_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.7_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.8_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.9_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.00_rain0_evap0_Turbulence_3	4.5	coeff1.0_43.75_16.00_rain1_x1_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain1_x2_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain1_x3_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain1_x4_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_x1_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_x2_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_x3_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_x4_evap0_Turbulence_3	4.8
		coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_0 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_2 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_4	4.9
coeff0.0_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.1_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.2_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.3_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.4_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.5_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.6_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.7_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.8_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff0.9_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.25_rain0_evap0_Turbulence_3	4.6	coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1_x0.1 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1_x1 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1_x10 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1_x100 coeff1.0_43.75_16.25_rain1_evap1_Turbulence_1_x1000	4.1
		coeff0.0_43.75_16.00_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeff0.0_43.75_16.00_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.00_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.00_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.00_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3	4.11
		coeff0.0_43.75_16.25_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeff0.0_43.75_16.25_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeff1.0_43.75_16.25_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.25_rain_x0.0_evap1_Turbulence_3 coeffScale_dir_43.75_16.25_rain_x1.0_evap1_Turbulence_3	4.12

DODATAK B – RMSE vrijednosti za testove osjetljivosti

Tablica B1. RMSE za testove osjetljivosti modela na odabir ERA5 točke mreže za vjetar za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1.0 (coeff1.0). Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
coeff1.0_43.25_15.75	2,11	2,39	0,93
coeff1.0_43.25_16.00	2,33	2,4	0,95
coeff1.0_43.25_16.25	2,9	2,24	0,8
coeff1.0_43.50_15.75	3,19	2,44	0,97
coeff1.0_43.50_16.00	3,65	2,2	0,77
coeff1.0_43.50_16.25	4,41	2,11	0,72
coeff1.0_43.75_15.75	5,36	2,2	0,79
coeff1.0_43.75_16.00	6,14	1,85	0,61
coeff1.0_43.75_16.25	8,81	1,8	0,68

Tablica B2.1. RMSE za testove osjetljivosti modela na brzinu vjetra za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,00°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen nalazi se u nazivu simulacije (coeffN_) pri čemu je N = Scale_dir vjetar skaliran prema smjeru puhanja. Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
coeff0.0_43.75_16.00	1,27	0,31	0,31
coeff0.1_43.75_16.00	0,86	0,41	0,26
coeff0.2_43.75_16.00	0,74	0,52	0,24
coeff0.3_43.75_16.00	0,95	0,61	0,23
coeff0.4_43.75_16.00	1,35	0,68	0,24
coeff0.5_43.75_16.00	1,9	0,76	0,26
coeff0.6_43.75_16.00	2,67	0,98	0,31
coeff0.7_43.75_16.00	3,56	1,25	0,39
coeff0.8_43.75_16.00	4,56	1,54	0,47
coeff0.9_43.75_16.00	5,4	1,7	0,54
coeff1.0_43.75_16.00	6,14	1,85	0,61
coeffScale_dir_43.75_16.00	1,7	1,1	0,44

Tablica B2.2. RMSE za testove osjetljivosti modela na brzinu vjetra za ERA5 točku koordinata (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent N kojim je vjetar množen nalazi se u nazivu simulacije (coeffN_) pri čemu je N = Scale_dir vjetar skaliran prema smjeru puhanja. Procesi oborine i isparavanja nisu uključeni, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
coeff0.0_43.75_16.25	0,74	0,53	0,24
coeff0.1_43.75_16.25	0,95	0,65	0,24
coeff0.2_43.75_16.25	1,42	0,75	0,25
coeff0.3_43.75_16.25	2,06	0,85	0,28
coeff0.4_43.75_16.25	2,86	0,93	0,31
coeff0.5_43.75_16.25	3,73	1,0	0,35
coeff0.6_43.75_16.25	4,68	1,11	0,39
coeff0.7_43.75_16.25	5,8	1,31	0,46
coeff0.8_43.75_16.25	6,97	1,56	0,55
coeff0.9_43.75_16.25	7,9	1,69	0,61
coeff1.0_43.75_16.25	8,81	1,8	0,68
coeffScale_dir_43.75_16.25	9,04	1,9	1,29

Tablica B3. RMSE za testove osjetljivosti modela na procese oborine i isparavanja za ERA5 točke s koordinatama (43,75° 16,00°) i (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Uključenost/neuključenost procesa oborine u nazivu simulacije je označena s rain1/rain0, dok je uključenost/neuključenost procesa isparavanja u imenu označena s evap1/evap0. Koeficijent N kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1,0 (coeff1.0). Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama je bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
43.75_16.00_rain0_evap0	6,14	1,85	0,61
43.75_16.00_rain0_evap1	6,33	1,94	1,14
43.75_16.00_rain1_evap0	5,59	1,79	0,41
43.75_16.00_rain1_evap1	5,92	1,56	0,7
43.75_16.25_rain0_evap0	8,81	1,8	0,68
43.75_16.25_rain0_evap1	9,04	1,9	1,29
43.75_16.25_rain1_evap0	8,03	1,71	0,42
43.75_16.25_rain1_evap1	8,41	1,51	0,8

Tablica B4. RMSE za testove osjetljivosti modela na količinu oborine za ERA5 točke s koordinatama (43,75° 16,00°) i (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijent *N* kojim je oborina množena nalazi se u nazivu simulacije (rain1_x*N*). Koeficijent *N* kojim je vjetar množen bio je u svim simulacijama jednak 1.0 (coeff1.0) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja. Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
43.75_16.00_rain1_x1	5,92	1,56	0,7
43.75_16.00_rain1_x2	5,75	1,5	0,41
43.75_16.00_rain1_x3	5,62	1,92	0,41
43.75_16.00_rain1_x4	5,46	2,83	0,71
43.75_16.25_rain1_x1	8,41	1,51	0,8
43.75_16.25_rain1_x2	8,1	1,46	0,46
43.75_16.25_rain1_x3	7,92	1,91	0,42
43.75_16.25_rain1_x4	7,61	2,8	0,66

Tablica B5. RMSE za testove osjetljivosti modela na odabir metode uključivanja procesa turbulencije za ERA5 točku s koordinatama (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Koeficijenti *N* kojima su množeni vjetar i oborina bili su u svim simulacijama jednaki 1,0 (redom coeff1.0 i rain1_x1) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
Turbulence_0	29,77	0,51	3,61
Turbulence_1	7,72	1,44	0,72
Turbulence_2	8,41	1,52	0,8
Turbulence_3	8,41	1,51	0,8
Turbulence_4	8,41	1,52	0,8

Tablica B6. RMSE za testove osjetljivosti modela na parametar modela dicoww (VTD) pri korištenju metode uključivanja procesa turbulencije Turbulence_1 za ERA5 točku s koordinatama (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 26.9. – 24.10.2023. Parametar je mijenjan na način da se uobičajena vrijednost koja se koristi u modelu (0.000001 m² s⁻¹) množila koeficijentom *N* koji se nalazi u nazivu simulacije (Turbulence_1_x*N*). Koeficijenti *N* kojima su množeni vjetar i oborina bili su u svim simulacijama jednaki 1,0 (redom coeff1.0 i rain1_x1) te je u svim simulacijama bio uključen proces isparavanja. Metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_1 (konstanta vrijednost parametra dicoww).

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
Turbulence_1_x0.1	7,43	1,34	0,66
Turbulence_1_x 1	7,72	1,44	0,72
Turbulence_1_x 10	8,57	2,04	1,21
Turbulence_1_x 100	9,65	2,36	1,33
Turbulence_1_x 1000	9,75	2,43	1,36

DODATAK C – RMSE vrijednosti za simulacije miješanja 2021. godine

Tablica C1. RMSE za simulacije u kojima je korištena ERA5 točka koordinata (43,75° 16,00°) za simulirano razdoblje 21.7.-12.10.2021. Uključivanje/neuključivanje vjetra označeno je s coeff1.0/coeff0.0, a procesa oborine s rain_x0/rain_x1. Skaliranje vjetra prema smjeru puhanja označeno je s coeffScale_dir. U svim je simulacijama bio uključen proces isparavanja, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
coeff0.0_rain_x0	0,81	0,86	0,89
coeff0.0_rain_x1	1,52	2,71	2,34
coeff1.0_rain_x0	17,07	0,21	0,58
coeff1.0_rain_x1	16,04	1,45	0,05
coeffScale_dir_rain_x0	1,27	0,52	0,1
coeffScale_dir_rain_x1	0,85	2,19	0,81

Tablica C2. RMSE za simulacije u kojima je korištena ERA5 točka koordinata (43,75° 16,25°) za simulirano razdoblje 21.7.-12.10.2021. Uključivanje/neuključivanje vjetra označeno je s coeff1.0/coeff0.0, a procesa oborine s rain_x0/rain_x1. Skaliranje vjetra prema smjeru puhanja označeno je s coeffScale_dir. U svim je simulacijama bio uključen proces isparavanja, dok je metoda uključivanja procesa turbulencije u svim simulacijama bila Turbulence_3.

Naziv simulacije	Temperatura [°C]	Salinitet	Gustoća [kg m ⁻³]
coeff0.0_rain_x0	0,09	0,93	0,57
coeff0.0_rain_x1	0,22	3,05	1,94
coeff1.0_rain_x0	16,76	0,35	0,42
coeff1.0_rain_x1	15,16	1,99	0,04
coeffScale_dir_rain_x0	2,8	0,64	0,06
coeffScale_dir_rain_x1	1,94	2,64	0,78

Životopis doktorandice

Iva Dominović Novković rođena je 1996. godine u Šibeniku, no od malih nogu živi u Zagrebu. Pohađala je XV. gimnaziju. Na Sveučilištu u Zagrebu završila je preddiplomski studij Geofizika i diplomski studij Fizika – geofizika, smjer meteorologija i fizička oceanografija, tijekom kojeg je bila predstavnik studenata u Vijeću odsjeka. Diplomski rad radila je pod mentorstvom dr.sc. Miroslave Pasarić na temu promjena morske razine kraj otoka Blitvenica. Po završetku fakulteta zaposlila se na Državnom hidrometeorološkom zavodu u Odjelu za numeričku prognozu vremena nakon čega je u svibnju 2021. prešla raditi na Institut Ruđer Bošković u grupu dr. Ciglencečki-Jušić u sklopu Laboratorija za fiziku mora i kemiju vodenih sustava. Iste godine upisala je doktorski studij oceanologije na Sveučilištu u Zagrebu s usmjerenjem na fiziku mora. U sklopu doktorskih istraživanja usavršavala se tri mjeseca na Sveučilištu Bangor (Bangor, Ujedinjeno Kraljevstvo; u sklopu HRZZ stipendije MOBDOK) pod mentorstvom prof. Petera Robinsa, dva tjedna na Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (Berlin, Njemačka) pod mentorstvom dr. sc. Georgijja Kirillina i na šest stručno – znanstvenih radionica. Tijekom dokorskog studija bila je autor na 30 konferencijskih priopćenja (na 12 kao prvi autor; 2 puta pod stipendijom European Geoscience Union i 1 put pod stipendijom ZIMO-Mladi), 8 WoS radova (2 kao prvi autor) i jednom stručnom radu te je recenzent za *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Bila je voditelj i suvoditelj dvije studentske prakse. Dio je organizacijskog tima za dvije međunarodne konferencije, a 2025. godine je bila predavač na ljetnoj školi u Italiji (tema: praktikum obrade klimatoloških podataka). Osim istraživanja jezera, jako voli i svoju obitelj, prijatelje, sunce, more, bakinu pašticađu i čokoladu u svim oblicima.

Znanstvena publikacija doktorandice

Ispis radova za osobu: Iva Dominović Novković (CroRIS na dan 3. siječnja 2026.)

Prilog u časopisu

Izvorni znanstveni rad

1. Dautović, Jelena; **Dominović Novković, Iva**; Simonović, Niki; Ciglencečki, Irena
Organic carbon in the water column and sediment of the eastern Adriatic Sea coastal and transitional waters // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 329 (2026), 109659-109659. doi: 10.1016/j.ecss.2025.109659
2. Vilibić, Ivica; Terzić, Elena; Vrdoljak, Iva; **Dominović Novković, Iva**; Vodopivec, Martin; Ciglencečki, Irena; Djakovac, Tamara; Hamer, Bojan
Extraordinary mucilage event in the northern Adriatic in 2024—a glimpse into the future climate? // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 317 (2025), 109222, 13. doi: 10.1016/j.ecss.2025.109222
3. Mateša, Sarah; **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Ciglencečki, Irena
Reduced sulfur species in a marine euxinic environment of Rogoznica Lake – Dragon Eye, Croatia // *Acta Adriatica*, 66 (2025), 1; -, 14. doi: 10.32582/aa.66.1.1
4. Vilibić, Ivica; Bubalo, Maja; Zemunik Selak, Petra; Pranić, Petra; Radovan, Ana; Mihanović, Hrvoje; **Dominović, Iva**
High-frequency water level oscillations in a coastal shallow lake // *Natural Hazards*, 121 (2025), 20; 23951-23975. doi: 10.1007/s11069-025-07506-7

5. Vidović, Kristijan; Hočevar, Samo; Grgić, Irena; Metarapi, Dino; **Dominović Novković, Iva**; Mifka, Boris; Gregorič, Asta; Alfoldy, Balint; Ciglencečki, Irena
Do bromine and surface-active substances influence the coastal atmospheric particle growth? // Heliyon, 10 (2024), 11; e31632, 14. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31632

6. **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Ciglencečki, Irena; Vilibić, Ivica
Observing lake-sea tidally driven water exchange in Lake Zmajev Oka (Rogoznica, Croatia) // Acta Adriatica, 65 (2024), 2; 179-192. doi: 10.32582/aa.65.2.6

7. Simonović, Niki ; **Dominović, Iva** ; Marguš, Marija ; Matek, Antonija ; Ljubešić, Zrinka ; Ciglencečki, Irena
Dynamics of organic matter in the changing environment of a stratified marine lake over two decades // Science of the Total Environment, 865 (2023), 161076, 20. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161076

8. **Dominović, Iva**; Dutour-Sikirić, Mathieu; Margus, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Geček, Suncana; Ciglencečki, Irena
Deoxygenation and stratification dynamics in a coastal marine lake // Estuarine, Coastal and Shelf Science, 291 (2023), 108420, 11. doi: 10.1016/j.ecss.2023.108420

Prilog sa skupa (u zborniku)

Sažetak izlaganja sa skupa

1. **Dominović Novković, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Robins, Peter; Ciglencečki-Jušić, Irena; Vilibić, Ivica
Zmajev oka lake under pressure: new findings on its environmental and physical dynamics // Book of Abstracts of 9th Faculty of Science PhD Student Symposium / Petrović, Petra (ur.).
Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet, 2025. str. 63-63

2. **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Robins, Peter; Ciglencečki, Irena; Vilibić, Ivica
Rogoznica Lake: Exploring the Environmental Interactions // 2nd International Scientific Symposium Interdisciplinary Approach to the Scientific Research of the Adriatic Sea InspireAdriatic 2025 / Sviličić Petrić, Ines; Perić, Lorena; Cuculić, Vlado (ur.).
Zagreb: Ruđer Bošković Institute, Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb, Croatia, 2025. str. 24-24

3. **Dominović, Iva**; Robins, Peter; Ciglencečki, Irena; Vilibić, Ivica
Numeričko modeliranje morskog jezera Zmajev oka (Rogoznica) // Knjiga sažetaka međunarodnog VI. znanstvenog i stručnog skupa Klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora / Čolak, Slavica; Milošević, Rina; Šarić, Tomislav (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2025. str. 23-24

4. Vilibić, Ivica; Pranić, Petra; Zemunik Selak, Petra; Bubalo, Maja; Mihanović, Hrvoje; **Dominović Novković, Iva**
Visokofrekventne oscilacije razine Vranskog jezera (Biograd, Hrvatska) // Knjiga sažetaka V. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem, Zadar, 2024. / Čolak, Slavica; Šarić, Tomislav; Milošević, Rina (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2024. str. 16-17

5. **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Ciglencečki, Irena; Vilibić, Ivica

Izmjena vode u jezeru Zmajevo oko (Rogoznica, Hrvatska) uzrokovana plimnim oscilacijama // Knjiga sažetaka V. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem, Zadar, 2024. / Čolak, Slavica; Šarić, Tomislav; Milošević, Rina (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2024. str. 20-21

6. Ciglencečki, Irena; Đakovac, Tamara; Tojčić, Iva; Simonović, Niki; **Dominović, Iva**; Terzić, Elena; Dautović, Jelena; Vilibić, Ivica

Fenomen cvjetanja mora, „mucillagini” u sjevernom Jadranu 2024. godine // Knjiga sažetaka V. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem, Zadar, 2024. / Čolak, Slavica; Šarić, Tomislav; Milošević, Rina (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2024. str. 28-28

7. Trošelj, Joško; **Dominović, Iva**; Pečar Ilić, Jadranka; Ciglencečki, Irena; Kirillin, Georgiy

O osnovnim fizikalnim mehanizmima cirkuliranja vode i međudjelovanja slojeva vodenog stupca morskog jezera “Zmajevo oko” kod Rogoznice // Knjiga sažetaka V. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem, Zadar, 2024. / Čolak, Slavica; Šarić, Tomislav; Milošević, Rina (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2024. str. 18-19

8. Mateša, Sarah; Marguš, Marija; **Dominović, Iva**; Čanković, Milan; Ciglencečki, Irena

Prostorna i vremenska dinamika reduciranih sumpornih specija u morskom euksinskom okolišu (Rogozničko jezero – Zmajevo oko, Hrvatska) // Knjiga sažetaka V. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem, Zadar, 2024. / Čolak, Slavica; Šarić, Tomislav; Milošević, Rina (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2024. str. 22-23

9. Petricioli, Donat; Bakran-Petricioli, Tatjana; **Dominović, Iva**; Ciglencečki Jušić, Irena

Benthic succession in marine lake Zmajevo Oko – natural process in the Lake or acceleration to extinction? / Sukcesija u bentosu morskog jezera Zmajevo Oko – prirodan proces u Jezeru ili ubrzani put prema izumiranju? // Knjiga sažetaka IV. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem / Bakran-Petricioli, Tatjana; Šarić, Tomislav; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2023. str. 106-107

10. Ciglencečki, Irena; Marguš, Marija; Simonović, Niki; **Dominović, Iva**; Čanković, Milan; Mateša, Sarah; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat

Što nam govori 30 godina istraživanja Rogozničkog jezera - Zmajevo Oka? // Knjiga sažetaka IV. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem / Bakran-Petricioli, Tatjana; Šarić, Tomislav; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).

Zadar: Sveučilište u Zadru, 2023. str. 92-93

11. **Dominović, Iva**; Dutour-Sikirić, Mathieu; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Geček, Sunčana; Ciglencečki, Irena

Morsko jezero Zmajevo Oko (Rogoznica): povezanost fizičko-kemijskih parametara i pojave anoksične holomiksije // Knjiga sažetaka IV. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i

očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem / Bakran-Petricioli, Tatjana; Šarić, Tomislav; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2023. str. 96-97

12. Vidović, Kristijan; Grgić, Irena; **Dominović, Iva**; Mifka, Boris; Hočevar, Samo; Gregorič, Asta; Alfoldy, Balint; Ciglencečki, Irena
Jedinstveni uvjeti okoline koji potiču stvaranje novih čestica na jezeru Zmajevu Oko (Rogoznica) u Hrvatskoj // Knjiga sažetaka IV. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem / Bakran-Petricioli, Tatjana; Šarić, Tomislav; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2023. str. 100-101

13. Simonović, Niki; **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Ciglencečki, Irena
The influence of environmental changes on the dynamics and properties of organic matter in the changing marine environment of Rogoznica Lake // Knjiga sažetaka IV. znanstveno-stručnog skupa Prilagodbe na klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora s međunarodnim sudjelovanjem / Bakran-Petricioli, Tatjana; Šarić, Tomislav; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2023. str. 98-99

14. Ciglencečki, Irena ; Simonović, Niki ; **Dominović, Iva** ; Marguš, Marija ; Čanković, Milan ; Mateša, Sarah ; Bakran-Petricioli, Tatjana ; Petricioli, Donat ; Dutour-Sikirić, Mathieu
„Zmajevu oko“ – Rogozničko morsko jezero kao model odziva ekosustava na promjene u okolišu // III. znanstveno-stručni skup Klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava jadranskog mora : knjiga sažetaka / Bakran-Petricioli, Tatjana ; Šarić, Tomislav ; Arko-Pijevac, Milvana (ur.).
Zadar: Sveučilište u Zadru, 2022. str. 18-18

15. **Dominović, Iva** ; Dutour Sikirić, Mathieu ; Bakran- Petricioli, Tatjana ; Petricioli, Donat ; Marguš, Marija ; Ciglencečki, Irena
Physicochemical characteristics of the marine Lake Rogoznica and its connection with the atmosphere and the outer sea // IX. međunarodno savjetovanje o morskoj tehnologiji in memoriam akademiku Zlatku Winkleru.
Rijeka: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2022. str. 15-15

16. **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Dutour Sikirić, Mathieu; Ciglencečki, Irena
Rogozničko morsko jezero: najnovija saznanja o vezi jezera s okolnim morem i atmosferom // Znanstvena škola o okolišu 2021. : sveobuhvatni pristup istraživanju antropogenih pritisaka na okoliš : knjiga sažetaka / Furdek Turk, Martina ; Fiket, Željka ; Ivanić, Maja (ur.).
Zagreb: Institut Ruđer Bošković, 2022. str. 29-29

Stručni rad

1. Dautović, Jelena; Simonović, Niki; **Dominović, Iva**; Zovko, Zdeslav; Ciglencečki, Irena
Otopljeni organski ugljik (DOC) u obalnim i prijelaznim vodama istočnog Jadrana // 8. hrvatska konferencija o vodama : Hrvatske vode u proizvodnji hrane i energije : zbornik radova / Biondić, Danko; Holjević, Danko; Vizner, Marija (ur.).
Zagreb: Hrvatske vode, 2023. str. 513-521

Prilog sa skupa (neobjavljen)

Neobjavljeni prilog sa skupa

1. **Dominović Novković, Iva**; Marguš, Marija; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat; Ciglencečki-Jušić, Irena; Vilibić, Ivica
Tide-controlled water exchange in the strongly stratified marine lake Zmajevsko oko (Rogoznica, Croatia) // EGU General Assembly 2025
Beč, Austrija, 27.04.2025-02.05.2025. doi: 10.5194/egusphere-egu25-403
2. Dautović, Jelena; Simonović, Niki; **Dominović Novković, Iva**; Ciglencečki-Jušić, Irena
Organski ugljik u površinskom sedimentu i vodenom stupcu istočnog Jadrana, priobalne i prijelazne vode // Međunarodni VI. znanstveno stručni skup Klimatske promjene i očuvanje morskih ekosustava Jadranskog mora
Crikvenica, Hrvatska, 02.10.2025-05.12.2025
3. Mateša, Sarah; Marguš, Marija; **Dominović, Iva**; Ciglencečki, Irena
Termination of polysulfides (S_x2-) in seawater euxinic conditions by electroanalytical methods // 36th Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry
Šibenik, Hrvatska, 26.05.2024-29.05.2024
4. **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Kirillin, Georgiy; Ciglencečki-Jušić, Irena; Vilibić, Ivica
Mixing regime of Zmajevsko oko (Rogoznica, Croatia), a heliothermal lake threatened by rapid deoxygenation // 26th Annual International Workshop on Physical Processes in Natural Waters
Girona, Španjolska, 01.07.2024-05.07.2024
5. Ciglencečki, Irena; Marguš, Marija; **Dominović Novković, Iva**; Simonović, Niki; Mateša, Sarah
Lake Rogoznica (Dragon's Eye), an extreme, euxine environment on the eastern Adriatic coast // 43rd CIESM Congress
Palermo, Italija, 14.10.2024-18.10.2024
6. Ciglencečki, Irena; Marguš, Marija; Dautović, Jelena; Simonović, Niki; Mateša, Sarah; Vidović, Kristijan; **Dominović, Iva**
Electroanalytical methods in the study of changes in the marine environment // 36th Topical Meeting of the International Society of Electrochemistry
Šibenik, Hrvatska, 26.05.2024-29.05.2024
7. Vilibić, Ivica; Pranić, Petra; Zemunik, Petra; Bubalo, Maja; Mihanović, Hrvoje.; **Dominović Novković, Iva**; Lewis, Clare
High-frequency water level oscillations in a coastal shallow lake (Vrana Lake, Croatia) // 3rd World Conference on Meteotsunamis
, 13.10.2024-17.12.2024
8. Vilibić, Ivica; Dogan, Gozde Guney; **Dominović Novković, Iva**; Huan, Xun; Jordà, Gabriel; Pranić, Petra; Tojčić, Iva; Villalonga, Joan; Yalciner, Ahmet Cevdet; Zemunik Selak, Petra
Global Science of Meteorological Tsunamis: From Planetary to Mesoscale Processes (GLOMETs) // EGU General Assembly 2024
Beč, Austrija, 14.04.2024-19.04.2024. doi: 10.5194/egusphere-egu24-4024

9. Simonović, Niki ; **Dominović, Iva** ; Marguš, Marija ; Ciglencečki, Irena
Study of the organic matter properties in the changing environment of a marine lake (Rogoznica lake) // XVI International Estuarine Biogeochemistry Symposium
Šibenik, Hrvatska, 23.05.2023-26.05.2023

10. Dominović, Iva

Zmajevsko oko (Rogoznica): prirodni laboratorij za praćenje promjena u okolišu u eri klimatskih promjena // 1. skup mladih znanstvenika ZIMO-a
Zagreb, Hrvatska, 11.12.2023-11.12.2023

11. Ciglencečki, Irena; Dautović, Jelena; Simonović, Niki; **Dominović, Iva**; Marguš, Marija; Čanković, Milan; Mateša, Sarah
Organic matter and sulfur compounds as an indication of changes in the environment; long-term research (1990-2021) in the northern Adriatic and marine system of Rogoznica lake // ECSA 59 Using the best scientific knowledge for the sustainable management of estuaries and coastal seas
Donostia-San Sebastián, Španjolska, 05.09.2022-08.09.2022

12. Vidović, Kristijan; Hočevar, Samo; Grgić, Irena; Gregorič, Asta; Alfoldy, Balint; **Dominović, Iva**; Ciglencečki, Irena
New Particle Formation Events At A Unique “Dragon Eye “Marine Lake Area In Rogoznica, Croatia // iCACGP/IGAC joint International Atmospheric Chemistry Conference
Manchester, Ujedinjeno Kraljevstvo, 11.09.2022-15.09.2022

13. **Dominović, Iva** ; Dutour Sikirić, Mathieu ; Marguš, Marija ; Bakran-Petricioli, Tatjana ; Petricioli, Donat ; Geček, Sunčana ; Ciglencečki, Irena
Is a marine lake at the Adriatic coast the natural model of progressive water column anoxia? // ECSA 59 Using the best scientific knowledge for the sustainable management of estuaries and coastal seas
Donostia-San Sebastián, Španjolska, 05.09.2022-08.09.2022

14. **Dominović, Iva** ; Marguš, Marija ; Geček, Sunčana ; Bakran-Petricioli, Tatjana ; Petricioli, Donat ; Dutour Sikirić, Mathieu ; Ciglencečki, Irena
Physicochemical properties of a marine lake in the central Adriatic (Lake Rogoznica): interaction with the atmosphere, the sea and the surrounding karst // EGU General Assembly 2022
Beč, Austrija; online, 23.05.2022-27.05.2022. doi: 10.5194/egusphere-egu22-492

Druge vrste radova

Izveštaj

1. Marguš, Marija; **Dominović Novković, Iva**; Ciglencečki, Irena; Bakran-Petricioli, Tatjana; Petricioli, Donat
Istraživanje kontakta Zmajevskog oka s okolnim morem, 2023 (izveštaj projekta)

Ocjenski radovi

Diplomski rad (sveučilišni)

1. Iva Dominović

Koherentnost promjena razine mora na Blitvenici i u Splitu / Miroslava Pasarić (mentor).
Zagreb, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2020