

# Pojednostavljeni model za prognozu vertikalnog temperaturnog profila u malim, monomiktičnim jezerima

---

Šarović, Kristina

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:340416>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Kristina Šarović

**POJEDNOSTAVLJENI MODEL ZA PROGNOZU  
VERTIKALNOG TEMPERATURNOG PROFILA  
U MALIM, MONOMIKTIČNIM JEZERIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Zvezdana Bencetić Klaić

Zagreb, 2024.





University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Kristina Šarović

**SIMPLIFIED MODEL FOR PREDICTION OF THE  
VERTICAL TEMPERATURE PROFILE IN SMALL  
MONOMICTIC LAKES**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: prof. dr. sc. Zvezdana Bencetić Klaić

Zagreb, 2024



Ova doktorska disertacija izrađena je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Zvezdane Bencetić Klaić, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog doktorskog studija Fizike, smjer Geofizika.

Mentorica prof. Zvezdana Bencetić Klaić redovita je profesorica u trajnom zvanju na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Istraživanje je provedeno u okviru projekta "Hidrodinamičko modeliranje sustava Plitvičkih jezera" (NP Plitvička jezera; broj potpore 7989/16).



*Zahvala*

*Ponajprije se zahvaljujem mentorici, prof. dr. sc. Zvezdani Bencetić Klaić, na prenesenom znanju i iskustvu, iskrenoj pomoći i strpljivom vođenju ovog istraživanja i izrade disertacije.*

*Zahvaljujem članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada, prof. dr. sc. Zoranu Pasariću i dr. sc. Ivici Vilibiću, a posebice prof. dr. sc. Mirku Orliću, na uloženom trudu i korisnim komentarima koji su ovaj rad učinile kvalitetnijim i potpunijim.*

*Želim zahvaliti i svim ostalim profesorima i kolegama Geofizičkog odsjeka na prenesenom znanju i pomoći kod uklapanja u rad na novom fakultetu i u novom znanstvenom području. Marku Humu zahvaljujem na vođenju kroz administrativne labirinte molbi, upisa, ispisa i mirovanja te brzom rješavanju svih problema.*

*Istraživanje je provedeno u okviru projekta "Hidrodinamičko modeliranje sustava Plitvičkih jezera" (NP Plitvička jezera; broj potpore 7989/16). Također zahvaljujem Državnom hidrometeorološkom zavodu koji je za potrebe projekta ustupio meteorološke podatke.*

*Zahvaljujem kolegici Meliti Burić na rezultatima iz modela GOTM i SCHISM.*

*Zahvaljujem nekadašnjem direktoru, Mr.sc. Zdravku Mužeku, dipl.ing.stroj., na čiji sam poticaj upisala doktorski studij.*

*Hvala mojim roditeljima i obitelji na neprestanoj podršci kroz sve faze mojeg školovanja uključujući i ovaj doktorski studij. Najveće hvala Vasku na razumijevanju i podršci.*

*I na kraju, htjela bih zahvaliti A.E. za generalni doprinos znanosti bez kojeg bi brojna istraživanja bila nemoguća.*

*U Zagrebu, srpanj 2024.*





## SAŽETAK

Temperatura vode, zajedno s njezinim vertikalnim profilom, bitan je čimbenik koji izravno ili indirektno utječe na fizikalne, kemijske i biološke procese te na transport plinova i nutrijenata u jezerima. Ovaj utjecaj dalje se odražava na biološku aktivnost i raznolikost unutar jezera i njihovoj okolini. Sveprisutne klimatske promjene značajno utječu na vodene sustave diljem svijeta. Jezera, kao zatvoreni ekosustavi, izuzetno su osjetljiva na te promjene, što rezultira nizom posljedica s kompleksnim povratnim vezama.

Termodinamičko ponašanje jezera pod utjecajem je različitih procesa, a ključni pokretač su meteorološki uvjeti koji determiniraju toplinski tok na površini jezera. S ciljem omogućavanja pouzdane prognoze vertikalnog temperaturnog profila uz minimalan broj ulaznih meteoroloških varijabli, razvijen je model za mala monomiktična jezera, nazvan SIMO, temeljen na rješavanju jednodimenzionalne jednadžbe energetske bilance. Model je primijenjen na dva jezera unutar sustava Plitvičkih jezera, Prošće i Kozjak. Rezultati kratkoročnih simulacija (duljine do 30 dana) pokazuju da model ima zadovoljavajuće performanse u prognozi vertikalnog temperaturnog profila na satnoj skali. Dugoročnom (jednogodišnjom) simulacijom demonstrirana je sposobnost modela da predvidi proljetni početak stratifikacije jezera i njezino jačanje tijekom ljeta te nastupanje jesenskog konvektivnog miješanja.

Nakon kalibracije i verifikacije, model je primijenjen na prognozu buduće temperature vode u jezeru Kozjak za tri različita scenarija buduće klime, RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5. Rezultati ukazuju na značajan porast temperature vode u pesimističnijim scenarijima, s umjerenim jačanjem stratifikacije procijenjenim na temelju Schmidtovog indeksa stabilnosti. Unatoč većem porastu temperature u epilimniju, difuzija i konvektivno miješanje doprinose zagrijavanju i dubljih slojeva, čime je ograničeno jačanje stratifikacije. No čak i u najoptimističnijem scenariju, primjećuje se signifikantno produljenja trajanja stratifikacije.

Time je po prvi puta analiziran utjecaj klimatskih promjena na temperaturu i stratifikaciju jezera Kozjak, što je prva takva analiza za neko jezero u Hrvatskoj općenito. Razumijevanje njegovog odgovora na klimatske promjene ključno je za učinkovito upravljanje i očuvanje jezera i s njime povezanih ekosustava. Predviđeno povećanje temperature vode i produljeno razdoblje stratifikacije nose ozbiljne ekološke implikacije. Dobiveni rezultati predstavljaju temelj za buduća istraživanja u različitim područjima, kao što su biologija jezera, geokemija, sedimentologija itd.

**Ključne riječi:** 1-D model; evaluacija numeričkog modela; klimatske promjene; Plitvička jezera; površinski toplinski tok; prognoza temperature vode; RCP scenariji; stratifikacija jezera

# EXTENDED ABSTRACT

## I INTRODUCTION

Water temperature significantly influences various lake properties, including gas and mineral solubility, chemical reactions, and biological activity. Furthermore, the vertical temperature profile plays a crucial role in gas and nutrient transport within a lake. Stable stratification can lead to methane and nutrient accumulation, along with reduction of oxygen concentrations, potentially causing hypoxic conditions. While meteorological forcing is the main driver of lake thermodynamic behavior, the lake-atmosphere interaction is two-way, as lakes also significantly influence local and regional weather and climate.

Lakes are often called "sentinels of climate change" due to their ability to reflect both natural and anthropogenic activities in their catchment area, providing valuable insights into the patterns and mechanisms of terrestrial and aquatic systems' response to climate change. The complex and diverse responses of lakes to climate change, within the lakes and their surroundings, emphasize the need for detailed studies of individual lakes in order to capture spatial and temporal heterogeneity of these responses.

This thesis focuses on the Plitvice Lakes system, more precisely on lakes Prošće and Kozjak, the first and the twelfth lake in the system. The Plitvice Lakes system has formed through the continuous process of tufa deposition. This biodynamic process depends on the balance of a number of physical, chemical and biological factors where the water temperature has a significant role. Despite conservation efforts, Plitvice Lakes face vulnerability to climate and anthropological changes.

Considering the role of the water temperature in the entire ecosystem and its influence on weather and climate, in the last couple of decades there has been a growing interest in modeling the lake thermal regimes and understanding their sensitivity to climate change. There is a number of different numerical models for water temperature prediction, ranging from complex coupled 3-D models to simple 1-D models. The latter are widely

used due to their simplicity and computational efficiency. These models fall into three categories: (1) mixed layer models based on the energy-budget approach, (2) differential models based on solving the 1-D heat transfer equation (thermal diffusivity models), and (3) second-order turbulence closure models. Lake models also differ in the processes they incorporate, such as wind sheltering, sediment heat flux, light attenuation, convective mixing, etc. The choice of processes depends on the model's purpose, which can range from improving weather prediction and climate models to evaluating the effects of climate change or conducting specific limnological studies focusing on gas emissions, oxygen and nutrient levels, heat and mass exchange with the atmosphere, evaporation and lake level fluctuations, etc.

The goal of this thesis is to develop a simplified model for predicting the vertical temperature profile in small, warm, monomictic lakes forced with a reduced number of meteorological input variables. Considering the sensitivity of the lake ecosystems to climate change, the second goal of this thesis is to apply the developed model to analyze the temperature and stratification dynamics of Lake Kozjak under various future climate scenarios.

## **II DATA**

The Plitvice Lakes represent a mountainous lake system in Croatia, comprising 16 named and several unnamed lakes interconnected by cascades and waterfalls, covering a total water surface of 1.949 km<sup>2</sup>. Designated as Croatia's first national park in 1949 and an UNESCO World Heritage site since 1979, the Plitvice Lakes are renowned for their natural beauty, biodiversity, and hydrogeological uniqueness. Situated in the Dinaric karst region, the area displays distinctive geological, geomorphological, and hydrological features. Scientific exploration of this area dates back to 1850, and a comprehensive multidisciplinary review was presented by Klaić et al. (2018).

The performance of the proposed numerical model forced by measured meteorological data was evaluated against lake temperatures measured continuously during an observational campaign under the Hydrodynamic Modeling of Plitvice Lakes project. Temperatures were recorded in two major lakes of the system: Lake Prošće (the southernmost lake) and Lake Kozjak (the largest lake). Temperatures were measured at 15 depths ranging from 0.2 to 27 m in Lake Prošće (with a maximum depth of 37.4 m)

and at 16 depths ranging from 0.2 to 43 m in Lake Kozjak (with a maximum depth of 46 m). The meteorological forcing data measured at the Plitvice Lakes automatic meteorological station were provided by the Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) which also provided quality control of the data. The data set consists of hourly values of air temperature, wind speed, atmospheric pressure, relative humidity, precipitation amount and ultraviolet B (UVB) radiation.

In the climate projection scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5), data from the CORDEX initiative were used. Data were obtained from the general circulation models NorESM1-M (for scenarios RCP2.6 and RCP4.5) and IPSL CM5A-MR (for scenario RCP8.5), dynamically downscaled using REMO2015 regional climate model.

### **III METHODOLOGY**

The proposed SIMO model, which stands as an acronym for SIMplified MOdel, is based on solving the 1-D energy balance equation, commonly employed in similar differential models. The goal was to develop a model that estimates the net heat flux and vertical thermal diffusion using only routinely measured hourly mean meteorological variables. Namely, the model incorporates carefully chosen parameterizations to calculate the surface heat flux components, including longwave and shortwave radiation, and sensitive and latent heat flux, using only the air temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed, precipitation, and UVB radiation. The only additionally needed input are the climatological air temperature data. Apart for the initial vertical temperature profile, the model does not use any lake-specific variables. The model accounts for convective mixing through an algorithm that checks for density inversion and assumes complete mixing of the involved layers if inversion is detected. For solving the 1-D energy balance equation, the assumption of constant horizontal cross-sectional area of the lake was found appropriate. However, it was observed that during the convective mixing phase, this assumption results in water temperature overprediction. Thus, the convective mixing algorithm takes into account the shrinking of the lake cross-section with depth. The model is implemented in MATLAB using an implicit Euler integration scheme.

The uncalibrated model performance was evaluated against observational data using common bivariate measures: mean bias error, mean absolute error, root mean square error, and maximum absolute error, as well as index of agreement. Results from

simulations of different lengths, ranging from 1 to 30 days, were used to evaluate the model performance sensitivity to the simulation length. Additionally, the model's capability to predict the springtime onset of lake stratification and autumn convective overturn was examined by running a year-long simulation initiated with an approximately uniform vertical profile of the lake temperature ( $\approx 4^{\circ}\text{C}$ ).

After evaluating the uncalibrated model performance, the model is calibrated and applied to predict future water temperature of Lake Kozjak under three different future climate scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) from 2006 to 2100. In addition to analyzing the trends in water temperature at various depths in detail, the average temperatures of the epilimnion, hypolimnion, and the whole lake are also calculated and analyzed. Furthermore, the surface and bottom layer temperatures and their relation to specific forcing parameters are studied. The changes in stratification dynamics were mainly explored through the thermocline depth and the Schmidt stability index (SSI). The thermocline depth is determined as the depth of the highest vertical temperature gradient. The SSI was employed as a quantitative indicator of lake stability. The stratification criterion used for Lake Kozjak is  $\text{SSI} \geq 460 \text{ J m}^{-2}$ . This criterion was used to identify the start, end, and duration of the stratification period, expressed in days of the year.

#### **IV RESULTS AND DISCUSSION**

Historically, Lakes Prošće and Kozjak have been considered warm dimictic lakes. However, the measured data analyzed in this study, as well as recent subjective observations, have revealed a change in the stratification regime which had shifted from dimictic to monomictic, with stratification happening only during the warm summer period and convective mixing in autumn and winter. The surface heat flux is the main driver of the lake thermodynamic behavior, with the shortwave radiation identified as its key component being an order of magnitude larger than all the other components.

The SIMO 1.1 model performed reasonably well. Specifically, the onset of the stratification period and both the vertical temperature profile and the deepening of the thermocline over time were well captured. In general, the model tended to overestimate temperatures in the epilimnion, especially for Lake Prošće during the summer stratification period. Furthermore, while the upper metalimnion boundary was well reproduced for both lakes, its thickness was overestimated, leading to an underestimation

of the maximum temperature gradient. Despite these discrepancies, the model satisfactorily predicted stratification dynamics and convective mixing. Several possible causes for the differences between modeled and measured temperatures were identified, including the underestimation of turbulent heat transfer in the epilimnion during windy periods. Furthermore, the model can not simulate internal seiches and the related water and heat exchange between the warmer epilimnion and cooler hypolimnion. Despite these limitations, considering the simplifications in the model, it demonstrated relatively good behavior and satisfactory performance. Sensitivity analysis regarding simulation length demonstrated that, with appropriate meteorological data (as in the case of Lake Kozjak), the model could provide reasonable water temperature forecasts for periods of at least 30 days. The lower performance for Lake Prošće is mainly attributed to the influence of inflows. Namely, the inflow influence is much more pronounced in Lake Prošće compared to Lake Kozjak, as Lake Prošće is the first lake in the system. However, the model assumes closed water system and does not consider the inflow effect. Another influencing factor is the greater distance of Lake Prošće from the meteorological station providing the input data. This emphasizes the importance of precise meteorological data for the specific lake location, given that meteorological forcing is a key driver of lake thermodynamics.

A year-long simulation indicated that the model could predict the onset and intensification of stratification and the occurrence of convective mixing with relatively good accuracy. Calibration of the model parameters further improved the model's representation of the metalimnetic layers and reduced the temperature overestimation. Despite its simplicity, SIMO 1.1 shows comparable performance to more complex models in reproducing water temperature profiles.

The simulation of the Lake Kozjak's water temperature under different future climate scenarios revealed that the climate change would have significant effects on the lake's future water temperature as well as on its stratification strength and duration. Mean temperature increases of 0.51, 1.41, and 4.51 °C (100 y)<sup>-1</sup> were projected for scenarios RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5, respectively. The temperature increase is slightly more pronounced in the epilimnion than in the hypolimnion. Most rapid temperature increase occurs in the surface layer during summer under scenario RCP8.5, with a peak of 6.63 °C (100 y)<sup>-1</sup> in August, driven by changes in shortwave radiation heat flux.



The lake consistently exhibits monomictic behavior across all scenarios. While no significant trend was observed in the annual average thermocline depth, its maximum depth increased by  $7.3 \text{ m (100 y)}^{-1}$  under RCP8.5 and  $3 \text{ m (100 y)}^{-1}$  under RCP4.5. The stratification strength increased substantially only under the baseline RCP8.5 scenario. The increase in stratification strength is limited by the annual convective mixing through the whole water column due to Lake Kozjak's relatively small depth. However, earlier onset and delayed cessation of stratification by the end of the century was observed regardless of the scenario. The projected stratification period was extended by approximately 47, 28, and 16 d  $(100 \text{ y})^{-1}$  under RCP8.5, RCP4.5, and RCP2.6 scenarios, respectively.

Predicted surface temperature increases for Lake Kozjak are within the range of values reported in global lake studies. Intriguingly, predicted deeper layer temperature increases surpass global average, hinting at Lake Kozjak's distinctive behavior.

The projected increase in lake water temperature, coupled with changes in stratification dynamics, could have significant and wide-ranging consequences. The complex interconnected processes in the dynamic system may trigger cascading effects and positive feedback loops, impacting the Plitvice Lakes ecosystem. While a comprehensive analysis of these changes requires a multidisciplinary approach, notable issues include a potential impact on phytoplankton diversity, cyanobacteria growth, and an increased risk of lake eutrophication due to higher temperatures and nutrient input. Additionally, the anticipated rise in water temperature may lead to faster tufa deposition and barrier growth processes, resulting in changes in the morphology of the lake system in a warmer climate.

## **V CONCLUSION**

This doctoral dissertation successfully accomplishes its two main goals: the development and evaluation of a simplified 1-D model for predicting the vertical temperature profile in small, warm, monomictic lakes using a reduced set of input meteorological variables, and the application of this model to analyze the influence of climate change on temperature and stratification of Lake Kozjak. This study marks the first attempt to model and forecast the water temperature and stratification of some of the Plitvice Lakes, as well as of lakes in Croatia in general, encompassing both short-term and long-term simulations. It is also the first effort aimed at analyzing the water temperature and

stratification trends under future climate scenarios of a lake in this region, contributing valuable insights to the understanding of the Plitvice Lakes' dynamics in the face of changing environmental conditions.

Unlike other, more complex models, SIMO relies solely on meteorological variables routinely measured at meteorological stations, along with the climatological mean air temperature and basic lake characteristics, such as geographic coordinates, altitude, depth, and trophic status. The reduced number of necessary input data makes it practical for use in regions where specialized measurements, such as shortwave or longwave radiation, are not available. While the model was employed without specific prior calibration of input parameters, the availability of more detailed lake information could enhance its performance through parameter calibration. The short-term simulations proved that the model provides reasonable hourly water temperature forecast for periods of at least 30 days. The long-term simulation performance of SIMO makes it appropriate for climatological studies and for year-long simulations. Even in cases where no water temperature profile data is available, simulations can simply be initiated with uniform temperature profile, characteristic for the period when the lakes are completely mixed. The results of such simulations are useful for assessing the formation and strengthening of lake stratification, which is crucial for various research areas such as lake biology, geochemistry, sedimentology, etc.

The presented evaluation of SIMO is limited to a single geographical area. To more reliably confirm the general applicability of the model, it should be applied to a larger number of different temperate, monomictic lakes. However, given that the performance measures were calculated without prior parameter calibration, similar performance values can be expected for other lakes.

The analysis of the climate change effects predicts significant temperature rise and prolonged stratification in Lake Kozjak that would have serious consequences with numerous feedback mechanisms, including morphological changes of the lake system.

Considering Lake Kozjak's geography and climate, the study provides insights into potential responses of similar temperate lakes in mountainous regions. The findings lay a foundation for future studies in lake biology, geochemistry, sedimentology, and related fields.

# POPIS SIMBOLA I KRATICA

## Popis simbola

$\alpha$	Albedo vodene površine
$\beta$	Koeficijent apsorpcije kratkovalnog zračenja u površinskom sloju
$\beta_s$	Parametar lokacije
$\delta$	Deklinacija Sunca
$\Delta t$	Vremenski korak
$\Delta T_m$	Srednja godišnja vrijednost razlike dnevne maksimalne i minimalne temperature zraka
$\Delta z_A$	Debljina površinskog apsorpcijskog sloja
$\Delta z_j$	Debljina $j$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$\varepsilon$	Koeficijent emisivnosti vodene površine
$\varepsilon_a$	Koeficijent emisivnosti atmosfere
$\varepsilon_{acf}$	Koeficijent emisivnosti atmosfere u uvjetima bez naoblake
$\varepsilon_{ecc}$	Ekscentricitet Zemljine orbite
$\zeta$	Parametar stabilnosti
$\lambda$	Zemljopisna duljina
$\lambda_e$	Koeficijent atenuacije kratkovalnog zračenja u vodi
$\rho$	Gustoća vode
$\rho_j$	Gustoća vode $j$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$\rho_z$	Gustoća vode na dubini $z$
$\rho_a$	Gustoća zraka
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\tau_0$	Propusnost stupca suhog i čistog zraka za kratkovalno zračenje
$\tau_a$	Propusnost atmosfere za kratkovalno zračenje uslijed apsorpcije aerosolom
$\tau_v$	Propusnost atmosfere za kratkovalno zračenje uslijed apsorpcije vodenom parom
$\tau_{cf}$	Propusnost atmosfere bez naoblake (eng. <i>cloud-free</i> ) za kratkovalno zračenje

$\varphi$	Zemljopisna širina
$\Phi$	Toplinski tok
$\Phi_{j\pm 1/2}$	Toplinski tok na granici između $j$ -tog i $j\pm 1$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$\psi_M$	Funkcija stabilnosti količine gibanja
$\psi_E$	Funkcija stabilnosti vodene pare
$\omega_s$	Polovina duljine dana (vrijeme između izlaska Sunca i podneva ili između podneva i zalaska Sunca)
$c_{\text{elev}}$	Korekcija propusnosti atmosfere za nadmorsku visinu
$c_a$	Specifični toplinski kapacitet zraka
$c_p$	Specifični toplinski kapacitet vode
$C_D$	Bezdimenzijski koeficijent otpora
$C_E$	Bezdimenzijski koeficijent prijenosa latentne topline
$C_H$	Bezdimenzijski koeficijent prijenosa osjetne topline
$D$	Faktor Sunčevog zračenja nakon dnevnog temperaturnog maksimuma
$e_a$	Tlak vodene pare
$e_s$	Tlak zasićenja vodene pare
$f$	Frakcija naoblake
$g$	Ubrzanje sile teže
$h$	Visina iznad tla
$H_l$	Toplinski tok latentne topline
$H_p$	Toplinski tok donesen oborinom
$H_s$	Toplinski tok osjetne topline
$IA_{\text{orig}}$	Indeks podudarnosti (izračunat prema originalnoj definiciji)
$IA_{\text{mod}}$	Indeks podudarnosti (izračunat prema modificiranoj definiciji)
$IA_{\text{ref}}$	Indeks podudarnosti (izračunat prema usavršenoj definiciji)
$k$	Von Karmanova konstanta
$k^*$	Parametar Ekmanovog profila ovisan o zemljopisnoj širini
$K_1, K_2, K_3$	Empirijske konstante za izračun atenuacije kratkovalnog zračenja u vodi
$k_m$	Koeficijent molekularne toplinske difuzije
$k_t$	Koeficijent turbulentne toplinske difuzije
$k_{t,j\pm 1/2}$	Koeficijent turbulentne toplinske difuzije na granici između $j$ -tog i $j\pm 1$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$L$	Monin-Obukhovljeva duljina

$L_a^\downarrow$	Dugovalno zračenje atmosfere usmjereno prema površini jezera
$L_s^\uparrow$	Dugovalno zračenje s površine jezera usmjereno prema atmosferi
$L_n$	Neto dugovalno zračenje na površini vode
$L_v$	Specifična latentna toplina isparavanja vode
$M_{conv}$	Član konvektivnog miješanja
MAE	Srednja apsolutna pogreška
MaxAE	Maksimalna apsolutna pogreška
MBE	Srednja pogreška pristranosti
$N$	Uzgonska frekvenciju (Brunt-Väisälä frekvencija)
$O_i$	Izmjerene vrijednosti
$p$	Atmosferski tlak na 2 m iznad tla
$P$	Količina oborine
$P_i$	Prognoziranje vrijednosti
$Pr_0$	Prandtlov broj
$q_a$	Specifična vlažnost zraka na 2 m visine
$q_s$	Specifična vlažnost zraka neposredno iznad površine vode
$r$	Koeficijent refleksivnosti vodene površine za dugovalno zračenje
$rh$	Relativna vlažnost zraka na 2 m iznad tla
$rh_{T_{min}}$	Relativna vlažnost u trenutku jutarnje minimalne temperature zraka
$rh_{T_{max}}$	Relativna vlažnost u trenutku dnevne maksimalne temperature zraka
RMSE	Korijen srednje kvadratne pogreške
$Ri$	Richardsonov broj
$S$	Sunčevo zračenje na površini Zemlje
$S_0$	Sunčeva konstanta
$S_n$	Neto kratkovalno zračenje na površini vode
$S_{surf}$	Ukupna dnevna ozračenost Sunčevim zračenjem na površini Zemlje
$S_{surf_{T_{max}}}$	Ozračenost Sunčevim zračenjem na površini Zemlje u periodu od izlaska Sunca do trenutka postizanja maksimalne dnevne temperature zraka
SSI	Schmidtov indeks stabilnosti
$S_{top}$	Ukupna dnevna ozračenost Sunčevim zračenjem na vrhu atmosfere
$t$	Vrijeme
$T$	Temperatura vode
$T_{1+p}$	Temperatura vode prvog sloja diskretiziranog modela jezera nakon miješanja oborine
$T_a$	Temperatura zraka na 2 m iznad tla

$T_j$	Temperatura vode $j$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$T_{j\_new}$	Temperatura vode $j$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera nakon konvektivnog miješanja
$T_{min}$	Jutarnja minimalna temperatura zraka
$T_{max}$	Dnevna maksimalna temperatura zraka
$T_{mean}$	Srednja godišnja temperatura zraka
$T_{prec}$	Temperatura oborine
$T_s$	Površinska temperatura vode
$T_v$	Virtualna temperatura zraka
$u^*$	Brzina trenja na površini
$UVB$	Tok UVB zračenja
$UVB_d$	Ukupna dnevna količina UVB zračenja
$V$	Brzina vjetra na 10 m visine
$V_2$	Brzina vjetra na 2 m visine
$z$	Dubina vode
$\bar{z}$	Srednja dubina vodenog stupca
$z_0$	Visina hrapavosti površine
$z_E$	Visina hrapavosti za vodenu paru
$z_j$	Dubina integracijske točke $j$ -tog sloja diskretiziranog modela jezera
$z_{max}$	Maksimalna dubina jezera
$z_{NV}$	Nadmorska visina
$z_{SD}$	Secchijeva dubina

### Popis kratica

1-D	Jednodimenzionalni
3-D	Trodimenzionalni
CSLM	Canadian Small Lake Model
CO <sub>2</sub>	Ugljični dioksid
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
ESGF	Earth System Grid Federation
GCM	General Circulation Model
GLM	General Lake Model
GOTM	General Ocean Turbulent Model

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research
NPPJ	Nacionalni park Plitvička jezera
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
SCHISM	Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model
SIMO	Simplified Model
UV	Ultraljubičasto zračenje
UVA	Ultraljubičasto A zračenje
UVB	Ultraljubičasto B zračenje
WCRP	World Climate Research Programme
WRF	Weather Research and Forecasting

# SADRŽAJ

SAŽETAK .....	I
EXTENDED ABSTRACT .....	III
I    Introduction .....	iii
II   Data .....	iv
III  Methodology .....	v
IV   Results and discussion.....	vi
V    Conclusion.....	viii
POPIS SIMBOLA I KRATICA .....	X
SADRŽAJ.....	XV
1    UVOD.....	1
1.1  Temperatura vode i stratifikacija u jezerima.....	1
1.2  Jezera u svjetlu klimatskih promjena .....	3
1.3  Uloga temperature vode u Plitvičkim jezerima.....	4
1.4  Modeli za simulaciju temperature jezera .....	6
1.5  Motivacija i ciljevi istraživanja.....	9
2    PODACI.....	13
2.1  Područje istraživanja .....	13
2.2  Mjerenja temperaturnog profila vode.....	16
2.3  Izmjereni meteorološki podaci .....	19
2.4  Meteorološki podaci klimatskih projekcija.....	20
3    METODOLOGIJA .....	25
3.1  Formulacija modela SIMO 1.1 .....	25



3.1.1	Energetska bilanca i rubni uvjeti .....	27
3.1.1.1	Kratkovalno zračenje .....	28
3.1.1.2	Dugovalno zračenje .....	32
3.1.1.3	Toplinski tok latentne i osjetne topline .....	33
3.1.1.4	Toplinski tok oborinom.....	34
3.1.2	Konvektivno miješanje.....	35
3.1.3	Postavljanje modela.....	37
3.2	Evaluacija uspješnosti modela .....	39
3.2.1	Mjere uspješnosti modela.....	39
3.2.2	Uspješnost modela u kratkoročnoj prognozi .....	41
3.2.3	Uspješnost modela u dugoročnoj prognozi .....	41
3.3	Klimatske projekcije temperature vode i stratifikacije jezera .....	42
3.3.1	Trendovi temperature .....	42
3.3.2	Trendovi karakteristika stratifikacije .....	43
4	REZULTATI I DISKUSIJA .....	45
4.1	Uspješnost modela SIMO 1.1 .....	45
4.1.1	Analiza toplinskih tokova.....	45
4.1.2	Uspješnost modela u kratkoročnoj prognozi.....	46
4.1.3	Uspješnost modela u dugoročnoj prognozi .....	53
4.1.4	Usporedba s drugim modelima .....	59
4.2	Analiza utjecaja klimatskih promjena na temperaturu i stratifikaciju jezera Kozjak.....	64
4.2.1	Analiza trendova temperature vode.....	64
4.2.2	Analiza karakteristika stratifikacije.....	71
4.2.3	Posljedice predviđenih promjena .....	74
5	ZAKLJUČAK .....	77
	PRILOG A.....	81

LITERATURA .....	85
ŽIVOTOPIS.....	97

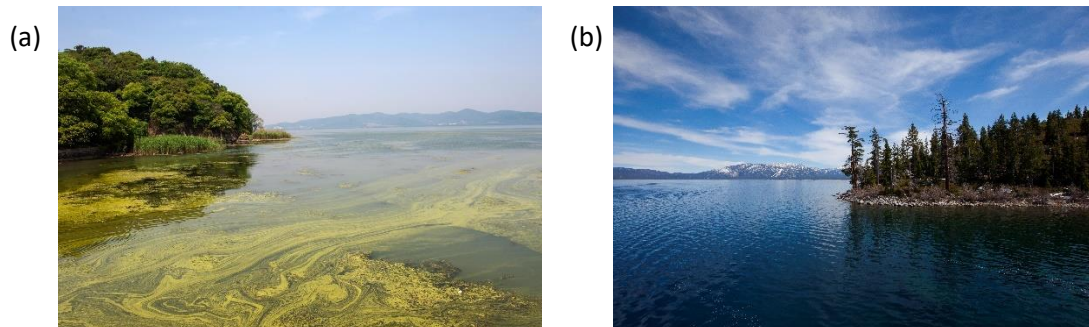


# 1 UVOD

## 1.1 Temperatura vode i stratifikacija u jezerima

Temperatura vode kritičan je čimbenik o kojem ovisi čitav niz svojstava jezera. Ona izravno utječe na biokemijske procese poput topljivosti plinova i minerala, brzine kemijskih reakcija (Benson i Krause, 1980; Krumgalz, 2018; Jane i sur., 2021) i proizvodnje metana u pridnenim slojevima (Jansen i sur., 2022). Osim toga, vertikalni temperaturni profil jezera, odnosno njegova stratifikacija (stabilnost vodenog stupca), kao i duljina razdoblja stratifikacije, igraju vitalnu ulogu u transportu plinova i hranjivih tvari, te posljedično, njihovoj raspodjeli unutar jezera (Vachon i sur., 2019; Ladwig i sur., 2021). Jaka stabilna stratifikacija ograničava razmjenu kroz termoklinu te tako pospješuje akumulaciju metana i nutrijenata u hipolimniju (Rinta i sur., 2017). Istovremeno, produljeno trajanje termalne stratifikacije dovodi do smanjenje koncentracije kisika u hipolimniju što može rezultirati hipoksičnim uvjetima (North i sur., 2014).

Povećanje temperature vode, u kombinaciji s povećanim dotokom kritičnih nutrijenata (osobito dušika i fosfora), povećava kapacitet primarne produkcije, pospješuje dominaciju cijanobakterija u zajednicama fitoplanktona te destabilizira dominaciju makrofita u bistrim jezerima, dovodeći do eutrofikacije (Mooij i sur., 2005). Povećanje temperature vode od 4 °C, što odgovara predikcijama klimatskih scenarija za mnoga jezera, dovodi do smanjene raznolikosti fitoplanktona i dominacije cijanobakterija koje su bolje prilagođene za toplije i promjenjivije uvjete (Rasconi i sur., 2017). Dominacija cijanobakterija ima posljedični utjecaj na zooplankton te na koncentracije kisika i nutrijenata. Osim toga, procjenjuje se da je do 70 % takozvanih cvjetanja cijanobakterija toksično, a upravo povećana temperatura vode potiče pomak iz netoksičnih u toksične vrste cijanobakterija (Scholz i sur., 2017). Usporedba izgleda eutrofičnog jezera Taihu (Kina) i oligotrofnog jezera Tahoe (SAD) prikazana je na Slici 1.



**Slika 1:** (a) Eutrofično jezero Taihu, Kina (izvor: <https://www.lgsonic.com/cyanobacterial-blooms/>) i (b) oligotrofno jezero Tahoe, SAD (izvor: [https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg\\_disp.jsp?med\\_id=184847&from=](https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=184847&from=))

Nadalje, s obzirom na temperaturnu toleranciju pojedinih vrsta organizama, temperatura vode direktno definira njihov habitat. Promjena temperature može dovesti do povećanja ili smanjenja habitata pojedine vrste. Već se sada uočavaju signifikantne razlike u odnosu na ranija razdoblja u obliku pomicanja invazivnih vrsta, a u pesimističnim scenarijima buduće klime, čak do 92 % habitata pojedinih vrsta je kategorizirano kao visokog ili vrlo visokog rizika (Scholz i sur., 2017; Kraemer i sur., 2021; Estrela-Segrelles i sur., 2023).

No promjene temperature vode ne utječu isključivo na bioraznolikost u jezerima već i u njihovom okolišu. Površinska temperatura vode utječe na fenologiju insekata, što na primjer utječe na populaciju komaraca, bolesti koje prenose komarci, broj ptica itd. Drugim riječima, temperatura vode i stratifikacija jezera imaju kaskadne efekte na čitavi ekosustav u i oko jezera.

Termodinamičko ponašanje jezera uglavnom je uvjetovano meteorološkim uvjetima koji kontroliraju tokove topline i vlage te mehanički utjecaj vjetera na površini jezera. No interakcija između jezera i atmosfere je dvosmjerna. Dok je atmosfera s jedne strane glavni pokretač termodinamike jezera, s druge strane jezera također utječu na atmosferske uvjete unoseći heterogenost površine. Specifične fizičke karakteristike jezera u odnosu na okolno tlo, kao što su hrapavost površine, albedo, toplinski kapacitet, temperatura i brzina isparavanja, utječu na površinske atmosferske tokove (MacKay, 2012), a time i na lokalno i regionalno vrijeme i klimu. Uz to, valja obratiti pozornost da efekt koji jezera imaju na vrijeme i klimu, može imati izrazitu sezonsku i dnevnu varijabilnost (Wu i sur., 2019).

Izrazito velika jezera poput Velikih jezera (SAD i Kanda) imaju utjecaj na vrijeme i klimu na regionalnoj skali poremećujući obrasce atmosferske cirkulacije i mezoskalnih pojava, te imaju značajnu ulogu u hidroklimi utječući na dinamiku vlage, evaporaciju i oborinu

(Bryan i sur., 2015; Kristovich i sur., 2017). No čak i relativno mala jezera utječu na meteorološke parametre u svojoj neposrednoj okolini. Klaić i Kvakić (2014) pokazuju da jezero površine 11,55 km<sup>2</sup> (jezero Kosinj, Hrvatska) utječe na temperaturu i vlagu zraka te brzinu vjetra iznad samog jezera, a u određenim vremenskim uvjetima čak i u području unutar 20 – 30 km udaljenosti. Osim toga, čak je i za tako malo jezero, u određenim scenarijima, primijećeno postojanje atmosferske termalne cirkulacije (eng. *lake-land breeze*). Slična atmosferska termalna cirkulacija opažena je i za Plitvičko jezero Kozjak (Staver i sur., 2022), čija je površina samo 0,82 km<sup>2</sup>.

## 1.2 Jezera u svjetlu klimatskih promjena

U literaturi, jezera se često nazivaju nadglednicima klimatskih promjena (eng. *sentinels of climate change*) (Adrian i sur., 2009; Williamson i sur., 2009; Golub i sur., 2022). Kao zatvoreni sustavi, jezera odražavaju sve antropogene i prirodne aktivnosti u svojoj okolini, integrirajući utjecaje s čitavog slivnog područja. S obzirom na njihovu brojnost i distribuciju, jezera predstavljaju globalno razgranatu mrežu ekosustava koja može pružiti vrijedne informacije o uzorcima i mehanizmima kojima kopneni i vodeni sustavi reagiraju na klimatske promjene (Williamson i sur., 2009).

Brojna dosadašnja istraživanja ukazuju na to da klimatske promjene značajno utječu i donose ozbiljne prijetnje vodenim sustavima diljem svijeta (Mooij i sur., 2005; Verburg i Hecky, 2009; Sahoo i sur., 2013; Råman Vinnå i sur., 2021). Dodatno, tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, globalno se povećao i antropogeni pritisak na vodene sustave (Amiri i sur., 2014; Baier i sur., 2014; Janse i sur., 2015; Gude, 2017). Mala jezera posebno su osjetljiva na vanjske utjecaje i promjene (Straile i sur., 2003; Jankowski i sur., 2005).

Odzivi jezera na klimatske promjene su kompleksni i nisu funkcija promjene pojedine klimatske varijable, već kombinacije faktora koji utječu na toplinski budžet, poput temperature zraka, relativne vlažnosti, kratkovalnog i dugovalnog zračenja, brzine vjetra, oborine i sl. Kako bi se mogući odziv jezera i eventualne posljedice što bolje razumjeli i predvidjeli, sve se više truda ulaže u analizu stratifikacije i istraživanje odziva teže mjerivih parametara vode na većim dubinama, a ne samo pri površini. Pojedine studije fokusiraju se na specifična jezera (Matsumoto i sur., 2019; Ayala i sur., 2020; Piccioni i sur., 2021; Noori i sur., 2022b; Sterckx i sur., 2023), no postoje i mnoga istraživanja s

regionalnim ili globalnim obuhvatom (Woolway i Merchant, 2019; Shatwell i sur., 2019; Maberly i sur., 2020; Pilla i sur., 2020; Råman Vinnå i sur., 2021; Woolway i sur., 2021; Golub i sur., 2022; Woolway i sur., 2022; Sharaf i sur., 2023). Kod površinske temperature i temperature epilimnija primjećuje se globalni porast (O'Reilly i sur., 2015), dok promjene temperature vode u hipolimniju ne slijede taj trend te pokazuju visoku varijabilnost kako u predznaku tako i u vrijednosti (Pilla i sur., 2020). Read i sur. (2014) također ističu kontrast između snažno koherentnih temperatura epilimnija koje su uglavnom visoko korelirane s regionalnim temperaturama zraka te brzo i direktno reagiraju na klimatske promjene, nasuprot slabo koherentnim temperaturama hipolimnija i intenzitetu stratifikacije koji pokazuju znatno kompleksnije ponašanje ovisno o lokaciji i morfologiji jezera. Time prepoznaju i naglašavaju potrebu za daljnjim istraživanjem i modeliranjem pojedinačnih jezera kako bi se uhvatila prostorna i vremenska heterogenost odziva jezera. Adrian i sur. (2009) također upozoravaju da je s obzirom na ogromne razlike u veličini, morfologiji i karakteristikama slivnog područja, kao i zemljopisnoj lokaciji jezera, potreban poseban oprez kod donošenja generaliziranih zaključaka u vezi odziva jezera na klimatske promjene.

### **1.3 Uloga temperature vode u Plitvičkim jezerima**

Kako će kasnije biti detaljnije opisano, u fokusu ovog rada su Plitvička jezera, točnije prvo i dvanaesto jezero u sustavu, jezera Prošće i Kozjak. S obzirom da se radi o jedinstvenom geomorfološkom sustavu osobite bioraznolikosti, važno je istaknuti specifične utjecaje i ulogu koju temperatura vode ima konkretno u ovom sustavu.

Svoje nastajanje i postojanje, Plitvička jezera duguju procesu osedranja odnosno stvaranja sedre (eng. *tufa*). Sedra na Plitvičkim jezerima (Slika 2) se uobičajeno definira kao *šupljikava, porozna stijena koja nastaje taloženjem u vodi otopljenog kalcijevog karbonata pomoću biljaka, algi i mahovina* (NPPJ, 2023a). Rastom sedrenih barijera nekadašnja riječna dolina pretvorena je u današnji kaskadni sustav jezera. Iznenadnim pucanjem pojedine barijere ili bržim rastom nizvodne u odnosu na prethodnu uzvodnu barijeru, dolazilo je pak do nestajanja pojedinih jezera ili spajanja dvaju jezera u jedno. Proces stvaranja sedre i evolucija sedrenih barijera aktivan je i danas te neprestano mijenja izgled jezera i slapova.



**Slika 2:** Detalj sedre (a) i sedrene formacije (b) (izvor: NPPJ, 2023a)

Radi se o osjetljivom biodinamičkom procesu, ovisnom o složenoj ravnoteži fizikalnih, kemijskih i bioloških faktora. Stvaranje sedre pozitivno je korelirano s temperaturom vode i odvija se u određenom rasponu temperatura, a osim o temperaturi ovaj proces direktno ovisi i o kemijskom sastavu vode, brzini protoka te kompleksnoj zajednici algi, mahovina i cijanobakterija (Vurnek i sur., 2021; Matoničkin Kepčija i Miliša, 2023).

Nedavna istraživanja ističu utjecaj temperature vode i režima stratifikacije ne samo na proces stvaranja sedre, već i općenito na čitavi ekosustav Plitvičkih jezera. Brozinčević i sur. (2023) bave se kemijskim svojstvima vode Plitvičkih jezera i pokazuju kako temperatura vode i stratifikacija utječu na topljivost kalcijevog karbonata, koncentraciju otopljenog kisika, brzinu difuzije ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) te kiselost i tvrdoću vode. Ternjej i sur. (2023) spominju da je dominacija određenih vrsta fitoplanktona u Plitvičkim jezerima visoko osjetljiva na temperaturu vode i stratifikaciju. Nadalje, kada je vodeni stupac u jezeru izmiješan, proizvodnja klorofila odvija se kroz cijelu vodenu masu, dok je tijekom razdoblja stratifikacije proizvodnja klorofila ograničena na epilimniju. Pronađena je značajna korelacija između ukupne gustoće makro-zooplanktona i temperature vode, budući da temperatura vode utječe na njihov rast, trajanje pojedine faze u životnom ciklusu i pojavu pojedinih vrsta tijekom godine (Ternjej i sur., 2023). Niz makroorganizama je također osjetljiv na temperaturu vode. Fenologija izlijeganja različitih vrsta insekata ovisi o temperaturi površinske vode (Čmrlec i sur., 2013; Ivković i Pont, 2016; Ivković i sur., 2023). Promjene okolišnih faktora poput temperature mogu habitat učiniti neodgovarajućim za određene vrste bentičkih makro-beskralježnjaka i natjerati ih na ulazak u pasivni drift (Miliša i sur., 2023). Neke riblje vrste, poput pastrve, koja je jedna od samo tri riblje vrste autohtone za područje Plitvičkih jezera, zahtijevaju relativno hladnu vodu bogatu kisikom (Buj i sur., 2023).



Jezero Prošće, prvo jezero u nizu, karakterizira se kao mezotrofno, dok se ostala Plitvička jezera karakteriziraju kao oligotrofna. Međutim, već je primijećen napredak močvarnih zajednica i akvatične vegetacije povezane s eutrofikacijom oligotrofnih krških jezera (Alegro i sur., 2023). Osim toga, iako je područje Plitvičkih jezera proglašeno zaštićenim područjem te se ulažu značajni naponi kako bi se minimizirao ljudski utjecaj, rizik od antropogene eutrofikacije još nije u potpunosti iskorijenjen te i dalje postoji. Intenzivni razvoj turizma na području Plitvičkih jezera već je odavno identificiran kao prijetnja koja dovodi do povećane onečišćenosti i proizvodnje otpada (Roglić, 1951; Petrik, 1961; Böhm, 1997), što doprinosi mogućoj eutrofikaciji jezera. Neriješeni kanalizacijski sustav, zajedno s nezadovoljavajuće riješenim sustavom odvodnje otpadnih voda iz gospodarstava u slivnom području Plitvičkih jezera, predstavlja glavni izvor zabrinutosti. Povećanje crpljenja vode iz Plitvičkih jezera, s glavnim postrojenjem na jezeru Kozjak, stvara značajan pritisak na ekosustav uslijed rasta potražnje. Situaciju pogoršava trend izgradnje novih smještajnih kapaciteta bez osigurane vodoopskrbe i kanalizacijskog sustava. Dodatni rizik od onečišćenja predstavlja i magistralna državna cesta koja prolazi kroz slivno područje, a koja se među ostalim koristi i za prijevoz opasnog i teškog tereta. Svi ovi čimbenici, u kombinaciji s klimatskim promjenama i povećanjem temperature vode, mogu dovesti do povećanja metaboličke aktivnosti, cvatnje algi i eutrofikacije (Zhang i Chadwick, 2022). Ranjivost sustava na klimatske i antropogene čimbenike više je nego očita.

Važno je naglasiti i socijalno-ekonomski utjecaj Plitvičkih jezera. Nacionalni park Plitvička jezera (NPPJ) ima ključnu ulogu u životu i razvoju lokalne zajednice, budući da je najveći poslodavac u širem području. Prema službenim informacijama zapošljava 30 % stalnih i 90 % sezonskih radnika (Kovačević i sur., 2019). Osim toga, NPPJ generira značajan broj dodatnih radnih mjesta kroz stvaranje potražnje za različitim uslugama, kupnju poljoprivrednih proizvoda te povećanje smještajnih kapaciteta.

#### **1.4 Modeli za simulaciju temperature jezera**

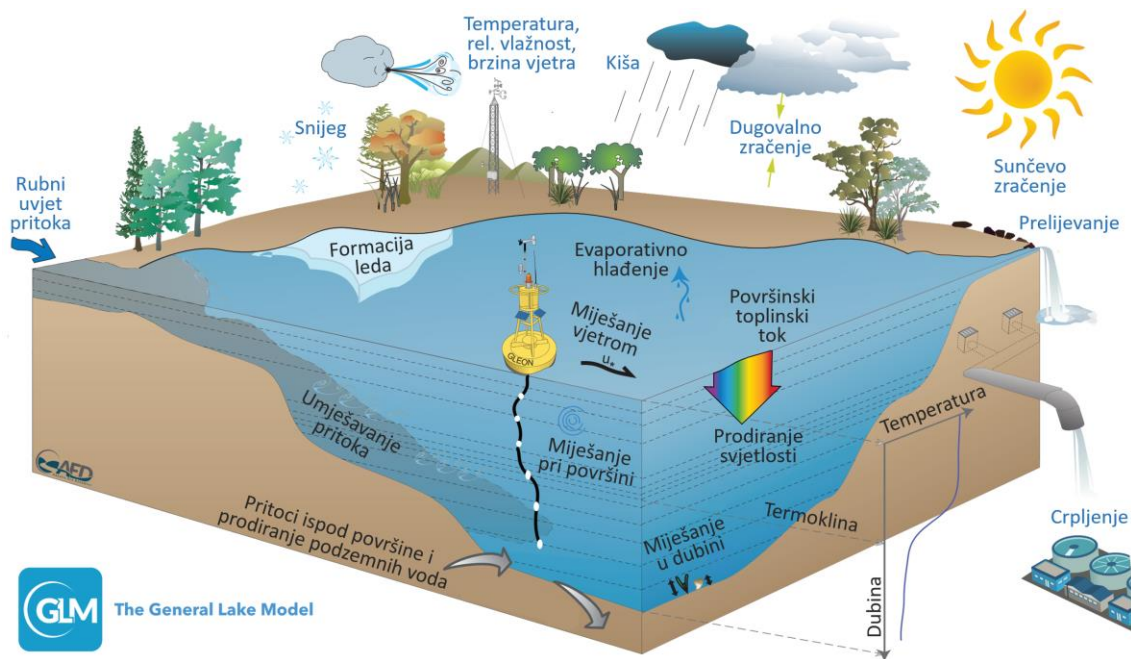
S obzirom na ulogu temperature jezerske vode u čitavom ekosustavu, te njezin utjecaj na vrijeme i klimu, nije začuđujuće da se posljednjih nekoliko desetljeća sve veći znanstveni interes fokusira na modeliranje toplinskog režima jezera (Stepanenko i sur., 2013; Thiery i sur., 2014; Stepanenko i sur., 2016; MacKay i sur., 2017) i njegovu osjetljivost na

klimatske promjene (Woolway i Merchant, 2019; Shatwell i sur., 2019; Maberly i sur., 2020; Pilla i sur., 2020; Råman Vinnå i sur., 2021; Woolway i sur., 2021; Golub i sur., 2022; Woolway i sur., 2022; Sharaf i sur., 2023). Koristi se čitav niz različitih modela sa širokim rasponom razine kompleksnosti. Najveću razinu kompleksnosti imaju trodimenzionalni (3-D) modeli. Ti su modeli posljedično računalno najskuplji, komplicirano ih je spregnuti s numeričkim modelima za prognozu vremena te su najzahtjevniji u smislu potrebnih ulaznih podataka koji često nisu lako dostupni.

Zahvaljujući njihovoj relativnoj jednostavnosti i računalnoj učinkovitosti, jednodimenzionalni (1-D) modeli za prognozu temperature vode imaju znatno širu primjenu. Postoji više vrsta 1-D modela različite složenosti, a općenito se mogu podijeliti u tri skupine:

- (1) modeli s izmiješanim slojevima temeljeni na pristupu energetske bilance,
- (2) modeli toplinske difuzije (diferencijalni modeli) temeljeni na rješavanju 1-D jednadžbe prijenosa topline i
- (3) modeli turbulencije drugog reda zatvaranja ( $k$ - $\varepsilon$  modeli).

Modeli temeljeni na proračunu energetske bilance najčešće pretpostavljaju da postoje dva dobro izmiješana sloja (epilimniji i hipolimniji), a za procjenu dubine i dinamike miješanja tih slojeva koriste kinetičku energiju proizvedenu smicanjem vjetra na površini jezera. Tu spadaju TEMIX (Bell i sur., 2006), Flake (Mironov i sur., 2010; Thierry i sur., 2014), General Lake Model – GLM (Hipsey i sur., 2019), Canadian Small Lake Model - CSLM (MacKay i sur., 2017) itd. Modeli temeljeni na toplinskoj difuziji obično se sastoje od većeg broja dobro izmiješanih slojeva za koje se postavlja i rješava jednadžba prijenosa topline (Hostetler i Bartlein, 1990; Liston i Hall, 1995; Stefan i sur., 1998; Sun i sur., 2007). Modeli turbulencije drugog reda zatvaranja poznati su i kao  $k$ - $\varepsilon$  modeli, gdje je  $k$  turbulentna kinetička energija po jedinici mase, a  $\varepsilon$  brzina rasipanja (disipacije) turbulentne kinetičke energije. Ti modeli rješavaju jednadžbu prijenosa turbulentne kinetičke energije i zahtijevaju znatno više računalnih resursa od modela iz prethodne dvije skupine. Primjeri takvih modela su Simstrat (Goudsmit i sur., 2002) i LAKE (Stepanenko i sur., 2011; Stepanenko i sur., 2016).



**Slika 3:** Prikaz ulaznih podataka (plavi tekst) i ključnih procesa (crni tekst) uključenih u GLM model (prilagođeno iz rada Hipsey i sur., 2019)

Osim u osnovnom pristupu, modeli za prognozu temperature jezera razlikuju se i po procesima koje uključuju, poput izmjene topline (toplinskog toka) između jezerske vode i sedimenata, atenuacije svjetlosti, fazne promjene vode, konvekcijskog miješanja, efekta zavjetrine i drugih. Na Slici 3 su, kao primjer, shematski prikazani različiti procesi uzeti u obzir u spomenutom GLM modelu. Direktno uključivanje određenog procesa u model, pojednostavljenje procesa pomoću parametrizacije ili čak njegovo potpuno zanemarivanje, najčešće ovisi o svrsi modela te je njome opravdano.

Modeli jezera razvijaju se u različite svrhe, uključujući unapređivanje numeričkih modela za prognozu vremena ili klimatskih modela (Mironov i sur., 2010; MacKay, 2012; Wu i sur., 2020), procjenu utjecaja klimatskih promjena (Stefan i sur., 1998; Wu i sur., 2019; Råman Vinnå i sur., 2021) ili za potrebe posebnih limnoloških istraživanja. Posebna istraživanja mogu se baviti emisijama plinova, kao na primjer metana i/ili CO<sub>2</sub>, (Stepanenko i sur., 2011), koncentracijom kisika i hranjivih tvari (Bell i sur., 2006), izmjenom topline i mase između atmosfere i jezera (Sun i sur., 2007), pojavom leda (Sharma i sur., 2021; Li i sur., 2022), isparavanjem i fluktuacijom razine jezera (Hostetler i Bartlein, 1990) itd.

## 1.5 Motivacija i ciljevi istraživanja

Za forsiranje modela za prognozu temperature vode u jezerima potrebni su ulazni podaci, koji često nisu dostupni iz rutinskih meteoroloških mjerenja, kao na primjer podaci o komponentama kratkovalnog i dugovalnog zračenja. *Prvi cilj ovog istraživanja je formulirati pojednostavljeni model, SIMO (eng. SIMplified MOdel), za prognozu vertikalnog temperaturnog profila u malim, toplim, monomiktičnim jezerima forsiran što manjim brojem meteoroloških varijabli.* Model je temeljen na rješavanju jednodimenzionalne jednadžbe energetske bilance koja se koristi u sličnim modelima (Hostetler i Bartlein, 1990; Liston i Hall, 1995; Sun i sur., 2007), a opisali su ga Šarović i sur. (2022). Za forsiranje modela se osim opcionalnog korištenja podataka o ultraljubičastom B zračenju (UVB), koriste isključivo rutinski dostupni prizemni meteorološki podaci (temperatura zraka, relativna vlaga, atmosferski tlak, brzina vjetera i količina oborine). Nasuprot tome, drugi modeli za prognozu temperature jezera forsirani mjerenim meteorološkim podacima (Bell i sur., 2006; Sun i sur., 2007; Martynov i sur., 2010; MacKay, 2012; MacKay i sur., 2017) zahtijevaju mjerenja kratkovalne i dugovalne komponente zračenja. Umjesto izmjerenih vrijednosti, SIMO koristi pažljivo odabrane parametrizacije dugovalnog i kratkovalnog zračenja uz model apsorpcije svjetlosti s dubinom. Iako su neke od ovih parametrizacija dobro poznate, u ovom radu prvi put su direktno inkorporirane u prognostički model temperature jezera.

Model se evaluira kako bi se dokazala njegova uspješnost, odnosno kako bi se pokazalo da ima zadovoljavajuće performanse u usporedbi s kompleksnijim modelima. Za potrebe evaluacije, SIMO je primijenjen na dva jezera iz sustava Plitvičkih jezera, Prošće i Kozjak, te su dobiveni rezultati uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima kontinuiranog mjerenja temperaturnog profila u ta dva jezera. Važno je napomenuti da je time po prvi puta simulirana temperatura vode te nastupanje, razvoj i trajanje stratifikacije za jezera iz sustava Plitvičkih jezera i općenito za jezera u Hrvatskoj.

Osim uobičajenog računanja mjera uspješnosti za odabrani period simulacije, analizirana je i osjetljivost tih parametara na duljinu trajanja simulacije za kratkoročne simulacije duljine trajanja do maksimalno 30 dana. Prema saznanjima autora, takva detaljna evaluacija nije objavljena u dosadašnjim studijama koje se bave prognozom temperature jezera.

Uobičajeno se vertikalni temperaturni profili u jezerima ne mjere rutinski ili se mjere s grubom vremenskom rezolucijom. Na primjer, u slučaju Plitvičkih jezera, u okviru monitoringa se obavljaju jednom mjesečno. Prema tome, od velikog je interesa i sposobnost određenog modela da simulira početak i kraj razdoblja stratifikacije jezera dugoročnom simulacijom iniciranom uniformnim temperaturnim profilom odnosno potpuno izmiješanim stupcem vode karakterističnim za razdoblje potpunog konvektivnog miješanja. Istraživanja koja su obuhvaćala takve simulacije proveli su Martynov i sur. (2010) primjenjujući model turbulentne difuzije i dvoslojni model na dva mala dimiktična jezera u SAD-u, Goudsmit i sur. (2002) analizirajući performanse  $k-\varepsilon$  modela simulacijama perioda duljine do dvije godine, te Bruce i sur. (2018) razmatrajući set od 32 jezera diljem svijeta uz upotrebu GLM modela. Svi su ti modeli složeniji i/ili zahtijevaju opsežnije ulazne podatke od modela predloženog u ovom radu.

Uzimajući u obzir osjetljivost jezerskih ekosustava na klimatske promjene, *drugi cilj ovog istraživanja je primijeniti razvijeni model za analizu utjecaja klimatskih promjena na temperaturu vode i stratifikaciju jezera Kozjak, za različite scenarije buduće klime.* Temperaturni profil vode u jezeru Kozjak projiciran je za tri različita scenarija puteva reprezentativne koncentracije (eng. *Representative Concentration Pathways*, RCP). Time se u ovoj studiji prvi puta procjenjuje odgovor najvećeg Plitvičkog jezera, jezera Kozjak, na buduće klimatske promjene. Rezultate tog dijela istraživanja objavili su Šarović i Klaić, (2023). S obzirom na relativnu varijabilnost odziva jezera na klimatske promjene, ovaj rad dodatno doprinosi globalnim istraživanjima jezera analizirajući odgovor malog, krškog jezera na klimatske promjene. Svrha je rasvijetliti potencijalno specifičan odgovor jezera Kozjak na klimatske promjene, uzimajući u obzir njegovu morfologiju (jezero je malo no relativno duboko) i zemljopisni položaj. Dobiveni rezultati pružaju uvid u očekivano ponašanje jezera sličnih karakteristika u umjerenim zemljopisnim širinama, posebice onih smještenih u planinskim područjima. Osim toga ovi rezultati predstavljaju vrijedne ulazne podatke za brojna limnološka i multidisciplinarna istraživanja te potencijalno mogu pomoći lokalnoj zajednici u upravljanju i zaštiti jezera.

Postavljeni ciljevi i hipoteze ovog rada mogu se sažeti kao:

**Cilj 1:** Formulirati pojednostavljeni model za prognozu vertikalnog temperaturnog profila u malim, toplim, monomiktičnim jezerima forsiran što manjim brojem meteoroloških varijabli.

**Hipoteza 1.1:** U usporedbi s kompleksnijim modelima, takav model može imati zadovoljavajuće performanse.

**Hipoteza 1.2:** Takav model se može koristiti za dugoročnu prognozu temperature, odnosno može predvidjeti razvoj stratifikacije i nastupanje konvektivnog miješanja.

**Cilj 2:** Pomoću razvijenog modela analizirati utjecaj klimatskih promjena na temperaturu vode i stratifikaciju jezera Kozjak, za različite RCP scenarije buduće klime.

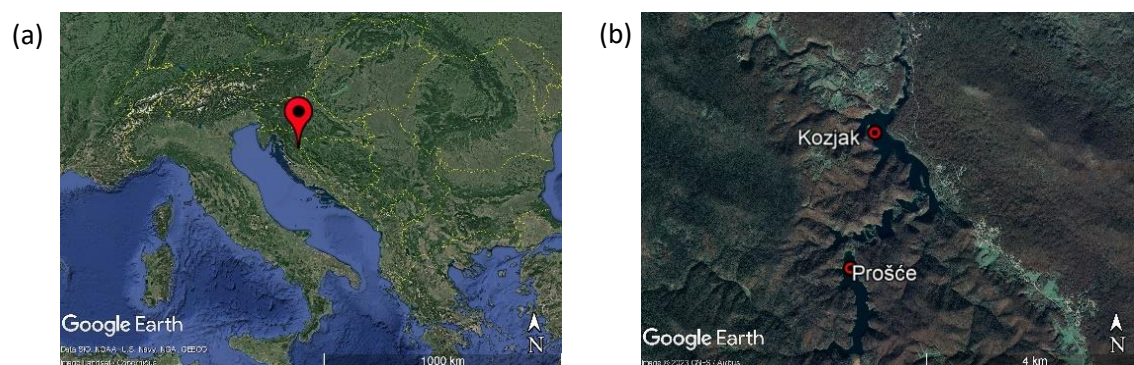
**Hipoteza 2.1:** U budućoj klimi, očekuje se znatan porast temperature jezera, jačanje stratifikacije te produljenje trajanja stratifikacije.



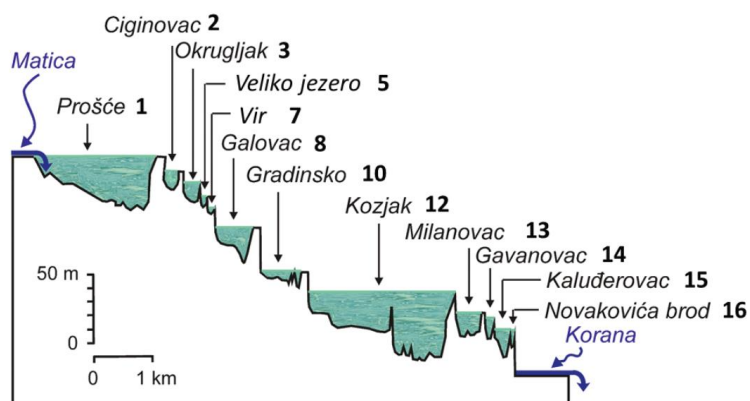
## 2 PODACI

### 2.1 Područje istraživanja

Plitvička jezera su jezerski sustav smješten u planinskom području Hrvatske (Slika 4). Sustav se sastoji od 16 imenovanih i nekoliko manjih neimenovanih jezera s ukupnom površinom vode od 1,949 km<sup>2</sup> (Slika 5). Jezera su međusobno povezana kaskadama i slapovima, čineći približno 9 km dugi lanac. Prvo, najjužnije jezero u lancu, jezero Prošće, nalazi se na nadmorskoj visini od 636 m, dok je posljednje jezero u nizu, jezero Novakovića Brod, smješteno na nadmorskoj visini od 503 m. Sustav jezera proteže se približno u smjeru od juga prema sjeveru.



**Slika 4:** Lokacija Plitvičkih jezera (crvena oznaka) (a) i zorniji prikaz sustava (b), (izvor © Google Earth)



**Slika 5:** Poprečni presjek sustava Plitvičkih jezera u približnom smjeru jug-sjever (izvor: Klaić i sur., 2018)



Područje Nacionalnog parka Plitvička jezera dio je dinarskog krškog područja. Obuhvaća izrazito karakteristične geološke, geomorfološke i hidrološke značajke koje stvaraju neobičnu ljepotu krajolika. Karbonatne stijene koje dominiraju terenom predstavljaju ključan faktor u formiranju specifične i izuzetno bogate morfologije ovog predjela. Na području parka zabilježeno je otprilike 8000 ponora, nekoliko krških visoravni i 114 speleoloških lokaliteta s ukupnom istraženom duljinom od 1664 m i dubinom od 2251 m (Kovačević i sur., 2019). Karbonatne stijene također značajno utječu na mineralni sastav vode u sustavu (Petalas i sur., 2018; Pratama i sur., 2021). Kalcijev karbonat otopljen u vodi jedan je od osnovnih uvjeta koji omogućuju proces stvaranja sedre zaslužan za nastajanje jezera, kaskada i slapova.

Zahvaljujući svojoj prirodnoj ljepoti, iznimnoj biološkoj raznolikosti i hidrogeološkoj jedinstvenosti, Plitvička jezera su prvi nacionalni park u Hrvatskoj, osnovan 1949. godine (NPPJ, 2023b), a od 1979. godine su upisana na UNESCO-ov popis svjetske baštine (UNESCO, 2023). Njihova jedinstvenost prije svega proizlazi iz biodinamičkih procesa stvaranja sedre, odgovornih za kontinuirano formiranje prirodnih brana i prepreka koje oblikuju jezerski sustav. Kako je već napomenuto u uvodu (Poglavlje 1.3), ti procesi ovise o krhkoj ravnoteži fizikalnih, kemijskih i bioloških uvjeta. Drugim riječima, odvijaju se u uskom rasponu temperature i kemijskog sastava vode, u prisutnosti određenih živih organizama (mikrofiti, makrofiti i bakterije), a dodatni bitni faktor predstavlja i količina i brzina protoka vode. Svojom jedinstvenom geomorfologijom i iznimnom biološkom raznolikošću, područje je predmet znanstvenih istraživanja još od 1850. godine (NPPL, 2021). Opsežan multidisciplinarni pregled abiotičkih studija usredotočenih na područje Plitvičkih jezera dali su Klaić i sur. (2018).

U svrhu evaluacije numeričkog modela za prognozu vertikalnog temperaturnog profila SIMO, model je primijenjen na dva najveća jezera sustava, jezera Prošće i Kozjak (Slike 4b i 5). Jezero Prošće je prvo i najjužnije jezero u sustavu, dok je jezero Kozjak 12. jezero u nizu. Osnovne karakteristike svakog jezera navedene su u Tablici 1. S obzirom na površinu i obujam, oba jezera klasificiraju se kao mala (Forcat i sur., 2011).

**Tablica 1:** Osnovne karakteristike jezera Prošće i Kozjak

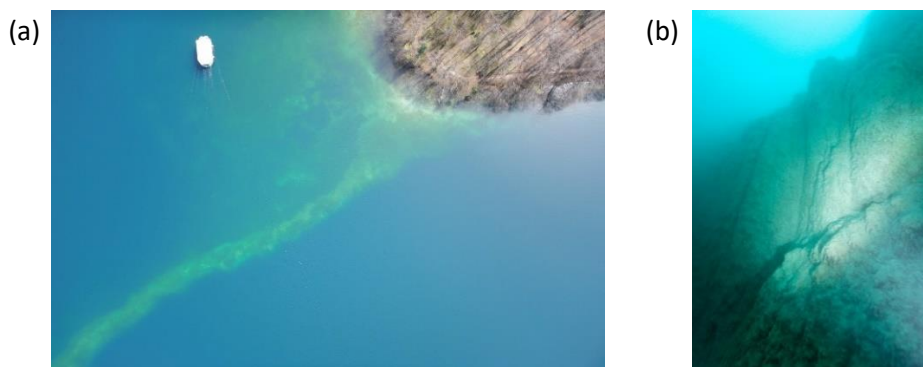
	<b>Jezero Prošće</b>	<b>Jezero Kozjak</b>
Nadmorska visina	636,6 m n.v.*	535 m n.v.
Površina	0,68 km <sup>2</sup>	0,82 km <sup>2</sup>
Volumen	0,00767 km <sup>3</sup>	0,01271 km <sup>3</sup>
Maksimalna / Prosječna dubina	37,4 / 13,2 m	46 / 17,3 m

\* n.v. – nadmorske visine

U drugom dijelu rada koji se bavi analizom utjecaja klimatskih promjena, fokus je stavljen na jezero Kozjak. Jezero Kozjak najveće je jezero u sustavu, kako po površini (0,82 km<sup>2</sup>) tako i po obujmu (0,01271 km<sup>3</sup>), a također i najdublje, s maksimalnom i prosječnom dubinom od 46 m odnosno 17,3 m. Jezero se proteže duž 2300 m, a širina varira između 100 i 600 m. Potopljena barijera (Slika 6), čiji se vrh nalazi 5 – 6 m ispod površine vode, dijeli jezero na dva bazena: dublji sjeverni bazen s duljinom od oko 730 m i plići južni bazen s duljinom od oko 1570 m. Složena morfologija jezera formirala se prije otprilike 400 godina kada su se spojila dva manja jezera uslijed potapanja brane koja ih je razdvajala. Postoje dvije teorije koje objašnjavaju ovaj događaj. Starija teorija (Petrik, 1958; Srdoč i sur., 1985) sugerira da je nizvodna sedrena barijera (trenutno aktivna brana jezera Kozjak) rasla brže od uzvodne brane između tadašnja dva jezera, uzrokujući porast razine vode drugog jezera sve dok nije dosegla i premašila uzvodnu branu. Ova teorija zamijenjena je novom 2019. godine kada su roniaci otkrili mjesto gdje se dio potopljene barijere vjerojatno odlomio, stvarajući kanal širine 4 m. Time je donja brana postala jedina aktivna i tako je nastalo današnje jezero Kozjak (NPPJ, 2023c).

Glavni izvor vode jezera Kozjak je uzvodno jezero s prosječnim godišnjim protokom od 2,14 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (minimalni protok iznosi 0,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, a maksimalni 11,6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Jezero također dobiva značajnu količinu vode od rijeke Rječice te potoka Jasenovac i Matijaševac, s ukupnim godišnjim prosječnim protokom od 0,67 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (minimalni ukupni protok iznosi 0,2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, a maksimalni 3,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) (Biondić i sur., 2010).

Tijekom ljeta, protok vode kroz jezerski sustav postaje vrlo slab, posebno u južnom dijelu sustava, između jezera Prošće i jezera Kozjak (Petrik, 1958). To znači da se termodinamički procesi uglavnom odvijaju lokalno u svakom jezeru zasebno. Postojeći protok je u obliku plitkih vodopada i kaskada. Stoga tijekom perioda ljetne stratifikacije od uzvodnog prema nizvodnom jezeru teče samo voda iz zagrijanog epilimnijskog sloja.



**Slika 6:** Potopljena barijera jezera Kozjak (izvor: NPPJ, 2023c)

Petrik (1961) također primjećuje da u toplom dijelu godine dolazi do porasta površinske temperature vode od izvora prema zadnjem jezeru. Ovaj nizvodni porast površinske temperature vode najizraženiji je u samom jezeru Prošće, a manje izražen između izlaza iz jezera Prošće i izlaza iz jezera Kozjak. Tijekom hladne sezone primijećen je nizvodni pad temperature (Petrik, 1961; za detalje pogledati Klaić i sur., 2018).

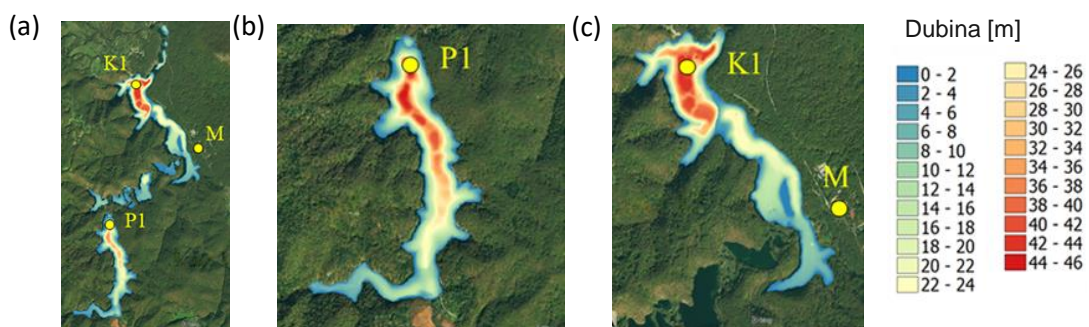
Niz studija, bilo da koriste povijesne podatke mjerenja, bilo rezultate simulacija budućih scenarija, izvještavaju o globalnim promjenama u režimu miješanja i stratificiranja jezera uslijed klimatskih promjena (Woolway i Merchant, 2019; Shatwell i sur., 2019; Råman Vinnå i sur., 2021). Råman Vinnå i sur. (2021) ističu mala jezera niske do umjerene nadmorske visine ( $< 1500$  m n.v.) i malog obujma ( $< 0,5$  km<sup>3</sup>), upravo poput jezera Kozjak, kao posebno podložna promjeni režima. Prethodna istraživanja, uglavnom temeljena na starijim sporadičnim promatranjima, klasificiraju jezero Kozjak kao dimiktično (Babinka, 2007; Špoljar i sur., 2007; Klaić i sur., 2018). Međutim, u posljednjih nekoliko godina, smrzavanje jezera nije zabilježeno (NPPJ, osobna komunikacija). Kasnija pojava i ranije topljenje ili potpuni izostanak leda, prepoznati su kao široko rasprostranjena posljedica globalnog zatopljenja (Sharma i sur., 2019; Imrit i Sharma, 2021; Sharma i sur., 2021) s kaskadnim učincima na temperaturu vode i razvoj stratifikacije (Woolway i sur., 2021), kao i na ekološke procese (Hebért i sur., 2021). Osim toga, kontinuirano mjerenje temperaturnog profila vode jezera Kozjak od 2018. do 2020. godine također ukazuje da se jezero počinje ponašati kao monomiktično (Poglavlje 2.2), najvjerojatnije kao rezultat klimatskih promjena.

## **2.2 Mjerenja temperaturnog profila vode**

Za evaluaciju prognostičkog modela SIMO koriste se podaci o temperaturi vode prikupljeni u okviru projekta Hidrodinamičko modeliranje sustava Plitvičkih jezera. Koriste se temperature vode izmjerene u dvije različite točke, jedna u jezeru Prošće (točka P1,  $\varphi = 44,8676^\circ$  N,  $\lambda = 15,5981^\circ$  E, 636 m n.v.) i jedna u jezeru Kozjak (točka K1,  $\varphi = 44,8902^\circ$  N,  $\lambda = 15,6038^\circ$  E, 535 m n.v.), prikazane na Slici 7. Obje točke pozicionirane su u području najvećih dubina pojedinog jezera. Mjerenje temperature obavljeno je pomoću vodootpornih temperaturnih senzora s vlastitim modulom za pohranu izmjerenih vrijednosti (HOBO TidBit MX Temp 400), kako su prethodno opisali za jezero Prošće Klaić i sur. (2020a) odnosno za jezero Kozjak Klaić i sur. (2020b). Senzori su tvornički

kalibrirani, a njihova preciznost iznosi  $\pm 0,20$  °C za raspon temperature između 0 i 70 °C, odnosno  $\pm 0,25$  °C za raspon temperature između -20 i 0 °C. Temperatura vode uzorkovana je frekvencijom od 1 Hz, a pohranjivane su srednje vrijednosti za periode od 2 minute. Međutim, budući da su meteorološki podaci bili dostupni s rezolucijom od jednog sata, u ovom istraživanju izračunate su i korištene srednje satne vrijednosti.

Na lokaciji P1 u jezeru Prošće, postavljeno je 15 senzora na fiksnim dubinama od 0,2, 0,5, 1, 1,5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 20, 23 i 27 m. Kako je jezero Kozjak dublje od jezera Prošće, na lokaciji K1 uz 15 senzora na istim dubinama kao na lokaciji P1, postavljen je i dodatni senzor na dubini od 43 m. Senzori su bili fiksno pričvršćeni na konopu čiji je jedan kraj usidren na dnu, a drugi vezan za bovu na površini. Time je osigurana fiksna dubina i pozicija senzora. Mjerenje temperature vode u jezeru Kozjak započelo je 7. srpnja 2018., a u jezeru Prošće 6. srpnja 2019. (Tablica 2).



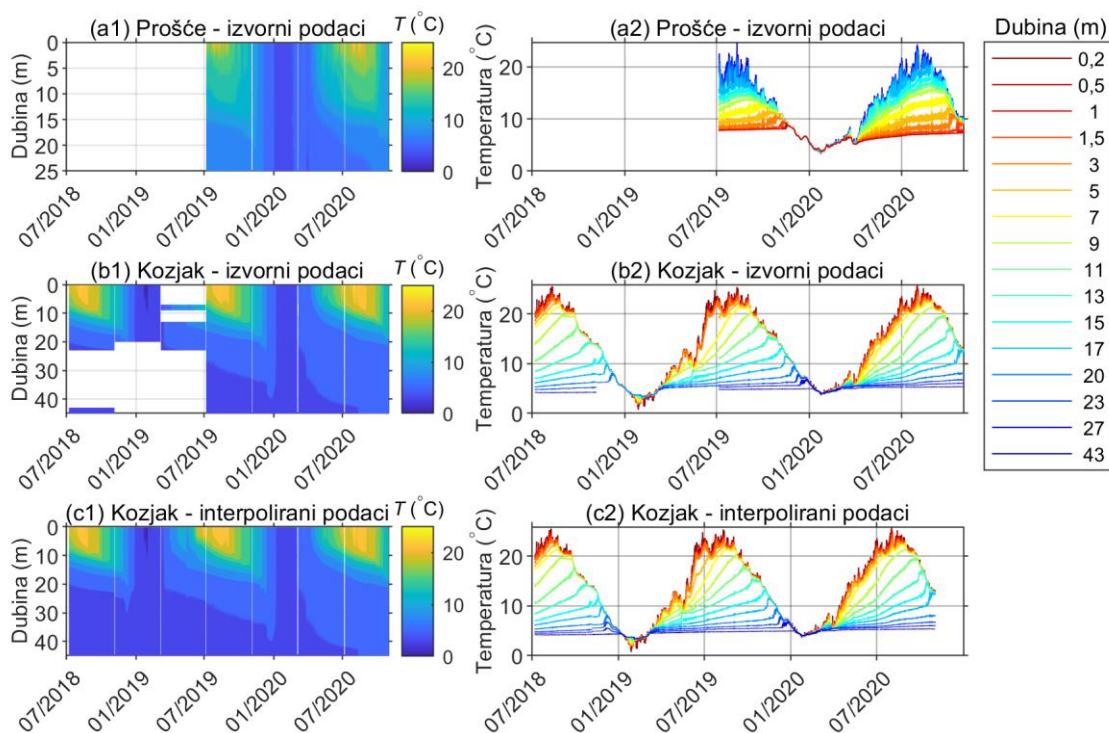
**Slika 7:** Kompozitna slika batimetrije jezera i digitalne ortofoto karte: prikaz cijelog jezerskog sustava (a), jezera Prošće (b) i jezera Kozjak (c). Lokacije točaka mjerenja temperaturnog profila vode P1 ( $\varphi = 44,8676^\circ$  N,  $\lambda = 15,5981^\circ$  E, visina površine jezera 636 m n.v.) i K1 ( $\varphi = 44,8902^\circ$  N,  $\lambda = 15,6038^\circ$  E, 535 m n.v.) te meteorološke mjerne postaje M ( $\varphi = 44,8811^\circ$  N,  $\lambda = 15,6197^\circ$  E, 579 m n.v.) prikazane su žutim točkama.

**Tablica 2:** Raspoloživost rezultata mjerenja. Lokacije mjernih točaka prikazane su na Slici 7

Set podataka	Mjerna točka	Raspoloživost podatka	
Temperatura vode	K1 (Kozjak, maksimalna dubina 46 m) $\varphi = 44,8902^\circ$ N, $\lambda = 15,6038^\circ$ E, 535 m n.v.	07.07.2018.	02.11.2020.
Temperatura vode	P1 (Prošće, maksimalna dubina 37,4 m) $\varphi = 44,8676^\circ$ N, $\lambda = 15,5981^\circ$ E, 636 m n.v.	06.07.2019.	02.11.2020.
Meteorološki podaci	M $\varphi = 44,8811^\circ$ N, $\lambda = 15,6197^\circ$ E, 579 m n.v.	07.07.2018.	04.11.2018.
		01.01.2019.	31.12.2019.
		02.07.2020.	30.09.2020.

Vrijednosti temperature bilježene su neprekidno izuzev tijekom nekoliko kratkih razdoblja od 1-2 dana, otprilike svaka četiri mjeseca, kada su senzori vađeni iz jezera u svrhu prikupljanja i pohranjivanja podataka. Ova razdoblja bez izmjerenih podataka mogu se primijetiti kao tanke bijele vertikalne linije na Slikama 8a1–c1.

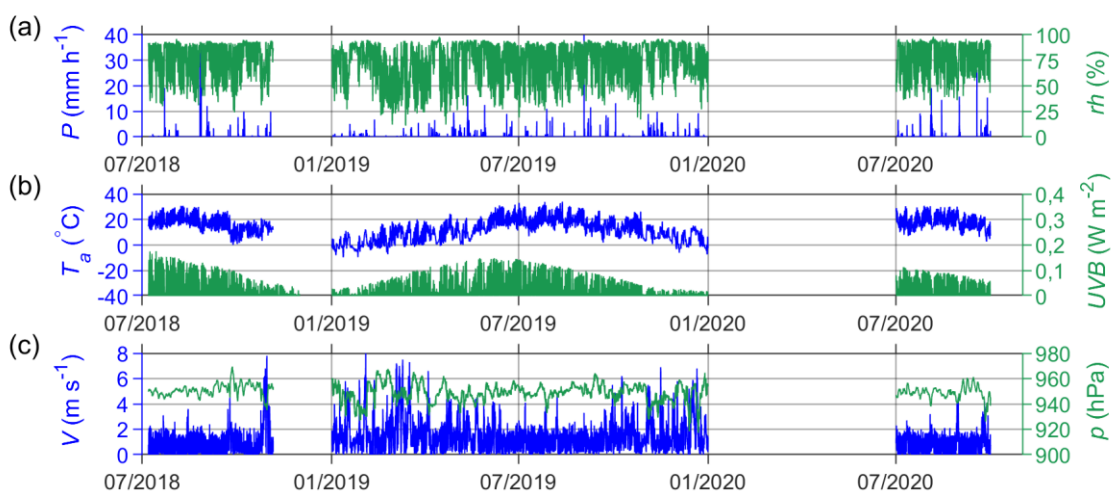
Zbog neispravnosti nekih senzora tijekom prve godine mjerenja, nedostaju podaci za neke promatrane dubine u jezeru Kozjak. Nedostajući podaci prikazani su kao bijela područja od srpnja 2018. do srpnja 2019. na Slici 8b1 ili kao prekinute linije na Slici 8b2. Senzori koji nisu bili u funkciji kasnije su zamijenjeni. Nedostajući podaci na određenim dubinama popunjeni su pomoću prostorne linearne interpolacije između dviju susjednih dubina koristeći postojeće podatke (Slike 8c1–c2). U periodu u kojem nedostaju podaci najdubljeg senzora, najprije su vremenskom linearnom interpolacijom izračunate vrijednosti za tu dubinu. Ovo je opravdano s obzirom na nisku varijabilnost temperature vode na toj dubini. S druge strane, vremenska interpolacija nije rađena za periode prikupljanja podataka iz razloga što se tim postupkom ne bi reproducirala vremenska varijabilnost temperature jezera na manjim dubinama.



**Slika 8:** Izmjerene vrijednosti temperature vode u jezeru Prošće (a1 – a2) i jezeru Kozjak (b1 – b2) te vrijednosti temperature vode u jezeru Kozjak nakon interpolacije izmjerenih podataka (c1 – c2)

### 2.3 Izmjereni meteorološki podaci

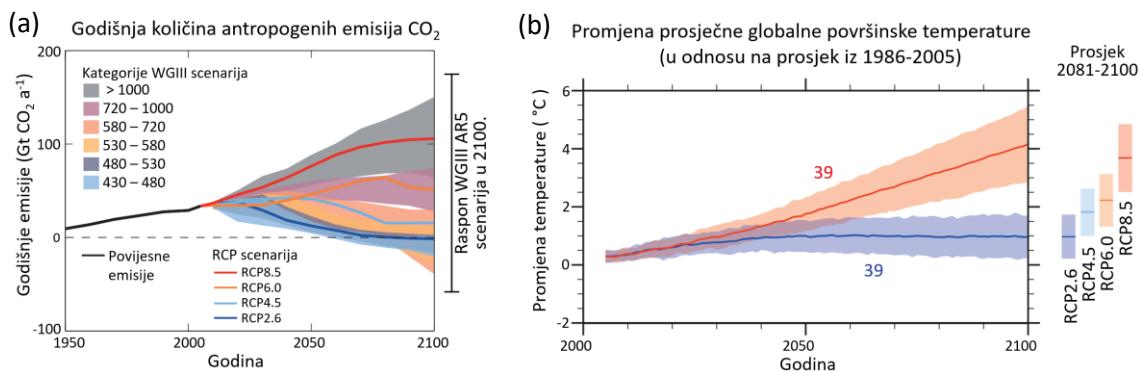
Simulacije provedene u svrhu evaluacije modela SIMO forsirane su meteorološkim podacima dobivenih od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) Republike Hrvatske koji je također osigurao i kontrolu kvalitete podataka. Podaci su izmjereni na meteorološkoj mjernoj postaji Plitvička jezera koja je dio mreže automatskih mjernih postaja DHMZ-a. Lokacija mjerne postaje označena je točkom M na Slikama 7a i c ( $\varphi = 44,8811^\circ$  N,  $\lambda = 15,6197^\circ$  E, 579 m n.v.) U ovom istraživanju korištene su srednje satne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka, atmosferskog tlaka i UVB zračenja mjenjenih na 2 m iznad tla, brzine vjetra mjerene na 10 m iznad tla te količine oborina (Slika 9). Dostupni su bili i podaci o smjeru vjetra no nisu korišteni u ovom istraživanju. Postaja se nalazi oko 2 km sjeveroistočno od lokacije P1 odnosno oko 1,6 km jugoistočno od lokacije K1. Unatoč relativno maloj razlici u udaljenosti od obje lokacije, može se pretpostaviti da su meteorološki uvjeti u točki M reprezentativniji za jezero Kozjak nego za jezero Prošće. Naime meteorološka postaja locirana je na padini uz samo jezero Kozjak, na otprilike 200 m udaljenosti od njegove obale. Razlika u nadmorskoj visini između točaka P1 i M veća je nego razlika između točaka K1 i M (Tablica 2), a treba napomenuti i da se radi o terenu kompleksne orografije s topografskim preprekama između točaka P1 i M. Osim toga jezero Kozjak, zajedno s mjernom postajom, je puno zaklonjenije u odnosu na jezero Prošće, pa izmjerene brzine vjetra vrlo vjerojatno podcjenjuju stvarne vrijednosti iznad jezera Prošće.



**Slika 9:** Dostupni meteorološki podaci s automatske mjerne postaje Plitvička jezera ( $\varphi = 44,8811^\circ$  N,  $\lambda = 15,6197^\circ$  E, 579 m n.v.): (a) količina oborine ( $P$ ) i relativna vlažnost zraka ( $rh$ ), (b) temperatura zraka ( $T_a$ ) i UVB zračenje ( $UVB$ ), (c) brzina vjetra ( $V$ ) i atmosferski tlak ( $p$ )

## 2.4 Meteorološki podaci klimatskih projekcija

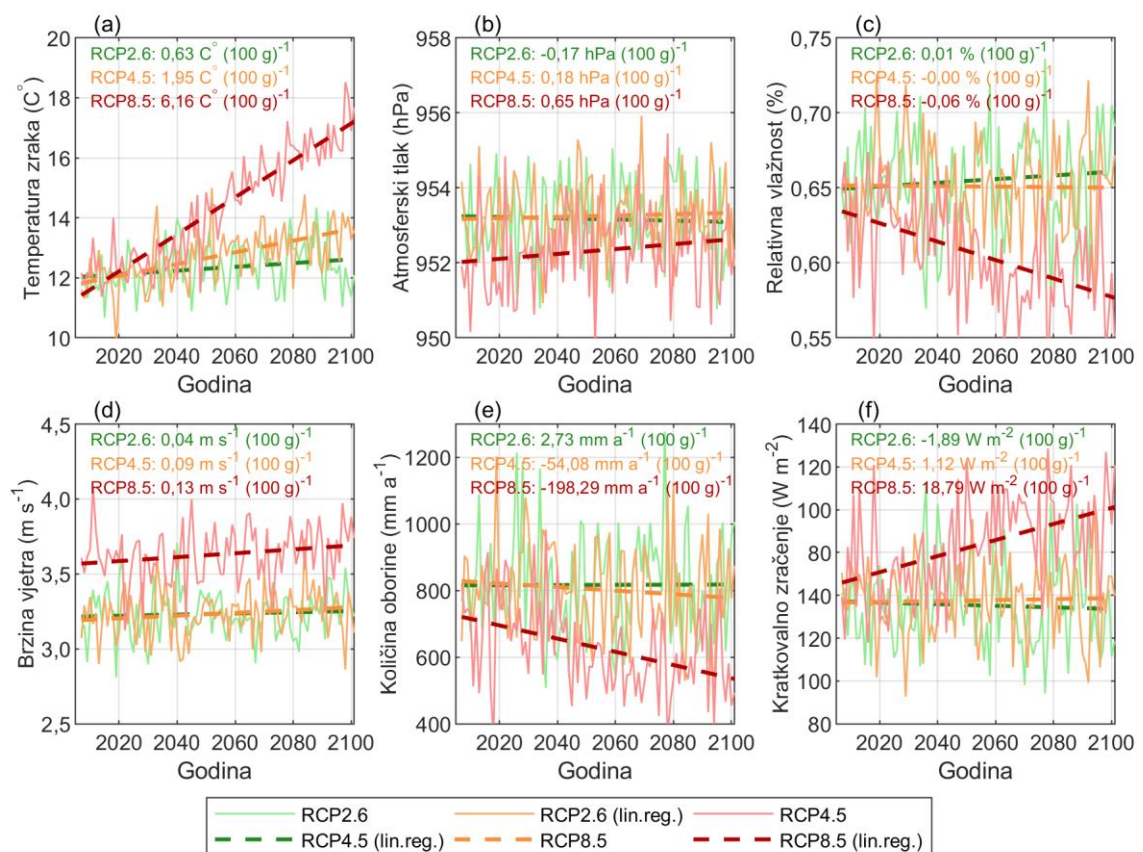
U okviru ovog istraživanja, temperatura vode u jezeru Kozjak simulirana je u uvjetima tri različita RCP scenarija. RCP scenariji su scenariji koncentracije stakleničkih plinova koji se koriste za istraživanje klime u skladu s Petim izvješćem Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (eng. *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) (IPCC, 2014). Postoje četiri scenarija imenovana prema povećanju forsiranja zračenjem do 2100. godine (u  $W m^{-2}$ ), u odnosu na pred-industrijske vrijednosti: 2,6, 4,5, 6 i  $8,5 W m^{-2}$  (Slika 10). RCP2.6 je najstroži i najoptimističniji, no malo vjerojatan scenarij. On pretpostavlja negativne emisije  $CO_2$  i prema njemu bi se globalni porast temperature do 2100. vjerojatno održao ispod  $2\text{ }^{\circ}C$ . RCP4.5 je srednji umjereni scenarij nešto veće vjerojatnosti. Pod pretpostavkom da neće biti provedene politike i mjere smanjenja emisija no da će doći do iscrpljenja fosilnih goriva, ovaj scenarij pretpostavlja da će 2045. emisije  $CO_2$  početi opadati. Očekuje se da će ovaj scenarij rezultirati globalnim porastom temperature između  $2$  i  $3\text{ }^{\circ}C$  do 2100. RCP6 scenarij pretpostavlja da će se vrhunac količine emisija dogoditi 2080. Ovaj se scenarij temelji na visokim emisijama i pretpostavlja da će se uslijed primjene različitih tehnologija i mjera za smanjenje emisija, forsiranje zračenjem stabilizirati nakon 2100. Ovaj bi scenarij vjerojatno rezultirao globalnim porastom temperature između  $3$  i  $4\text{ }^{\circ}C$ . RCP8.5 je najpesimističniji tzv. „referentni scenarij“. On pretpostavlja da neće biti poduzete nikakve mjere za ograničavanje emisija, što znači da će emisije nastaviti rasti tijekom 21. stoljeća. Očekuje se da će ovaj scenarij rezultirati globalnim porastom temperature između  $4$  i  $5\text{ }^{\circ}C$  do 2100. RCP8.5 scenarij se ne smatra vjerojatnim, ali se uobičajeno uzima u obzir kao najgori mogući scenarij. U ovom istraživanju razmatrani su scenariji RCP2.6, 4.5 i 8.5.



**Slika 10:** Godišnja količina antropogenih emisija  $CO_2$  prema RCP scenarijima (a) i promjena prosječne globalne površinske temperature u odnosu na prosjek iz razdoblja od 1986. – 2005. (b) (prilagođeno iz izvještaja IPCC-a, 2014)

Meteorološki podaci za razdoblje od 2006. do 2100. godine preuzeti su iz baze podataka koordiniranog eksperimenta dinamičke prilagodbe regionalne klime (eng. *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – CORDEX*). CORDEX je međunarodno koordinirana inicijativa pokrenuta od strane Svjetskog programa za istraživanje klime (eng. *World Climate Research Programme – WCRP*). Cilj inicijative je evaluacija i poboljšanje tehnika dinamičke prilagodbe regionalnim klimatskim modelima te priprema nove generacije klimatskih projekcija fine skale (CORDEX, 2022).

Za potrebe ovog istraživanja, podaci o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, brzini vjetra, atmosferskom tlaku, količini oborina (Slike 11a–e) te kratkovalnom zračenju, iz simulacija u europskoj domeni s prostornom rezolucijom od  $0,11^\circ$  i vremenskom rezolucijom od 1 h, preuzeti su sa servera Earth System Grid Federation (ESGF) održavanog od strane Njemačkog centra za prognozu klime (ESFG, 2022).



**Slika 11:** Godišnji prosjeci temperature zraka (a), atmosferskog tlaka (b), relativne vlažnosti zraka (c) i brzine vjetra (d) te ukupne godišnje količine oborina (e) od 2006. do 2100. godine dobiveni GCM modelom NCC NorESM1-M za scenarije RCP2.6 i RCP4.5, odnosno modelom IPSL CM5A-MR za scenarij RCP8.5 i RCM modelom REMO2015 (ansambl r1i1p1, realizacija dinamičke prilagodbe v1) za lokaciju jezera Kozjak; i godišnji prosjeci kratkovalnog zračenja za isto razdoblje izračunati pomoću SIMO v1.1 (f)



Radi se o podacima ansambla r1i1p1 i realizacije dinamičke prilagodbe v1. Za scenarije RCP2.6 i RCP4.5 korišten je model generalne cirkulacije (eng. *General Circulation Model* – GCM) NCC NorESM1-M, a za scenarij RCP8.5 model IPSL CM5A-MR. Dinamička prilagodba za sva tri scenarija provedena je pomoću regionalnog klimatskog modela (eng. *Regional Climate Model* – RCM) REMO2015.

Vrijednosti varijabli za lokaciju od interesa izračunate su bilinearnom interpolacijom koristeći podatke s četiri najbliže dostupne točke. Prije interpolacije vrijednosti temperature zraka, primijenjena je korekcija za razliku nadmorske visine s pretpostavkom prosječne stope ohlađivanja od  $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}(100\text{ m})^{-1}$ . Podaci o kratkovalnom zračenju korišteni su samo za izračun dnevnog profila zračenja, dok je ukupna dnevna kratkovalna ozračenost izračunata unutar predloženog modela (Poglavlje 3.1.1.1). Izračunato kratkovalno zračenje korišteno za računanje temperature vode prikazano je na Slici 11f.

Tu se valja kratko osvrnuti na inherentnu nesigurnost rezultata klimatskih modela koja generalno proizlazi iz više izvora koji mogu biti unutarnji, scenarijski i modelski. Unutarnja nesigurnost prisutna je zbog prirodne neforsirane varijabilnosti, inherentne klimatskom sustavu, i ne može se smanjiti. Nesigurnost scenarija odnosi se na faktore koji utječu na buduće scenarije emisija kao što su stanovništvo, tehnologija, socio-politička situacija itd. Nesigurnost modela posljedica je pojednostavljenja, parametrizacija i aproksimacija korištenih u modelu. Nesigurnost modela generira se u dva koraka, prilikom korištenja GCM-a i kasnije tijekom dinamičke prilagodbe RCM-om. Budući da izbor GCM-a općenito ima veći utjecaj na klimatske projekcije od izbora RCM-a (Christensen i Kjellström, 2020), bilo bi prikladnije koristiti rezultate dobivene istim GCM-om za sva tri scenarija. Međutim, skup podataka iz istog GCM-a koji sadrži sve potrebne varijable željenom prostornom i vremenskom rezolucijom, nije bio pronađen.

Što se tiče projekcija temperature na području jezera Kozjak, rezultati dobiveni modelom NorESM1-M i dinamičkom prilagodbom pomoću REMO2015 pozitivno su pristrani ( $\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ali imaju negativnu pristranost odziva na klimatske promjene ( $\sim -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Christensen i Kjellström, 2020; Vautard i sur., 2021). Suprotno vrijedi za rezultate dobivene modelom CM5A-MR i dinamičkom prilagodbom pomoću REMO2015 – negativno su pristrani ( $\sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ali imaju pozitivnu pristranost odziva na klimatske promjene ( $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Oba modela imaju tendenciju podcjenjivanja oborine zimi ( $\sim -1,5 \text{ mm d}^{-1}$ ) i precjenjivanja ljeti ( $\sim 1 \text{ mm d}^{-1}$ ) te oba modela generalno podcjenjuju brzinu vjetra ( $\sim -0,4 \text{ m s}^{-1}$ ). S druge strane, klimatske projekcije vjerojatno precjenjuju brzinu vjetra na lokaciji jezera Kozjak jer ne uzimaju u obzir orografske prepreke male skale koje okružuju i zaklanjaju jezero. Naime, izmjerene vrijednosti brzine vjetra u razdoblju između srpnja 2018. i rujna 2020. bile su uglavnom ispod  $2 \text{ m s}^{-1}$  (Slika 9c), dok preuzeti klimatološki podaci iz modela za isti taj period pokazuju znatno veće vrijednosti (uglavnom iznad  $3 \text{ m s}^{-1}$ , Slika 11d).



## 3 METODOLOGIJA

### 3.1 Formulacija modela SIMO 1.1

Prvi dio ovog istraživanja je fokusiran na razvoj pojednostavljenog modela za prognozu vertikalnog temperaturnog profila u malim, toplim, monomiktičnim jezerima forsiran što manjim brojem meteoroloških varijabli (Šarović i sur., 2022). Model je nazvan SIMO, skraćeno iz engleskog opisa *Simplified MOdel* (pojednostavljeni model).

Model je temeljen na rješavanju 1-D jednadžbe energetske bilance koja se koristi u sličnim diferencijalnim modelima (Hostetler i Bartlein, 1990; Liston i Hall, 1995; Sun i sur., 2007). S obzirom da je model namijenjen korištenju u toplim monomiktičnim jezerima te se u ovom radu primjenjuje na jezera Prošće i Kozjak na kojima tijekom kampanje mjerenja nije primijećeno značajno zaleđivanje površine, model ne uzima u obzir mehanizam stvaranja leda. Stoga je opravdano koristiti pojednostavljeni pristup koji umjesto entalpije koristi temperaturu vode. Uzimajući u obzir da batimetrija jezera često nije dostupna, kao i cilj da model bude što jednostavniji te da zahtijeva čim manje ulaznih podataka, na početku je pretpostavljeno da bazen jezera ima konstantan horizontalni poprečni presjek (bilo kojeg oblika). Prema tome, 1-D jednadžba energetske bilance može se napisati u obliku:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ [k_m + k_t] \frac{\partial T}{\partial z} \right\} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} + M_{\text{conv}}, \quad (1)$$

gdje je  $c_p$  specifični toplinski kapacitet vode ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\rho$  je gustoća vode ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $T$  je temperatura vode ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$  je vrijeme (s),  $z$  je dubina (m),  $k_m$  i  $k_t$  su koeficijenti molekularne i turbulentne toplinske difuzije ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\Phi$  je toplinski tok ( $\text{W m}^{-2}$ ), a  $M_{\text{conv}}$  je član konvektivnog miješanja ( $\text{W m}^{-3}$ ). Lijeva strana ove jednadžbe predstavlja lokalnu promjenu unutarnje energije. Prvi član s desne strane je difuzijski član koji uključuje molekularnu i turbulentnu difuziju, drugi član predstavlja vanjske izvore toplinskog toka te treći član uzima u obzir izmjenu topline uslijed konvektivnog miješanja.

Gustoća vode računa se prema formuli koju daju Chen i Millero (1986) pretpostavljajući da je salinitet vode jednak nuli odnosno zanemariv:

$$\rho = 999,8395 + 6,7914 \times 10^{-2}T - 9,0894 \times 10^{-3}T^2 + 1,0171 \times 10^{-4}T^3 - 1,2846 \times 10^{-6}T^4 + 1,1592 \times 10^{-8}T^5 - 5,0125 \times 10^{-11}T^6 \quad (2)$$

Koeficijent molekularne toplinske difuzije vode je svojstvo fluida i može se pretpostaviti da je konstantan i iznosi  $0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (npr. Sun i sur., 2007). S druge strane, koeficijent turbulentne toplinske difuzije ovisi o čimbenicima kao što su temperatura vode, stabilnost vodenog stupca te vertikalni gradijent brzine strujanja. Prema tome koeficijent turbulentne toplinske difuzije ovisi o meteorološkom forsiranju pa se računa kao funkcija vremena i dubine. Henderson-Sellers (1985) formulirao je metodu prema kojoj se koeficijent turbulentne toplinske difuzije izračunava kao:

$$k_t(z) = c_p \rho (ku^*z/Pr_0) \exp(-k^*z) (1 + 37Ri^2)^{-1}, \quad (3)$$

gdje je  $k = 0,4$  von Karmanova konstanta,  $u^*$  je brzina trenja na površini ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $k^*$  je parametar Ekmanovog profila ovisan o zemljopisnoj širini,  $Pr_0 = 1$  je neutralna vrijednost turbulentnog Prandtlovog broja, a  $Ri$  je Richardsonov broj. Parametar Ekmanovog profila računa se izrazom:

$$k^* = 6,6(\sin\varphi)^{1/2} V_2^{-1,84}, \quad (4)$$

gdje je  $\varphi$  zemljopisna širina i  $V_2$  je brzina vjetra na visini od 2 m iznad površine vode ( $\text{m s}^{-1}$ ). Richardsonov broj definiran je kao:

$$Ri = \frac{-1 + \{1 + 40N^2 k^2 z^2 / [u^{*2} \exp(-2k^*z)]\}^{1/2}}{20}, \quad (5)$$

gdje  $N$  predstavlja uzgonsku (Brunt-Väisälä) frekvenciju ( $\text{s}^{-1}$ ) definiranu kao:

$$N = [-g/\rho(\partial\rho/\partial z)]^{1/2}, \quad (6)$$

gdje je  $g$  ubrzanje sile teže ( $\text{m s}^{-2}$ ).

Brzina vjetra  $V_2$  u jednadžbi (4) određuje se pomoću logaritamske formule:

$$V_2 = u^* \log(2/z_0)/k, \quad (7)$$

gdje je  $z_0$  visina hrapavosti površine (m). Detalje o računanju brzine trenja  $u^*$  i visine hrapavosti  $z_0$  daju Verburg i Antenucci (2010).

Tu valja spomenuti da Sun i sur. (2007) navode da je za plitka jezera (pliča od 50 m) turbulentna toplinska difuzija zanemariva. Međutim to nije u skladu s nalazima brojnih

drugih istraživanja koja napominju da je turbulentna toplinska difuzija često znatno veća od molekularne toplinske vodljivosti čak i za plitka jezera (npr. Jassby i Powell, 1975; Quay i sur., 1980; Vachon i sur., 2019). Treba imati na umu da se u istraživanjima koeficijent turbulentne difuzije najčešće određuje indirektno temeljem izmjerenih brzina promjene vertikalne distribucije temperature vode u jezeru. To znači da su u tim procjenama uključeni doprinosi svih prisutnih procesa miješanja (npr. turbulencija uzrokovana smicanjem, lomljenje unutarnjih valova, turbulencija graničnog sloja itd.) Međutim, procesi miješanja i njihov relativni doprinos turbulentnom miješanju mogu se razlikovati od jezera do jezera. U ovom istraživanju, turbulentna toplinska difuzija je uključena u model SIMO prema jednadžbi (3).

### 3.1.1 Energetska bilanca i rubni uvjeti

Osim turbulentne toplinske difuzije, jedini drugi član jednadžbe (1) koji uzima u obzir meteorološke utjecaje jest član toplinskog toka odnosno izvora topline. Ukupni površinski toplinski tok sastoji se od neto kratkovalnog zračenja ( $S_n$ ), neto dugovalnog zračenja ( $L_n$ ), toplinskog toka osjetne topline ( $H_s$ ), toplinskog toka latentne topline ( $H_l$ ) i toplinskog toka donesenog oborinom ( $H_p$ ). Gornji rubni uvjet, odnosno rubni uvjet na površini jezera može se zapisati kao:

$$\Phi(0) = S_n + L_n + H_s + H_l + H_p . \quad (8)$$

Svi toplinski tokovi u jednadžbi (8) definirani su kao pozitivni kada su usmjereni prema dolje.

Za postavljanje donjeg rubnog uvjeta, odnosno rubnog uvjeta na dnu jezera, pretpostavlja se da tamo nema nikakvog toplinskog toka i da je gradijent temperature jednak nuli, što znači da nema ni toplinske difuzije. Stoga se donji rubni uvjeti mogu zapisati kao:

$$\frac{\partial T}{\partial z}(z_{\max}) = 0 , \quad (9)$$

$$\Phi(z_{\max}) = 0 . \quad (10)$$

Mjerenja kratkovalnog i dugovalnog zračenja nisu uobičajena, a toplinski tokovi osjetne i latentne topline se ne mogu izravno mjeriti (Brunel, 1989; Bahr i sur., 2012). Stoga je dobivanje izraza za toplinske tokove u jednadžbi (8) skupo i kompleksno. Iz tog razloga su u Poglavljima 3.1.1.1 do 3.1.1.4 predložene metode za izračun svakog od tih članova koristeći samo rutinski dostupne meteorološke podatke.

### 3.1.1.1 Kratkovalno zračenje

Brojni autori ukazuju na nedostatak izmjerenih podataka, kako o kratkovalnom tako i o dugovalnom zračenju (npr. Bell i sur., 2006; Martynov i sur., 2010; MacKay, 2012). Ovi podaci obično nisu dostupni iz rutinskih meteoroloških mjerenja, što je slučaj i s meteorološkom stanicom Plitvička jezera, gdje je mjerena samo UVB komponenta kratkovalnog zračenja. Niz istraživanja pokušava definirati korelacije između količine UVA, UVB, ukupnog UV ili globalnog Sunčevog zračenja (Kudish i Evseev, 2000; Kudish i sur., 2005; Podstawczynska, 2009; Pokhrel i Bhattarai, 2012; Pashiardis i sur., 2017) no rezultati pokazuju da između različitih lokacija postoje značajne varijacije omjera UV i globalnog Sunčevog zračenja, što je uglavnom uzrokovano lokalnim atmosferskim uvjetima. Podstawczynska (2009) navodi da su mutnoća zraka i naoblaka dva glavna faktora koji određuju varijabilnost dnevne transmisije Sunčevog zračenja kroz atmosferu. Pashiardis i sur. (2017) otkrili su da omjer UV i globalnog Sunčevog zračenja raste sa elevacijom Sunca i da prisutnost naoblake smanjuje UV komponentu manje nego što to čini ukupnom Sunčevom zračenju zbog snažne apsorpcije vodom u bliskom infracrvenom spektru.

Winslow i sur. (2001) predložili su model za procjenu ukupne dnevne ozračenosti Sunčevim zračenjem na površini Zemlje na temelju dnevne minimalne i maksimalne temperature te ukupne dnevne količine oborina, zajedno sa zemljopisnom širinom, nadmorskom visinom i srednjom godišnjom temperaturom lokacije. Pokazano je da je taj model znatno uspješniji u odnosu na široko korišteni empirijski model što su ga objavili Bristow i Campbell (1984) pa je odabran za implementaciju u algoritam modela SIMO.

Za procjenu ukupne dnevne ozračenosti na površini Zemlje,  $S_{\text{surf}}$  ( $\text{J m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ ) Winslow i sur. (2001) koriste izraz:

$$S_{\text{surf}} = \tau_{\text{cf}} D (1 - \beta_s r h_{T_{\text{max}}}) S_{\text{top}}, \quad (11)$$

gdje je  $\tau_{\text{cf}}$  je propusnost atmosfere bez naoblake (eng. *cloud-free*) za kratkovalno zračenje,  $D$  je faktor koji uzima u obzir Sunčevo zračenje nakon dnevnog temperaturnog maksimuma,  $\beta_s$  je dodatni parametar potreban za uvođenje varijacija između lokacija,  $r h_{T_{\text{max}}}$  je relativna vlažnost u trenutku kada je postignuta dnevna maksimalna temperatura zraka ( $T_{\text{max}}$ ), a  $S_{\text{top}}$  je ukupna dnevna ozračenost na vrhu atmosfere ( $\text{J m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$ ). Ukupna dnevna ozračenost na vrhu atmosfere računa se pomoću izraza:

$$S_{\text{top}} = S_0(1 + \varepsilon_{\text{ecc}}) \frac{3600 * 24}{\pi} \cos\varphi \cos\delta [\omega_s - \tan(\omega_s)], \quad (12)$$

gdje je  $S_0 = 1362 \text{ W m}^{-2}$  Sunčeva konstanta,  $\varepsilon_{\text{ecc}}$  je ekscentricitet Zemljine orbite,  $\delta$  je deklinacija Sunca,  $\varphi$  je zemljopisna širina lokacije, a  $\omega_s$  je jedna polovina duljine dana (vrijeme između izlaska Sunca i podneva ili između podneva i zalaska Sunca) izražena u radijanima (npr. Wald, 2019). Vrijednosti  $\varepsilon_{\text{ecc}}$  i  $\omega_s$  ovise samo o danu u godini, dok  $\delta$  također ovisi i o zemljopisnoj duljini budući da se koristi njezina vrijednost u podne, što omogućuje preciznije rezultate. Detalje o izračunu tih parametara daje Wald (2019).

Propusnost atmosfere bez naoblake za kratkovalno zračenje u jednadžbi (11) uzima u obzir propusnost stupca suhog i čistog zraka ( $\tau_0$ ) te smanjenje propusnosti uslijed apsorpcije aerosolom ( $\tau_a$ ) i vodenom parom ( $\tau_v$ ), a također uključuje i korekciju za nadmorsku visinu ( $c_{\text{elev}}$ ):

$$\tau_{\text{cf}} = (\tau_0 \tau_a \tau_v)^{c_{\text{elev}}}. \quad (13)$$

Za izračun  $\tau_0$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_v$ ,  $c_{\text{elev}}$ ,  $D$  i  $\beta_s$  koristi se postupak Winslowa i sur. (2001). Propusnost stupca suhog i čistog zraka ovisi samo o zemljopisnoj širini ( $\varphi$ ) i izračunava se kao:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 0,947 - (1,033 \times 10^{-5})|\varphi|^{2,22} & \text{za } |\varphi| \leq 80^\circ, \\ \tau_0 &= 0,774 & \text{za } |\varphi| > 80^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

Apsorpcija aerosolom vrlo je varijabilna i teško predvidljiva. Winslow i sur. (2001), pretpostavljaju da je  $\tau_a = 1$ , tj. da je apsorpcija zanemariva. S obzirom na ograničenost podataka, u ovom radu je korištena ista pretpostavka. Apsorpcija vodenom parom izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$\tau_v = 0,9636 - 9,092 \times 10^{-5} (T_{\text{mean}} + 30)^{1,8232}, \quad (15)$$

gdje je  $T_{\text{mean}}$  srednja godišnja temperatura zraka ( $^\circ\text{C}$ ) lokacije. U vlažnim danima, kada je ukupna dnevna količina oborina veća od 1 mm,  $\tau_v$  se dodatno umanjuje za 0,13. Faktor korekcije za nadmorsku visinu ( $c_{\text{elev}}$ ) izračunava se izrazom:

$$c_{\text{elev}} = [1 - (2,2569 \times 10^{-5})z_{\text{NV}}]^{5,2553}, \quad (16)$$

gdje je  $z_{\text{NV}}$  nadmorska visina lokacije (m).

Prema jednadžbi (11),  $\tau_{\text{cf}} S_{\text{top}}$  je maksimalna vrijednost  $S_{\text{surf}}$  u uvjetima bez naoblake. Utjecaj naoblake se indirektno uzima u obzir pomoću faktora  $D(1 - \beta_s r h_{T_{\text{max}}})$ . Taj član temelji se na saznanju da je ozračenost Sunčevim zračenjem od izlaska Sunca, kada se



očekuje jutarnja minimalna temperatura ( $T_{\min}$ ) i maksimalna vlažnost zraka ( $rh_{T_{\min}} \approx 1$ ), do trenutka postizanja maksimalne dnevne temperature zraka i minimalne vlažnosti ( $rh_{T_{\max}}$ ), proporcionalna opadanju relativne vlažnosti,  $S_{surf\_T_{\max}} \propto (1 - \beta_s rh_{T_{\max}})$ . Faktor  $D = S_{surf}/S_{surf\_T_{\max}}$  uvodi se kako bi se uzela u obzir ozračenost Sunčevim zračenjem na površini Zemlje od trenutka kada temperatura zraka postigne svoj dnevni maksimum do zalaska Sunca.  $D$  se izračunava pretpostavljajući da temperatura zraka doseže maksimum oko 15 sati:

$$D = [1 - (\omega_s - \pi/4)^2 / (2\omega_s^2)]^{-1}. \quad (17)$$

Faktor  $\beta_s$  u jednadžbi (11) uglavnom je konstantan, osim u područjima s vrlo velikim dnevnim rasponima temperature:

$$\beta_s = \max\{1.041, \quad 23.753\Delta T_m / (T_{\text{mean}} + 273.16)\}, \quad (18)$$

gdje je  $\Delta T_m$  srednja godišnja vrijednost razlike između dnevne maksimalne i minimalne temperature zraka.

Nakon što je izračunata ukupna dnevna ozračenost Sunčevim zračenjem, vrijednosti satnog kratkovalnog zračenja generiraju se pomoću izmjerenih vrijednosti UVB zračenja koje se koriste za izračun satnih težinskih faktora:

$$S(h) = UVB(h) \frac{S_{surf}}{UVB_d} = UVB(h) \frac{S_{surf}}{3600 \sum_{h=1}^{24} UVB(h)}, \quad (19)$$

gdje su  $S_{surf}$  i  $UVB_d$  ukupne dnevne vrijednosti ( $J m^{-2} dan^{-1}$ ) ukupne i UVB ozračenosti, a  $S(h)$  i  $UVB(h)$  srednje vrijednosti zračenja ( $W m^{-2}$ ) u  $h$ -tom satu u danu. U slučaju kada izmjerene vrijednosti UVB zračenja nisu dostupne, umjesto njih može se koristiti standardni dnevni profil zračenja.

Za razliku od svih ostalih članova u jednadžbi (8), kratkovalno zračenje je jedini toplinski tok koji se ne apsorbira u potpunosti u površinskom sloju vode. Dio kratkovalnog zračenja se reflektira, dio se zaista apsorbira u površinskom sloju, a ostatak prolazi kroz vodu uz određenu atenuaciju. Tok neto kratkovalnog zračenja koji doseže određenu dubinu računa se pomoću takozvanog *arctangent* modela što ga je predložio Henderson-Sellers (1986). Taj model je odabran iz razloga što dobro opisuje apsorpciju kratkovalnog zračenja u plićim slojevima koji su u diskretiziranim modelima jezera obično puno tanji od dubljih. Uz to definiran je jedinstvenom jednadžbom što ga čini jednostavnim za implementaciju

u računalni kod. Prema njemu kratkovalno zračenje na dubini  $z$ ,  $S_n(z)$  u ( $\text{W m}^{-2}$ ), računa se prema izrazu:

$$S_n(z) = (1 - \alpha)S \exp(-K_1 z) [1 - K_2 \tan^{-1}(K_3 z)], \quad (20)$$

gdje je  $\alpha$  albedo vodene površine, a  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$  su empirijske konstante. Uobičajeno korištena vrijednost albeda je 0,06. Koeficijent  $K_1$  odgovara koeficijentu atenuacije kratkovalnog zračenja  $\lambda_e$ , kojeg je moguće izračunati na temelju mjerenja Secchijeve dubine  $z_{SD}$  (m) izrazom

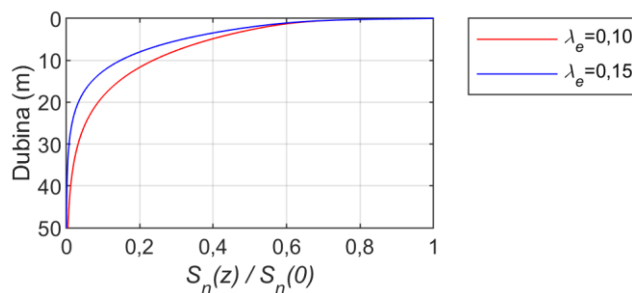
$$\lambda_e = 1,7/z_{SD}, \quad (21)$$

a u slučaju nedostupnosti podataka se za čista oligotrofna jezera može pretpostaviti vrijednost 0,1. U ovom radu se prije kalibriranja parametara modela, vrijednost 0,1 koristi za oba jezera, Kozjak i Prošće. Koeficijent  $K_2$  računa se prema formuli

$$K_2 = 2[1 - (1 - \beta)\exp(\lambda_e \Delta z_A)]/\pi, \quad (22)$$

gdje koeficijent  $\beta = 0,4$  uzima u obzir spomenutu apsorpciju u površinskom sloju, a  $\Delta z_A = 0,6$  m predstavlja debljinu tog sloja u kojem dolazi do intenzivnije apsorpcije, iza kojeg atenuacija zračenja dobiva eksponencijalni profil. Za zadnji parametar,  $K_3$ , uzima se vrijednost 4. Ovaj parametar nije u izravnoj ovisnosti o  $\lambda_e$  i  $\beta$ , već je mjera stope atenuacije zračenja s dubinom u gornjim slojevima.

Utjecaj koeficijenta atenuacije na smanjenje toka kratkovalnog zračenja s dubinom vodenog stupca dan je na Slici 12, gdje su prikazane vrijednosti izračunate prema jednadžbi (20), za  $\beta = 0,4$ ,  $\Delta z_A = 0,6$  m i dvije različite vrijednosti koeficijenta atenuacije.



**Slika 12:** Omjer toka kratkovalnog zračenja na dubini  $z$  i na površini jezera ( $z = 0$  m) za koeficijent atenuacije  $\lambda_e = 0,10$  (crvena linija) i  $\lambda_e = 0,15$  (plava linija)

### 3.1.1.2 Dugovalno zračenje

Neto dugovalno zračenje predstavlja razliku između dolaznog atmosferskog dugovalnog zračenja prema dolje odnosno prema površini jezera ( $L_a^\downarrow$ ) i odlaznog dugovalnog zračenja s površine jezera prema atmosferi ( $L_s^\uparrow$ ). S obzirom da podaci direktnih mjerenja dugovalnog zračenja pomoću pirgeometara uobičajeno nisu dostupna, dugovalno zračenje u modelu SIMO računa se prema formuli:

$$L_n = (1 - r)L_a^\downarrow - L_s^\uparrow = (1 - r)[\varepsilon_a \sigma (T_a + 273,15)^4] - \varepsilon \sigma (T_s + 273,15)^4, \quad (23)$$

gdje je  $r$  koeficijent refleksivnosti vodene površine za dugovalno zračenje,  $\varepsilon$  i  $\varepsilon_a$  su koeficijenti emisivnosti vodene površine i atmosfere,  $T_s$  je površinska temperatura vode ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  je temperatura zraka izmjerena na visini od 2 m iznad tla ( $^{\circ}\text{C}$ ), a  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta. Za koeficijente refleksivnosti i emisivnosti vodene površine mogu se pretpostaviti vrijednosti 0,04, odnosno 0,96 (npr. Sun i sur., 2007). Koeficijent emisivnosti atmosfere pak ovisi o relativnoj vlažnosti zraka i vertikalnom profilu temperature zraka. Pretpostavljajući uvjete standardne atmosfere, Brutsaert (1975) je izveo formulu za izračun koeficijenta emisivnosti atmosfere u uvjetima bez naoblake:

$$\varepsilon_{\text{acf}} = 1,24[e_a / (T_a + 273,15)]^{1/7}, \quad (24)$$

gdje je  $e_a$  tlak vodene pare (hPa), koji je definiran preko relativne vlažnosti zraka ( $rh$ ) i tlaka zasićenja vodene pare ( $e_s$ ):

$$e_a = e_s(T_a)rh. \quad (25)$$

Za izračun tlaka zasićenja vodene pare koristimo formulu Boltona (1980):

$$\begin{aligned} e_s(T_a) &= 6,11 \exp[mT_a / (n + T_a)] \\ \text{za } T_a > 0^{\circ}\text{C} & \quad m = 17,269 \quad n = 237,7, \\ \text{za } T_a < 0^{\circ}\text{C} & \quad m = 21,753 \quad n = 265,3. \end{aligned} \quad (26)$$

Postoje i druge empirijske formule za izračun koeficijenta emisivnosti atmosfere, no formula (24) smatra se najuspješnijom u mnogim istraživanjima za različita klimatska područja (Wang i Dickinson, 2013). Budući da se jednadžba (24) odnosi na atmosferske uvjete bez naoblake, potrebno je dodatno uzeti u obzir i utjecaj oblaka. Pretpostavljajući da je koeficijent emisivnosti vodenih kapljica u oblacima približno jednaka jedinici, Crawford i Duchon (1999) predlažu sljedeći izraz za računanje ukupnog koeficijenta emisivnosti atmosfere:

$$\varepsilon_a = (1 - f)\varepsilon_{acf} + f, \quad (27)$$

gdje  $f$  predstavlja frakciju naoblake definiranu omjerom prethodno procijenjenog Sunčevog zračenja na površini Zemlje u uvjetima sa i bez naoblake:

$$f = 1 - S_{\text{surf}}/(\tau_{cf}S_{\text{top}}). \quad (28)$$

Dakle frakcija naoblake ne predstavlja pokrivenost oblacima. U uvjetima bez naoblake, vrijednost frakcije naoblake iznosi 0. Međutim, budući da omjer Sunčevog zračenja na površini u uvjetima sa i bez naoblake nikada ne doseže nulu, izraz za frakciju naoblake nikada ne doseže teorijski maksimum od 1, čak ni u uvjetima potpune naoblake. Valja napomenuti da iako će se model SIMO najčešće koristiti s vremenskom rezolucijom od jednog sata, u izračunu se koristiti dnevna srednja vrijednost koeficijenta emisivnosti atmosfere.

Jednadžba (27) prepoznata je kao najprikladnija za ovu namjenu u mnogim istraživanjima (Wang i Dickinson, 2013). Uvrštavanjem jednadžbi (24) i (27) u jednadžbu (23), dobiva se konačni izraz za izračun neto dugovalnog zračenja:

$$L_n = \varepsilon\{[(1 - f)\varepsilon_{acf} + f]\sigma(T_a + 273,15)^4\} - \varepsilon\sigma(T_a + 273,15)^4. \quad (29)$$

### 3.1.1.3 Toplinski tok latentne i osjetne topline

Za izračun toplinskih tokova latentne i osjetne topline koristi se blago modificirani algoritam koji su ponudili Verburg i Antenucci (2010). Njihov računalni kod javno je dostupan na mrežnoj stranici Nacionalnog instituta za istraživanje voda i atmosfere (eng. *National Institute of Water and Atmospheric Research – NIWA*), (NIWA, 2021). U tom algoritmu koristi se metoda aerodinamičkih koeficijenata temeljena na Monin-Obukhovljevoj teoriji sličnosti (Monin i Obukhov, 1954). Prema toj metodi, toplinski tok osjetne i latentne topline računaju se prema izrazima:

$$H_s = -\rho_a c_a C_H U_Z (T_s - T_a), \quad (30)$$

$$H_l = -\rho_a L_v C_E U_Z (q_s - q_a), \quad (31)$$

gdje su  $C_H$  i  $C_E$  bezdimenzijski koeficijenti prijenosa osjetne i latentne topline,  $c_a = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  je specifični toplinski kapacitet zraka,  $L_v \approx 2500 \text{ kJ kg}^{-1}$  je specifična latentna toplina isparavanja vode,  $\rho_a$  je gustoća zraka ( $\text{kg m}^{-3}$ ), a  $q_s$  i  $q_a$  su vrijednosti specifične vlažnosti zraka ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) neposredno iznad površine vode i na visini mjerenja. Gustoća zraka i specifična vlažnost zraka računaju se pomoću jednadžbe idealnog plina

te izmjerenih vrijednosti atmosferskog tlaka, temperature i relativne vlažnosti zraka. Koeficijenti prijenosa osjetne i latentne topline računaju se u iterativnom postupku, najprije pretpostavljajući neutralne atmosferske uvjete:

$$C_D = k^2 / [\ln(h/z_0) - \psi_M]^2, \quad (32)$$

$$C_E = k^2 / \{[\ln(h/z_0) - \psi_M][\ln(h/z_E) - \psi_E]\} = kC_D^{1/2} / [\ln(h/z_E) - \psi_E], \quad (33)$$

$$C_H = C_E, \quad (34)$$

gdje je  $C_D$  bezdimenzijski koeficijent otpora,  $h$  je visina iznad tla (m),  $z_0$  i  $z_E$  su visine hrapavosti (m), a  $\psi_M$  i  $\psi_E$  su funkcije stabilnosti količine gibanja i vodene pare. Funkcije stabilnosti definirane su pomoću parametra stabilnosti  $\zeta = h/L$ , gdje je  $L$  Monin-Obukhovljeva duljina definirana kao:

$$L = \frac{-\rho_a u^{*3} T_V}{kg \left( \frac{H_s}{c_a} + 0.61 \frac{(T_a + 273,16) H_1}{L_v} \right)}, \quad (35)$$

gdje je  $T_V$  virtualna temperatura zraka. Očito je da duljina  $L$  ovisi o toplinskim tokovima  $H_s$  i  $H_1$ , dok toplinski tokovi  $H_s$  i  $H_1$  sami ovise o stabilnosti atmosfere odnosno o duljini  $L$ . Iz tog razloga, za izračun  $H_s$  i  $H_1$  neophodno je koristiti iterativni postupak. Postupak se pokreće pretpostavkom neutralnih uvjeta ( $\psi_M = \psi_E = 1$ ) te se tako računaju  $H_s$  i  $H_1$  pomoću kojih se računa Monin-Obukhovljeva duljina  $L$ . S dobivenom vrijednošću Monin-Obukhovljeve duljine ulazi se u novu iteraciju odnosno ponovno se računaju vrijednosti funkcija stabilnosti. Postupak se nastavlja dok razlika između Monin-Obukhovljeve duljine između dvije uzastopne iteracije ne padne ispod 0,0001 %. Dodatne pojedinosti o izračunu visina hrapavosti, funkcija stabilnosti i samog iterativnog postupka mogu se pronaći u radu Verburga i Antenuccija (2010).

#### 3.1.1.4 Toplinski tok oborinom

Pod pretpostavkom da se voda iz prvog sloja diskretiziranog numeričkog modela jezera potpuno pomiješa s količinom oborine koja pada tijekom vremenskog razdoblja  $\Delta t$  (s), temperatura tog sloja bila bi jednaka:

$$T_{1+p} = \frac{\Delta z_1 T_1 + P / (1000 \times 3600) \Delta t T_{prec}}{\Delta z_1 + P / (1000 \times 3600) \Delta t}, \quad (36)$$

gdje  $T_1$  i  $T_{1+p}$  predstavljaju temperaturu vode prvog sloja prije i nakon miješanja s oborinom (°C),  $T_{prec}$  je temperatura oborine (°C),  $\Delta z_1$  je debljina prvog sloja (m), a  $P$  je

satna količina oborine ( $\text{mm h}^{-1}$ ). Toplinski tok doveden oborinom  $H_p$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) računa se kao:

$$\begin{aligned} H_p &= \frac{1}{\Delta t} [\Delta z_1 + P(1000 \times 3600)\Delta t] \rho c_p (T_{1+p} - T_1) = \\ &= \rho c_p P(1000 \times 3600) (T_{\text{prec}} - T_1). \end{aligned} \quad (37)$$

Budući da  $T_{\text{prec}}$  uobičajeno nije dostupna, u ovom se radu umjesto  $T_{\text{prec}}$  koristi temperatura zraka.

### 3.1.2 Konvektivno miješanje

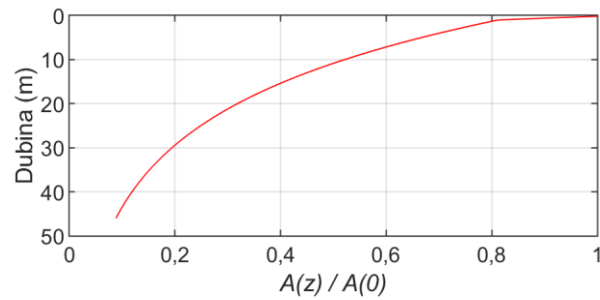
Tijekom noći, neto toplinski tok na površini jezera uobičajeno je negativan. To znači da dolazi do hlađenja gornjih slojeva jezera. Kao rezultat toga, uspostavlja se nestabilna stratifikacija jezera. Međutim, ta nestabilna stratifikacija je kratkotrajna jer voda veće gustoće koja se formira na površini jezera brzo tone i miješa se s vodom manje gustoće ispod nje, obnavljajući tako ravnotežu, tj. minimalnu potencijalnu energiju.

Kako su Sun i sur. (2007) ukazali na važnost uvođenja mehanizma konvektivnog miješanja, a što se kasnije pokazalo i u ovom istraživanju, mehanizam konvektivnog miješanja uključen je u model SIMO. Zbog prirode pojave konvektivnog miješanja, ovaj mehanizam nije uključen direktno kod rješavanja jednadžbe (1), već kroz posebni dio algoritma. Naime, nakon svakog vremenskog koraka numeričke integracije, algoritam modela provjerava postoje li dva susjedna sloja takva da gornji sloj ima veću gustoću od donjeg. U slučaju da postoje, pretpostavlja se da dolazi do potpunog miješanja tih slojeva. Ako pretpostavimo konstantni horizontalni poprečni presjek bazena jezera, odnosno da je površina svih slojeva jednaka, tada temperatura slojeva nakon miješanja iznosi:

$$T_{j\_new} = T_{j+1\_new} = (T_j \Delta z_j + T_{j+1} \Delta z_{j+1}) / (\Delta z_j + \Delta z_{j+1}), \quad (38)$$

gdje  $\Delta z_j$  i  $\Delta z_{j+1}$  predstavljaju debljinu  $j$ -tog (gornjeg) i  $(j+1)$ -tog (donjeg) sloja,  $T_j$  i  $T_{j+1}$  su temperature vode u svakom od ta dva sloja prije konvektivnog miješanja, a  $T_{j\_new}$  i  $T_{j+1\_new}$  temperature vode nakon konvektivnog miješanja. Ovaj pristup korišten je u prvoj verziji modela SIMO v1.0 (Šarović i sur., 2022). No utvrđeno je da u razdobljima u kojima dolazi do konvektivnog miješanja, model počinje znatno precjenjivati temperaturu vode. Iz tog se rezultata moglo zaključiti da je pretpostavka konstantnog horizontalnog poprečnog presjeka jezera, prikladna za izračun prijenosa topline, no ne i

kod konvektivnog miješanja gdje razlika u površini slojeva koji sudjeluju u miješanju čini bitnu razliku. S obzirom da precizni batimetrijski podaci nisu bili dostupni, u radu Šarović i Klaić (2023) uvodi se pretpostavka eksponencijalnog smanjenja horizontalnog poprečnog presjeka s porastom dubine kako je prikazano na Slici 13. Koriste se dvije različite krivulje za dubine ispod i iznad  $z = 1$  m.



**Slika 13:** Pretpostavljeno sužavanje jezera s dubinom odnosno omjer površine horizontalnog poprečnog presjeka na dubini  $z$ ,  $A(z)$ , i na površini jezera,  $A(0)$

### 3.1.3 Postavljanje modela

Kod modela napisan je u programskom jeziku MATLAB, a jednađba (1) diskretizirana je pomoću implicitne Eulerove sheme:

$$\begin{aligned} \frac{c_p \rho_j}{\Delta t} (T_j^{n+1} - T_j^n) \Delta z_j = & (k_m + k_{t,j+1/2}^n) \left( \frac{T_{j+1}^{n+1} - T_j^{n+1}}{z_{j+1} - z_j} \right) \\ & - (k_m + k_{t,j-1/2}^n) \left( \frac{T_j^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{z_j - z_{j-1}} \right) - (\Phi_{j+1/2}^n - \Phi_{j-1/2}^n). \end{aligned} \quad (39)$$

Donji indeksi u ovom izrazu označavaju slojeve (kada se radi o cijelim brojevima  $j$ ,  $j \pm 1$ ) ili granice između dva sloja (kada se radi o  $j \pm 1/2$ ). Gornji indeksi ( $n$ ,  $n+1$ ) označavaju vremenski inkrement. Kako je spomenuto u Poglavlju 3.1.2, u ovom integracijskom koraku izostavljen je konvektivni član iz jednađbe (1). Mehanizam konvektivnog miješanja implementiran je u odvojenom postupku nakon koraka integracije jednađbe (1) samo u slučaju kad se u stupcu vode ustanovi inverzija gustoće (Slika 14). Budući da model ne uključuje mehanizam stvaranja leda, nakon provjere stabilnosti, algoritam izvodi korak koji ograničava minimalnu temperaturu na 0 °C.

Jednađba (39) može se preurediti na sljedeći način:

$$\begin{aligned} T_{j-1}^{n+1} \left( \frac{-k_m - k_{t,j-1/2}^n}{z_j - z_{j-1}} \right) + T_j^{n+1} \left( \frac{\Delta z_j c_p \rho_j}{\Delta t} + \frac{k_m + k_{t,j+1/2}^n}{z_{j+1} - z_j} + \frac{k_m + k_{t,j-1/2}^n}{z_j - z_{j-1}} \right) \\ + T_{j+1}^{n+1} \left( \frac{-k_m - k_{t,j+1/2}^n}{z_{j+1} - z_j} \right) = \left( \frac{\Delta z_j c_p \rho_j}{\Delta t} \right) T_j^n + (\Phi_{j+1/2}^n - \Phi_{j-1/2}^n). \end{aligned} \quad (40)$$

Ta jednađba zapisana u matričnom obliku glasi:

$$\mathbf{M} \mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{A} \mathbf{T}^n + \mathbf{B} \quad (41)$$

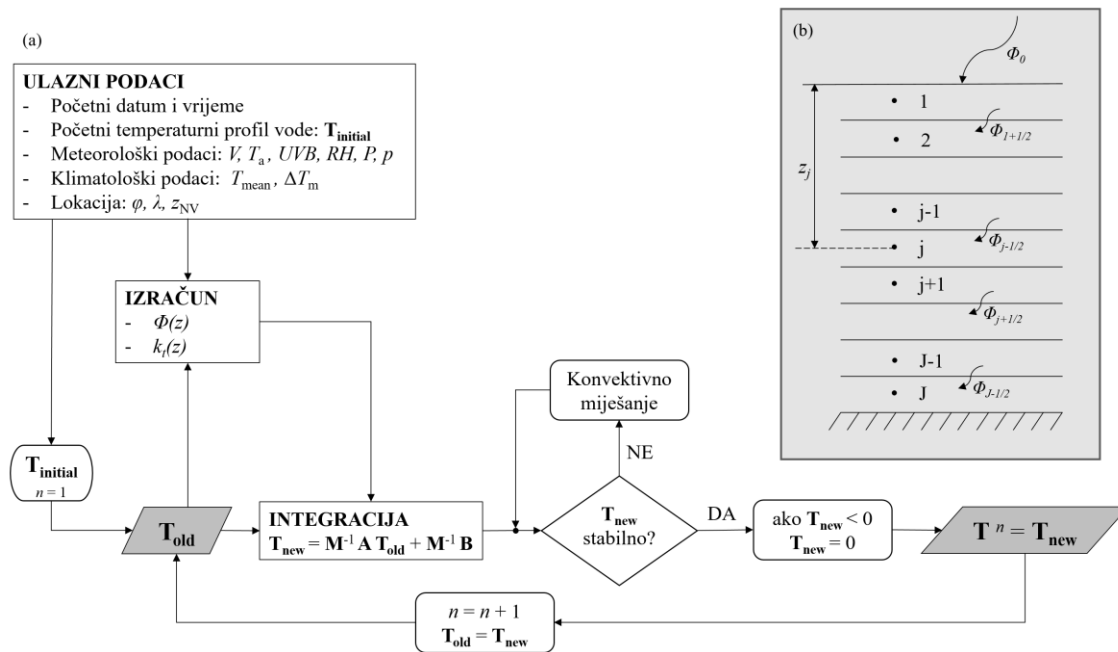
Tada, rješenje  $\mathbf{T}^{n+1}$  za vremenski inkrement  $n+1$  računa se kao:

$$\mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}^n + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}. \quad (42)$$

Primijetiti da se matrica  $\mathbf{M}$  iznova računa u svakom koraku jer u sebi sadrži koeficijent turbulentne toplinske difuzije koji je vremenski promjenjiv.

Shematski prikaz modela dan je na Slici 14.





**Slika 14:** Konfiguracija modela SIMO. Na panelu (a) je dan shematski prikaz algoritma modela SIMO. Ulazni podaci uključuju datum i vrijeme početka simulacije, početni temperaturni profil vode, meteorološke podatke (brzina vjetera, temperatura zraka, UVB zračenje, relativna vlažnost zraka, oborine i atmosferski tlak), klimatološke podatke (srednja godišnja temperatura zraka i srednja godišnja vrijednost razlike između dnevne maksimalne i minimalne temperature zraka), te podatke o lokaciji (zemljopisna širina, duljina i nadmorska visina). Panel (b) prikazuje postavke slojeva. Točke od 1 do J predstavljaju integracijske točke u kojima se računa temperatura vode, a  $z_j$  označava dubinu  $j$ -te točke. Horizontalne linije označavaju granice između slojeva,  $\Phi_{j\pm 1/2}$  predstavljaju toplinske tokove na granicama između slojeva, a  $\Phi_0$  je neto toplinski tok na površini jezera.

Implicitna Eulerova shema je bezuvjetno stabilna i prema tome nema gornju granicu za vremenski korak. Uzimajući u obzir vremensku rezoluciju dostupnih ulaznih podataka, model je korišten s vremenskim korakom od jednog sata. Provedene su simulacije i s kraćim vremenskim koracima, no utvrđeno je kako to smanjenje koraka nije rezultiralo znatnim poboljšanjem uspješnosti modela.

Model je moguće koristiti s različitom vertikalnom rezolucijom. Simulacije provedene s ciljem evaluacije uspješnosti modela provedene su s rezolucijom koja odgovara dubinama mjerenja te se smanjuje s povećanjem dubine. Dubine točaka integracije usklađene su s dubinama postavljenih temperaturnih senzora (Poglavlje 2.2), dok su granice slojeva postavljene na sredini između svakog para uzastopnih integracijskih točaka. Debljine slojeva u ovim simulacijama kreću se od 0,35 m (površinski sloj) do 16 m (pridneni sloj).

Simulacije za potrebe analize utjecaja klimatskih promjena (Šarović i Klaić, 2023) napravljene su s nešto finijom vertikalnom rezolucijom, tako što debljine prvih nekoliko slojeva odgovaraju debljinama u prethodnim simulacijama za potrebe evaluacije, no debljina dubljih slojeva je ograničena na maksimalno 2 m. Prema tome, dubine integracijskih točaka u ovim simulacijama iznose 0,2, 0,5, 1, 1,5 i 3 m, nakon čega su postavljene na intervalu od 2 m.

## 3.2 Evaluacija uspješnosti modela

### 3.2.1 Mjere uspješnosti modela

Za ocjenu uspješnosti modela SIMO, koriste se uobičajene bivarijantne mjere:

- srednja pogreška pristranosti (eng. *mean bias error* – MBE)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_i (P_i - O_i), \quad (43)$$

- srednja apsolutna pogreška (eng. *mean absolute error* – MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_i (|P_i - O_i|), \quad (44)$$

- korijen srednje kvadratne pogreške (eng. *root mean square error* – RMSE)

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_i (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (45)$$

- maksimalna apsolutna pogreška (eng. *maximum absolute error* – MaxAE)

$$MaxAE = \max\{|P_i - O_i|\} \quad (46)$$

U gore navedenim izrazima,  $O_i$  označava izmjerene, a  $P_i$  prognozirane vrijednosti, dok je  $n$  broj odgovarajućih parova tih vrijednosti.

MBE koristi se za procjenu sklonosti modela da precjenjuje ili podcjenjuje temperaturu. S druge strane, MAE i RMSE daju informacije o centralnoj tendenciji pogreške. Međutim, RMSE također uzima u obzir i distribuciju pogreške te postaje veći kako varijabilnost pogreške raste. Drugim riječima, RMSE stavlja veću težinu na veće pogreške, što ga čini osjetljivijim na odstupajuće vrijednosti (eng. *outliers*). Prema tome se MAE smatra prirodnijom mjerom prosječne pogreške od RMSE-a (Willmott i

Matsuura, 2005). MaxAE nije mjera sustavne pogreške, ali se u ovom radu računa kao mjera koja pokazuje najveća odstupanja.

Nadalje, računa se još i indeks podudarnosti (eng. *Index of Agreement* – IA) i to pomoću tri različite formulacije predložene od Willmotta i sur. (2012):

- originalna definicija indeksa podudarnosti ( $IA_{orig}$ )

$$IA_{orig} = 1 - \frac{\sum_i [(P_i - \bar{O}) - (O_i - \bar{O})]^2}{\sum_i (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} = 1 - \frac{\sum_i (P_i - O_i)^2}{\sum_i (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad (47)$$

- modificirana definicija indeksa podudarnosti ( $IA_{mod}$ )

$$IA_{mod} = 1 - \frac{\sum_i |P_i - O_i|}{\sum_i (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)}, \quad (48)$$

- usavršena definicija indeksa podudarnosti ( $IA_{ref}$ )

$$IA_{ref} = 1 - \frac{\sum_i |P_i - O_i|}{2 \sum_i |O_i - \bar{O}|} \quad \text{za} \quad \sum_i |P_i - O_i| < 2 \sum_i |O_i - \bar{O}|, \quad (49a)$$

$$IA_{ref} = \frac{2 \sum_i |O_i - \bar{O}|}{\sum_i |P_i - O_i|} - 1 \quad \text{za} \quad \sum_i |P_i - O_i| > 2 \sum_i |O_i - \bar{O}|. \quad (49b)$$

$IA_{orig}$  definiran je kvadratom razlike između prognoziranih i izmjerenih vrijednosti, zbog čega precjenjuje utjecaj velikih pogrešaka, slično kao i RMSE. Iz tog razloga je u modificiranoj verziji kvadrat zamijenjen apsolutnom vrijednošću što čini  $IA_{mod}$ , manje osjetljivim na odstupajuće vrijednosti od  $IA_{orig}$ .  $IA_{mod}$  ima dobro definiranu gornju granicu, odnosno približava se vrijednosti 1 (savršeno podudaranje) sporije od  $IA_{orig}$ . To znači da je  $IA_{mod}$  konzervativniji i omogućuje precizniju usporedbu različitih modela s relativno dobrim performansama. Vrijednosti  $IA_{orig}$  i  $IA_{mod}$  kreću se u rasponu od 0 do 1, gdje vrijednost 0 znači da su varijabilnosti prognoziranih i izmjerenih vrijednosti potpuno izvan faze, dok vrijednost 1 znači savršeno podudaranje. Kod  $IA_{ref}$ , varijabilnost prognoziranih vrijednosti u nazivniku zamijenjena je varijabilnošću izmjerenih vrijednosti te se vrijednost  $IA_{ref}$  kreće u rasponu od –1 do 1.  $IA_{ref}$  ima i dobro definiranu donju granicu, što za razliku od  $IA_{mod}$  dodatno omogućuje osjetljiviju usporedbu modela s relativno lošim performansama. Međutim, treba naglasiti da niske vrijednosti IA ne ukazuju nužno na loše performanse modela već je moguće da se radi o varijabli niske varijabilnosti. U tom slučaju relativno mala odstupanja od izmjerenih vrijednosti dovode do izrazito niske vrijednosti IA.

### **3.2.2 Uspješnost modela u kratkoročnoj prognozi**

Uspješnost modela SIMO posebno je analizirana za kratkoročne odnosno za dugoročne prognoze temperature vode. Za evaluaciju uspješnosti koriste se samo razdoblja u kojima je dostupan puni set potrebnih izmjerenih podataka koji uključuje meteorološke podatke i podatke o temperaturnom profilu u odgovarajućem jezeru. Evaluacija uspješnosti modela u kratkoročnoj prognozi treba dati odgovor na pitanje možemo li i s kojom pouzdanošću model koristiti za kratkoročne prognoze sa satnom rezolucijom.

Točnije, napravljena je analiza osjetljivosti kako bi se procijenila ovisnost performansi modela o duljini simulacije. Analiza je provedena na način da su simulacije u trajanju do 30 dana pokretane u svakom satu tijekom razdoblja u kojima je dostupan puni set potrebnih podataka. Za inicijalizaciju svake simulacije koristile su se izmjerene vrijednosti temperaturnog profila vode. Prognozirane temperature vode i vertikalni temperaturni gradijenti dobiveni u svakoj simulaciji nakon određenog vremena trajanja simulacije (od 1 do 30 dana) uspoređeni su s odgovarajućim izmjerenim vrijednostima. Rezultati ove analize osjetljivosti pokazat će sposobnost modela za pružanje kvalitetne kratkoročne prognoze te smanjenje uspješnosti modela s povećanjem duljine simulacije.

### **3.2.3 Uspješnost modela u dugoročnoj prognozi**

Kako je drugi cilj ovog rada primijeniti razvijeni model u svrhu procjene utjecaja klimatskih promjena, neophodno je ocijeniti uspješnost modela u dugoročnoj prognozi. Evaluacija uspješnosti modela u dugoročnoj prognozi treba dati odgovor na pitanje može li model predvidjeti početak i razvoj stratifikacije jezera uslijed zagrijavanja, te njezin kraj uslijed hlađenja i konvektivnog miješanja, te možemo li i s kojom pouzdanošću model koristiti za dugoročne prognoze. Osim za klimatološke analize, uspješnost modela u dugoročnoj prognozi čini ga zanimljivim i za primjenu kod jezera za koja ne postoje mjerenja profila temperature no za koja se zna da su tijekom zime potpuno izmiješana jer u tom slučaju nije potrebno mjerenje čitavog profila temperature vode za pokretanje simulacije, već je dovoljno poznavati površinsku temperaturu vode.

U svrhu evaluacije uspješnosti modela u dugoročnoj prognozi, pokrenuta je simulacija u trajanju od godinu dana. Simulacija je inicirana 01.01.2019. s približno uniformnim vertikalnim temperaturnim profilom, što je karakteristično za razdoblje kada je jezero izmiješano. Ova analiza napravljena je samo na primjeru jezera Kozjak iz razloga što za

jezero Prošće nije bio dostupan set podataka iz cjelogodišnjeg razdoblja, niti za razdoblje početka stratifikacije. Dodatni razlog je činjenica da model puno bolje opisuje termodinamičko ponašanje jezera Kozjak što je kasnije detaljno prikazano i objašnjeno. Prema tome dugoročne simulacije te analiza utjecaja klimatskih promjena provedene su samo za jezero Kozjak.

Iako se kod ovog tipa analize ne mogu očekivati vrlo precizni i točni rezultati na satnoj skali, kao što je to slučaj kod kratkoročnih simulacija, cilj ove analize je procijeniti u kojoj mjeri model može pružiti relevantne informacije o pojavi i trajanju stratifikacije te dubini termokline.

### **3.3 Klimatske projekcije temperature vode i stratifikacije jezera**

U svrhu procjene utjecaja klimatskih promjena na temperaturu i stratifikaciju vode jezera Kozjak, pomoću modela SIMO provedene su simulacije za vremenski period od 2006. do 2100. godine, koristeći meteorološke podatke prema tri različita RCP scenarija: RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5. Za sva tri scenarija detaljno su analizirani trendovi promjene temperature te dinamika stratifikacije.

Napomenimo da su stope promjene svih relevantnih varijabli izračunate tijekom cijelog razdoblja simulacije, od 2006. do 2100. godine, te su izražene kao promjena na 100 godina (npr. °C (100 g)<sup>-1</sup>).

#### **3.3.1 Trendovi temperature**

Najprije su analizirani godišnji srednjaci temperature vode na različitim dubinama te su izračunati pripadni trendovi. Iz temperaturnih profila izračunate su i analizirane prosječne temperature epilimnija, hipolimnija te cijelog jezera.

Prvi i zadnji sloj u diskretiziranom modelu, koji se protežu od 0 do 0,35 m, odnosno od 42 do 46 m dubine, predstavljaju površinski i pridneni sloj. Evolucija temperature vode u tim slojevima detaljnije je analizirana računanjem mjesečnih srednjaka te stope promjene temperature za svaki mjesec zasebno. Na taj način proučen je utjecaj klimatskih promjena na godišnju varijaciju temperature. Usporedbom s trendovima pojedinih komponenata toplinskog toka utvrđeni su i glavni vanjski faktori koji utječu na promjenu temperature vode.

### 3.3.2 Trendovi karakteristika stratifikacije

Dinamika stratifikacije analizirana je preko parametara kao što su vertikalni temperaturni gradijent, dubina termokline i Schmidov indeks stabilnosti (eng. *Schmidt stability index* - SSI).

Dubina termokline određena je kao dubina najvećeg vertikalnog gradijenta temperature vode, uzimajući u obzir dubine veće od 1 m kako bi se isključili visoki gradijenti koji se pojavljuju u blizini površine (Klaić i sur., 2020b). Prilikom izračuna godišnje prosječne dubine termokline uzete su u obzir samo vrijednosti dobivene tijekom razdoblja stratifikacije jezera.

Kao glavni kvantitativni pokazatelj stabilnosti jezera korišten je Schmidov indeks stabilnosti (SSI). Taj indeks predstavlja količinu energije potrebnu da bi se vodeni stupac potpuno izmiješao kako bi se postigao uniformni temperaturni profil, bez uvođenja ili odvođenja topline izvana. Pretpostavljajući konstantnu površinu horizontalnog poprečnog presjeka jezera, SSI se računa pomoću izraza kojeg su dali Gaudard i sur. (2019):

$$SSI = g \int (z - \bar{z}) \rho_z dz , \quad (50)$$

gdje  $\bar{z}$  označava srednju dubina vodenog stupca (m), a  $\rho_z$  gustoću vode na dubini  $z$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ). Vrijednost SSI korištena je za objektivno određivanje početka, kraja i trajanja razdoblja stratifikacije. Vrijeme početka odnosno kraja stratifikacije izraženo je kao dan u godini, a određeno je kao prvi odnosno zadnji dan u godini kada SSI prijeđe iznad odnosno padne ispod zadane kriterijske vrijednosti. Gaudard i sur. (2019) kao kriterij stratifikacije predlažu  $SSI / z_{\max} \geq 10 \text{ J m}^{-3}$ , gdje je  $z_{\max}$  maksimalna dubina jezera. Za jezero Kozjak, ovaj kriterij glasi  $SSI \geq 460 \text{ J m}^{-2}$ . Prema tome, jezero se smatra stratificiranim kada je vrijednost SSI-a iznad  $460 \text{ J m}^{-2}$ .



## 4 REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Uspješnost modela SIMO 1.1

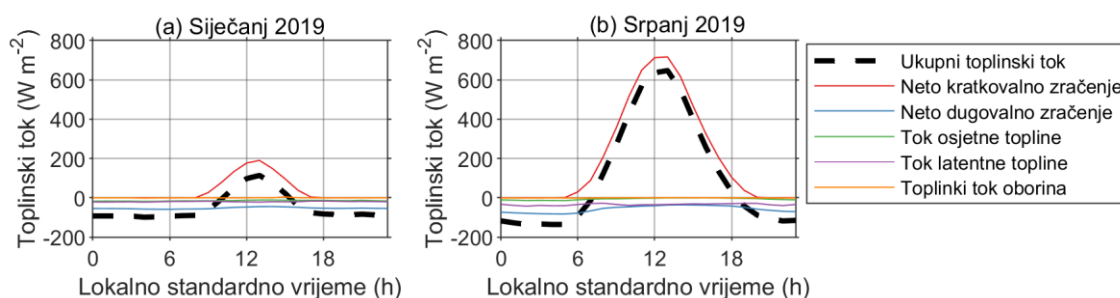
#### 4.1.1 Analiza toplinskih tokova

Na temelju sporadičnih promatranja vertikalnih profila temperature u Plitvičkim jezerima, prethodna istraživanja sugeriraju da su jezera Prošće i Kozjak dimiktična (Klaić i sur., 2018). Dimiktična jezera su stratificirana i ljeti i zimi. U pravilu su zimi pokrivena ledom te temperaturno inverzno stratificirana - temperatura vode pri dnu je oko 4 °C, dok je pri površini ispod leda oko 0 °C. Miješaju se dva puta godišnje, u proljeće i jesen.

Podaci kontinuiranih mjerenja vertikalnih profila temperature u jezerima Prošće i Kozjak prikazani na Slikama 8a i c, jasno pokazuju da su se oba jezera tijekom ove kampanje ponašala kao topla monomiktična jezera. U takvim jezerima do konvektivnog miješanja dolazi tijekom jeseni i zime, a stabilna stratifikacija uspostavlja se tijekom kasnog proljeća te jača do kraja ljeta. Osim toga, topla monomiktična jezera (koja su često prisutna u umjerenim i tropskim zemljopisnim širinama) se ne zamrzavaju, što je bio slučaj i kod jezera Prošće i Kozjak tijekom cijele kampanje mjerenja temperature, što se može zaključiti iz činjenice da su zimske temperature u gornjim slojevima jezera bile iznad 0 °C (Slike 8a i c).

S obzirom da je površinski toplinski tok glavni pokretač termodinamičkog ponašanja jezera, zanimljivo je najprije analizirati njegove članove. Slika 15 prikazuje prosječni dnevni hod ukupnog modeliranog toplinskog toka i pojedinih članova toplinskog toka za siječanj, kao karakteristični zimski mjesec (a), i srpanj, kao karakteristični ljetni mjesec (b). Toplinski tok Sunčevog kratkovalnog zračenja je za red veličine veći od ostalih komponenata ukupnog toplinskog toka, što ukazuje da je jedan od glavnih čimbenika koji utječe na temperaturu vode jezera. Sljedeći po apsolutnoj veličini je toplinski tok neto dugovalnog zračenja, a zatim toplinski tok latentne topline. Ove dvije komponente su u prosjeku negativnog predznaka te su u pravilu odgovorne za negativni toplinski tok, odnosno hlađenje jezera tijekom noći.





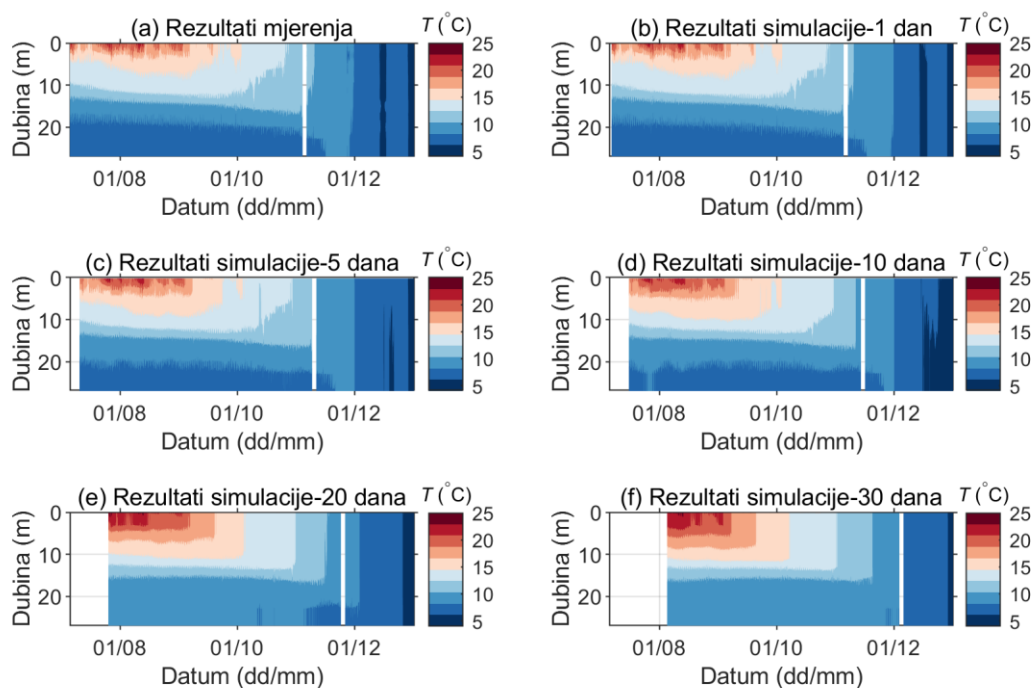
**Slika 15:** Prosječni dnevni hod ukupnog modeliranog toplinskog toka i pojedinih članova toplinskog toka za siječanj (a) i srpanj 2019. (b)

#### 4.1.2 Uspješnost modela u kratkoročnoj prognozi

Izmjerene i prognozirane temperature vode u 2019. godini, za različite duljine simulacije prikazane su na Slici 16 za jezero Prošće (primijetiti da mjerenja temperature u ovom jezeru počinju tek u srpnju 2019.), odnosno na Slici 17 za jezero Kozjak. Rezultati simulacija pokazuju da je model relativno uspješan. Naime, početak razdoblja stratifikacije (Slika 17) te vertikalni profil temperature i produbljivanje termokline s vremenom su dobro reproducirani (Slike 16 i 17). Rezultati simulacija za jezero Kozjak se bolje podudaraju s rezultatima mjerenja, dok su kod jezera Prošće prisutne veće razlike između prognoziranih i izmjerenih temperatura, posebno za simulacije duljine trajanja preko 10 dana. Kod jezera Prošće, temperature u epilimniju su znatno precijenjene tijekom stratifikacijskog razdoblja (npr. u kolovožu), dosežući razliku do 5 °C u duljim simulacijama (Slike 16 i A1). Međutim, dubina maksimalnog gradijenta temperature u metalimniju, koji se nalazi otprilike između 12 i 16 m dubine, zadovoljavajuće je reproducirana čak i u simulacijama duljine od 30 dana (Slika A3).

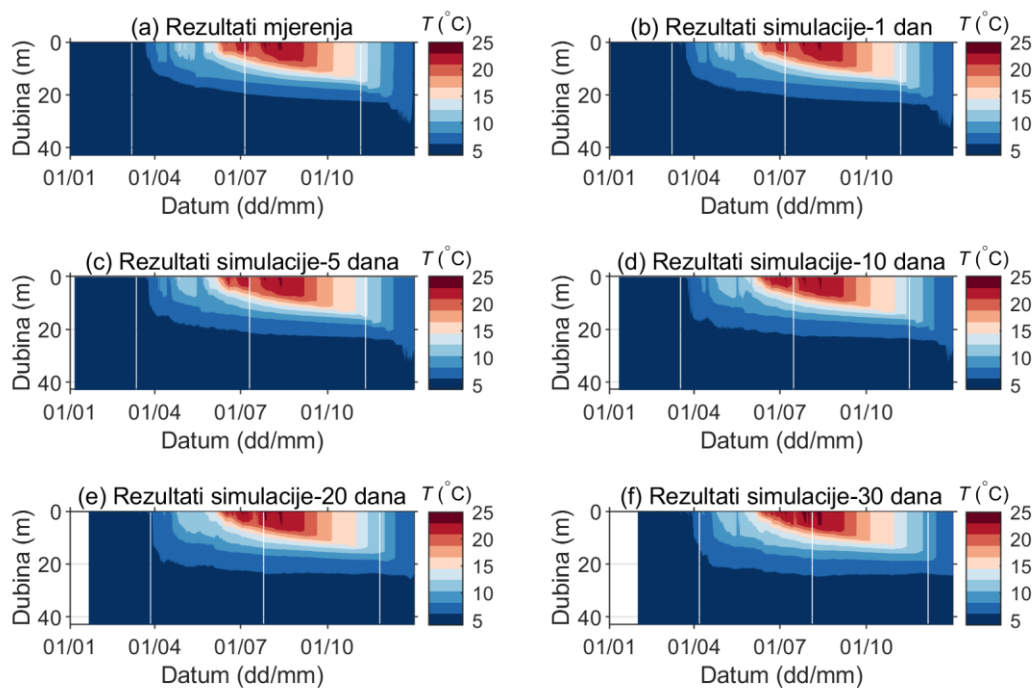
Kod jezera Kozjak, razlika između prognozirane i izmjerene dubine maksimalnog gradijenta temperature je unutar 2 m čak i za simulacije duljine 30 dana, ali je generalno znatno niža (Slika A5). U simulacijama duljine trajanja 10 ili više dana, temperatura je blago precijenjena i u epilimniju i u hipolimniju u periodu stratifikacije (otprilike do 1 °C) dok je pred kraj godine, početkom konvektivnog miješanja precijenjena samo u epilimniju dok se u hipolimniju primjećuje blago podcjenjivanje. Prema mjerenjima temperature, stratifikacija jezera Kozjak počela je 21. ožujka, dok simulacije duljine 30 dana prognoziraju početak stratifikacije 23. ožujka, što znači da kod ovih simulacija postoji kašnjenje od dva dana. Konvektivno miješanje počelo je 6. rujna, dok je u rezultatima simulacije u trajanju od 30 dana početak konvektivnog miješanja nastupio 10. rujna, dakle s kašnjenjem od četiri dana.

### Temperatura - jezero Prošće



**Slika 16:** Izmjerene (a) i prognozirane (b – f) temperature vode u jezeru Prošće za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019.

### Temperatura - jezero Kozjak



**Slika 17:** Izmjerene (a) i prognozirane (b – f) temperature vode u jezeru Kozjak za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 01.01. do 31.12.2019.

Kod oba jezera primjećuje se da s duljinom simulacije raste debljina metalimnija (Slike A3 i A5). Upravo u tom području dolazi do najvećih pogrešaka vertikalnog gradijenta temperature što ukazuje na zahtjevnost modeliranja tog područja, a što sve više dolazi do izražaja većom duljinom trajanja simulacije.

Na Slici 18 dan je zorniji prikaz usporedbe izmjerene i prognozirane temperature vode na dubinama od 0,2, 5, 15 i 27 m za razdoblje od 6. srpnja do 31. prosinca 2019. Ovo razdoblje odabrano je za prikaz iz razloga što je to najdulje razdoblje tijekom kojeg su neprekidno dostupni svi potrebni podaci (meteorološki podaci i temperature vode) za oba jezera. Dodatno, u Prilogu A, za isto razdoblje prikazani su izmjereni i prognozirani vertikalni gradijenti temperature (Slike A3 i A5) te pogreške prognoze kako za temperature (Slike A1 i A2), tako i za gradijente temperature (Slike A4 i A6).

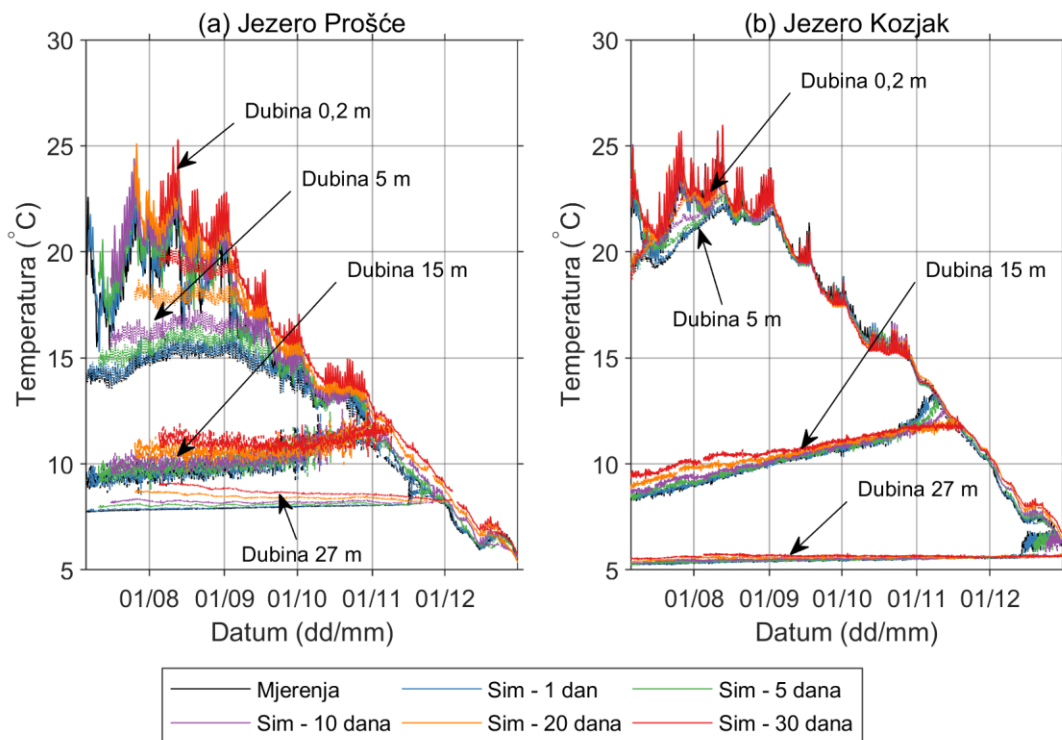
Očekivano, generalno se odstupanja prognoziranih od izmjerenih vrijednosti povećavaju s duljinom simulacijskog razdoblja. Međutim, čak i simulacije najduljeg trajanja (30 dana) daju kvalitativno prihvatljive rezultate u slučaju jezera Prošće, a čak i kvantitativno u slučaju jezera Kozjak. Odstupanja prognoziranih temperatura na satnoj skali su uglavnom bila  $\leq \pm 2^\circ\text{C}$  za jezero Prošće i  $\leq \pm 1^\circ\text{C}$  za jezero Kozjak, osim u dijelu epilimnija jezera Prošće gdje su odstupanja uglavnom bila  $\leq 4^\circ\text{C}$ . Nadalje, dubina termokline i njezino produbljivanje s vremenom dobro su uhvaćene modelom (Slike A3 do A6).

Iako je model zadovoljavajuće reproducirao vremenske varijacije temperature vode na različitim dubinama na satnoj skali (Slika 18), nije bio u mogućnosti reproducirati unutarnje seše koji su u ovom razdoblju prethodno dokumentirani za oba jezera (Klaić i sur., 2020b; Klaić i sur., 2020a). To je i očekivano s obzirom da se model temelji isključivo na pristupu energetske bilance, odnosno ne uzima u obzir hidrodinamičko ponašanje jezera, izuzev vertikalnog miješanja dvaju susjednih slojeva tijekom nestabilne stratifikacije.

Slike 19 i 20 prikazuju izračunate mjere uspješnosti modela za oba jezera. Model sustavno precjenjuje temperaturu vode u epilimniju, posebno u plićim slojevima i području termokline. MBE iznosi od  $< 0,3^\circ\text{C}$  za jezero Prošće i  $< 0,1^\circ\text{C}$  za jezero Kozjak za simulacije u trajanju od jednog dana, do  $2,2^\circ\text{C}$  za jezero Prošće i  $0,6^\circ\text{C}$  za jezero Kozjak (na dubini od 5 m) za simulacije u trajanju od 30 dana (Slike 19a i 20a). Vrijednost MAE-a u epilimniju jezera Prošće kreće se od  $< 0,4^\circ\text{C}$  za simulacije u trajanju od jednog dana i relativno ravnomjerno raste do  $1,5^\circ\text{C}$  za simulacije u trajanju od 30 dana, odnosno do

2,2 °C u području termokline (Slike 19b). U jezeru Kozjak MAE također počinje od  $< 0,4$  °C za simulacije u trajanju od jednog dana i polako se povećava na 0,7 °C kako duljina simulacije dosegne 30 dana (Slika 20b).

Nekoliko je čimbenika koji potencijalno dovode do precjenjivanja temperature u gornjim slojevima, u ovom slučaju posebno izraženo kod jezera Prošće. Prvi je podcjenjivanje turbulentnog miješanja i prijenosa topline turbulentnim procesima, posebno u razdobljima jakih vjetrova. Kao što se vidi na slikama A1 i A2, ovo precjenjivanje temperature u gornjem dijelu jezera daleko je izraženije kod jezera Prošće nego kod jezera Kozjak. Kako je navedeno u Poglavlju 2.3, meteorološki uvjeti na lokaciji postaje gdje se vrši mjerenje meteoroloških varijabli korištenih za forsiranje modela u slučaju oba jezera (lokacija M na Slici 7), reprezentativniji su za jezero Kozjak nego za jezero Prošće. Zbog nešto veće nadmorske visine i manje zaklonjene pozicije, jezero Prošće izloženo je jačim vjetrovima od onih izmjerenih na lokaciji M. Stoga su modelirano turbulentno miješanje i posljedični modelirani prijenos topline u simulacijama vjerojatno slabiji nego u stvarnosti.



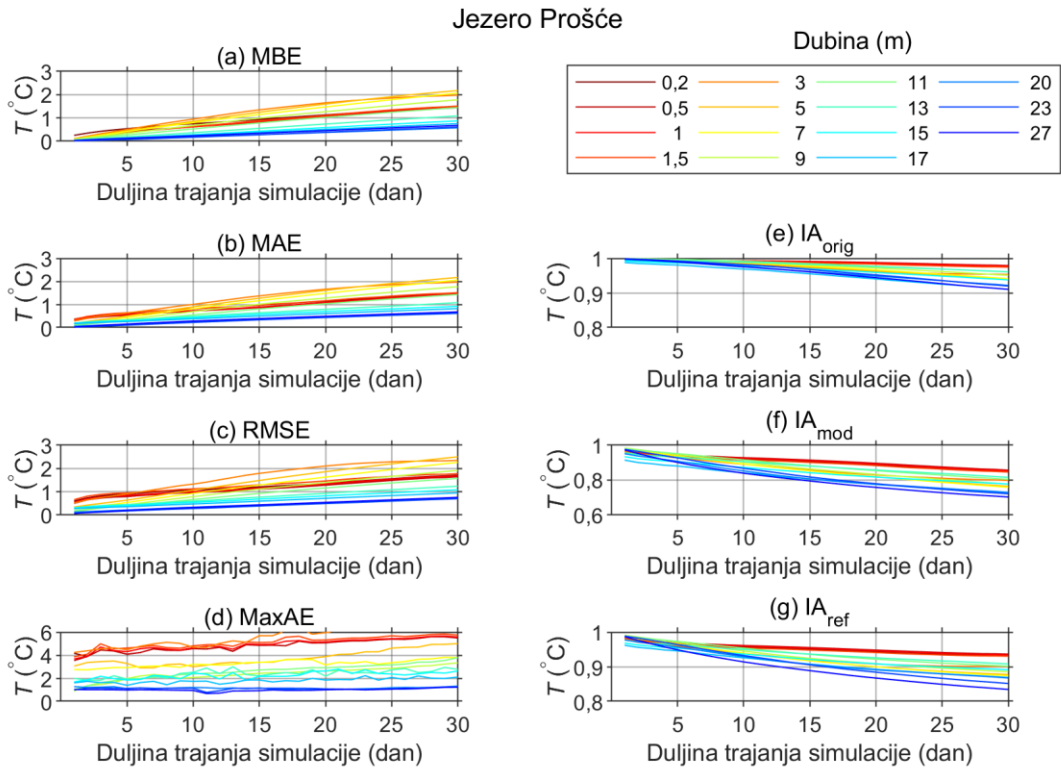
**Slika 18:** Izmjerene i prognozirane temperature vode na dubinama od 0,2, 5, 15 i 27 m za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019. za jezero Prošće (a) i Kozjak (b)

Drugi mogući razlog je precijenjeni koeficijent atenuacije kratkovalnog zračenja. Koeficijent atenuacije ovisi o količini otopljenih organskih tvari i čestica u jezerskoj vodi te ga se može kalibrirati kako bi se što bolje reproducirale stvarne fizikalne karakteristike jezera, no u ovom koraku nije kalibriran kako bi se istražila uspješnost modela s generičkim parametrima bez kalibracije za specifičnu lokaciju. Korištena vrijednost koeficijenta atenuacije od 0,1 odgovara oligotrofnim jezerima, a jezero Prošće karakterizirano je kao mezotrofno, što indicira veću vrijednost ovog koeficijenta. Prema tome ovaj se razlog može odbaciti.

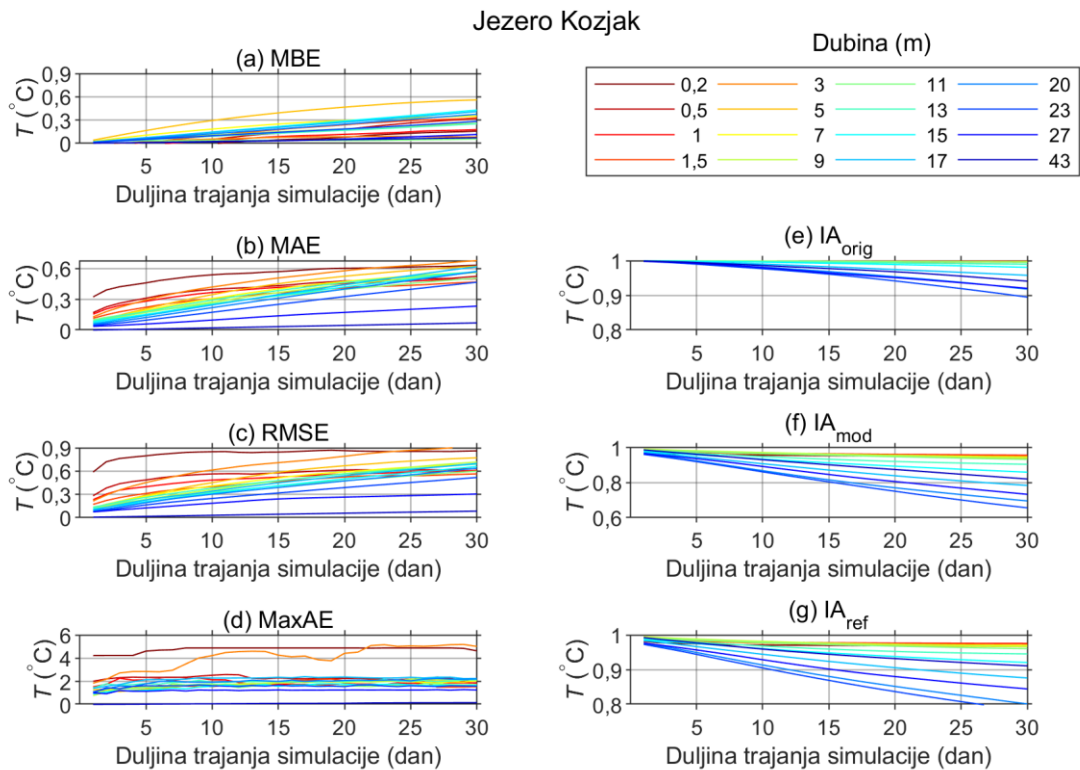
Također postoji mogućnost da je došlo do precjenjivanja površinskog toplinskog toka zbog korištenja raznih aproksimacija što ograničava pouzdanost modela. Ta se pretpostavka također može odbaciti jer bi se u tom slučaju isti problem očitovao i na primjeru jezera Kozjak.

Glavnim uzročnikom lošijih performansi modela na primjeru jezera Prošće smatra se utjecaj pritoka koji nije uzet u obzir, a u slučaju Plitvičkih jezera može biti značajan. Utjecaj pritoka je znatno izraženiji kod jezera Prošće koje se vodom napaja iz rijeke Matice. Za razliku od njega, glavni izvor vode jezera Kozjak je uzvodno jezero, i to iz njegovih gornjih slojeva, što sprječava intenzivno miješanje u periodu stratifikacije kada je uz to protok relativno mali ili čak zanemariv. Prema tome, pretpostavka zatvorenog sustava koja se koristi u modelu znatno je prikladnija za jezero Kozjak nego za jezero Prošće, što potvrđuju i dobiveni rezultati.

U hipolimniju, vrijednosti MBE, MAE, RMSE i MaxAE ostaju izrazito niske, posebice za najdublje slojeve, i to za oba jezera bez obzira na duljinu simulacije (Slike 19 i 20). Tako niske vrijednosti rezultat su niske varijabilnosti temperature u dubokim slojevima jezera, što formulacije ovih mjera ne uzimaju u obzir. Za jezero Kozjak MBE u pridnom sloju ostaje ispod 0,1 °C, a u jezeru Prošće ispod 0,7 °C, odnosno generalno ispod 1 °C u hipolimniju. S druge strane, bez obzira na formulaciju (originalnu, modificiranu ili usavršenu), IA uzima u obzir varijabilnost temperature pa se primjećuje da vrijednost IA pada povećanjem duljine trajanja simulacije čak i u dubokim slojevima. To ukazuje da iako su rezultati zadovoljavajući, ipak postoji pad uspješnosti modela s povećanjem duljine trajanja simulacije čak i u dubokim slojevima.



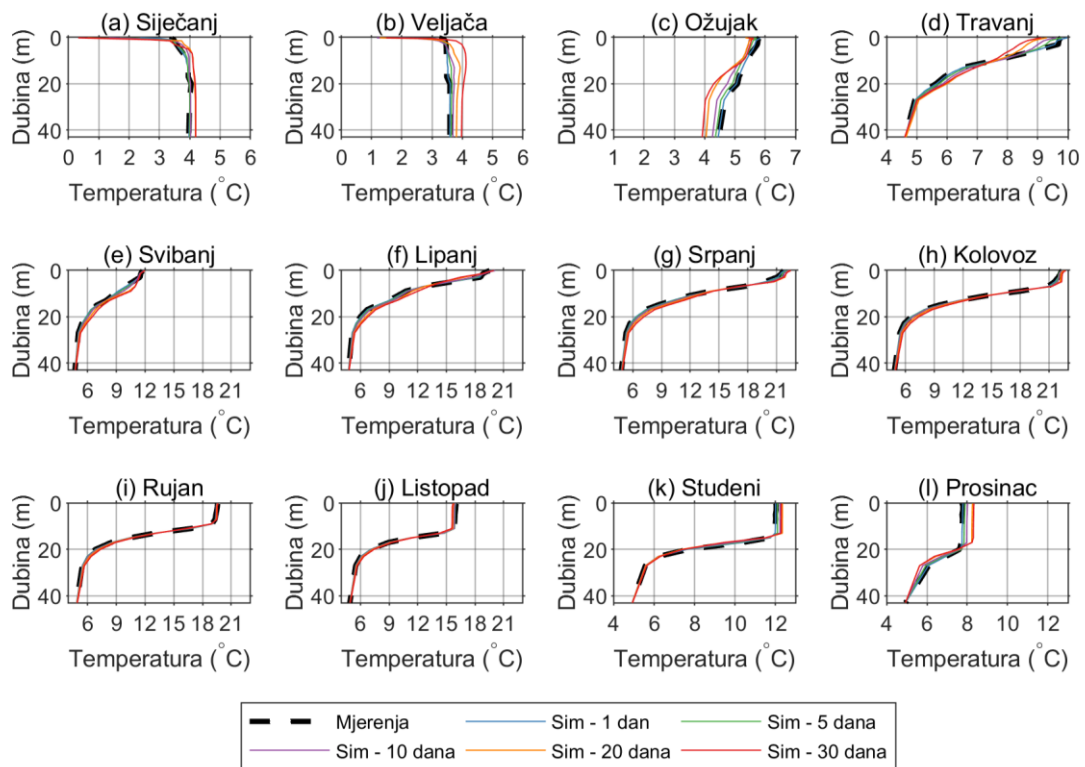
**Slika 19:** Mjere uspješnosti modela za jezero Prošće (izračunate uzimajući u obzir sva razdoblja u kojima je dostupan puni set potrebnih podataka: 06.07. – 31.12.2019. i 02.07. – 30.09.2020.)



**Slika 20:** Mjere uspješnosti modela za jezero Kozjak (izračunate uzimajući u obzir sva razdoblja u kojima je dostupan puni set potrebnih podataka: 07.07. – 04.11.2018; 01.01. – 31.12.2019. i 02.07. – 30.09.2020.)

Kao što se vidi na Slikama 19 i 20, MaxAE se nije značajno povećao s povećanjem duljine trajanja simulacija ni kod jednog od dva promatrana jezera. Očekivano, MaxAE ima najveće vrijednosti u plitkim slojevima koji su pod najvećim utjecajem meteoroloških uvjeta i u metalimniju odnosno području termokline. Maksimalne vrijednosti kod oba jezera su relativno visoke i iznose 6,5 °C kod Prošća i 5,2 °C kod Kozjaka, a nalaze se na dubini od 3 m. U površinskom sloju, MaxAE doseže 5,6 °C kod Prošćea i 4,2 °C kod Kozjaka. Slične vrijednosti dobivene za RMSE i MAE (Slike 19 i 20, b i c) ukazuju na to da utjecaj odstupajućih vrijednosti nije značajan.

Na Slici 21 prikazani su mjesečni srednjaci izmjerenih i prognoziranih vertikalnih profila temperature vode za jezero Kozjak. (Rezultati za jezero Prošće nisu prikazani jer ne postoji cjelogodišnji period u kojem je dostupan puni set potrebnih podataka.) Model uspješno reproducira godišnju varijaciju temperaturnog profila tijekom 2019. godine, uključujući početak i završetak stratifikacije i povećanje dubine termokline tijekom jačanja stratifikacije. Model podcjenjuje temperaturu površinskog sloja u siječnju i veljači (Slike 21a i b), a blago je precjenjuje u studenom i prosincu (Slike 21k i l). Radi se o razdobljima u kojima dolazi do konvektivnog miješanja. Odstupanje je suprotnog predznaka krajem jeseni i početkom zime u odnosu na kraj zime. Razlog tome je taj što se početkom zime radi o konvektivnom miješanju pri kojem je gornji sloj veće gustoće hladniji od donjeg sloja (temperatura vode > 4 °C), a krajem zime radi se o konvektivnom miješanju pri kojem je gornji sloj veće gustoće topliji od donjeg (temperatura vode < 4 °C). Zagrijavanje jezera počinje u proljeće te se nastavlja kroz ljeto. Uočava se blaga tendencija modela precjenjivanju temperature u epilimniju i podcjenjivanju u hipolimniju (Slike 21d–f). Razlika između prognozirane i izmjerene temperature površinskog sloja tijekom ljetnih mjeseci ostaje ispod 1 °C čak i u najduljim simulacijama. Ovi rezultati konzistentni su s prethodnom diskusijom o mjerama uspješnosti modela. U kolovozu (Slika 21h), iako je i dalje prisutna jaka stratifikacija, efekti konvektivnog miješanja tijekom noći počinju utjecati na mjesečni srednjak. U sljedećim mjesecima (Slike 21i–l), stratifikacija slabi, a dubina miješanja raste do maksimalne vrijednosti od otprilike 20 m u prosincu (Slika 21l). Uslijed intenziviranja konvektivnog miješanja, dolazi do porasta odstupanja prognoziranih temperatura epilimnija od izmjerenih vrijednosti. Odstupanja se povećavaju i povećanjem duljine trajanja simulacije. Simulacije u trajanju od 30 dana, u prosjeku precjenjuju temperaturu epilimnija za 0,2 °C u studenom te za 0,7 °C u prosincu.



**Slika 21:** Godišnji hod vertikalnog profila temperature vode u jezeru Kozjak. Paneli (a) – (l) pokazuju mjesečno uprosječene vrijednosti izmjerenih i prognoziranih temperatura za 2019. godinu

### 4.1.3 Uspješnost modela u dugoročnoj prognozi

Kako analiza uspješnosti modela u dugoročnoj prognozi treba pokazati sposobnost modela da predvidi početak i kraj stratifikacije te povećanje dubine termokline, za njeno provođenje potrebni su podaci za forsiranje i evaluaciju modela tijekom neprekinutog perioda minimalnog trajanja od jedne godine. S obzirom na dostupnost podataka ova analiza provedena je samo na slučaju jezera Kozjak i to za 2019. godinu. Simulacija je inicirana 01.01.2019. s približno uniformnim profilom temperature ( $\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) koji odgovara izmjerenim vrijednostima u tom vremenskom trenutku.

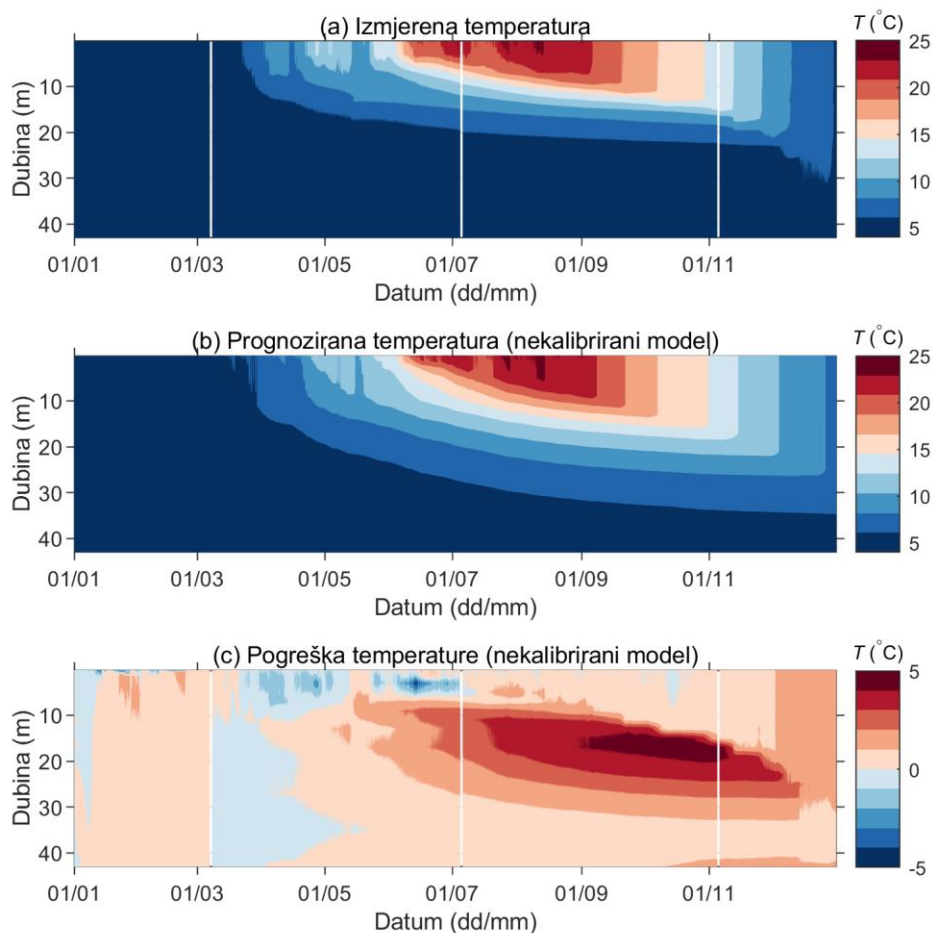
Slika 22 prikazuje dijagrame izmjerenih (a) i prognoziranih vrijednosti (b) te pogrešku prognozirane temperature (c). Kako je pokazano u prethodnom poglavlju, model je sklon precjenjivanju temperature u gornjim slojevima. To je posebno izraženo u području termokline gdje pogreška doseže  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  te u epilimniju krajem godine gdje pogreška ostaje ispod  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ipak, može se reći da model relativno dobro prognozira početak i kraj razdoblja stratifikacije, pri čemu je vrijeme početka prognozirano malo točnije od završetka. Do prvog primjetnog povećanja temperature i početka stratifikacije prema mjerenjima dolazi 21. ožujka, odnosno 18. ožujka prema prognozi (Slika 22). Značajni



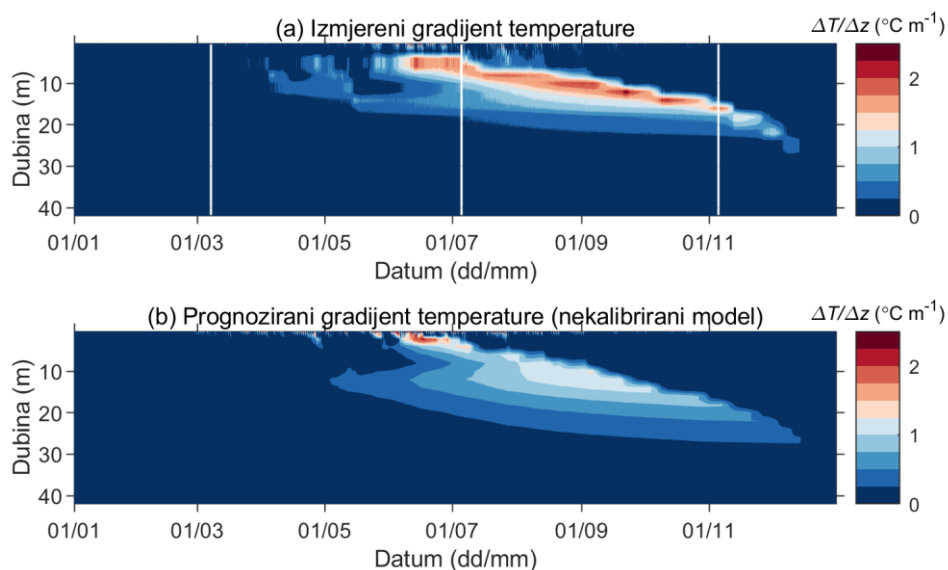
vertikalni gradijenti temperature koji prelaze  $2\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$  pojavljuju se 12. lipnja i u izmjerenim i u prognoziranim vrijednostima (Slika 23). Međutim u rezultatima simulacije maksimalni gradijent nalazi se na dubini od oko 2,5 m, dok se u rezultatima mjerenja nalazi na dubini od 5 m. Dubina termokline povećava se tijekom ljeta, a maksimalni vertikalni gradijent temperature pojavljuje se 21. rujna na dubini od 12 m i iznosi  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ . Maksimalni prognozirani vertikalni gradijent temperature u istom vremenskom trenutku nalazi se na istoj dubini no iznosi samo  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ . Slika 23 pokazuje da model prilično točno prognozira dubinu gornje granice metalimnija, međutim uglavnom precjenjuje njegovu debljinu te blago precjenjuje temperaturu u hipolimniju, što se posljedično očitava kao podcjenjivanje vertikalnog gradijenta temperature u metalimniju. Dan 6. prosinca može se smatrati završetkom stratifikacije, s gradijentima temperature ispod  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ . Konvektivno miješanje započinje se primjećivati u kolovozu, a dubina izmiješanog epilimnija raste sve do prosinca. Prognozirana dubina miješanja dobro reproducira izmjerene vrijednosti. To se jasnije može uočiti na Slici 24 gdje su prikazani mjesečni srednjaci izmjerenih (crne linije) i prognoziranih (zelene linije) temperaturnih profila u jezeru Kozjak u 2019. godini.

Kako je prvi cilj ovog istraživanja bio pokazati uspješnost modela uz minimalnu količinu podataka o konkretnom jezeru, svi do sada prikazani rezultati dobiveni su bez posebne kalibracije modela odnosno korištenjem generičkih vrijednosti parametara pronađenih u literaturi. Za potrebe analize utjecaja klimatskih promjena u Poglavlju 4.2, model je kalibriran pomoću dostupnih podataka o jezeru Kozjak (Šarović i Klaić, 2023).

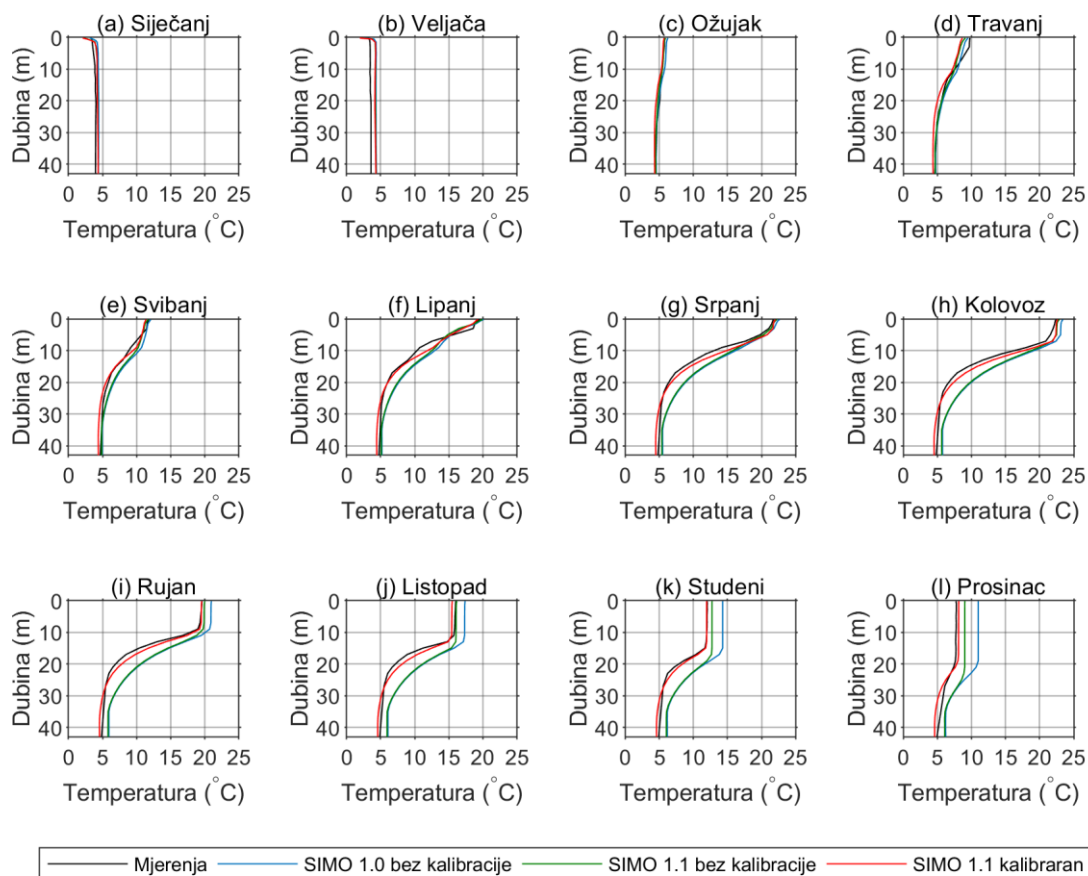
Budući da je tok Sunčevog zračenja identificiran kao glavni čimbenik koji utječe na temperaturu vode u jezeru, glavni fokus bio je na kalibraciji parametara koji utječu na neto tok kratkovalnog zračenja i parametara atenuacije kratkovalnog zračenja u vodi. Nakon kalibracije, vrijednost koeficijenta atenuacije kratkovalnog zračenja povećana je s 0,1 (vrijednost prikladna za prozirna oligotrofna jezera) na 0,15. Prosječna Secchi dubina jezera Kozjak, mjerena jednom mjesečno u periodu od 2009. do 2010. godine, iznosila je  $z_{SD} = 10,5\text{ m}$  (Žutinić i sur., 2014), što ukazuje na vrijednost koeficijenta atenuacije od  $1,7 / z_{SD} = 0,16$  (Poole i Atkins, 1929). Prema tome kalibrirana vrijednost koeficijenta atenuacije kratkovalnog zračenja se otprilike slaže s mjerenjima iz 2009. – 2010. godine.



**Slika 22:** Izmjerena (a) i prognozirana temperatura (b) te pogreška prognoze (c) u jezeru Kozjak u 2019. godini. Simulacija provedena nekalibriranim modelom SIMO 1.1, inicirana 01.01.2019.



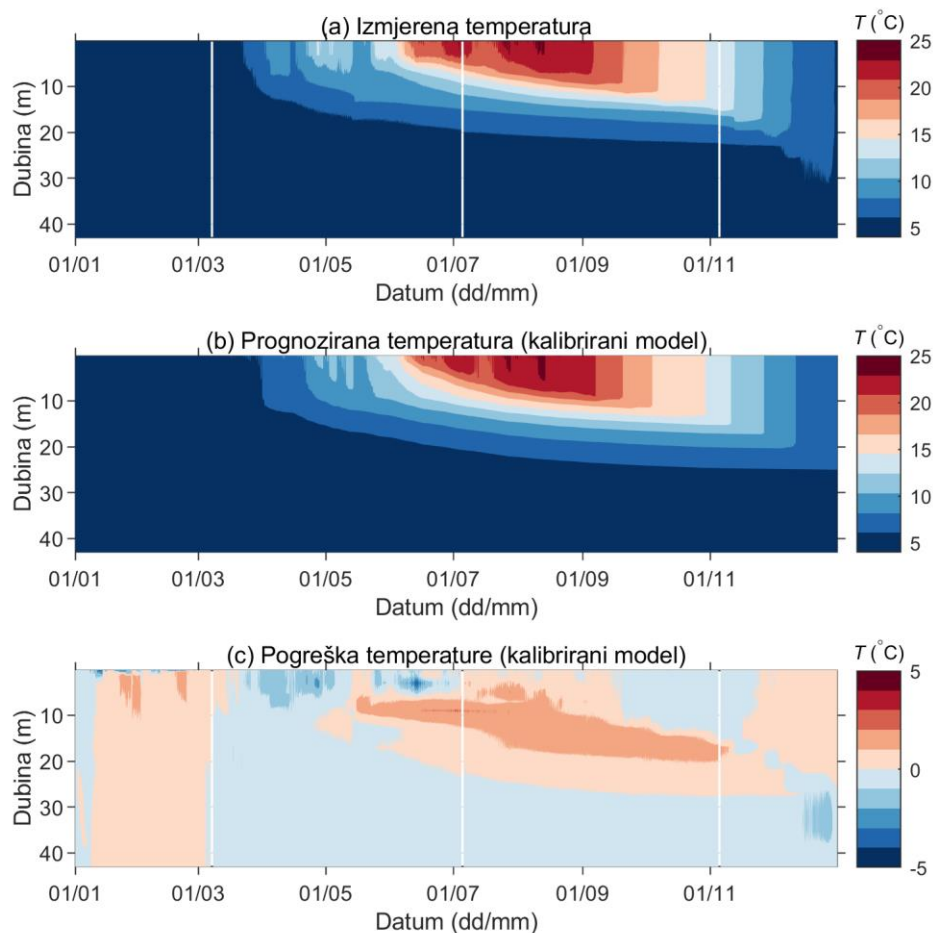
**Slika 23:** Izmjereni (a) i prognozirani vertikalni gradijent temperature (b) u jezeru Kozjak u 2019. godini. Simulacija provedena nekalibriranim modelom SIMO 1.1, inicirana 01.01.2019.



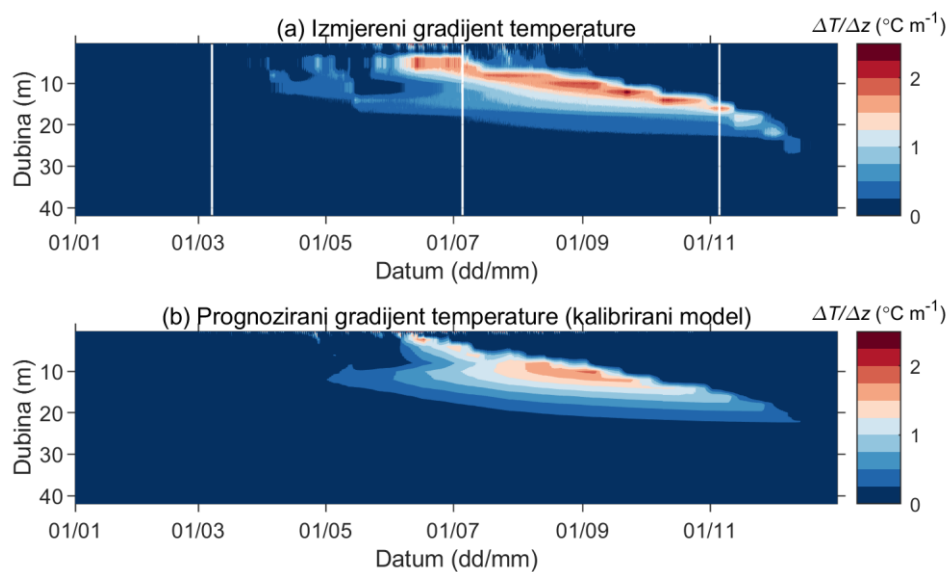
**Slika 24:** Mjesečni srednjaci prognoziranih temperaturnih profila u jezeru Kozjak u 2019. godini dobivenih nekalibriranim modelom SIMO 1.0 (zeleno), nekalibriranim modelom SIMO 1.1 (plavo) i kalibriranim modelom SIMO 1.1 (crveno) u usporedbi s izmjenjenim vrijednostima (crno)

Rezultati jednogodišnje simulacije kalibriranog modela prikazani su na Slikama 25 i 26 te na Slici 24 (crvene linije). Nakon kalibracije pogreška temperature uglavnom ne prelazi  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Osim toga, debljina metalimnija je manja, a vertikalni gradijent temperature bolje reproduciran, iako je i dalje podcijenjen. Kod rezultata površinskog sloja ne primjećuje se veliko poboljšanje, no čak i nekalibrirani model je relativno dobro reproducirao temperaturu u tom sloju (Tablica 3). S druge strane, ako promatramo rezultate po čitavoj dubini vodenog stupca, kalibracijom modela MBE smanjio se s 0,84 na praktički zanemarivih  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ , RMSE s 1,4 na  $0,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ , MAE s 0,99 na  $0,52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a MaxAE s 4,92 na  $4,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Rezultat kalibracije je lakše uočljiv na Slici 27 gdje je prikazan vremenski niz temperature vode na različitim dubinama jezera. Najočitiije poboljšanje primjećuje se u slojevima oko i ispod termokline (Slike 27i–p) gdje je kalibracijom postignuto bitno smanjenje precjenjivanja temperature.



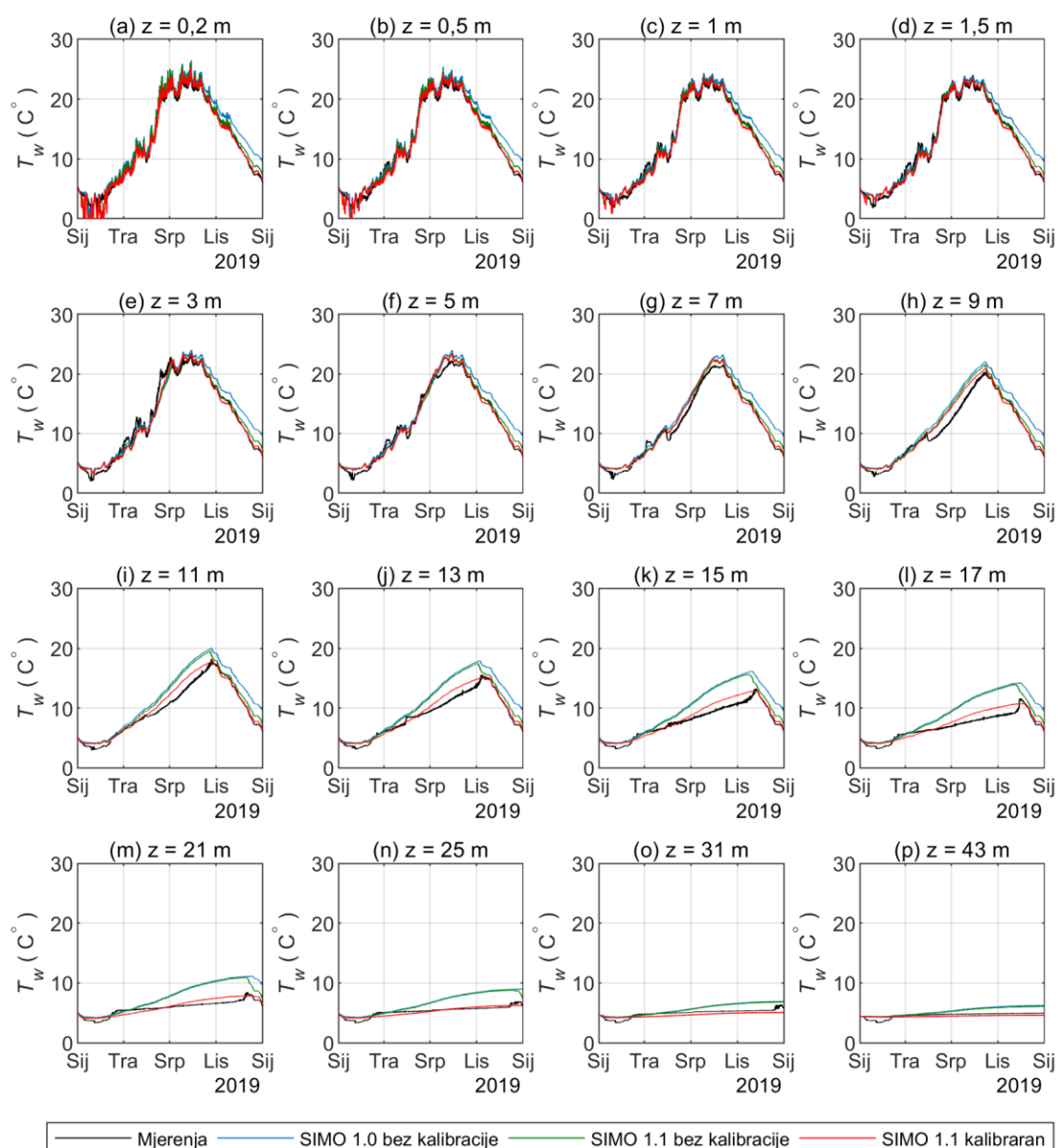
**Slika 25:** Izmjerena (a) i prognozirana temperatura (b) te pogreška prognoze (c) u jezeru Kozjak u 2019. godini. Simulacija provedena kalibriranim modelom SIMO 1.1.



**Slika 26:** Izmjereni (a) i prognozirani vertikalni gradijent temperature (b) u jezeru Kozjak u 2019. godini. Simulacija provedena kalibriranim modelom SIMO 1.1

**Tablica 3:** Mjere uspješnosti nekalibriranog modela SIMO 1.0 te nekalibriranog i kalibriranog modela SIMO 1.1 za simulacije temperature vode jezera Kozjak u 2019. godini

(°C)	Ukupno za sve dubine			Površinski sloj		
	SIMO 1.0 nekalibriran	SIMO 1.1 nekalibriran	SIMO 1.1 kalibriran	SIMO 1.0 nekalibriran	SIMO 1.1 nekalibriran	SIMO 1.1 kalibriran
<b>MBE</b>	1,24	0,84	0,02	0,86	0,09	-0,34
<b>RMSE</b>	1,74	1,40	0,66	1,52	0,97	0,95
<b>MAE</b>	1,31	0,99	0,52	1,21	0,72	0,66
<b>MaxAE</b>	5,11	4,92	4,27	3,96	4,24	4,27



**Slika 27:** Satne vrijednosti prognoziranih temperatura vode jezera Kozjak u 2019. godini dobivene nekalibriranim modelom SIMO 1.0 (zeleno), nekalibriranim modelom SIMO 1.1 (plavo) i kalibriranim modelom SIMO 1.1 (crveno) u usporedbi s izmjerenim vrijednostima (crno)

Na Slikama 24 i 27 te u Tablici 3, osim rezultata kalibriranog i nekalibriranog modela SIMO 1.1 prikazani su još i rezultati nekalibriranog modela SIMO 1.0. Radi se o prvoj verziji modela koja kod mehanizma konvektivnog miješanja nije uzimala u obzir smanjenje površine horizontalnog poprečnog presjeka jezera s povećanjem dubine. Ovdje je jasno vidljiv utjecaj te pretpostavke. Naime, iako je model i u toj jednostavnijoj varijanti dobro reproducirao dubinu konvektivnog miješanja, općenito je izrazito precjenjivao temperaturu u izmiješanom epilimniju. Diskrepancija između prognozirane i izmjerene temperature epilimnija postaje sve veća s produljenjem trajanja i intenziviranjem konvektivnog miješanja.

#### **4.1.4 Usporedba s drugim modelima**

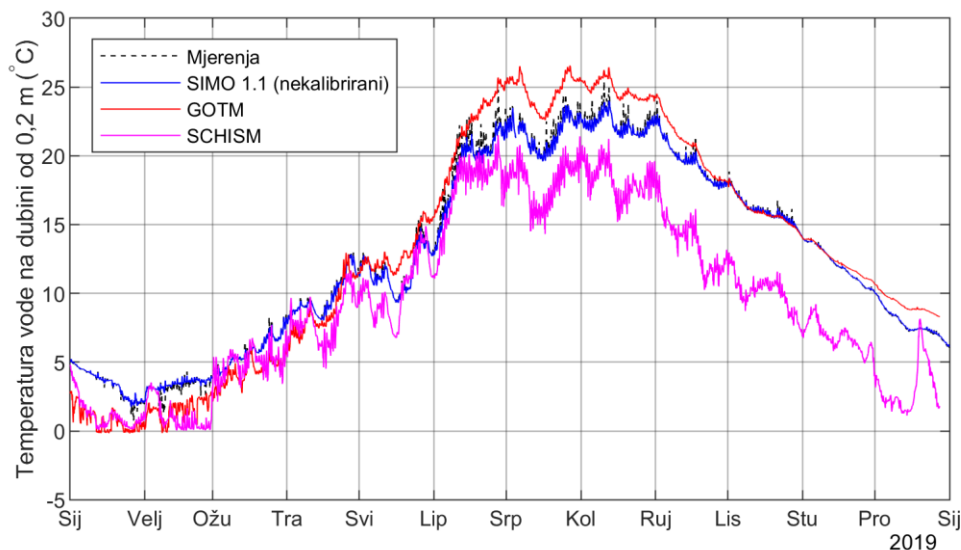
Za potrebe usporedbe performansi modela SIMO1.1 s performansama složenijih modela, na primjeru jezera Kozjak za isto jednogodišnje razdoblje za koje je primijenjen model SIMO 1.1, s početkom 01.01.2019. , primijenjeni su 1-D model General Ocean Turbulent Model (GOTM) v4.1.0 (<https://gotm.net/about/>) i 3-D model Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model (SCHISM) v5.3 (Zhang i sur., 2016). Simulacije pomoću oba modela provedene su u okviru projekta „Hidrodinamičko modeliranje sustava Plitvičkih jezera“ u poduzeću Gekom.

GOTM je 1-D model vodenog stupca razvijen u svrhu hidrodinamičkih, termodinamičkih i biogeokemijskih istraživanja jezera te zatvorenih ili poluzatvorenih morskih vodenih tijela. Model simulira vertikalni transport količine gibanja, topline i soli (Burchard i sur., 1999). Model se može koristiti samostalno ili združen s drugim modelima, a ima nekoliko opcija zatvaranja turbulencije. Ovaj je model korišten u nizu oceanografskih (Bruggeman i Bolding, 2014; Burchard i sur., 2014; Li i sur., 2021) i limnoloških studija (Ciglenečki i sur., 2014; Andersen i sur., 2021; Nielsen i sur., 2021). SCHISM je 3-D model s nestrukturiranom mrežom. Koristi hidrostatičku aproksimaciju te rješava vremenski usrednjene jednadžbe očuvanja mase i količine gibanja te transporta soli i topline. Zbog svoje nestrukturirane mreže pogodan je za bazene s kompliciranom geometrijom. Široko se koristi u hidrodinamičkim istraživanjima rijeka, obalnih voda, mora i oceana (Jacob i sur., 2016; Bubalo i sur., 2018; Zhang i sur., 2020; Burić i sur., 2021) te jezera (Frishfelds i sur., 2021).

Kao što je prethodno već opisano, za modeliranje meteorološkog forsiranja u modelu SIMO koriste se samo rezultati mjerenja. U GOTM i SCHISM simulacijama, osim

izmjerenih podataka o temperaturi zraka i vjetru (GOTM simulacija) te izmjerene temperature zraka (SCHISM simulacija), meteorološko forsiranje modelirano je pomoću atmosferskog modela Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock i Klemp, 2008). U obje simulacije pretpostavlja se da je salinitet vode zanemariv. Osim toga, u oba modela korištena je ista  $k-\epsilon$  shema zatvaranja turbulencije prema Rodiju (1984). Konačno, oba modela inicijalizirana su temperaturama jezera izmjerenim 01.01.2019. (kao i SIMO).

Temperature vode na dubini od 0,2 m dobivene pomoću sva tri modela (SIMO, GOTM i SCHISM) te izmjerene vrijednosti prikazane su na Slici 28. U slučaju modela SIMO, prikazani su rezultati nekalibriranog modela SIMO 1.1. Vidi se da rezultati modela SIMO bolje reproduciraju izmjerene vrijednosti od ostala dva modela. Treba imati na umu da uzrok tome može biti korištenje različitih ulaznih podataka (odnosno to što GOTM i SCHISM koriste rezultate WRF-a), no svakako ukazuje na uspješnost i primjenjivost modela SIMO. Mjere uspješnosti za sva tri modela sažete su u Tablici 4. SIMO 1.1 pokazuje bolje performanse od druga dva modela s obzirom na sve mjere osim RMSE koji je za GOTM manji za 0,6 °C.



**Slika 28:** Usporedba izmjerene temperature površinskog sloja s vrijednostima dobivenim modelima SIMO 1.1, GOTM i SCHISM za jezero Kozjak u 2019. godini

**Tablica 4:** Usporedba mjera uspješnosti modela SIMO 1.1, GOTM i SCHISM za površinski sloj za jezero Kozjak u 2019. godini

	SIMO nekalibriran	1.1	SIMO kalibriran	1.1	GOTM	SCHISM
MBE	0,09		-0,34		1,85	3,91
RMSE	0,97		0,95		0,35	-3,34
MAE	0,72		0,66		1,53	3,37
MaxAE	4,24		4,27		4,41	8,24

U literaturi su dostupne kvantitativne mjere uspješnosti raznih modela dobivene u brojnim istraživanja modeliranja jezera. Međutim, usporedba uspješnosti modela s drugim modelima nije uvijek jednostavna jer ne postoji zajednički sustavni pristup izvještavanju. Naime, različita istraživanja koriste se različitim mjerama uspješnosti te ponekad nisu jasno opisane metode izračuna, razdoblja promatranja ili frekvencija i dubina mjerenja. U nekim slučajevima mjerenja se ne rade dovoljno često da bi precizno razlučila kratkotrajne varijacije ili pak ne obuhvaćaju dovoljno dugačako razdoblje. Nadalje, nisu pronađena istraživanja koja računaju mjere uspješnosti u odnosu na duljinu trajanja simulacije koristeći samo krajnje rezultate, kao što je pokazano u Poglavlju 4.1.2.

S druge strane postoje brojna istraživanja rezultata dugoročnih simulacija. Neka od njih sažeta su u Tablici 5 i na Slici 29. Za jednogodišnju simulaciju temperature vode u malom dimiktičnom jezeru, Martynov i sur. (2010) izvještavaju o vrijednostima RMSE-a od 1,8 °C za diferencijalni model (Hostetler) i 3,2 °C za dvoslojni model (FLake). Bruce i sur. (2018) proveli su dvogodišnju simulaciju za 32 različita jezera koristeći GLM model. Izračunati RMSE za cijeli vertikalni profil, epilimnij i hipolimnij redom su iznosili 1,34, 1,62 i 1,31 °C. MacKay (2012) je proveo simulaciju modelom s izmiješanim slojevima, u trajanju od otprilike mjesec i pol te izvjestio o vrijednostima MBE-a na površini < 1 °C. Read i sur. (2014) su simulirali 30 godina (asimilacija podataka odnosno ponovno pokretanje simulacije radilo se jednom godišnje) za 434 jezera umjerenih zemljopisnih širina i izvjestili o vrijednostima RMSE-a od 2,78 °C za cijeli vertikalni profil, 1,74 °C u epilimniju i 3,33 °C u hipolimniju. Moore i sur. (2021) koristili su četiri različita modela za monomiktično jezero umjerenih zemljopisnih širina te dobili vrijednosti RMSE-a u rasponu od 0,8 do 2,96 °C za simulacije prije kalibracije parametara modela i od 0,61 do 1,17 °C nakon kalibracije. Dobivene apsolutne vrijednosti MBE-a kretale su se od 0,34 do 1,75 °C za simulacije prije kalibracije parametara modela i od 0,1 do 0,55 °C nakon nje.



Jednogodišnja simulacija nekalibriranim modelom SIMO 1.1 u ovom istraživanju dala je RMSE od 0,97 °C u površinskom sloju odnosno 1,4 °C za ukupnu dubinu jezera. Najveća vrijednost RMSE-a primjećuje se u području termokline, i iznosi 1,92 °C na dubini od 17 m. Nakon kalibracije modela najveća vrijednost RMSE-a nalazi se plice, na 9 m dubine, i iznosi 1 °C. Kalibracijom je vrijednost RMSE-a u hipolimniju spuštana s 0,95 na 0,45 °C, dok je utjecaj u epilimniju manji pa je vrijednost s 1,02 pala na 0,81 °C.

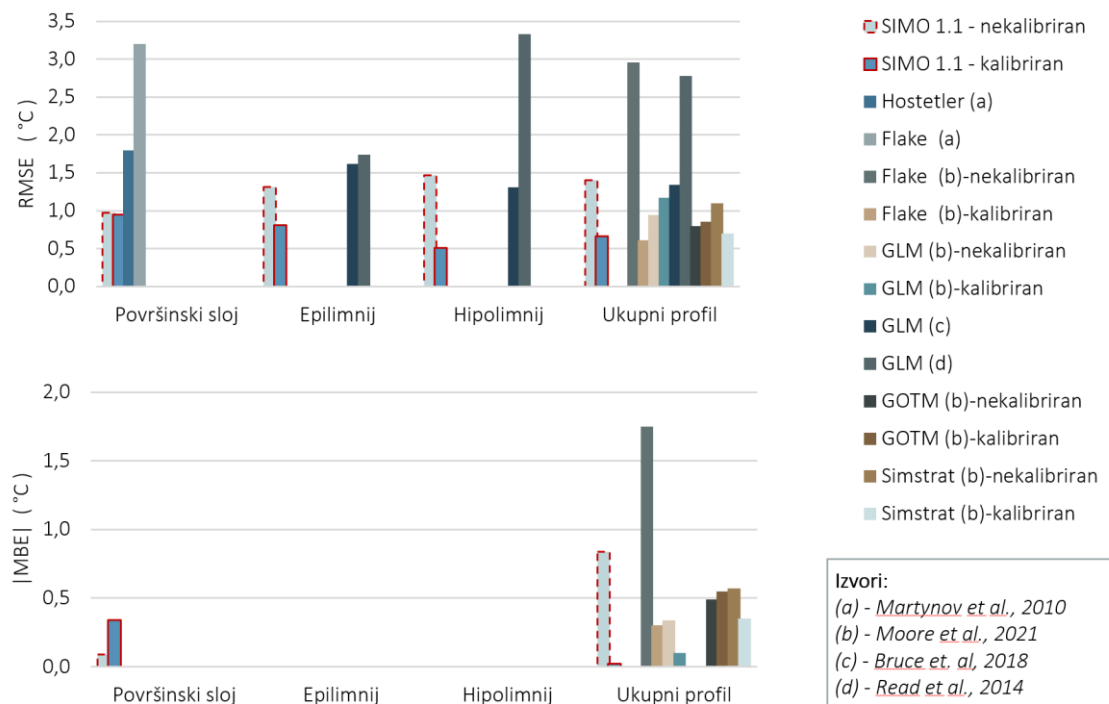
**Tablica 5:** Usporedba performansi modela SIMO 1.1 s drugim modelima

Reference	Model	Područje primjene	Duljina simulacije	RMSE*	MBE *
	SIMO1.1	malo monomiktično jezero	1 godina	Cijeli vert. profil: 1,4 / 0,66°C Površinski sloj: 0,97 / 0,95 °C Epilimnij: 1,31 / 0,81°C Hipolimnij: 1,47/0,51 °C	Cijeli vert. profil: 0.84/0,02 °C Površinski sloj: 0.09 °C/-0,34
	SIMO1.1	malo monomiktično jezero	1.5 mjeseca		Površinski sloj: 0.5 / 0.25 °C
Martynov i sur. (2010)	a) Hostetler b) FLake	malo dimiktično jezero	1 godina	Površinski a) 3.2 °C b) 3.2 °C	sloj: 1.8 °C
Bruce i sur. (2018)	GLM	32 različita jezera		Cijeli vert. profil: 1.34 °C Epilimnij: 1.62 °C Hipolimnij: 1.31 °C	
MacKay (2012)	Model izmiješanih slojeva	arktičko jezero	1.5 mjeseca		Površinski sloj: < 1 °C
Read i sur. (2014)	GLM	434 jezera umjerenih zemljopisnih širina	30 godina (pokretana godišnje)	Cijeli vert. profil: 2.78 °C Epilimnij: 1.74 °C Hipolimnij: 3.33 °C	
Moore i sur. (2021)	a) FLake b) GLM c) GOTM d) Simstrat	monomiktično jezero umjerene zemljopisne širine	1 godina	Cijeli vert. profil: a) 2.96 / 0.61 b) 0.94 / 1.17 c) 0.80 / 0.85 d) 1.10 / 0.70	Cijeli vert. profil: a) -1.75 / -0.3 b) -0.34 / 0.10 c) -0.49 / -0.55 d) 0.57 / -0.35

\* kada su dane dvije vrijednosti prva se odnosi na nekalibrirani, a druga na kalibrirani model

Apsolutna vrijednost MBE-a u površinskom sloju je kalibracijom narasla s 0,1 na 0,33 °C, no ukupno za cijelu dubinu jezera smanjena je s 0,84 na 0,02 °C, a njena maksimalna vrijednost s 1,93 na 0,55 °C. Kao i kod RMSE-a, maksimalna vrijednost MBE-a također se javlja u području termokline, na dubini od 17 m prije odnosno 9 m nakon kalibracije. Nekalibrirani model sustavno precjenjuje temperaturu po cijeloj dubini jezera, što je pokazano i u prethodnim poglavljima (npr. na Slici 20a), dok kalibrirani model precjenjuje temperaturu u metalimniju i blago podcjenjuje iznad i ispod njega odnosno u epilimniju i hipolimniju.

Generalno se može zaključiti da je uspješnost modela zadovoljavajuća te da je usporediva i čak premašuje uspješnost nekih postojećih modela (Tablica 5, Slika 29). Performanse u području termokline su očekivano nešto lošije od ostatka jezera, no nažalost podaci o mjerama uspješnosti postojećih modela za taj sloj nisu pronađeni u dostupnoj literaturi.



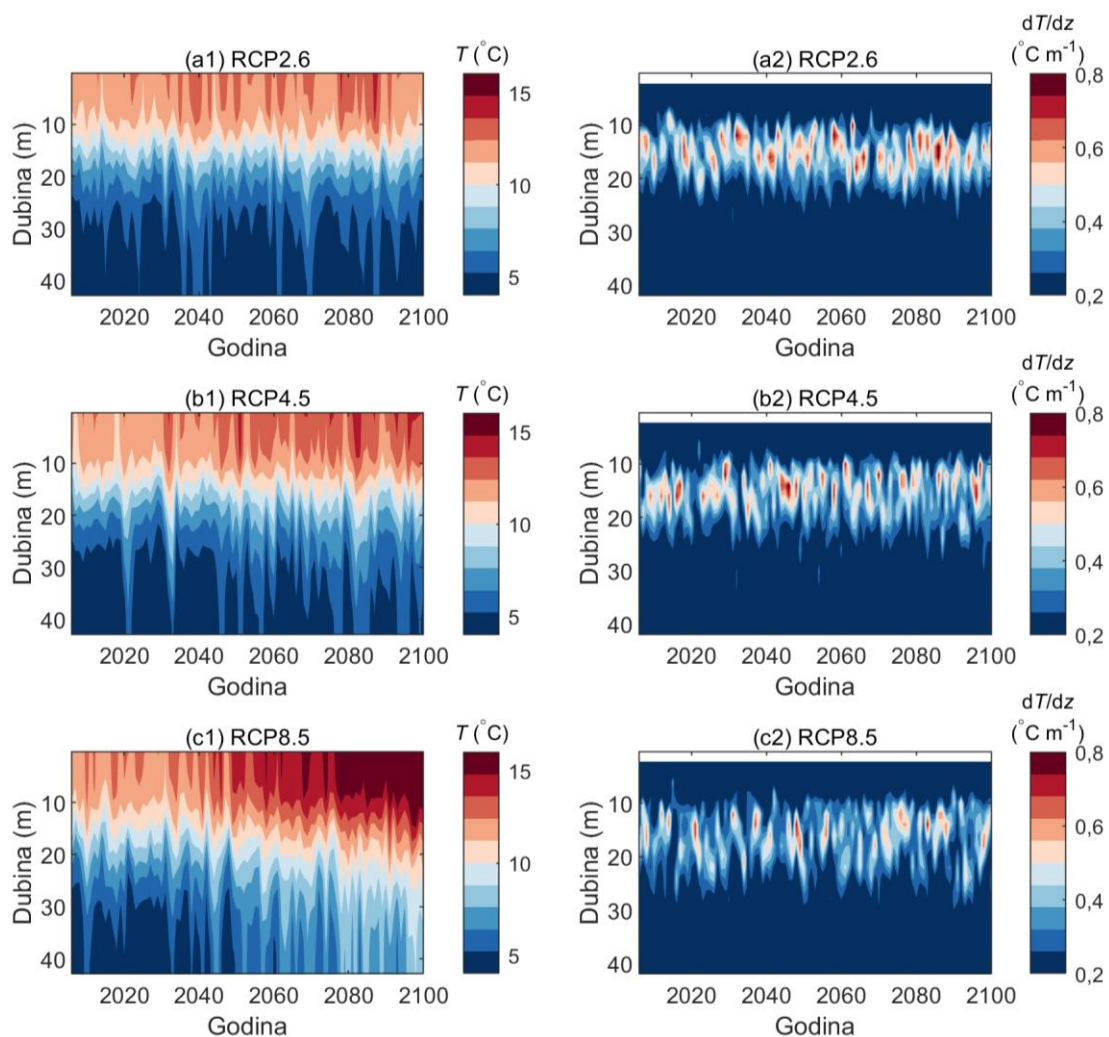
**Slika 29:** Usporedba performansi modela SIMO 1.1 s drugim modelima

## 4.2 Analiza utjecaja klimatskih promjena na temperaturu i stratifikaciju jezera Kozjak

Kako je ranije opisano, u svrhu analize utjecaja klimatskih promjena na temperaturu vode jezera Kozjak, kalibrirani model SIMO 1.1 primijenjen je na jezero Kozjak za razdoblje od 2006. do 2100. za tri RCP scenarija. Rezultati i diskusija dani su u sljedećim poglavljima.

### 4.2.1 Analiza trendova temperature vode

Na Slici 30 prikazani su konturni dijagrami prognoziranih vrijednosti temperature vode i vertikalnog temperaturnog gradijenta za sva tri scenarija, RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) i RCP8.5 (c). Zbog zornosti prikaza, prikazane su godišnje usrednjene vrijednosti.



**Slika 30:** Godišnji srednjaci temperature vode (a1 – c1) i vertikalnog temperaturnog gradijenta (a2 – c2) izračunati za razdoblje od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) i RCP8.5(c)

U scenariju RCP2.6 se ne primjećuje znatni porast temperature do kraja stoljeća (Slika 30a1), no porast je prisutan u scenariju RCP4.5 (Slika 30b1) i još više u scenariju RCP8.5 (Slika 30c1). Međutim taj porast temperature nije praćen znatnim rastom vertikalnog gradijenta temperature (Slike 30a2–c2) iz razloga što do porasta temperature vode dolazi na svim dubinama, a ne samo u gornjim slojevima. Na ovim dijagramima se također ne može primijetiti znatno povećanje dubine maksimalnog vertikalnog gradijenta, što ukazuje na odsutnost znatnog trenda promjene dubine termokline. Kako će kasnije biti detaljnije prikazano, signifikantni porast maksimalne dubine termokline opažen je u scenariju RCP8.5, zajedno sa signifikantnim produljenjem razdoblja stratifikacije u sva tri analizirana scenarija. Međutim, spomenuti zaključci ne ističu se na Slici 30, a glavni razlog tome je to što Slika 30 prikazuje godišnje usrednjene podatke u kojima se godišnji ekstremi slabije odražavaju.

Kako bi se detaljnije ispitali trendovi temperature vode na različitim dubinama i razvoj stratifikacije, izračunati su koeficijenti linearne regresije godišnje usrednjenih vrijednosti temperature vode za svaku dubinu i scenarij. Slike 31a1–c1 prikazuju godišnje usrednjene temperature vode u svakom sloju diskretiziranog modela, zajedno s temperaturom termokline (TC). Temperatura termokline definirana je kao temperatura na dubini koja odgovara dubini najveće vrijednosti vertikalnog gradijenta temperature. Budući da se gradijent temperature izračunava na granici između dva sloja, temperatura termokline izračunata je kao prosjek temperature tih dvaju slojeva. Kako su na Slikama 31a1–c1 prikazane godišnje usrednjene vrijednosti temperature, tako je i temperatura termokline također izračunata kao godišnji srednjak uzimajući u obzir cijelu godinu, a ne samo podatke iz razdoblja kada je jezero bilo stratificirano. Ovo nije uobičajeni pristup te ga treba uzeti u obzir ako se ovdje dobiveni rezultati uspoređuju s rezultatima drugih istraživanja. Temperatura termokline pokazuje znatan uzlazni trend od  $0,8 \text{ }^\circ\text{C (100 g)}^{-1}$  u scenariju RCP2.6,  $1,82 \text{ }^\circ\text{C (100 g)}^{-1}$  u scenariju RCP4.5 i  $4,68 \text{ }^\circ\text{C (100 g)}^{-1}$  u scenariju RCP8.5. Izračunati koeficijenti brzine promjene temperature za svaki sloj posebno prikazani su kao funkcija dubine jezera na Slikama 31a2–c2. U takozvanom baznom scenariju (RCP8.5), temperatura vode povećava se znatno brže nego u ostala dva scenarija. To je i očekivano s obzirom na značajno brži porast temperature zraka i kratkovalnog zračenja te smanjenje relativne vlage u scenariju RCP8.5, u usporedbi s druga dva scenarija (Slike 11a, c i f). Stope porasta temperature vode površinskog sloja za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 iznosile su redom  $0,62$ ,  $1,75$  i  $5,19 \text{ }^\circ\text{C (100 g)}^{-1}$ ,

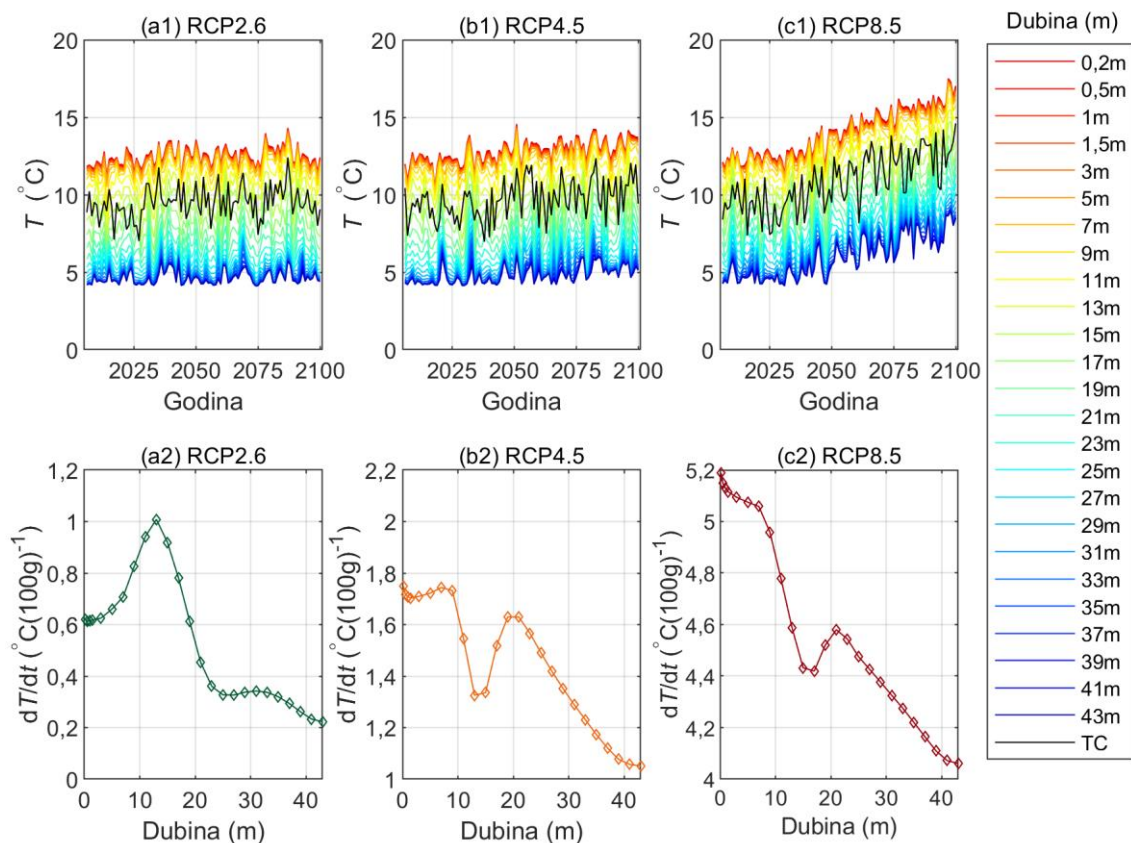
dok su stope porasta temperature vode u pridnenom sloju iznosile redom 0,22, 1,05 i 4,06 °C (100 g)<sup>-1</sup>. Međutim, provjera signifikantnosti pokazala je da izračunati trendovi za dubine veće od 20 m u scenariju RCP2.6 (Slika 31a2) nisu značajni ( $p > 0.05$ ).

Općenito, stopa promjene temperature vode u hipolimniju opada približno linearno s povećanjem dubine (Slike 31a2–c2). To nije slučaj u epilimniju i području termokline iz razloga što tu dolazi do utjecaja različitih mehanizama meteorološkog forsiranja i nelinearnosti procesa koji upravljaju termodinamičkim ponašanjem jezera (termalna stratifikacija i konvektivno miješanje). U plićim slojevima (dubine < 10 m) do izražaja dolazi utjecaj promjene kratkovalnog zračenja. To se može primijetiti kao znatno veća stopa promjene temperature plićih slojeva u scenariju RCP8.5, a izrazito niža u scenariju RCP2.6, u usporedbi sa stopama promjene u nešto dubljim slojevima (10 do 15 m).

Budući da u scenariju RCP2.6 nema značajnog povećanja dubine termokline, kroz metalimnij (do ~23 m) dolazi do strmog smanjenja stope porasta temperature vode, koja nakon toga, u hipolimniju, nastavlja opadati puno blaže s povećanjem dubine (Slika 31a2). Strmo smanjenje stope promjene temperature vode zabilježeno je i u epilimniju u scenarijima RCP4.5 i RCP8.5 (Slike 31b2–c2). Međutim, u ta dva scenarija dolazi do naglog skoka stope promjene temperature vode na dubini od oko 21 m. Razlog ovakvog naizgled čudnog rezultata je upravo produbljenje epilimnija. Naime slojevi koji se nalaze neposredno ispod termokline generalno su znatno niže temperature i sporije se griju u odnosu na slojeve neposredno iznad nje. Pomicanjem termokline prema dubljim slojevima, slojevi koji su bili ispod polako dolaze iznad termokline što se očitava spomenutom višom stopom porasta u odnosu na slojeve neposredno ispod i iznad dubina kretanja termokline. Stopa porasta temperature na većim dubinama je znatno niža što je u skladu s prethodnim istraživanjima (Pilla i sur., 2020; Noori i sur., 2022a). Međutim, u dostupnoj literaturi nisu pronađeni podaci ovako detaljnih analiza stope porasta temperature u ovisnosti o dubini vode s dovoljnom rezolucijom da bi se mogao uočiti ovaj tip ponašanja u području termokline.

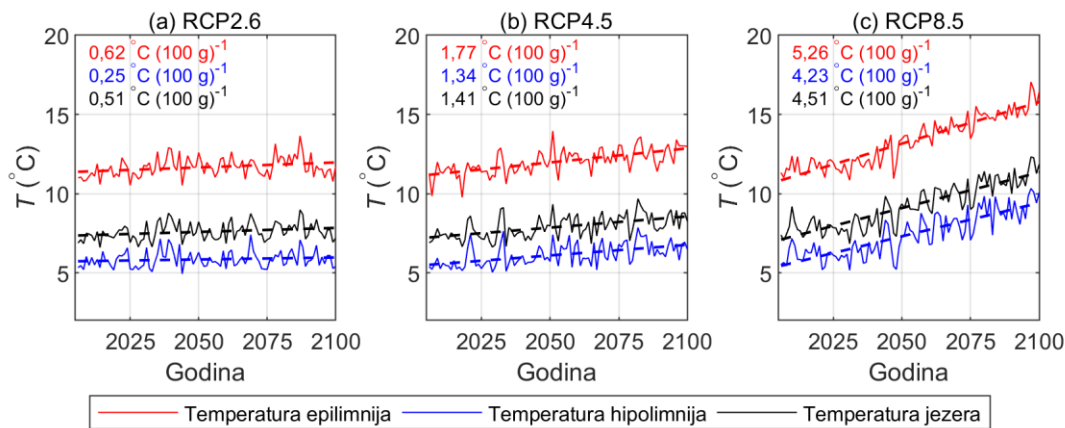
Rezultati istraživanja utjecaja klimatskih promjena na 29 švicarskih jezera za scenarije RCP8.5, RCP4.5 i RCP2.6, do kraja stoljeća predviđaju prosječno povećanje površinske temperature vode od 3,3, 1,7 i 0,9 °C, te prosječno povećanje pridnene temperature od 1,6, 0,93 i 0,48 °C (Råman Vinnå i sur., 2021). Globalno istraživanje koje je obuhvatilo 635 jezera (Woolway i Merchant, 2019) predviđa prosječno zagrijavanje površinske vode jezera do kraja stoljeća od 2,5 i 1,1 °C, za scenarije RCP6.0 i RCP2.6. Međutim, najveća

prognozirana vrijednost zagrijavanja površine jezera do kraja stoljeća za scenarij RCP6.0 doseže, prema istom istraživanju, oko 5,5 °C. Prema tome, rezultati povećanja temperature gornjih slojeva jezera Kozjak ne odstupaju znatno od rezultata postojećih istraživanja. S druge strane, povećanje temperature dubljih slojeva jezera Kozjak premašuju predviđanja koja prikazuju Rāman Vinnā i sur. (2021). Autori tog istraživanja objašnjavaju blago zagrijavanje dubokih slojeva činjenicom da faza zimskog hlađenja ostaje dovoljno jaka pa se jezera uglavnom stignu osloboditi topline akumulirane tijekom ljeta, odnosno čitavi vodeni stupac jezera ohladi se do temperature maksimalne gustoće vode od  $\approx 4$  °C. Time se pridnena temperatura jezera praktički resetira svake zime. To nije slučaj kod jezera Kozjak, gdje temperatura pridnenog sloja nakon 2030. godine rijetko pada na  $\approx 4$  °C.

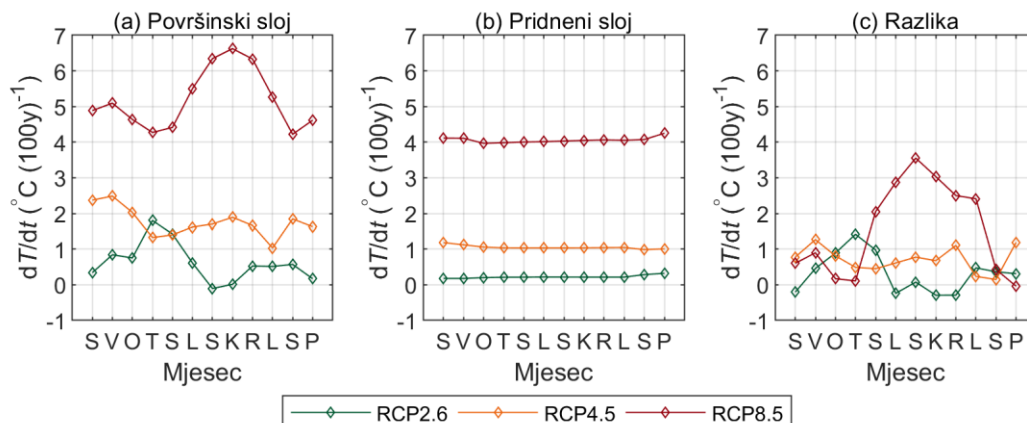


**Slika 31:** Godišnje vrijednosti temperature vode izračunate za period od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6 (a1), RCP4.5 (b1) i RC8.5 (c1) te stope porasta temperature vode u ovisnosti o dubini (a2 – c2). Legenda se odnosi na panele (a1 – c1) i označava dubine, dok TC označava termoklinu

Na Slici 32 prikazane su godišnje vrijednosti temperature uprosječene po dubini epilimnija i hipolimnija te po cijeloj dubini jezera. Kako je hipolimnija u jezeru Kozjak uglavnom otprilike dvostruko deblji od epilimnija, prosječna temperatura cijelog jezera bliža je prosječnoj temperaturi hipolimnija. Očekivano, temperatura epilimnija je znatno viša. Slično vrijedi i za koeficijente linearnih regresija ovih slojeva. Naime, stope porasta temperature epilimnija slične su stopama porasta temperature zraka (Slika 11a), dok su stope porasta temperature hipolimnija nešto niže. No razlika u stopama porasta temperature između epilimnija i hipolimnija nije dramatična zbog ranije spomenutog znatnog zagrijavanja jezera po cijeloj dubini uz to da se ovdje razmatraju godišnji srednjaci. Brzina porasta srednje temperature jezera (crne linije) za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 redom iznosi 0,5, 1,4 i 4,5 °C (100 g)<sup>1</sup>.

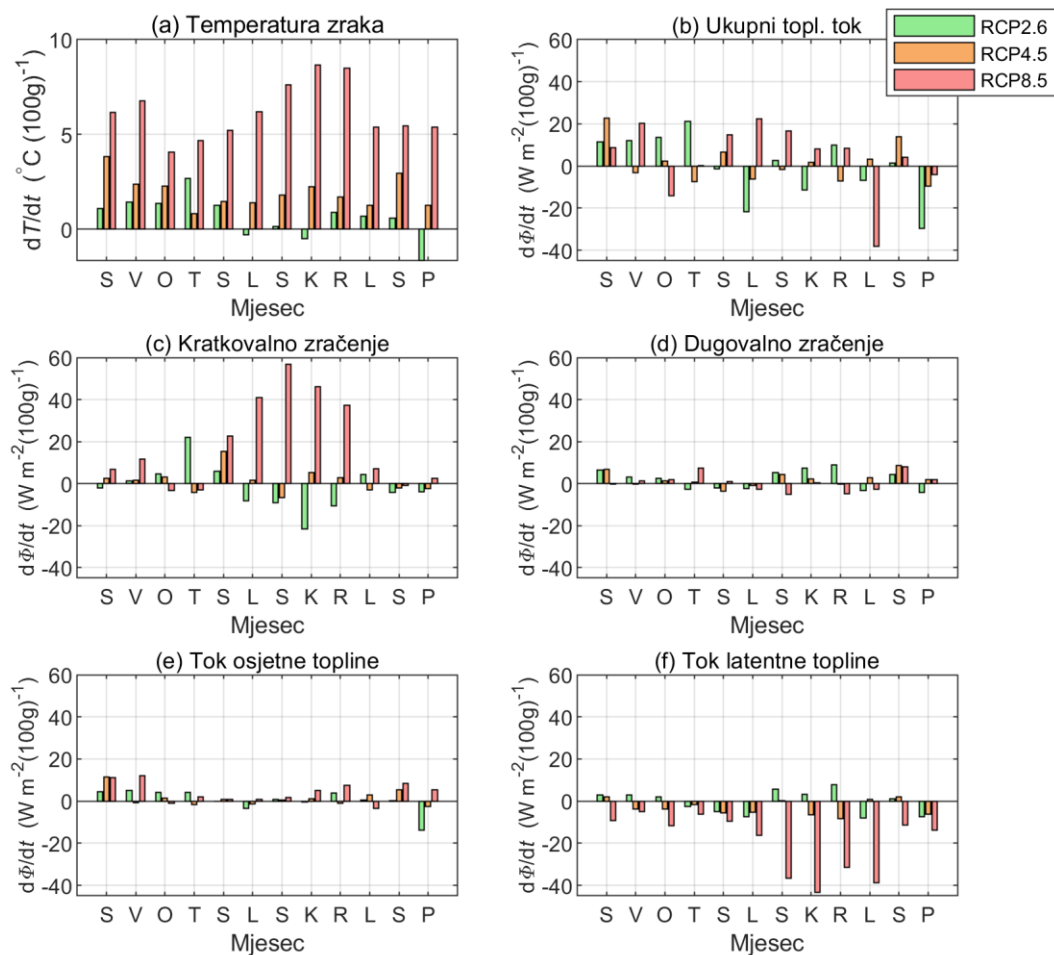


**Slika 32:** Godišnje vrijednosti prosječne temperature vode epilimnija (crveno), hipolimnija (plavo) i cijelog jezera (crno) izračunate za period od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) i RC8.5(c)



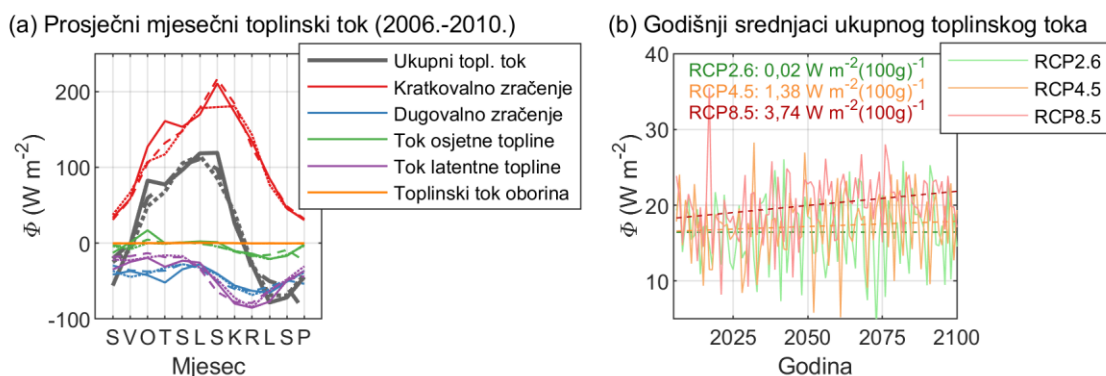
**Slika 33:** Stopa porasta mjesečnih vrijednosti temperature površinskog sloja od 0 do 0,35 m dubine (a), temperature pridnenog sloja od 42 do 46 m dubine (b) i razlike temperature između ta dva sloja (c) izračunate za razdoblje od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RC8.5

Općenito, temperatura vode pokazuje nižu godišnju varijabilnost na većim dubinama. Temperatura vode pridnenog sloja (od 42 do 46 m dubine) u jezeru Kozjak je gotovo konstantna tijekom cijele godine (standardna devijacija izračunata iz mjerenih podataka u 2019. iznosi  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Slično je i stopa porasta temperature pridnenog sloja izračunata za svaki mjesec bila približno konstantna (Slika 33b). S druge strane, temperatura vode u površinskom sloju (od 0 do 0,35 m dubine) pokazuje značajnu varijabilnost tijekom godine (standardna devijacija izračunata iz mjerenih podataka u 2019. iznosi  $6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), pa nije iznenađujuće da i mjesečne stope porasta temperature pokazuju signifikantnu godišnju varijaciju (Slika 33a). Najveće stope porasta temperature površinskog sloja pojavljuju se u scenariju RCP8.5 tijekom ljetne stratifikacije, dosežući maksimum od  $6,63\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (100 g)}^{-1}$  u kolovozu.



**Slika 34:** Stopa promjene mjesečnih vrijednosti temperature zraka (a), ukupnog toplinskog toka (b) i komponenta toplinskog toka (c – f) izračunata za razdoblje od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RC8.5. Pozitivni toplinski tok definiran je prema površini vode (prema dolje)





**Slika 35:** Prosječne mjesečne vrijednosti komponenta toplinskog toka za razdoblje od 2006. do 2010. godine za scenarije RCP2.6 (točkaste linije), RCP4.5 (crtkane linije) i RCP8.5 (pune linije) (a) i godišnji srednjaci ukupnog toplinskog toka u razdoblju od 2006. do 2100. godine (b)

Do najveće vrijednosti stope porasta temperature po mjesecima za scenarij RCP2.6 dolazi u travnju, a za scenarij RCP4.5 u veljači. Zanimljivo je za primijetiti da maksimumi stope porasta temperature površinskog sloja odgovaraju maksimumima stope promjene kratkovalnog zračenja (Slika 34c), koje je identificirano kao dominantna komponenta ukupnog toplinskog toka tijekom ljetne stratifikacije (Slika 35a). Značajan dio toka kratkovalne radijacije koji se ne reflektira nazad u atmosferu (40 %) apsorbira se u prvih 0,6 m ispod površine. Ispod ovog sloja započinje eksponencijalna atenuacija kratkovalnog zračenja. Rezultat toga je da tok kratkovalnog zračenja na dubini od 20 m iznosi  $\sim 3,5$  % toka nereflektiranog kratkovalnog zračenja na površini jezera. Iz toga se može zaključiti da je utjecaj Sunčevog zračenja na dubinama od oko 20 ili više metara zanemariv. S obzirom da se sve druge komponente ukupnog toplinskog toka osim kratkovalnog zračenja apsorbiraju u površinskom sloju, to znači da je glavni mehanizam prijenosa topline prema dubljim slojevima proces difuzije koji je relativno spor i ne pokazuje veliku varijaciju tijekom godine. Nešto veća stopa porasta temperature u pridnom sloju tijekom prosinca u usporedbi s ostatkom godine posljedica je zimskog konvektivnog miješanja.

Ukupni toplinski tok pokazuje pozitivni trend od  $0,02$ ,  $1,38$  i  $3,74 W m^{-2} (100 g)^{-1}$  redom za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 (Slika 35b), što i dovodi do očitog povećanja srednje temperature vode jezera. Međutim, stopa promjene ukupnog toplinskog toka izračunata na mjesečnoj bazi pokazuje zanimljivu varijabilnost te u nekim scenarijima za pojedine mjesece poprima negativnu vrijednost (Slika 34b).

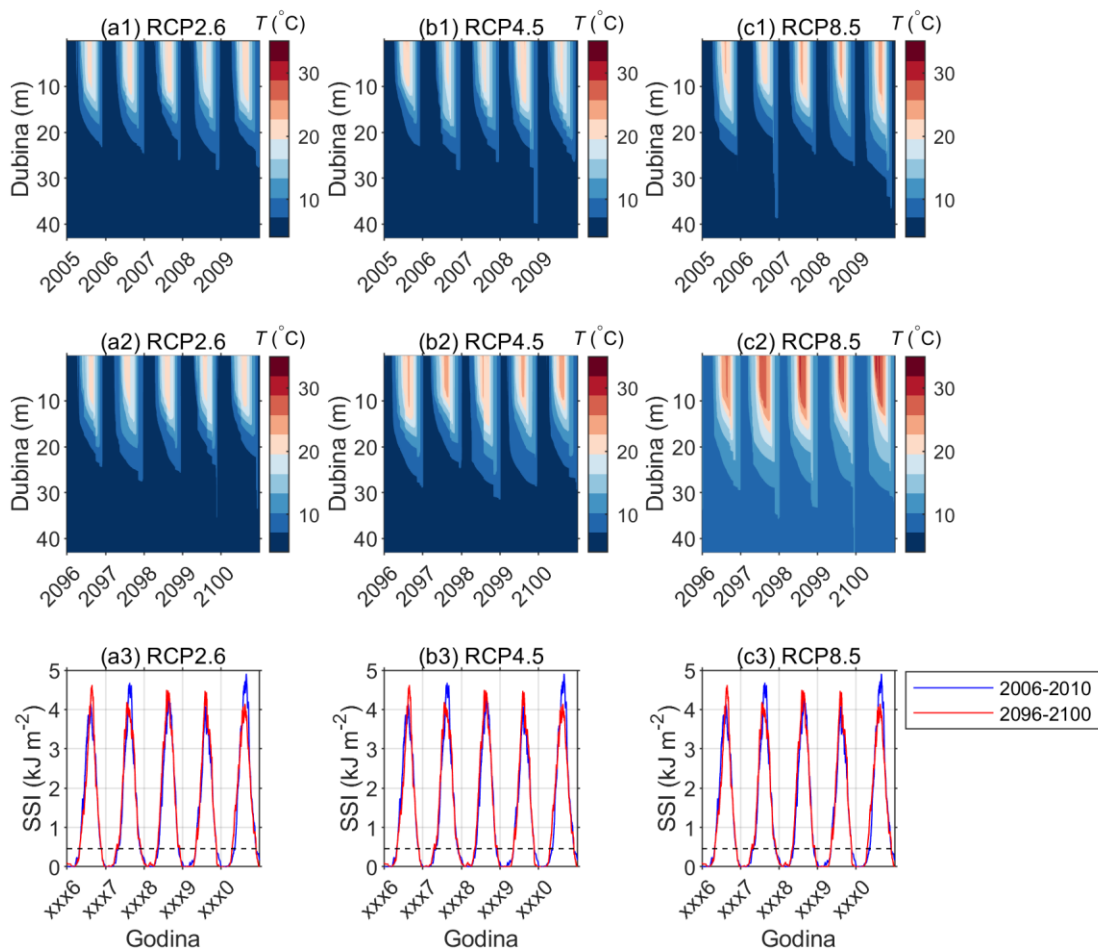
Slike 34b–f prikazuju stopu promjene mjesečnih vrijednosti toplinskog toka i njegovih komponentata, a Slika 34a stopu promjene mjesečnih vrijednosti temperature zraka, kao jednog od glavnih faktora koji utječe na toplinske tokove. Promjena kratkovalnog zračenja je uglavnom posljedica smanjenja naoblake i relativne vlage u budućoj klimi prema analiziranim scenarijima. Smanjenje relativne vlage, zajedno s povećanjem temperature zraka, što je posebno izraženo u scenariju RCP8.5, dovodi do povećanja gubitaka latentne topline s površine jezera (Slika 34f). Stope promjene neto dugovalnog zračenja i toka osjetne topline su znatno manje (Slike 34d i 34e).

#### **4.2.2 Analiza karakteristika stratifikacije**

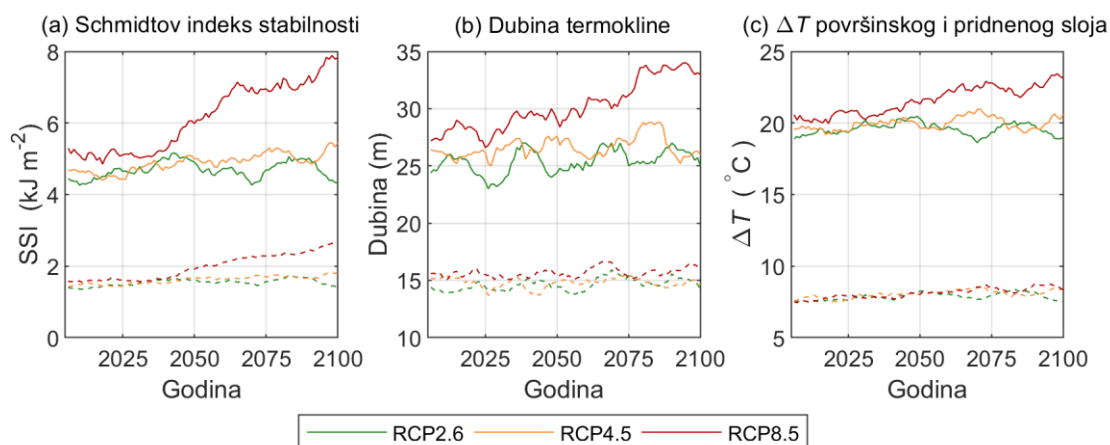
Ranije je napomenuto da podaci prikupljeni zadnjih nekoliko godina ukazuju na to da je jezero Kozjak doživjelo promjenu u režimu miješanja, prelazeći iz dimiktičnog u monomiktično. U sva tri simulirana scenarija ovog istraživanja, jezero Kozjak nastavilo se ponašati kao monomiktično jezero, odnosno, prolazilo je kroz period stratifikacije tijekom ljetnog razdoblja i period konvektivnog miješanja na jesen i zimu, a bez zimskog perioda stratifikacije i proljetnog konvektivnog miješanja. Kvalitativna usporedba konturnih dijagrama temperature vode pokazuje da je termodinamičko ponašanje jezera na kraju analiziranog razdoblja slično onom na početku (Slike 36a1–c2) te da nema naknadnih promjena u režimu miješanja.

Godišnja maksimalna vrijednost Schmidtovog indeksa stabilnosti ima signifikantni pozitivni trend u scenarijima RCP4.5 i RCP8.5 koji iznosi  $800$  odnosno  $3398 \text{ J m}^{-2} (100 \text{ g})^{-1}$ . Trend godišnje prosječne vrijednosti indeksa stabilnosti statistički je značajan u sva tri scenarija, ali je relativno niske vrijednosti u scenarijima RCP2.6 i RCP4.5, za koje iznosi  $176 \text{ J m}^{-2}(100 \text{ g})^{-1}$  odnosno  $377 \text{ J m}^{-2} (100 \text{ g})^{-1}$ . Očekivano, u scenariju RCP8.5 trend godišnje prosječne vrijednosti indeksa stabilnosti znatno je veći i iznosi  $1270 \text{ J m}^{-2} (100 \text{ g})^{-1}$  (Slika 37a).

S druge strane, godišnja prosječna dubina termokline ne pokazuje statistički značajan trend niti u jednom scenariju (Slika 37b). Međutim, maksimalna godišnja dubina termokline povećava se stopom porasta od  $7,3 \text{ m} (100 \text{ g})^{-1}$  u scenariju RCP8.5. U scenariju RCP4.5, statistički značajan trend od  $3 \text{ m} (100 \text{ g})^{-1}$  pronađen je samo za razdoblje do 2085. godine. U scenariju RCP2.6 maksimalna dubina termokline ne pokazuje statistički značajan trend.



**Slika 36:** Temperatura vode od 2006. do 2010. godine (a1 – c1) i od 2096. do 2100. godine (a2 – c2) i vrijednosti Schmidtovog indeksa stabilnosti za ta ista razdoblja (a3 – c3) za scenarije RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) i RCP8.5 (c). Crtkana linija označava vrijednost kriterija stabilnosti koji za jezero Kozjak iznosi  $\text{SSI}=460 \text{ J m}^{-2}$

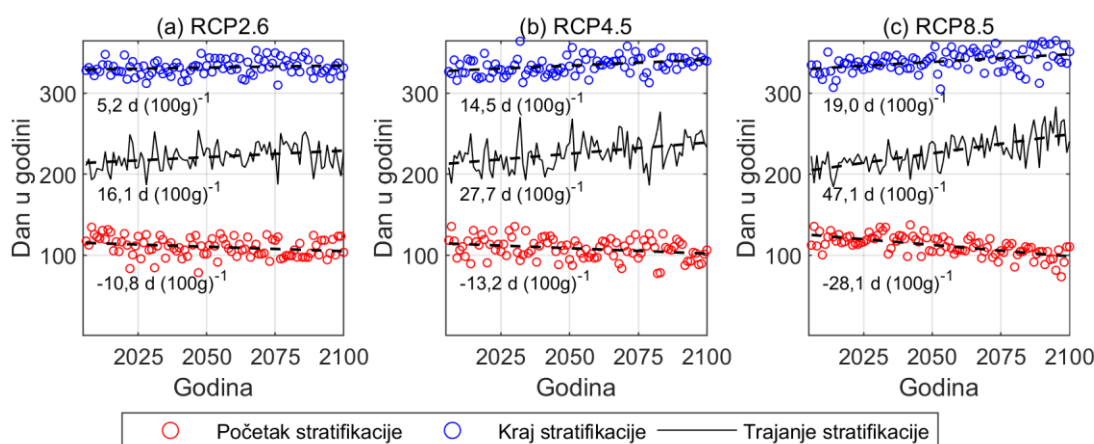


**Slika 37:** Desetogodišnji klizni srednjak godišnjih maksimuma (pune linije) i godišnjih srednjaka (crtkane linije) Schmidtovog indeksa stabilnosti (a), dubine termokline (b) i razlike temperatura površinskog i pridnenog sloja (c) od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5

Povećanje indeksa stabilnosti i maksimalne godišnje dubine termokline (Slika 37), kao i porast temperaturne razlike između površinskog i pridnenog sloja (Slika 33c, 37c), ukazuju na povećanje stabilnosti vodenog stupca. S druge strane, relativno niski porast prosječne godišnje vrijednosti indeksa stabilnosti dovodi do zaključka da je spomenuto povećanje stabilnosti značajno samo u scenariju RCP8.5. Razlog zašto ne dolazi do većeg jačanja stratifikacije leži u zagrijavanju čak i najdubljih slojeva jezera. To je djelomično posljedica njegove relativno male dubine koja omogućuje dovoljan prijenos topline prema dubljim slojevima putem difuzije, kao i konvektivnog miješanja čitavog vodenog stupca zimi. To nije slučaj u znatno dubljim jezerima gdje se konvektivno miješanje događa samo do određene dubine (Perroud i sur., 2009). Zagrijavanje jezera po cijeloj njegovoj dubini se jednostavno može uočiti, posebice za scenarij RCP8.5, usporedbom Slika 36c1 i c2, gdje je jasno prikazano povećanje temperature epilimnija, no isto tako i znatno zagrijavanje hipolimnija.

Kriterij  $SSI > 460 \text{ J m}^{-2}$  pomoću kojeg se objektivno određuje početak i kraj razdoblja stratifikacije, predložen u Poglavlju 3.3.2, testiran je i pokazao se prikladnim za jezero Kozjak, s obzirom da je zadovoljavajuće uhvatio početak stratifikacije u proljeće te konvektivno miješanje u jesen (Slika 36). Budući da SSI predstavlja količinu energije potrebnu za miješanje stupca vode, razlika u temperaturi između površinskog i pridnenog sloja koja odgovara vrijednosti SSI-a od  $460 \text{ J m}^{-2}$  ovisi o obliku vertikalnog profila temperature. U simulacijskim rezultatima, vrijednosti razlike temperature između površinskog i pridnenog sloja koje odgovaraju vrijednosti SSI-a od  $460 \text{ J m}^{-2}$  kreću se između  $3,3 \text{ (P}_5)$  i  $6,6 \text{ °C (P}_{95})$ , s prosječnom vrijednošću od  $4,7 \text{ °C}$ . Zbog strmog nagiba krivulje SSI (Slika 36a3–c3), izračunate vrijednosti početka, kraja i trajanja razdoblja stratifikacije relativno su neosjetljive na odabir vrijednosti kriterija indeksa stabilnosti.

Iznenadujuće, znatan porast trajanja stratifikacijskog razdoblja od  $16,1 \text{ d (100 g)}^{-1}$  predviđen je čak i za scenarij RCP2.6. U ovom scenariju očekuje se da će stratifikacijski period počinjati oko 11 dana ranije i završavati oko 5 dana kasnije po stoljeću (Slika 38a). U scenariju RCP4.5 očekuje se da će period stratifikacije počinjati približno 13 dana ranije i završiti približno 14,5 dana kasnije po stoljeću, što rezultira povećanjem trajanja stratifikacijskog razdoblja od oko  $28 \text{ d (100 g)}^{-1}$  (Slika 38b). Do najvećeg produljenja stratifikacijskog razdoblja od  $47 \text{ d (100 g)}^{-1}$  dolazi u scenariju RCP8.5, i to zbog 28 dana ranijeg početka i 19 dana kasnijeg završetka stratifikacije po stoljeću (Slika 38c).



**Slika 38:** Početak (crveni kružići), kraj (plavi kružići) i trajanje (crne linije) stratifikacije u razdoblju od 2006. do 2100. godine za scenarije RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) i RCP8.5 (c)

Rezultati dobiveni za scenarij RCP2.6 slažu se s rezultatima što su ih objavili Woolway i sur. (2021), pri čemu autori predviđaju da će se prosječno trajanje stratifikacijskog razdoblja jezera sjeverne hemisfere u ovom scenariju produljiti za  $13 \pm 6$  dana do kraja stoljeća. S druge strane, rezultati za scenarij RCP8.5 premašuju rezultate spomenutog istraživanja koje u tom scenariju predviđa produljenje stratifikacijskog razdoblja od  $33,2 \pm 11,6$  dana do kraja stoljeća. Dok je raniji početak stratifikacije u scenariju RCP8.5 u skladu s Woolway i sur. (2021), gdje se predviđa da će stratifikacija započinjati  $22,0 \pm 7,0$  dana ranije, neslaganje se pojavljuje u procijenjenom završetku stratifikacije, za kojeg spomenuto istraživanje predviđa da će se događati  $11,3 \pm 4,7$  dana kasnije za razliku od promjene od  $19 \text{ d } (100 \text{ g})^{-1}$  predviđene za jezero Kozjak. Autori su brzinu vjetra identificirali kao jedan od glavnih faktora koji utječu na prekid stratifikacije, pojačavajući turbulentni toplinski tok prema atmosferi i miješajući slojeve blizu površine. U slučaju jezera Kozjak može se pretpostaviti da je razlog kasnijeg završetka stratifikacije relativno niska brzina vjetra u području kao i činjenica da model ne uključuje mehanizam mehaničkog miješanja vjetrom.

### 4.2.3 Posljedice predviđenih promjena

Posljedice projiciranog porasta temperature vode jezera, praćene i promjenom u dinamici stratifikacije, su brojne i dalekosežne. Radi se o iznimno složenom dinamičkom sustavu u kojem se odvijaju spregnuti procesi povezani kompleksnim povratnim vezama. Bilo kakva promjena može izazvati kaskadne učinke na druge dijelove ekosustava ili potaknuti uzajamno pojačavajuće procese s pozitivnom povratnom vezom. Razumijevanje tih

povratnih veza ključno je za predviđanje dugoročnih ekoloških i hidroloških promjena u Plitvičkim jezerima. Opsežna analiza posljedica prognoziranih promjena zahtijeva multidisciplinarni pristup odnosno uključivanje i suradnju stručnjaka iz različitih područja (limnologija, biologija, sedimentologija, ekologija itd.). Takva sveobuhvatna analiza je izvan opsega ovog istraživanja. Međutim, važno je spomenuti neke od važnijih problema koji se mogu očekivati. Spomenuti rast temperature vode od oko 4 °C predviđen u scenariju RCP8.5 mogao bi imati dramatičan utjecaj na zajednicu fitoplanktona poput smanjenja njihove raznolikosti te bi pogodovao razvoju cijanobakterija, a u kombinaciji s povećanim dovodom nutrijenata uslijed antropogenog djelovanja lako može dovesti do poticanja procesa eutrofikacije jezera (Rasconi i sur., 2017).

Budući da su starija istraživanja pokazala da je proces osedavanja brži pri višim temperaturama vode (Srdoč i sur., 1985), rezultati ovog rada koji prognoziraju značajan porast temperature vode, impliciraju da se u budućem, toplijem klimatskom razdoblju mogu očekivati promjene u dinamici stvaranja sedre i rasta barijera. To bi potencijalno dovelo do brže evolucije i promjena u morfologiji jezerskog sustava.



## 5 ZAKLJUČAK

Cilj ove doktorske disertacije bio je razviti i evaluirati pojednostavljeni 1-D model za prognozu vertikalnog temperaturnog profila u malim toplim monomiktičnim jezerima forsiran minimalnim brojem ulaznih varijabli, te primijeniti ga na jezero Kozjak kako bi se po prvi put analizirao utjecaj klimatskih promjena na temperaturu i stratifikaciju jednog od Plitvičkih jezera. Općenito, ovo je prvi put da se modeliraju i prognoziraju temperatura vode i stratifikacija nekih od Plitvičkih jezera, a i jezera u Hrvatskoj općenito, bilo kratkotrajnim bilo dugoročnim simulacijama.

Razvijeni model, SIMO, koristi isključivo meteorološke varijable koje se rutinski mjere na meteorološkim postajama (npr. temperatura zraka, relativna vlažnost, atmosferski tlak, brzina vjeta i oborine) i klimatološke podatke o temperaturi zraka. Potrebno je poznavati još određene karakteristike jezera kao što su njegove zemljopisne koordinate, nadmorska visina, dubina i generalni trofički status. Za inicijalizaciju kratkoročnih simulacija potrebne su još i izmjerene vrijednosti početnog vertikalnog temperaturnog profila jezera. U ovom radu analizirana je uspješnost modela bez posebne prethodne kalibracije ulaznih parametara, no u slučaju dostupnosti detaljnijih informacija o batimetriji jezera, zamućenosti (Secchi dubina), zračenju i sl., njih je moguće upotrijebiti za kalibraciju parametara što može rezultirati znatno većom uspješnošću modela.

Glavni je izazov bio iz dostupnih podataka izračunati neto toplinski tok na površini jezera i odrediti njegove komponente (toplinski tok kratkovalnog i dugovalnog zračenja, tok osjetne i latentne topline te toplinski tok oborina).

Uspješnost modela ocijenjena je pomoću podataka iz kampanje kontinuiranog mjerenja temperaturnog profila vode dva Plitvička jezera, Prošće i Kozjak. Rezultati su pokazali da su performanse modela nešto lošije za jezero Prošće. Kao glavni razlog identificiran je utjecaj pritoka, koji nije uzet u obzir u modelu, a koji kod jezera Prošće, kao prvog u nizu lanca Plitvičkih jezera, nije zanemariv kao u slučaju jezera Kozjak. Dodatni razlog je činjenica da je jezero Prošće udaljenije od meteorološke postaje s koje su dobiveni meteorološki podaci korišteni za forsiranje simulacija oba jezera. Nadalje, Prošće ima



približno 100 m veću nadmorsku visinu od jezera Kozjak, te je okruženo kompleksnom orografijom i vrlo vjerojatno izloženo jačim vjetrovima i nižim temperaturama zraka od onih koji su korišteni kao ulazni meteorološki podaci. To ukazuje na važnost preciznih ulaznih meteoroloških podataka za konkretnu mikrolokaciju, što je i očekivano budući da je meteorološko forsiranje ključni pokretač termodinamike jezera.

Općenito, model ima tendenciju precjenjivanja temperatura u epilimniju, posebice kod jezera Prošće za vrijeme ljetnog jačanja stratifikacije. Gornja granica metalimnija je dobro reproducirana dok je njegova debljina bila precijenjena, dovodeći do podcjenjivanja maksimalnog gradijenta temperature. Međutim, model zadovoljava prognozira dinamiku stratifikacije i konvektivnog miješanja. Postoji nekoliko mogućih uzroka odstupanja modeliranih od izmjerenih temperatura. Jedan od njih je podcjenjivanje turbulentnog prijenosa topline u epilimniju, posebno u razdobljima jakih vjetrova. Osim toga, model ne može simulirati unutarnje seše i njima uzrokovanu izmjenu vode i topline između toplijeg epilimnija i hladnijeg hipolimnija. Drugi mogući uzroci su korištenje neprikladne vrijednosti koeficijenta atenuacije kratkovalnog zračenja i ograničena pouzdanost površinskog toplinskog toka (s obzirom da se radi o parametrizaciji). Međutim, uzimajući u obzir sva pojednostavljena korištena u modelu, može se zaključiti da se model relativno dobro ponaša i ima zadovoljavajuće performanse.

Analiza osjetljivosti performansi modela na duljinu simulacije pokazala je da se u slučaju korištenja odgovarajućih meteoroloških podataka (kao u slučaju jezera Kozjak), performanse modela, posebno u epilimniju, postupno pogoršavaju do duljine simulacije od otprilike 15-20 dana. Daljnje povećanje duljine simulacije do 30 dana imalo je mali utjecaj na analizirane mjere uspješnosti modela. Time je dokazano da se model može koristiti za dobivanje razumne prognoze temperature vode za razdoblja od najmanje 30 dana.

Dugoročna simulacija u trajanju od godinu dana pokazala je da model može relativno precizno predvidjeti početak i jačanje stratifikacije te nastupanje konvektivnog miješanja. Vrijednosti mjera uspješnosti modela SIMO 1.1 usporedive su s vrijednostima drugih modela pronađenih u literaturi. Stoga se model SIMO 1.1 može primjenjivati na jezera za koja nisu dostupni podaci o temperaturi vode. Simulacija perioda trajanja godinu dana, pokrenuta u trenutku kad je jezero izmiješano te približno uniformnog temperaturnog profila, korisna je za procjenu uspostave stratifikacije jezera, što može biti od velike

važnosti za niz različitih područja istraživanja kao što su biologija jezera, geokemija, sedimentologija itd.

Međutim, predstavljena evaluacija modela SIMO 1.1 ograničena je na jedno geografsko područje. Kako bi se pouzdanije potvrdila opća primjenjivost modela SIMO, potrebno je primijeniti ga na veći broj različitih monomiktičnih jezera. No s obzirom da su prikazane performanse izračunate bez prethodne kalibracije parametara, slične vrijednosti mjera uspješnosti se mogu očekivati i za druga jezera. Ubuduće, model je moguće proširiti modulom za formaciju leda te ga primijeniti i na jezera čija je površina tijekom zime pokrivena ledom.

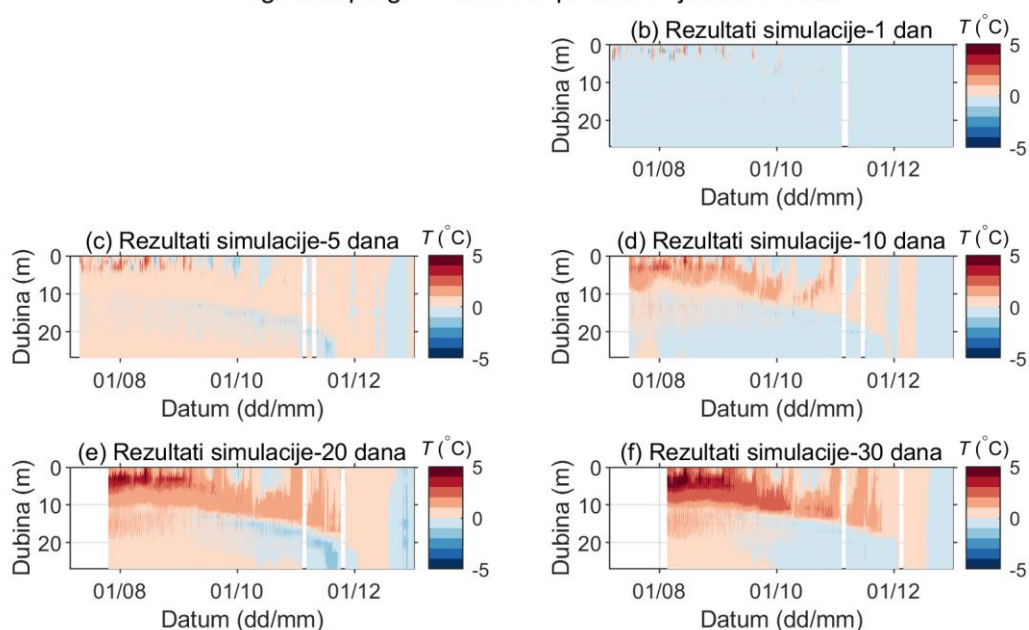
S obzirom da Plitvička jezera predstavljaju poseban hidrogeološki krški sustav, brojna istraživanja bave se njihovim fizičkim, kemijskim, hidrološkim, geološkim, klimatološkim i drugim svojstvima. Međutim, u ovom radu se po prvi puta simulirao odziv jednog od Plitvičkih jezera na buduće scenarije klime. Temperatura vode u jezeru Kozjak simulirana je i analizirana za tri različita scenarija RCP-a u razdoblju od 2006. do 2100. godine. Za scenarije RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5 izračunate su stope povećanja srednje temperature jezera od 0,51, 1,41 i 4,51 °C (100 g)<sup>-1</sup>. Povećanje temperature malo je izraženije u epilimniju nego u hipolimniju. Analiza brzine promjene temperature vode po mjesecima pokazala je da se najznačajnije povećanje temperature za scenarij RCP8.5 očekuje tijekom ljeta (s maksimumom od 6,63 °C (100 g)<sup>-1</sup> kod površinskog sloja u kolovozu), što nije bio slučaj za scenarije RCP2.6 i RCP4.5. Razlog ovako izražene stope porasta ljeti za scenarij RCP8.5 je značajna stopa porasta toplinskog toka kratkovalnog zračenja tijekom ljetnih mjeseci u scenariju RCP8.5.

Očekivani trend produljenja razdoblja stratifikacije u baznom scenariju RCP8.5 iznosi 47 dan (100 g)<sup>-1</sup> te 27,7 dan (100 g)<sup>-1</sup> u scenariju RCP4.5, a čak i u scenariju RCP2.6 postoji značajan trend od 16,1 dan (100 g)<sup>-1</sup>. Signifikantni trend godišnje prosječne dubine termokline nije uočen, no maksimalna godišnja vrijednost dubine termokline povećava se brzinom od 7,3 m (100 g)<sup>-1</sup> u scenariju RCP8.5 i 3 m (100 g)<sup>-1</sup> u scenariju RCP4.5. Značajan porast prosječne jačine stratifikacije, procijenjene pomoću Schmidtovo­g indeksa stabilnosti, uočen je samo u slučaju baznog scenarija RCP8.5. Naime, zbog relativno male dubine jezera Kozjak, dolazi do značajnog zagrijavanja dubokih slojeva putem toplinske difuzije i konvektivnog miješanja, što ne dopušta značajnije jačanje stratifikacije.

Posljedice porasta temperature i značajno duljeg perioda stratifikacije su brojne te impliciraju složene povratne mehanizme. U kombinaciji s dodatnim antropogenim stresorima mogu rezultirati smanjenjem raznolikosti fitoplanktona i dominacijom određenih vrsta prilagođenijih toplijim uvjetima, poput cijanobakterija i klorofita, s kaskadnim učincima na zooplankton i riblji fond. Dinamika formiranja sedre, ključnog procesa u sustavu Plitvičkih jezera, također je osjetljiva na porast temperature vode u jezeru, pa bi povećanje temperature vode moglo ubrzati evoluciju morfologije jezerskog sustava i prouzročiti promjene u njegovoj makro-strukturi.

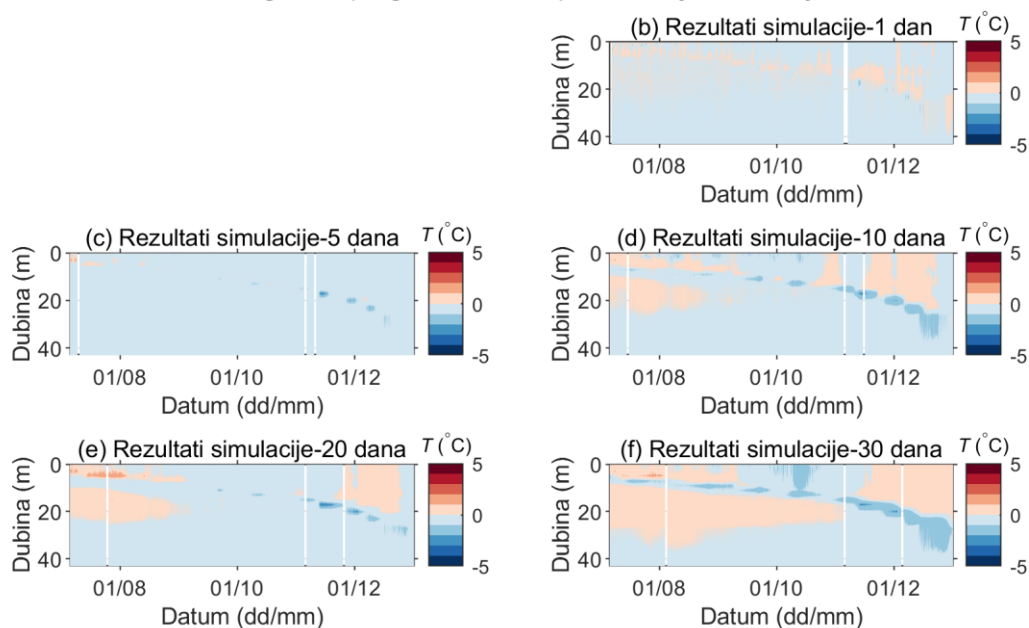
S obzirom na geografski položaj i klimu jezera Kozjak, zajedno s njegovom specifičnom morfologijom, rezultati i zaključci ovog istraživanja pružaju vrijedan uvid u mogući odgovor na klimatske promjene sličnih jezera u planinskim područjima umjerenih širina. Osim toga, rezultati ove analize utjecaja klimatskih promjena na temperaturu vode se mogu koristiti kao ulazni podaci u daljnjim istraživanjima u različitim područjima, poput biologije jezera, ekologije, geokemije, sedimentologije i drugih.

## Pogreška prognozirane temperature - jezero Prošće



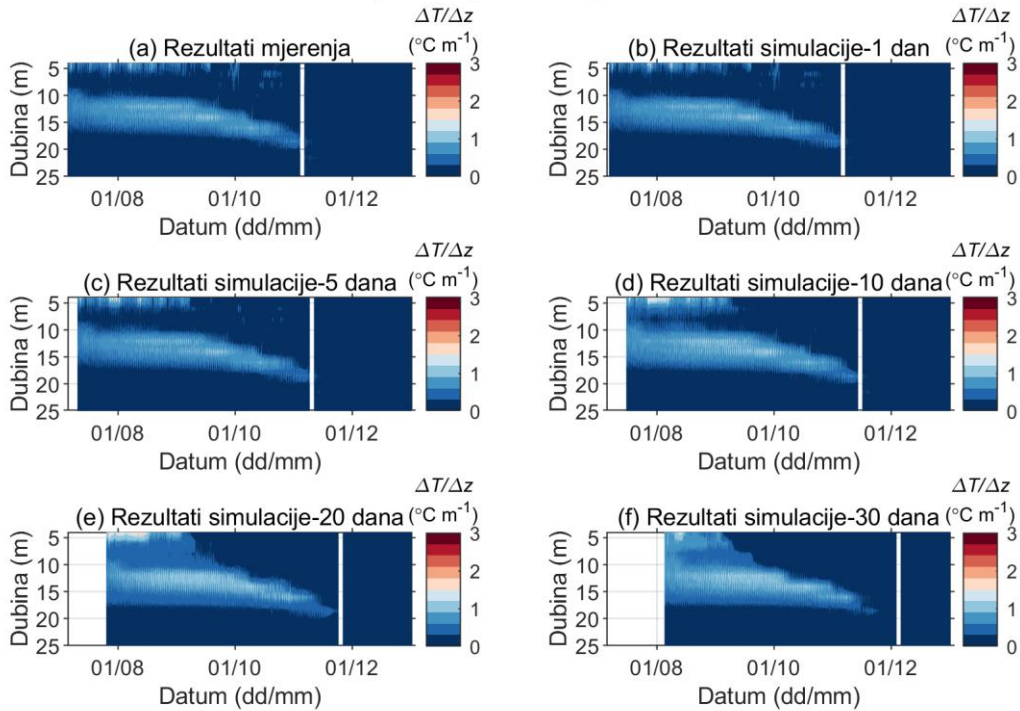
**Slika A1:** Pogreška prognozirane temperature vode u jezeru Prošće ( $P_i - O_i$ ), za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019. Panel (a) je izostavljen tako da pozicije panela za različite duljine trajanja simulacije odgovaraju onima na Slici 16

## Pogreška prognozirane temperature - jezero Kozjak



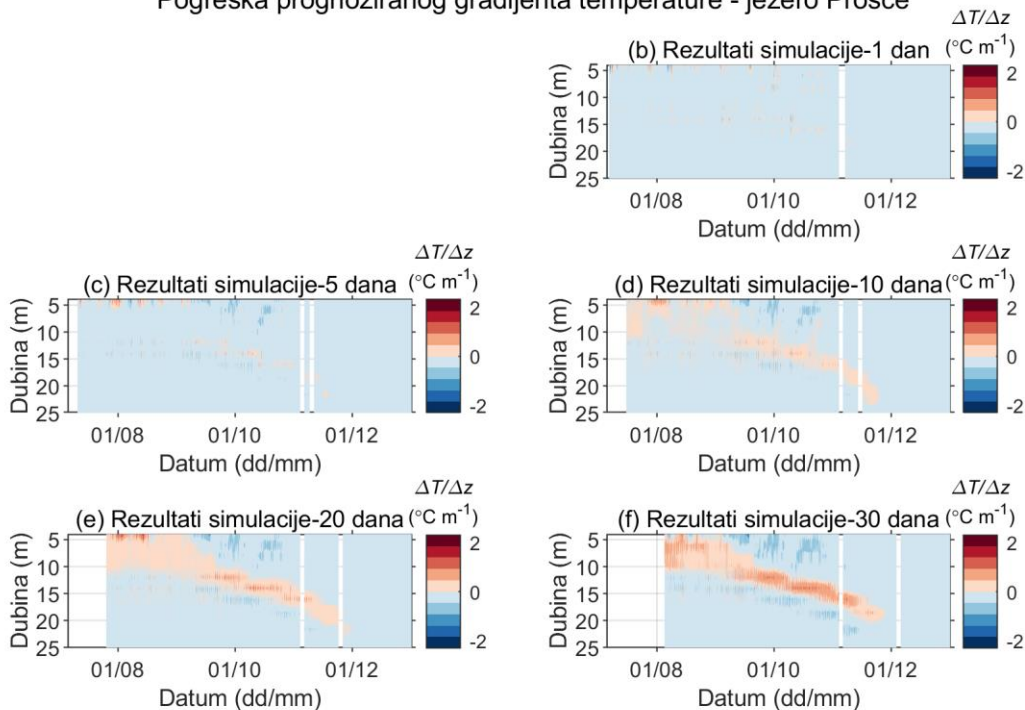
**Slika A2:** Pogreška prognozirane temperature vode u jezeru Kozjak ( $P_i - O_i$ ), za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019. Panel (a) je izostavljen tako da pozicije panela za različite duljine trajanja simulacije odgovaraju onima na Slici 17

### Gradijent temperature - jezero Prošće



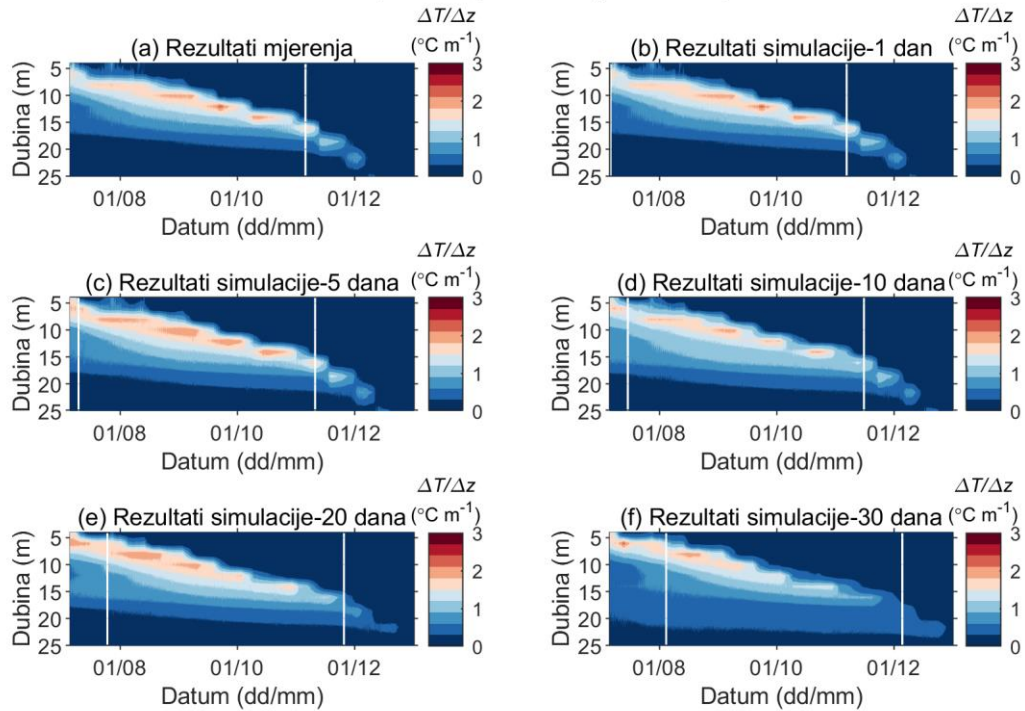
**Slika A3:** Izmjereni (a) i prognozirani (b – f) vertikalni gradijent temperature vode u jezeru Prošće za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019.

### Pogreška prognozirano gradijenta temperature - jezero Prošće



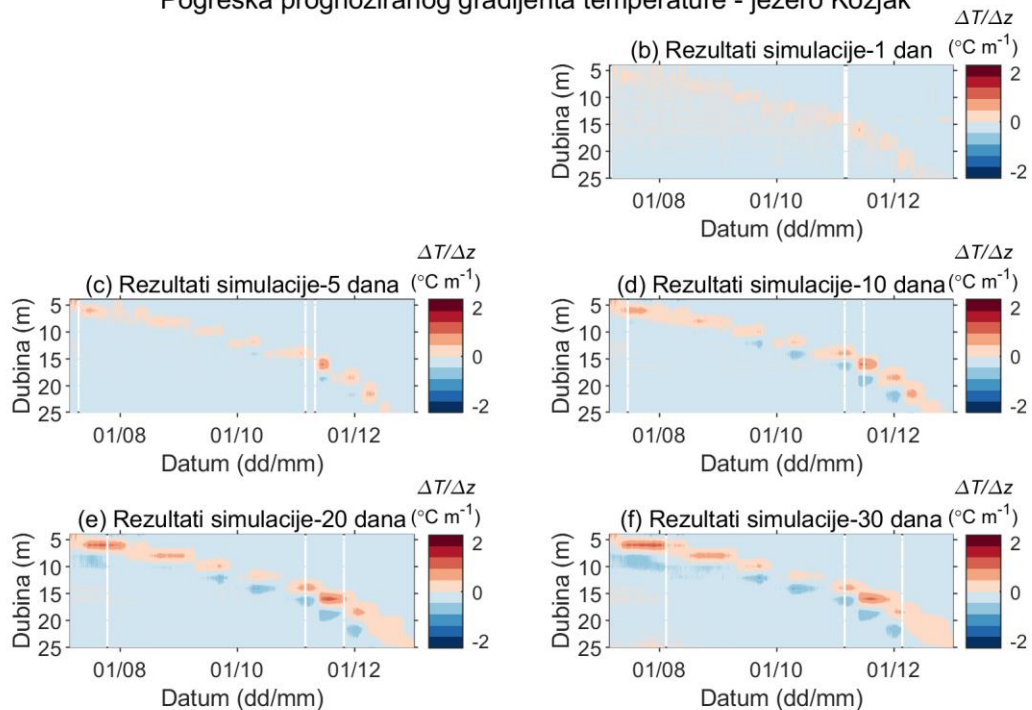
**Slika A4:** Pogreška prognozirano gradijenta temperature vode u jezeru Prošće ( $P_i - O_i$ ), za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019. Panel (a) je izostavljen tako da pozicije panela za različite duljine trajanja simulacije odgovaraju onima na Slici A3

### Gradijent temperature - jezero Kozjak



**Slika A5:** Izmjereni (a) i prognozirani (b – f) vertikalni gradijent temperature vode u jezeru Kozjak za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019.

### Pogreška prognozirano gradijenta temperature - jezero Kozjak



**Slika A6:** Pogreška prognozirano gradijenta temperature vode u jezeru Kozjak ( $P_i - O_i$ ), za različite duljine trajanja simulacije u razdoblju od 06.07. do 31.12.2019. Panel (a) je izostavljen tako da pozicije panela za različite duljine trajanja simulacije odgovaraju onima na Slici A5



## LITERATURA

- Adrian R, Zagarese H, Baines SB, Hessen DO, Keller W, Livingstone DM, Sommaruga R, Straile D, Van Donk E, Weyhenmeyer GA, Winder M (2009) Lakes as sentinels of climate change. *Limnol Oceanogr* 54:2283–2297
- Alegro A, Rimac A, Šegota V, Koletić N (2023) The Plitvice Lakes – An interplay of moss, stonewort and marshland vegetation. U: Miliša M, Ivković M (ur) *Plitvice Lakes*. Springer Cham, str 215–242
- Amiri MJ, Fadaei E, Baghvand A, Ezadkhasty Z (2014) Removal of heavy metals Cr (VI), Cd (II) and Ni (II) from aqueous solution by bioabsorbtion of *elaegnus angustifolia*. *Int J Environ Res* 8:411–420. <https://doi.org/10.22059/IJER.2014.732>
- Andersen TK, Bolding K, Nielsen A, Bruggeman J, Jeppesen E, Trolle D (2021) How morphology shapes the parameter sensitivity of lake ecosystem models. *Environ Model Softw* 136:104945. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104945>
- Ayala AI, Moras S, Pierson DC (2020) Simulations of future changes in thermal structure of Lake Erken: Proof of concept for ISIMIP2b lake sector local simulation strategy. *Hydrol Earth Syst Sci* 24:3311–3330. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3311-2020>
- Babinka S (2007) Multi-tracer study of karst waters and lake sediments in Croatia and Bosnia-Herzegovina: Plitvice Lakes National Park and Bihać Area. Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Bahr A, Evans C, Martinoli A, Huwald H, Higgins C, Parlange M (2012) Measuring sensible heat flux with high spatial density. U: 2012 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings, SAS 2012. Brescia, Italy, 7-9 February 2012, str 255–260
- Baier K, Schmitz KS, Azzam R, Strohschön R (2014) Management tools for sustainable ground water protection in mega urban areas - Small scale land use and ground water vulnerability analyses in Guangzhou, China. *Int J Environ Res* 8:249–262. <https://doi.org/10.22059/IJER.2014.714>
- Bell VA, George DG, Moore RJ, Parker J (2006) Using a 1-D mixing model to simulate the vertical flux of heat and oxygen in a lake subject to episodic mixing. *Ecol Modell* 190:41–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.02.025>
- Benson BB, Krause DJ (1980) The concentration and isotopic fractionation of gases dissolved in freshwater equilibrium with the atmosphere. 1. Oxygen. *Limnol Oceanogr* 25:662–671. <https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.4.0662>
- Biondić B, Biondić R, Meaški H (2010) The conceptual hydrogeological model of the Plitvice Lakes. *Geol Croat* 63:195–206. <https://doi.org/10.4154/gc.2010.17>
- Böhm D (1997) Aktualni problem zaštite i očuvanja Nacionalnog parka Plitvička jezera. *Šumarski List* 121:161–170
- Bolton D (1980) The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Weather Rev.* 108:1046–1053



- Bristow KL., Campbell GS (1984) On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric For Meteorol* 31:159–166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
- Brozinčević A, Vurnek M, Frketic T (2023) Water chemistry. U: Miliša M, Ivković M (ur) *Plitvice Lakes*. Springer Cham, str 65–94
- Bruce LC, Frassl MA, Arhonditsis GB, Gal G, Hamilton DP, Hanson PC, Hetherington AL, Melack JM, Read JS, Rinke K, Rigosi A, Trolle D, Winslow L, Adrian R, Ayala AI, Bocaniov SA, Boehrer B, Boon C, Brookes JD, Bueche T, Busch BD, Copetti D, Cortés A, de Eyto E, Elliott JA, Gallina N, Gilboa Y, Guyennon N, Huang L, Kerimoglu O, Lenters JD, MacIntyre S, Makler-Pick V, McBride CG, Moreira S, Özkundakci D, Pilotti M, Rueda FJ, Rusak JA, Samal NR, Schmid M, Shatwell T, Snorthheim C, Soullignac F, Valerio G, van der Linden L, Vetter M, Vinçon-Leite B, Wang J, Weber M, Wickramaratne C, Woolway RI, Yao H, Hipsey MR (2018) A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-testing across a global observatory network. *Environ Model Softw* 102:274–291. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.016>
- Bruggeman J, Bolding K (2014) A general framework for aquatic biogeochemical models. *Environ Model Softw* 61:249–265. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.002>
- Brunel JP (1989) Estimation of sensible heat flux from measurements of surface radiative temperature and air temperature at two meters: Application to determine actual evaporation rate. *Agric For Meteorol* 46:179–191. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90063-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90063-4)
- Bryan AM, Steiner AL, Posselt DJ (2015) Regional modeling of surface-atmosphere interactions and their impact on Great Lakes hydroclimate. *J Geophys Res Atmos* 120:1044–1064. <https://doi.org/10.1002/2014JD022316>
- Bubalo M, Janeković I, Orlić M (2018) Chrystal and Proudman resonances simulated with three numerical models. *Ocean Dyn* 68:497–507. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1146-8>
- Buj I, Čaleta M, Marčić Z, Zanella D, Mustafić P (2023) The fish of the Plitvice Lakes — A wealth of simplicity. U: Miliša M, Ivković M (ur) *Plitvice Lakes*. Springer Cham, str 317–343
- Burchard H, Bolding K, Villarreal, Manuel R (1999) GOTM, a General Ocean Turbulence Model. Theory, implementation and test cases. European Commission, Space Applications Institute
- Burchard H, Schulz E, Schuttelaars HM (2014) Impact of estuarine convergence on residual circulation in tidally energetic estuaries and inlets. *Geophys Res Lett* 41:913–919. <https://doi.org/10.1002/2013GL058494>
- Burić M, Grgurić S, Mikulčić H, Wang X (2021) A numerical investigation of tidal current energy resource potential in a sea strait. *Energy* 234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121241>
- Chen CA, Millero FJ (1986) Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range. *Limnol Oceanogr* 31:657–662. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.3.0657>
- Christensen OB, Kjellström E (2020) Partitioning uncertainty components of mean

- climate and climate change in a large ensemble of European regional climate model projections. *Clim Dyn* 54:4293–4308. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05229-y>
- Ciglenc̆ki I, Janeković I, Marguš M, Bura-Nakić E, Carić M, Ljubešić Z, Batistić M, Hrustić E, Dupčić I, Garić R (2014) Impacts of extreme weather events on highly eutrophic marine ecosystem (Rogoznica Lake, Adriatic coast). *Cont Shelf Res* 108:144–155. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.05.007>
- Čmrlec K, Ivković M, Šemnički P, Mihaljević Z (2013) Emergence phenology and microhabitat distribution of aquatic diptera community at the outlets of barrage lakes: Effect of temperature, substrate and current velocity. *Pol J Ecol* 61:135–144
- CORDEX (2022) Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. <https://cordex.org/>. pristupljeno: 21.05.2022
- Crawford TM, Duchon CE (1999) An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. *J Appl Meteorol* 38:474–480. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<0474:AIPFEE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0474:AIPFEE>2.0.CO;2)
- ESFG (2022) Earth System Grid Federation WCRP CORDEX. <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>. pristupljeno: 21.05.2022
- Estrela-Segrelles C, Gómez-Martínez G, Pérez-Martín MÁ (2023) Climate change risks on Mediterranean river ecosystems and adaptation measures (Spain). *Water Resour Manag* 37:2757–2770. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03469-1>
- Forcat F, Roget E, Figueroa M, Sánchez X (2011) Earth rotation effects on the internal wave field in a stratified small lake: Numerical simulations. *Limnetica* 30:27–42
- Frishfelds V, Sennikovs J, Bethers U, Murawski J, Timuhins A (2021) Modeling transit flow through port gates and connecting channel in Baltic Sea—Liepaja port—Liepaja lake system. *Front Mar Sci* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.657721>
- Gaudard A, Răman Vinnä L, Bärenbold F, Schmid M, Bouffard D (2019) Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners-The case of Swiss lakes using Simstrat v2.1. *Geosci Model Dev* 12:3955–3974. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3955-2019>
- Golub M, Thiery W, Marcé R, Pierson D, Vanderkelen I, Mercado-Bettin D, Woolway RI, Grant L, Jennings E, Kraemer BM, Schewe J, Zhao F, Frieler K, Mengel M, Bogomolov VY, Bouffard D, Côté M, Couture RM, Debolskiy A V., Droppers B, Gal G, Guo M, Janssen ABG, Kirillin G, Ladwig R, Magee M, Moore T, Perroud M, Piccolroaz S, Raaman Vinnä L, Schmid M, Shatwell T, Stepanenko VM, Tan Z, Woodward B, Yao H, Adrian R, Allan M, Anneville O, Arvola L, Atkins K, Boegman L, Carey C, Christianson K, De Eyto E, Degasperi C, Grechushnikova M, Hejzlar J, Joehnk K, Jones ID, Laas A, MacKay EB, Mammarella I, Markensten H, McBride C, Özkundakci D, Potes M, Rinke K, Robertson D, Rusak JA, Salgado R, Van Der Linden L, Verburg P, Wain D, Ward NK, Wollrab S, Zdorovenova G (2022) A framework for ensemble modelling of climate change impacts on lakes worldwide: The ISIMIP Lake Sector. *Geosci Model Dev* 15:4597–4623. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-4597-2022>
- Goudsmit GH, Burchard H, Peeters F, Wüest A (2002) Application of k-ε turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches. *J Geophys Res* 107:(23-1)-(23-13). <https://doi.org/10.1029/2001jc000954>

- Gude VG (2017) Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Rev Environ Sci Biotechnol* 16:591–609. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9449-7>
- Hebert M-P, Beisner BE, Rautio M, Fussmann GF (2021) Warming winters in lakes: Later ice onset promotes consumer overwintering and shapes springtime planktonic food webs. *Proc Natl Acad Sci U S A* 118:1–9. <https://doi.org/10.1073/pnas.2114840118>
- Henderson-Sellers B (1985) New formulation of eddy diffusion thermocline models. *Appl Math Model* 9:441–446. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(85\)90110-6](https://doi.org/10.1016/0307-904X(85)90110-6)
- Henderson-Sellers B (1986) Calculating the surface energy balance for lake and reservoir modeling: A review. *Rev Geophys* 24:625–649. <https://doi.org/10.1029/RG024i003p00625>
- Hipsey MR, Bruce LC, Boon C, Busch B, Carey CC, Hamilton DP, Hanson PC, Read JS, De Sousa E, Weber M, Winslow LA (2019) A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geosci Model Dev* 12:473–523. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-473-2019>
- Hostetler SW, Bartlein PJ (1990) Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resour Res* 26:2603–2612. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02603>
- Imrit MA, Sharma S (2021) Climate change is contributing to faster rates of lake ice loss in lakes around the northern hemisphere. *J Geophys Res Biogeosciences* 126:1–13. <https://doi.org/10.1029/2020JG006134>
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland
- Ivković M, Baranov V, Dorić V, Mičetić Stanković V, Previšić A, Vilenica M (2023) Aquatic insects of Plitvice Lakes. U: Miliša M, Ivković M (ur) Plitvice Lakes. Springer Cham, str 275–316
- Ivković M, Pont AC (2016) Long-time emergence patterns of Limnophora species (Diptera, Muscidae) in specific karst habitats: tufa barriers. *Limnologica* 61:29–35. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.09.003>
- Jacob B, Stanev EV, Zhang YJ (2016) Local and remote response of the North Sea dynamics to morphodynamic changes in the Wadden Sea. *Ocean Dyn* 66:671–690. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0949-8>
- Jane SF, Hansen GJA, Kraemer BM, Leavitt PR, Mincer JL, North RL, Pilla RM, Stetler JT, Williamson CE, Woolway RI, Arvola L, Chandra S, DeGasperi CL, Diemer L, Dunalska J, Erina O, Flaim G, Grossart HP, Hambright KD, Hein C, Hejzlar J, Janus LL, Jenny JP, Jones JR, Knoll LB, Leoni B, Mackay E, Matsuzaki SIS, McBride C, Müller-Navarra DC, Paterson AM, Pierson D, Rogora M, Rusak JA, Sadro S, Saulnier-Talbot E, Schmid M, Sommaruga R, Thiery W, Verburg P, Weathers KC, Weyhenmeyer GA, Yokota K, Rose KC (2021) Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature* 594:66–70. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
- Jankowski T, Livingstone DM, Forster R, Bührer H (2005) Long-term nitrate concentrations in four perialpine lakes: regional coherence and the effects of climate

- change. *Int Vereinigung für Theor und Angew Limnol Verhandlungen* 29:927–931. <https://doi.org/10.1080/03680770.2005.11902818>
- Janse JH, Kuiper JJ, Weijters MJ, Westerbeek EP, Jeuken MHJL, Bakkenes M, Alkemade R, Mooij WM, Verhoeven JTA (2015) GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems. *Environ Sci Policy* 48:99–114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.007>
- Jansen J, Woolway RI, Kraemer BM, Albergel C, Bastviken D, Weyhenmeyer GA, Marcé R, Sharma S, Sobek S, Tranvik LJ, Perroud M, Golub M, Moore TN, Råman Vinnå L, La Fuente S, Grant L, Pierson DC, Thiery W, Jennings E (2022) Global increase in methane production under future warming of lake bottom waters. *Glob Chang Biol* 28:5427–5440. <https://doi.org/10.1111/gcb.16298>
- Jassby A, Powell T (1975) Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake, California. *Limnol Oceanogr* 20:530–543. <https://doi.org/10.4319/lo.1975.20.4.0530>
- Klaić ZB, Babić K, Mareković T (2020a) Internal seiches in a karstic mesotrophic lake (Prošće, Plitvice Lakes, Croatia). *Geofizika* 37:1–32. <https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.11>
- Klaić ZB, Babić K, Orlić M (2020b) Evolution and dynamics of the vertical temperature profile in an oligotrophic lake. *Hydrol Earth Syst Sci* 24:3399–3416. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3399-2020>
- Klaić ZB, Kvakić M (2014) Modeling the impacts of a man-made lake on the meteorological conditions of the surrounding areas. *J Appl Meteorol Climatol* 53:1121–1142. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0163.1>
- Klaić ZB, Rubinić J, Kapelj S (2018) Review of research on Plitvice Lakes, Croatia in the fields of meteorology, climatology, hydrology, hydrogeochemistry and physical limnology. *Geofizika* 35:189–278. <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.9>
- Kovačević T, Miculinić K, Cindrić J, Čulinović K, Brozinčević A, Špoljarić I, Magdić N, Cindrić J, Vuković I, Vurnek M, Markić N, Kulić M, Marković J, Rendulić Ž, Turkalj M, Božičević N, Poznanović R, Rubčić Kovačić S, Maričić Brkljačić N, Sertić S, Sekulić D, Franjković D, Luketić Z (2019) Plitvice Lakes National Park Management Plan 2019 - 2028. Plitvice Lakes National Park Public Institution, Plitvice Lakes
- Kraemer BM, Pilla RM, Woolway RI, Anneville O, Ban S, Colom-Montero W, Devlin SP, Dokulil MT, Gaiser EE, Hambright KD, Hessen DO, Higgins SN, Jöhnk KD, Keller W, Knoll LB, Leavitt PR, Lepori F, Luger MS, Maberly SC, Müller-Navarra DC, Paterson AM, Pierson DC, Richardson DC, Rogora M, Rusak JA, Sadro S, Salmaso N, Schmid M, Silow EA, Sommaruga R, Stelzer JAA, Straile D, Thiery W, Timofeyev MA, Verburg P, Weyhenmeyer GA, Adrian R (2021) Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nat Clim Chang* 11:521–529. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01060-3>
- Kristovich DR, Clark RD, Frame J, Geerts B, Knupp KR, Kosiba KA, Laird NF, Metz ND, Minder JR, Sikora TD, Steenburgh WJ, Steiger SM, Wurman J, Young GS (2017) The Ontario winter lake-effect systems field campaign: Scientific and educational adventures to further our knowledge and prediction of lake-effect storms. *Bull Am Meteorol Soc* 98:315–332. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00034.1>

- Krumgalz BS (2018) Temperature dependence of mineral solubility in water. Part 3. Alkaline and alkaline Earth sulfates. *J Phys Chem Ref Data* 47. <https://doi.org/10.1063/1.5031951>
- Kudish AI, Evseev E (2000) Statistical relationships between solar UVB and UVA radiation and global radiation measurements at two sites in Israel. *Int J Climatol* 20:759–770. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000615\)20:7<759::AID-JOC494>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000615)20:7<759::AID-JOC494>3.0.CO;2-K)
- Kudish AI, Lyubansky V, Evseev EG, Ianetz A (2005) Inter-comparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (Dead Sea), Israel. *Energy* 30:1623–1641. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.033>
- Ladwig R, Hanson PC, Dugan HA, Carey CC, Zhang Y, Shu L, Duffy CJ, Cobourn KM (2021) Lake thermal structure drives inter-annual variability in summer anoxia dynamics in a eutrophic lake over 37 years. *Hydrol Earth Syst Sci* 25:1009–1032. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-349>
- Li Q, Bruggeman J, Burchard H, Klingbeil K, Umlauf L, Bolding K (2021) Integrating CVMix into GOTM (v6.0): A consistent framework for testing, comparing, and applying ocean mixing schemes. *Geosci Model Dev* 14:4261–4282. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4261-2021>
- Li X, Peng S, Xi Y, Woolway RI, Liu G (2022) Earlier ice loss accelerates lake warming in the Northern Hemisphere. *Nat Commun* 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32830-y>
- Liston GE, Hall DK (1995) An energy-balance model of lake-ice evolution. *J Glaciol* 41:373–382. <https://doi.org/10.1017/S0022143000016245>
- Maberly SC, O'Donnell RA, Woolway RI, Cutler MEJ, Gong M, Jones ID, Merchant CJ, Miller CA, Politi E, Scott EM, Thackeray SJ, Tyler AN (2020) Global lake thermal regions shift under climate change. *Nat Commun* 11:1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15108-z>
- MacKay MD (2012) A process-oriented small lake scheme for coupled climate modeling applications. *J Hydrometeorol* 13:1911–1924. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0116.1>
- MacKay MD, Verseghy DL, Fortin V, Rennie MD (2017) Wintertime simulations of a boreal lake with the Canadian small lake model. *J Hydrometeorol* 18:2143–2160. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0268.1>
- Martynov A, Sushama L, Laprise R (2010) Simulation of temperate freezing lakes by one-dimensional lake models: Performance assessment for interactive coupling with regional climate models. *Boreal Environ Res* 15:143–164
- Matoničkin Kepčija R, Miliša M (2023) Recent tufa deposition. U: Miliša M, Ivković M (ur) Plitvice Lakes. Springer Cham, str 123–144
- Matsumoto K, Tokos KS, Rippke J (2019) Climate projection of lake superior under a future warming scenario. *J Limnol* 78:296–309. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2019.1902>
- Miliša M, Špoljar M, Sertić Perić M, Dražina T (2023) Energy and matter dynamics through the barrage lakes ecosystem. U: Miliša M, Ivković M (ur) Plitvice Lakes. Springer Cham, str 145–170

- Mironov D, Heise E, Kourzeneva E, Ritter B, Schneider N, Terzhevik A (2010) Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ Res* 15:218–230
- Monin AS, Obukhov AM (1954) Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr Akad Nauk SSSR Geophys Inst* 24:163–187
- Mooij WM, Hülsmann S, De Senerpont Domis LN, Nolet BA, Bodelier PLE, Boers PCM, Dionisio Pires LM, Gons HJ, Ibelings BW, Noordhuis R, Portielje R, Wolfstein K, Lammens EHRR (2005) The impact of climate change on lakes in the Netherlands: A review. *Aquat Ecol* 39:381–400. <https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>
- Moore TN, Mesman JP, Ladwig R, Feldbauer J, Olsson F, Pilla RM, Shatwell T, Venkiteswaran JJ, Delany AD, Dugan H, Rose KC, Read JS (2021) LakeEnsemblR: An R package that facilitates ensemble modelling of lakes. *Environ Model Softw* 143:105101. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105101>
- Nielsen A, Schmidt Hu FR, Schnedler-Meyer NA, Bolding K, Andersen TK, Trolle D (2021) Introducing QWET – A QGIS-plugin for application, evaluation and experimentation with the WET model: *Environmental Modelling and Software*. *Environ Model Softw* 135. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104886>
- NIWA (2021) National Institute of Water and Atmospheric Research: Latent and sensible heat fluxes from lake water surfaces. <https://niwa.co.nz/our-services/software/heat-fluxes-from-lakes>. pristupljeno: 28.01.2021
- Noori R, Bateni SM, Saari M, Almazroui M, Torabi Haghighi A (2022a) Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: results from approximately six decades of measurements (1964 – 2020). *Earth Sp Sci* 9:1–14. <https://doi.org/10.1029/2021EA001973>
- Noori R, Woolway RI, Changhyun J, Bateni SM, Maghrebi M, Pulkkanen M (2022b) Multi-decadal change in summer mean water temperature in Lake Konnevesi, Finland (1984-2021). (preprint). <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1982578/v1>
- North RP, North RL, Livingstone DM, Köster O, Kipfer R (2014) Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: Consequences of a climate regime shift. *Glob Chang Biol* 20:811–823. <https://doi.org/10.1111/gcb.12371>
- NPPJ (2023a) Nacionalni park Plitvička jezera: Sedra. <https://np-plitvicka-jezera.hr/prirodna-i-kulturna-bastina/prirodna-bastina/sedra/>. pristupljeno: 28.12.2023
- NPPJ (2023b) Nacionalni park Plitvička jezera: Povijesni pregled. <https://np-plitvicka-jezera.hr/znanstveno-istrazivacki-rad/povijesni-pregled/>. pristupljeno: 28.12.2023
- NPPJ (2023c) Nacionalni park Plitvička jezera: Potopljena barijera Kozjaka. <https://np-plitvicka-jezera.hr/potopljena-barijera-kozjaka/>. pristupljeno: 28.12.2023
- O'Reilly CM, Rowley RJ, Schneider P, Lenters JD, McIntyre PB, Kraemer BM (2015) Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys Res Lett* 42:10773–10781. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- Pashiardis S, Kalogirou S, Pelengaris A (2017) Statistical analysis and inter-comparison of solar UVB and global radiation for Athalassa and Larnaca, Cyprus. *SM J Biometrics Biostat* 2:1012. <https://doi.org/10.36876/smjbb.1006>

- Perroud M, Goyette S, Martynov A, Beniston M, Anneville O (2009) Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models. *Limnol Oceanogr* 54:1574–1594
- Petalas CP, Akratos CS, Tsihrintzis VA (2018) Hydrogeological investigation of a karst aquifer system. *Environ Process* 5:155–181. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0277-0>
- Petrik M (1961) Temperatura i kisik Plitvičkih jezera. *Raspr odjela za Mat fizičke i Teh Nauk JAZU* 11:81–119
- Petrik M (1958) Prinosi hidrologiji Plitvica. U: Šafar J (ur) *Plitvička Jezera - Nacionalni park*. Poljoprivredni nakladni zavod, Zagreb, str 49–173
- Piccioni F, Casenave C, Lemaire BJ, Le Moigne P, Dubois P, Vinçon-Leite B (2021) The thermal response of small and shallow lakes to climate change: New insights from 3D hindcast modelling. *Earth Syst Dyn* 12:439–456. <https://doi.org/10.5194/esd-12-439-2021>
- Pilla RM, Williamson CE, Adamovich B V., Adrian R, Anneville O, Chandra S, Colom-Montero W, Devlin SP, Dix MA, Dokulil MT, Gaiser EE, Girdner SF, Hambright KD, Hamilton DP, Havens K, Hessen DO, Higgins SN, Huttula TH, Huuskonen H, Isles PDF, Joehnk KD, Jones ID, Keller WB, Knoll LB, Korhonen J, Kraemer BM, Leavitt PR, Lepori F, Luger MS, Maberly SC, Melack JM, Melles SJ, Müller-Navarra DC, Pierson DC, Pislegina H V., Plisnier PD, Richardson DC, Rimmer A, Rogora M, Rusak JA, Sadro S, Salmaso N, Saros JE, Saulnier-Talbot É, Schindler DE, Schmid M, Shimaraeva S V., Silow EA, Sitoki LM, Sommaruga R, Straile D, Strock KE, Thiery W, Timofeyev MA, Verburg P, Vinebrooke RD, Weyhenmeyer GA, Zadereev E (2020) Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Sci Rep* 10:20514. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76873-x>
- Podstawczynska A (2009) UV and global solar radiation in Łodz, Central Poland. *Int J Climatol* 1–10. <https://doi.org/10.1002/joc.1864>
- Pokhrel RP, Bhattarai BK (2012) Relation between global solar radiation and solar ultraviolet radiation in different parts of Nepal. *J Inst Eng* 8:169–175. <https://doi.org/10.3126/jie.v8i3.5942>
- Poole HH, Atkins WRG (1929) Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. *J Mar Biol Assoc United Kingdom* 16:297–324. <https://doi.org/10.1017/S0025315400029829>
- Pratama AD, Dwiputra DS, Nurkholis A, Haryono E, Cahyadi A, Agniy RF, Adji TN (2021) Factors affecting hydrochemistry of karst springs and their relationship to aquifer development. *Environ Process* 8:1379–1413. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00547-7>
- Quay PD, Broecker WS, Hesslein RH, Schindler DW (1980) Vertical diffusion rates determined by tritium tracer experiments in the thermocline and hypolimnion of two lakes. *Limnol Ocean* 25:201–218
- Råman Vinnå L, Medhaug I, Schmid M, Bouffard D (2021) The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Commun Earth Environ* 2:35. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>
- Rasconi S, Winter K, Kainz MJ (2017) Temperature increase and fluctuation induce

- phytoplankton biodiversity loss – Evidence from a multi-seasonal mesocosm experiment. *Ecol Evol* 7:2936–2946. <https://doi.org/10.1002/ece3.2889>
- Read JS, Winslow LA, Hansen GJA, Van Den Hoek J, Hanson PC, Bruce LC, Markfort CD (2014) Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology. *Ecol Modell* 291:142–150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.029>
- Rinta P, Bastviken D, Schilder J, Van Hardenbroek M, Stötter T, Heiri O (2017) Higher late summer methane emission from central than Northern European lakes. *J Limnol* 76:52–67. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1475>
- Rodi W (1984) Turbulence models and their application in hydraulics – A state of the art review, Technical report. Int. Assoc. for Hydraul. Res, Delft, Netherlands
- Roglić J (1951) Unsko-koranska zaravan i Plitvička jezera – Geomorfološka promatranja. *Geogr Glas* 13:49–66
- Sahoo GB, Schladow SG, Reuter JE, Coats R, Dettinger M, Riverson J, Wolfe B, Costa-Cabral M (2013) The response of Lake Tahoe to climate change. *Clim Change* 116:71–95. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0600-8>
- Scholz SN, Esterhuizen-Londt M, Pflugmacher S (2017) Rise of toxic cyanobacterial blooms in temperate freshwater lakes: causes, correlations and possible countermeasures. *Toxicol Environ Chem* 99:543–577. <https://doi.org/10.1080/02772248.2016.1269332>
- Sharaf N, Prats J, Reynaud N, Tormos T, Peroux T, Danis P-A (2023) A long-term dataset of simulated epilimnion and hypolimnion temperatures in 401 French lakes (1959-2020). *Earth Syst Sci Data Discuss* (preprint)
- Sharma S, Blagrove K, Magnuson JJ, O'Reilly CM, Oliver S, Batt RD, Magee MR, Straile D, Weyhenmeyer GA, Winslow L, Woolway RI (2019) Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nat Clim Chang* 9:227–231. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
- Sharma S, Richardson DC, Woolway RI, Imrit MA, Bouffard D, Blagrove K, Daly J, Filazzola A, Granin N, Korhonen J, Magnuson J, Marszelewski W, Matsuzaki SIS, Perry W, Robertson DM, Rudstam LG, Weyhenmeyer GA, Yao H (2021) Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in Northern Hemisphere lakes. *J Geophys Res Biogeosciences* 126:1–12. <https://doi.org/10.1029/2021JG006348>
- Shatwell T, Thiery W, Kirillin G (2019) Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes. *Hydrol Earth Syst Sci* 23:1533–1551. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1533-2019>
- Skamarock WC, Klemp JB (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J Comput Phys* 227:3465–3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Srdoč D, Horvatinčić N, Obelić B, Krajcar I, Sliepčević A (1985) Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s poebnim osvrtom na Plitvička jezera. *Krš Jugoslavije, JAZU* 11:101–104
- Staver D, Mihanović H, Klaić ZB (2022) Lake-land breezes over a small elongated lake (Kozjak, Plitvice Lakes, Croatia). *Geofizika* 39:51–70. <https://doi.org/10.15233/gfz.2022.39.11>



- Stefan HG, Fang X, Hondzo M (1998) Simulated climate change effects on year-round water temperatures in temperate zone lakes. *Clim Change* 40:547–576. <https://doi.org/10.1023/A:1005371600527>
- Stepanenko V, Mammarella I, Ojala A, Miettinen H, Lykosov V, Vesala T (2016) LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geosci Model Dev* 9:1977–2006. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016>
- Stepanenko VM, Machul'skaya EE, Glagolev M V., Lykosov VN (2011) Numerical modeling of methane emissions from lakes in the Permafrost Zone. *Izv - Atmos Ocean Phys* 47:252–264. <https://doi.org/10.1134/S0001433811020113>
- Stepanenko VM, Martynov A, Jöhnk KD, Subin ZM, Perroud M, Fang X, Beyrich F, Mironov D, Goyette S (2013) A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake. *Geosci Model Dev* 6:1337–1352. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1337-2013>
- Sterckx K, Delandmeter P, Lambrechts J, Deleersnijder E, Verburg P, Thiery W (2023) The impact of seasonal variability and climate change on lake Tanganyika's hydrodynamics. *Environ Fluid Mech* 23:103–123. <https://doi.org/10.1007/s10652-022-09908-8>
- Straile D, Livingstone DM, Weyhenmeyer GA, George DG (2003) The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic oscillation. *Geophys Monogr Ser* 134:263–279. <https://doi.org/10.1029/134GM12>
- Sun S, Yan J, Xia N, Sun C (2007) Development of a model for water and heat exchange between the atmosphere and a water body. *Adv Atmos Sci* 24:927–938. <https://doi.org/10.1007/s00376-007-0927-7>
- Šarović K, Burić M, Klaić ZB (2022) SIMO v1.0: Simplified model of the vertical temperature profile in a small, warm, monomictic lake. *Geosci Model Dev* 15:8349–8375. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8349-2022>
- Šarović K, Klaić ZB (2023) Effect of climate change on water temperature and stratification of a small, temperate, karstic lake (Lake Kozjak, Croatia). *Environ Process* 10:1–24. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00663-6>
- Špoljar M, Primc-Habdija B, Habdija I (2007) Transport of seston in the karstic hydrosystem of the Plitvice Lakes (Croatia). *Hydrobiologia* 579:199–209. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0409-4>
- Ternjej I, Špoljar M, Stanković I, Udovič MG, Žutinić P (2023) Plankton communities. U: Miliša M, Ivković M (ur) *Plitvice Lakes*. Springer Cham, str 243–274
- Thiery W, Martynov A, Darchambeau F, Descy JP, Plisnier PD, Sushama L, Van Lipzig NPM (2014) Understanding the performance of the FLake model over two African Great Lakes. *Geosci Model Dev* 7:317–337. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-317-2014>
- UNESCO (2023) World Heritage Convention: Plitvice Lakes National Park. <https://whc.unesco.org/en/list/98/>. pristupljeno: 20.02.2023
- Vachon D, Langenegger T, Donis D, McGinnis DF (2019) Influence of water column stratification and mixing patterns on the fate of methane produced in deep sediments of a small eutrophic lake. *Limnol Oceanogr* 64:2114–2128. <https://doi.org/10.1002/lno.11172>

- Vautard R, Kadygrov N, Iles C, Boberg F, Buonomo E, Bülow K, Coppola E, Corre L, van Meijgaard E, Nogherotto R, Sandstad M, Schwingshackl C, Somot S, Aalbers E, Christensen OB, Ciarlo JM, Demory ME, Giorgi F, Jacob D, Jones RG, Keuler K, Kjellström E, Lenderink G, Levavasseur G, Nikulin G, Sillmann J, Solidoro C, Sørland SL, Steger C, Teichmann C, Warrach-Sagi K, Wulfmeyer V (2021) Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *J Geophys Res Atmos* 126:1–28. <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Verburg P, Antenucci JP (2010) Persistent unstable atmospheric boundary layer enhances sensible and latent heat loss in a tropical great lake: Lake Tanganyika. *J Geophys Res Atmos* 115:1–13. <https://doi.org/10.1029/2009JD012839>
- Verburg P, Hecky RE (2009) The physics of the warming of Lake Tanganyika by climate change. *Limnol Oceanogr* 54:2418–2430. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2418](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2418)
- Vurnek M, Lakes P, Park N (2021) Sedra Plitvičkih jezera – fantastičan spoj kemije i biologije. *Hrvat vode* 29:157–168
- Wald L (2019) Basics in solar radiation at earths surface (Revised version #3)
- Wang K, Dickinson RE (2013) Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses. *Rev Geophys* 150–185. <https://doi.org/10.1002/rog.20009>
- Williamson CE, Saros JE, Vincent WF, Smol JP (2009) Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnol Oceanogr* 54:2273–2282. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2273](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273)
- Willmott CJ, Matsuura K (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim Res* 30:79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Willmott CJ, Robeson SM, Matsuura K (2012) A refined index of model performance. *Int J Climatol* 32:2088–2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>
- Winslow JC, Hunt ER, Piper SC (2001) A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. *Ecol Modell* 143:227–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00341-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00341-6)
- Woolway RI, Merchant CJ (2019) Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nat Geosci* 12:271–276. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x>
- Woolway RI, Sharma S, Smol JP (2022) Lakes in hot water: The impacts of a changing climate on aquatic ecosystems. *Bioscience* 72:1050–1061. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac052>
- Woolway RI, Sharma S, Weyhenmeyer GA, Debolskiy A, Golub M, Mercado-Bettín D, Perroud M, Stepanenko V, Tan Z, Grant L, Ladwig R, Mesman J, Moore TN, Shatwell T, Vanderkelen I, Austin JA, DeGasperi CL, Dokulil M, La Fuente S, Mackay EB, Schladow SG, Watanabe S, Marcé R, Pierson DC, Thiery W, Jennings E (2021) Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nat Commun* 12:2318. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>
- Wu Y, Huang A, Lazhu, Yang X, Qiu B, Wen L, Zhang Z, Fu Z, Zhu X, Zhang X, Cai S, Tang Y (2020) Improvements of the coupled WRF-Lake model over Lake Nam Co, Central Tibetan Plateau. *Clim Dyn* 55:2703–2724. <https://doi.org/10.1007/s00382->

- Wu Y, Huang A, Yang B, Dong G, Wen L, Lazhu, Zhang Z, Fu Z, Zhu X, Zhang X, Cai S (2019) Numerical study on the climatic effect of the lake clusters over Tibetan Plateau in summer. *Clim Dyn* 53:5215–5236. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04856-4>
- Zhang M, Chadwick MA (2022) Influences of elevated nutrients and water temperature from wastewater effluent on river ecosystem metabolism. *Environ Process* 9:43. <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00597-5>
- Zhang YJ, Ye F, Stanev EV, Grashorn S (2016) Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Model* 102:64–81. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.05.002>
- Zhang YJ, Ye F, Yu H, Sun W, Moghimi S, Myers E, Nunez K, Zhang R, Wang H, Roland A, Du J, Liu Z (2020) Simulating compound flooding events in a hurricane. *Ocean Dyn* 70:621–640. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01351-x>
- Žutinić P, Gligora Udovič M, Kralj Borojević K, Plenković-Moraj A, Judit P (2014) Morpho-functional classifications of phytoplankton assemblages of two deep karstic lakes. *Hydrobiologia* 740:147–166. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1950-1>

# ŽIVOTOPIS

Kristina Šarović rođena je 22. travnja 1989. godine u Skopju, gdje je završila osnovnu i srednju školu. Diplomski studij završava 2013. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, stekavši zvanje magistra inženjera zrakoplovnog inženjerstva. Nakon studija radila je u Institutu za energetiku i zaštitu okoliša – EKONERG, gdje se bavila numeričkim modeliranjem i optimizacijom energetske postrojenja te modeliranjem disperzije emisija u atmosferi. Godine 2019. prelazi u Rimac Technology (tada Rimac Automobili), gdje je trenutno na poziciji vodećeg inženjera za mehanički integritet.

Doktorski studij geofizike na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2014. godine. Uz stalan posao kontinuirano se stručno i znanstveno usavršava te sudjeluje u međunarodnim konferencijama. Rezultate rada predstavila je na znanstvenim skupovima te objavila u časopisima zastupljenima u Current Contents.

## **Primljene nagrade i priznanja:**

2008 - Nagrada Davorin Bazjanac za izvrsnost u studiranju

2010 - Medalja Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

## **Sudjelovanje radionicama**

Air quality in Mediterranean port cities, The Med-Maritime Integrated Projects, Venecija, Italija, 2014.

Course on the Atmospheric Boundary Layer Integrating Air Chemistry and Land Interactions, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb, 2016.

## Popis objavljenih radova:

- Merico E, Gambaro A, Argiriou A, Alebić-Juretić Ana, Barbaro E, Cesari D, Chasapidis L, Dimopoulos S, Dinoi A, Donateo A, Giannaros C, Gregoris E, Karagiannidis Athanasios F, Konstandopoulos AG, Ivošević T, Liora N, Melas D, Mifka B, Orlić I, Poupkou A, **Šarović K**, Tsakis A, Giua R, Pastore T, Nocioni A, Contini D (2017) Atmospheric impact of ship traffic in four Adriatic-Ionian port-cities: comparison and harmonization of different approaches. *Transp Res Part D Transp Environ*, 50, 431-445, <https://doi:10.1016/j.trd.2016.11.016>
- Šoljan V, Belušić A, **Šarović K**, Nimac I, Brzaj S, Suhin J, Belavić M, Večenaj Ž, Grisogono B (2018) Micro-scale properties of different bora types. *Atmosphere*, 9, 116, <https://doi:10.3390/atmos9040116>
- Šarović K**, Burić M, Klaić ZB (2022) SIMO v1.0: Simplified model of the vertical temperature profile in a small, warm, monomictic lake. *Geosci Model Dev*, 15, 8349–8375, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8349-2022>
- Šarović K**, Klaić ZB (2023) Effect of climate change on water temperature and stratification of a small, temperate, karstic lake (Lake Kozjak, Croatia). *Environ Process*, 10, 1–24, <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00663-6>

## Sažeci sa skupova

- Šarović K**, Horvatić Viduka E, Alebić-Juretić A (2015) Emisije iz pomorskog prometa u luci Rijeka. Deveti Hrvatski znanstveno-stručni skup Zaštita zraka '15, Hrvatsko udruženje za zaštitu zraka, Poreč, Hrvatska,
- Contini D, Gambaro A, Argiriou A, Alebić-Juretić A, Barbaro E, Cesari D, Dimopoulos S, Ade Dinoi A, Donateo A, Gregoris E, Karagiannidis A, Ivošević T, Liora N, Melas D, Merico E, Mifka B, Orlić I, Poupkou A, **Šarović K** (2015) Impact of maritime transport on particulate matter concentrations and chemical compositions in four port-cities of the Adriatic/Ionian area: an overview of the results of POSEIDON project. EGU General Assembly, Beč, Austrija
- Šarović K**, Klaić ZB (2022) Simple one-dimensional lake temperature prediction model (SIMO V1.0). *Meteorološki izazovi 8*, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, Hrvatska, 2022.
- Klaić ZB, Babić K, Mihanović H, **Šarović K** (2023) Two-way interactions between a small temperate lake and the atmosphere: A case of Kozjak, Plitvice Lakes, Croatia. 9th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean, European Meteorological Society, Genova, Italija
- Šarović K**, Klaić ZB (2023) Effect of climate change on water temperature and stratification of Lake Kozjak, *Meteorološki izazovi 9*, Hrvatsko meteorološko društvo, Zagreb, Hrvatska