



## Simulation of Water Surface Temperature for Lake Urmia using One-dimensional FLake Model

R. Mostafanejad<sup>1</sup>, M. Hemmati<sup>2</sup>, and S. Hejabi<sup>3\*</sup>

### Abstract

Modeling the lake water surface temperature (WST) can improve the simulation of the evaporation component. In this study the WST of Lake Urmia is simulated using the one-dimensional FLake model for the period 2001-2021 and the results were compared with the observations obtained from MODIS images. The results showed that the north (N) and south (S) of the lake have differences in terms of thermodynamics. In both the northern and southern parts of the lake, an increasing trend ( $0.084\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$  and  $0.117\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$ , respectively) in water surface temperature is observed and the slope of changes in the south of the lake is steeper than in the north of the lake. The FLake model was able to simulate WST fluctuations in a relatively good way. However, the model shows a warm bias of about  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  in both parts. In general, the model is less accurate in simulating the temperature of the winter days ( $\text{MBE}_N=4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\text{MBE}_S=4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) than the summer days ( $\text{MBE}_N=1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $\text{MBE}_S=1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). The modeled stratification of the lake is of warm monomictic type, and the investigation of the thermal stratification pattern indicated an earlier start of the mixing period in the south of the lake. Also, examining the relationship between the changes in WST and the atmospheric characteristics showed that air temperature and air humidity explain the most variance in WST; but the increasing trend of WST is only related to the increasing trend of air temperature.

**Keywords:** FLake Model, Lake Urmia, Thermal Stratification, Thermocline, Water Surface Temperature.

Received: June 17, 2023  
Accepted: August 27, 2023

## شبیه‌سازی دمای سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل یک بعدی FLake

رضا مصطفی‌نژاد<sup>۱</sup>، محمد همتی<sup>۲</sup> و سمیه حجابی<sup>۳\*</sup>

### چکیده

مدل‌سازی دمای سطح آب دریاچه می‌تواند به بهبود شبیه‌سازی مؤلفه تبخیر کمک کند. در مطالعه حاضر، با هدف شبیه‌سازی دمای سطح آب دریاچه ارومیه، از مدل یک‌بعدی FLake برای دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۱ استفاده شد و نتایج با مشاهدات حاصل از تصاویر سنجنده MODIS مقایسه شد. نتایج نشان داد که شمال (N) و جنوب (S) دریاچه دارای تفاوت‌های ترمودینامیکی هستند. در هر دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه، روند افزایشی (به ترتیب،  $0.084\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$  و  $0.117\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) در دمای سطح آب مشاهده می‌شود و شیب تغییرات در جنوب دریاچه تندتر از شمال دریاچه است. مدل FLake به طور نسبتاً مطلوبی قادر به شبیه‌سازی نوسانات دمای سطح آب است. با این وجود مدل در هر دو بخش، ارزیابی گرم در حدود  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. به طور کلی مدل در شبیه‌سازی دمای روزهای زمستان ( $\text{MBE}_N=4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  و  $\text{MBE}_S=4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) دقت کمتری نسبت به روزهای تابستان ( $\text{MBE}_N=1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  و  $\text{MBE}_S=1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) دارد. لایه‌بندی مدل‌سازی‌شده دریاچه از نوع تک‌آمیختگی گرم است و بررسی الگوی لایه‌بندی حرارتی حاکی از شروع زودتر دوره آمیختگی در جنوب دریاچه است. همچنین بررسی رابطه بین روند تغییرات دمای سطح آب و مشخصه‌های جوی نشان داد که دمای هوا و رطوبت هوا بیشترین واریانس موجود در دمای سطح آب را تبیین می‌کنند؛ اما روند افزایشی دمای سطح آب تنها با روند افزایشی دمای هوا مرتبط است.

**کلمات کلیدی:** دریاچه ارومیه، دمای سطح آب، گرمایش، لایه‌بندی حرارتی، مدل FLake.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۷  
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۵

1- M.Sc. Student of Hydraulic Structures Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: reza.md24@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.hejabi@urmia.ac.ir

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.177981](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.177981)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۲ امکانپذیر است.



سنجش از دور مانند Terra-Aster، Terra/Aqua-MODIS، ATSR، سری Meteorat-MVIRI، NOAA-AVHRR، سنجنده‌ها و Landsat امکان‌پذیر است (Langer et al., 2010). علی‌رغم این، مشکلاتی مانند تفکیک زمانی و مکانی کم و خلاءهای ناشی از وجود پوشش ابر، روندیابی تغییرات دمای سطح آب را محدود می‌سازد. به‌علاوه، مشاهدات دمای حاصل از تصاویر ماهواره‌ای اطلاعاتی در مورد نیمرخ عمودی دمای آب فراهم نمی‌سازند.

روش دیگر شبیه‌سازی دمای سطح دریاچه، مدل‌سازی عددی است. در حال حاضر، مدل‌های یک‌بعدی، که به طور گسترده‌ای در علوم جوی استفاده می‌شوند، فرض می‌کنند که ویژگی‌های فیزیکی آب دریاچه به طور افقی یکنواخت است و انتقال گرمای آب دریاچه تنها در جهت عمودی در نظر گرفته می‌شود. یکی از مدل‌های توسعه‌یافته برای لحاظ نمودن اثرات دریاچه‌ها در مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا، مدل FLake<sup>۲</sup> است که بر مبنای تئوری تشابه بوده و برای شبیه‌سازی تغییرات فصلی نیمرخ قائم دما و شرایط اختلاط در یک دریاچه استفاده می‌شود (Mironov, 2008). این مدل بدنه آب را به دو لایه تقسیم می‌کند. لایه فوقانی لایه آمیخته<sup>۳</sup> با دمای یکنواخت است. زیر لایه آمیخته، نیمرخ دما با استفاده از مفهوم خودتشابهی<sup>۴</sup> پارامتره می‌شود. به این مفهوم که شکل مشخصه نیمرخ دما صرف نظر از عمق این لایه حفظ می‌شود.

Kheyrollah Pour et al. (2012) دمای سطح دریاچه و فنولوژی یخ را در دریاچه‌های Great Slave و Great Bear کانادا با استفاده از مدل FLake و مدل CLIMo برای دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۲ شبیه‌سازی نمودند و با داده‌های دمای سطح زمین<sup>۵</sup> (LST) حاصل از سنجنده تابش سنج طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط<sup>۶</sup> (MODIS) مقایسه نمودند. هر دو مدل توافق خوبی با داده‌های روزانه MODIS نشان دادند. Thiery et al. (2014) با بررسی عملکرد مدل FLake در دو دریاچه بزرگ آفریقا نشان دادند که مدل FLake می‌تواند به صورت جفت‌شده با مدل‌های پیش‌بینی جوی، به عنوان یک ابزار مناسب برای پارامتره نمودن دمای آب دریاچه مناطق حاره استفاده شود. Layden et al. (2016) به شبیه‌سازی دمای سطح آب ۲۴۴ دریاچه در سراسر جهان با استفاده از مدل دریاچه یک بعدی FLake پرداختند. نتایج نشان داد واسنجی مدل با استفاده از تنها سه ویژگی دریاچه‌ها (عمق دریاچه، آلبیدوی یخ و ضریب خاموشی نور<sup>۷</sup>) نتایج شبیه‌سازی را بهبود می‌بخشد. Le Moigne et al. (2016) به شبیه‌سازی دمای سطح دریاچه با استفاده از طرحواره FLake در مدل اقلیمی CNRM-CM5 پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که FLake

دریاچه ارومیه واقع در شمال غربی ایران دومین دریاچه فوق شور در جهان است که در سال‌های اخیر شدیداً با بحران خشک شدن مواجه شده است. در کنار عواملی مانند احداث سد و تخصیص منابع آب به کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی، عواملی همچون تغییر اقلیم و دوره‌های بلندمدت خشکسالی سبب کاهش بارش و در نتیجه کاهش جریان ورودی به دریاچه شده است. به علاوه، افزایش تبخیر از سطح آب سبب تشدید بحران کاهش تراز آب دریاچه شده است. به طوری که تراز آب دریاچه در دو دهه اخیر حدود ۷ متر افت داشته و شوری آن به بیش از ۳۴۰ g/L افزایش یافته است (Karbassi et al., 2010; Sima et al., 2021; Parsinejad et al., 2022). Fathian et al. (2015) نشان دادند که کاهش سطح آب دریاچه ارومیه با روند افزایشی دمای هوا در ارتباط است. Alizadeh-Choozari et al. (2016) عامل خشکسالی هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه را افزایش دمای هوا، کاهش بارش و روند افزایشی تبخیر در چند دهه اخیر عنوان کردند. Hejabi et al. (2022) با بررسی متغیرهای هواشناسی مؤثر در روند تبخیر و تعرق مرجع در حوضه دریاچه ارومیه نشان دادند که روند افزایشی معنی‌دار دمای بیشینه هوا پس از سرعت باد بیشترین سهم را در روند افزایشی تبخیر و تعرق مرجع داشته است.

Wright et al. (2013) نشان دادند که تغییر کمی در دمای آب دریاچه‌های بزرگ می‌تواند اثر محسوسی بر میزان بارندگی و ابرناکی داشته باشد. سرعت گرم شدن آب دریاچه‌ها اساساً به‌وسیله افزایش دمای هوا، که بستگی به ترکیبی از مشخصه‌های اقلیمی و محلی دارد، هدایت می‌شود. گرمایش جهانی روی نیمرخ دمای<sup>۱</sup> دریاچه تأثیرگذار بوده و می‌تواند سبب تغییر رژیم اختلاط شود (Livingstone, 2003). با توجه به اینکه دمای سطح آب دریاچه یک عامل کلیدی در تنظیم تبادل انرژی و آب در سطح مشترک جو-دریاچه است (Adrian et al., 2009)، بنابراین، به‌دست آوردن دمای سطح آب می‌تواند به درک ماهیت دینامیکی بسیار متغیر دریاچه کمک کرده و به بهبود شبیه‌سازی مؤلفه تبخیر که به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های منعکس‌کننده اثرات تغییر اقلیم شناخته می‌شود، کمک کند.

طی چند دهه گذشته، تخمین‌های دمای آب دریاچه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مورد توجه قرار گرفته است. سنجش از دور ابزاری کارآمد برای ارزیابی چرخه دمایی دریاچه‌های بزرگ است و امکان تولید داده‌های جهانی پیوسته از دمای سطح دریاچه‌ها و بررسی تغییر اقلیم را فراهم می‌سازد (Schneider et al., 2009). در حال حاضر، به دست آوردن دمای سطح زمین از فضا با استفاده از سکوه‌های متنوع

را بر اساس مدل جوی WRF جفت‌شده با مدل دریاچه FLake در دریاچه Nam-Co بررسی کردند.

بررسی پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته در مورد مدل FLake کاربردهای گسترده آن را به صورت مستقل یا به صورت جفت‌شده با مدل‌های سطح خشکی و مدل‌های اقلیمی در بسیاری از مناطق دنیا نشان می‌دهد. با این وجود تاکنون مطالعه‌ای در مورد عملکرد مدل FLake در شبیه‌سازی دمای سطح آب دریاچه ارومیه انجام نشده است. با توجه به توانایی بالای مدل FLake در شبیه‌سازی دمای دریاچه‌های مطالعه‌شده، بررسی دقت مدل مذکور در دریاچه ارومیه می‌تواند مبنایی برای پژوهش‌های آتی در زمینه مدل‌سازی‌های دقیق‌تر هیدرولوژی و اقلیم منطقه و همچنین پیش‌نگری پاسخ ترمودینامیک دریاچه به وضعیت اقلیمی تحت سناریوهای اقلیمی آینده شود. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی دمای آب سطح دریاچه ارومیه با استفاده از مدل یک‌بعدی FLake و مقایسه نتایج حاصل از مدل با دمای سطح دریاچه حاصل از مشاهدات تصاویر ماهواره‌ای است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دریاچه ارومیه است که بزرگ‌ترین آبگیر دائمی در آسیای غربی بوده و در شمال غرب فلات ایران قرار گرفته است. مساحت حوضه آبریز دریاچه ارومیه، ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است که معادل بیش از سه درصد مساحت کل کشور ایران می‌باشد (ULRP, 2015). میانگین بلندمدت بارش سالانه حوضه ۳۰۲/۸ mm و مشخصه اقلیمی آن زمستان‌های سرد (با میانگین دمای °C ۰/۲ و ژانویه و فوریه به عنوان سردترین ماه‌ها) و تابستان‌های نسبتاً معتدل (با میانگین دمای °C ۲۳/۹ و جولای و آگوست به عنوان گرم‌ترین ماه‌ها) است؛ در حالی که میانگین دمای سالانه حوضه °C ۱۲/۳ است (Alizadeh-Choozari et al., 2016). تبخیر سالانه از سطح دریاچه ۴/۱۵ میلیارد متر مکعب است (Mohammadi et al., 2022) و در تراز اکولوژیک (۱۲۷۴/۱ متر)، مساحت دریاچه برابر ۴۳۴۸ کیلومتر مربع و حجم آن ۱۴۵۷۶ میلیون متر مکعب است. حداکثر عمق دریاچه به ۱۶ متر می‌رسد (ULRP, 2015). آب دریاچه ارومیه توسط ۶۰ رودخانه تامین می‌شود که ۲۱ رودخانه دائمی یا فصلی هستند و ۳۹ رودخانه بصورت دوره‌ای هستند. از این میان، زرینه‌رود، سیمینه‌رود و آجی‌چای ورودی‌های اصلی به دریاچه ارومیه هستند (Ghaheri et al., 1999). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

در حالت برون‌خط<sup>۱</sup> دمای سطح دریاچه را به طور رضایت‌بخشی شبیه‌سازی می‌کند و استفاده از FLake به صورت جفت‌شده با CNRM-CM5 خطای موجود در مدل اقلیمی را بهبود می‌بخشد. Golosov et al. (2018) یک پارامتره‌سازی جدید برای نیمرخ عمودی دمای آب در مدل FLake ارائه نمودند و نشان دادند که پارامتره‌سازی جدید قادر است به بهبود بازتولید انواع نیمرخ‌های دمای آب در مقایسه با توابع اصلی مدل FLake کمک کند. Su et al. (2019) نشان دادند که FLake توانایی خوبی در شبیه‌سازی تغییرات فصلی دمای سطح دریاچه و ساختار گرمایی دریاچه Ch'inghai دارد. Huang et al. (2019) در مطالعه خود توانایی مدل‌های FLake، WRF-Lake و CoLM-Lake را در شبیه‌سازی ویژگی‌های گرمایی دریاچه Nam Co در فلات تبت مرکزی ارزیابی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مدل FLake از نظر محاسباتی کارآمدترین است و بهترین مهارت را در شبیه‌سازی تغییر زمانی و مقدار دمای اعماق نزدیک به سطح دریاچه نسبت به مدل‌های دیگر نشان می‌دهد. همچنین کاهش ضریب خاموشی نور در مدل FLake منجر به ایجاد یک لایه آمیخته بسیار عمیق‌تر و گرم‌اشیب<sup>۲</sup> گرم‌تر در فصول گرم و توافق بهتر با مشاهدات می‌شود. (Zdorovenova et al. 2021). استفاده از مدل FLake به بررسی فنولوژی یخ در دریاچه Vendyurskoe در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۲۰ پرداختند. یک روند منفی معنی‌دار برای ضخامت پوشش یخ در فصل بهار مشاهده شد. کاهش ضخامت پوشش یخ سبب افزایش تابش دریافتی در زیر یخ و در نتیجه شروع زودتر فرایند همرفت در زیر یخ شد. Huang et al. (2021) از مدل FLake برای شبیه‌سازی دمای سطح آب ۹۴ دریاچه در چین استفاده کردند و نشان دادند که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی و پیش‌نگری پاسخ دمای سطح آب دریاچه‌ها به تغییرات سریع اقلیمی استفاده شود. (Bernus and Ottlé 2022) برای شبیه‌سازی بیلان انرژی ۱۰۰۰ دریاچه در سرتاسر جهان مدل یک‌بعدی FLake را با مدل سطح خشکی ORCHIDEE جفت نمودند و از پنج پایگاه داده بازتحلیل مختلف با تفکیک‌های مکانی °/۵ یا °/۲۵ برای واداشت مدل استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از پایگاه داده‌های بازتحلیل ERA5 و E2OFD سبب بهبود شبیه‌سازی‌های دما می‌شود. (Wang et al. 2023) برای بهبود مدل‌سازی دمای دریاچه، مشاهدات ماهواره‌ای را با مدل عددی FLake یکپارچه نمودند و مشخصه‌های روند در دمای سطح دریاچه و رخداد امواج گرما را در دریاچه‌های چین بررسی نمودند. Zhou et al. (2023) فرایندهای فیزیکی کلیدی مربوط به فنولوژی یخ دریاچه

مدل FLake با فرض لایه‌بندی صرفاً حرارتی، اثر لایه‌بندی شوری را بر اختلاط دریاچه در نظر نمی‌گیرد. یکی از پارامترهای خارجی اصلی مدل عمق دریاچه است که برای دریاچه‌های عمیق، به جای عمق واقعی دریاچه، عموماً یک عمق کف ۴۰-۶۰ متر برای شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود؛ اما در مورد دریاچه‌های با عمق کم، متوسطی از عمق دریاچه لحاظ می‌شود. در مطالعه حاضر، عمق ۶ متر استفاده شد. علاوه بر این، مدل FLake می‌تواند پوشش برف را نیز روی سطح یخ‌زده دریاچه در نظر بگیرد. اما از آنجا که دریاچه ارومیه به دلیل غلظت بالای شوری در زمستان یخ نمی‌زند، این قسمت از مدل استفاده نشد. جزئیات بیشتر مدل در (Mironov (2008 آمده است.

### ۳-۲- داده‌های هواشناسی

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز برای اجرای مدل FLake شامل متغیرهای دمای هوا، سرعت باد، رطوبت هوا بر حسب فشار بخار، تابش خورشیدی و ابرناکی است. برای این منظور داده‌های دمای هوا در ارتفاع ۲ متری، دمای نقطه شبنم در ارتفاع ۲ متری، پوشش ابر، مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد و تابش خورشیدی برای دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۱ از پایگاه نسل پنجم داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا<sup>۱۱</sup> (ECMWF) به نام ERA5 تهیه شد (سایت <https://cds.climate.copernicus.eu>). این داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۵۰ به بعد موجود هستند. داده‌های بازتحلیل جوی به عنوان کامل‌ترین برآوردهای تاریخی جوی زمین در نظر گرفته می‌شوند که از طریق داده‌گذاری<sup>۱۱</sup> متغیرهای اندازه‌گیری شده در خشکی، اقیانوس، جو و همچنین تصاویر ماهواره‌ای، به سیستم‌های پیش‌بینی وضع هوا تولید می‌شوند. مقیاس زمانی داده‌های ERA5 ساعتی است و برای تبدیل آنها به داده‌های روزانه از برنامه کاربردی Copernicus CDS استفاده شد. این برنامه امکان تبدیل داده‌های ساعتی به روزانه را پیش از دانلود آنها فراهم می‌کند. پس از تهیه داده‌های روزانه، از طریق کدنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB، عملیاتی مانند تبدیل واحدهای لازم در مورد متغیرها، تبدیل داده‌های دمای نقطه شبنم به رطوبت هوا بر حسب فشار بخار، تبدیل داده‌های درصد پوشش ابر به محدوده [۰-۱] و محاسبه سرعت باد با استفاده از مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد انجام شد. جزئیات مربوط به نحوه تبدیل واحد متغیرها در (Layden et al. (2016 آمده است. در ادامه، داده‌ها با فرمت مشخص شده برای مدل FLake ذخیره و به عنوان ورودی مدل استفاده شد.

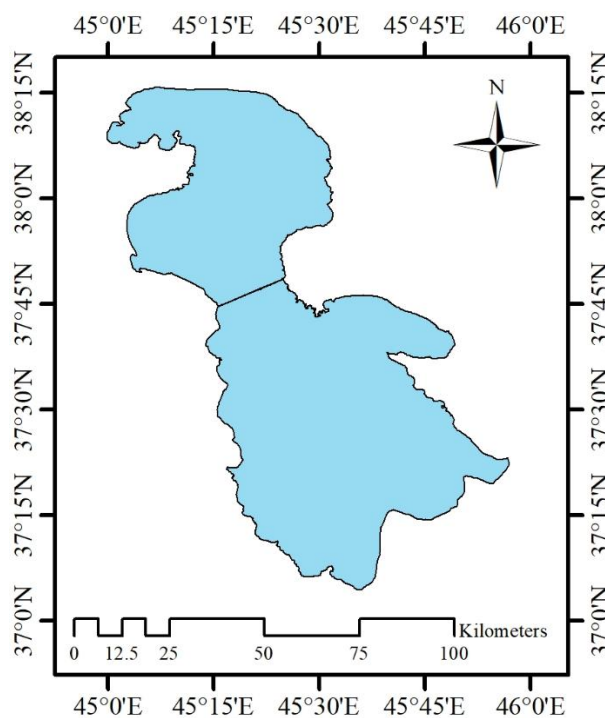


Fig. 1- Geographical location of the Lake Urmia

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه

### ۲-۲- مدل FLake

مدل FLake (Mironov, 2008) برای شبیه‌سازی نیمرخ عمودی دما و بیلان انرژی لایه‌های مختلف دریاچه در مقیاس‌های زمانی چند ساعت تا چند سال قابل استفاده است. مدل، دریاچه را در راستای عمودی به دو لایه تقسیم می‌کند. لایه فوقانی لایه آمیخته با دمای یکنواخت است. زیر لایه آمیخته، نیمرخ دما با استفاده از مفهوم خودتشابهی (Kitaigorodskii and Miropolsky, 1970) پارامتره می‌شود به این مفهوم که شکل مشخصه نیمرخ دما صرف نظر از عمق لایه حفظ می‌شود. فرمول پارامتره‌سازی به صورت معادله (۱) است:

$$\frac{\theta_s(t) - \theta(z,t)}{\Delta\theta(t)} = \Phi_\theta(\zeta) \quad h(t) \leq z \leq D \quad (1)$$

که  $t$  زمان،  $z$  عمق،  $\theta_s(t)$  دمای لایه آمیخته با عمق  $h(t)$ ،  $\Delta\theta(t) = \theta_s(t) - \theta_b(t)$  اختلاف دمای لایه آمیخته و دمای بستر دریاچه ( $\theta_b(t)$ ) و  $D$  عمق دریاچه است.  $\Phi_\theta(\zeta)$  تابعی بدون بعد از عمق بدون بعد  $\zeta = \frac{z-h(t)}{\Delta h(t)}$  است که در شرایط مرزی  $\Phi_\theta(0) = 0$  و  $\Phi_\theta(1) = 1$  است. بر اساس فرض خودتشابهی، نیمرخ دما می‌تواند به صورت یک تقریب دو لایه‌ای به صورت معادله (۲) بیان شود:

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_s(t) & 0 \leq z \leq h(t) \\ \theta_s(t) - [\theta_s(t) - \theta_b(t)] \Phi_\theta(\zeta) & h(t) \leq z \leq D \end{cases} \quad (2)$$

## ۴-۲- داده‌های دمای سطح زمین

که  $x$  و  $y$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دمای سطح آب دریاچه و  $n$  تعداد داده‌ها است.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- روند تغییرات میانگین سالانه دمای سطح آب

شکل ۲ روند تغییرات دمای سطح آب دریاچه (بر اساس داده‌های مشاهداتی MODIS) در مقیاس زمانی سالانه را برای بخش‌های شمالی و جنوبی دریاچه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در هر دو بخش روند افزایشی در دمای سطح آب مشاهده می‌شود و شیب تغییرات در جنوب دریاچه تندتر از شمال دریاچه است. در هر دو بخش، بر اساس آزمون روند Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, ) (1948)، روند تغییرات دمای سالانه سطح آب در شمال ( $^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) و جنوب ( $^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) دریاچه در سطح معنی‌داری ۵ درصد معنی‌دار است. روند افزایشی دمای سطح آب دریاچه می‌تواند ناشی از روند افزایشی دمای هوا باشد. بررسی روند متغیرهای اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه در چند دهه اخیر بیانگر وجود روند افزایشی ضعیف دمای هوا (Delju et al., 2013; Alizadeh-Choobari et al., 2016) بوده است. همچنین کاهش تراز و سطح آب دریاچه در چند سال اخیر می‌تواند سبب کاهش اثر تعدیل‌کنندگی دریاچه و افزایش دمای محیط شود. تفاوت روند تغییرات دما در شمال و جنوب دریاچه می‌تواند ناشی از تفاوت غلظت رسوبات دریاچه و همچنین تفاوت عمق دریاچه در بخش شمالی و جنوبی باشد که بر میزان نفوذ نور در آب و همچنین انعکاس نور تاثیر گذاشته و میزان انرژی دریافتی توسط آب را در شمال و جنوب دریاچه متفاوت می‌سازد (Rose et al., 2016; Noori et al., 2022). عامل دیگر، تفاوت دمای رودخانه‌های شمالی و جنوبی دریاچه است که می‌تواند بر دمای آب دریاچه تأثیر بگذارد (Dadashzadeh et al., 2020).

### ۳-۲- واسنجی مدل FLake

شکل ۳ تغییرات دو معیار RMSE و ضریب همبستگی را به ازای تغییرات پارامتر ضریب خاموشی نور برای دوره واسنجی (۲۰۱۶-۲۰۰۱) نشان می‌دهد. ضریب خاموشی نور تعیین‌کننده شدت کاهش نور رسیده به سطح آب با عمق است و هرچه بیشتر باشد، مقدار بیشتری از نور در لایه‌های بالاتر ستون آب جذب یا پخش می‌شوند و نور کمتری به اعماق آب می‌رسد. لذا در آب‌های با شفافیت کم، ضریب خاموشی بیشتر است (Armengol et al., 2003). با توجه به شکل، با افزایش ضریب خاموشی نور، مقدار خطای شبیه‌سازی دمای سطح آب کاهش و ضریب همبستگی افزایش می‌یابد. در شمال و جنوب

در این مطالعه، از محصول نسخه 6.1 دمای سطح زمین (LST) سنجنده MODIS ماهواره Terra (MOD11A1) و Aqua (MYD11A1) به عنوان داده‌های مشاهداتی دمای سطح آب دریاچه استفاده شد. این محصول داده‌های روز و شب دما را با تفکیک زمانی روزانه و تفکیک مکانی یک کیلومتر برای دوره زمانی ۲۰۰۰/۲/۲۴ تا حال حاضر فراهم می‌سازند (سایت <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>). دوره آماری مورد بررسی در مطالعه حاضر شامل سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ است. (Sima et al., 2013) بر اساس ۴۶ اندازه‌گیری دمای آب در چند نقطه از دریاچه ارومیه، حاصل از یک مطالعه موردی پیش کیفیت آب مرکز تحقیقات آرتیمیای دریاچه ارومیه در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰، به ارزیابی داده‌های LST سنجنده MODIS پرداختند و عملکرد این محصول را تأیید نمودند ( $R^2=0.92$ , Bias= $-0.27^{\circ}\text{C}$ ). محاسبه میانگین دمای روزانه سطح آب، با استفاده از کدنویسی در محیط پایتون انجام شد. در مورد هر یک از محدوده‌های شمالی و جنوبی دریاچه، میانگین دمای روز تمام سلول‌های موجود در محدوده محاسبه و همین عملیات در مورد میانگین دمای شب نیز تکرار شد. سپس، از طریق میانگین‌گیری از دمای روز و شب، میانگین دمای روزانه هر محدوده برای روزهای مختلف محاسبه شد. شایان ذکر است که میانگین‌گیری دما تنها برای روزهای فاقد خلاء آماری محاسبه شد و روزهایی که بدون داده در روز، شب یا هر دو بودند، کنار گذاشته شدند. لذا عملکرد مدل بر مبنای داده‌های موجود بررسی شد.

## ۴-۵- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مقادیر مختلف پارامتر ضریب خاموشی نور در یک فرایند سعی و خطا برای واسنجی مدل (دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۱) استفاده شد و صحت‌سنجی مدل برای دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۷ صورت گرفت و مقادیر بهینه پارامتر تعیین شد. معیارهای بررسی عملکرد مدل شامل ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱۱</sup> (RMSE) و میانگین خطای اریبی<sup>۱۳</sup> (MBE) است که با استفاده از معادلات (۳) تا (۵) محاسبه شدند:

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{(\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2})(\sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2})} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2} \quad (4)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y) \quad (5)$$

دریاچه به ترتیب به ازای مقدار ضریب خاموشی نور ۵/۵ و ۳/۳، مقدار خطای شبیه‌سازی به حداقل می‌رسد. با توجه به اینکه ضریب خاموشی نور با میزان شفافیت آب رابطه معکوس دارد، لذا شفافیت آب در جنوب دریاچه بیشتر از شمال دریاچه است. این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در غلظت رسوبات بخش شمالی و جنوبی دریاچه باشد.

دریاچه، به ترتیب به ازای مقدار ضریب خاموشی نور ۵/۵ و ۳/۳، مقدار خطای شبیه‌سازی به حداقل می‌رسد. با توجه به اینکه ضریب خاموشی نور با میزان شفافیت آب رابطه معکوس دارد، لذا شفافیت آب در جنوب دریاچه بیشتر از شمال دریاچه است. این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در غلظت رسوبات بخش شمالی و جنوبی دریاچه باشد.

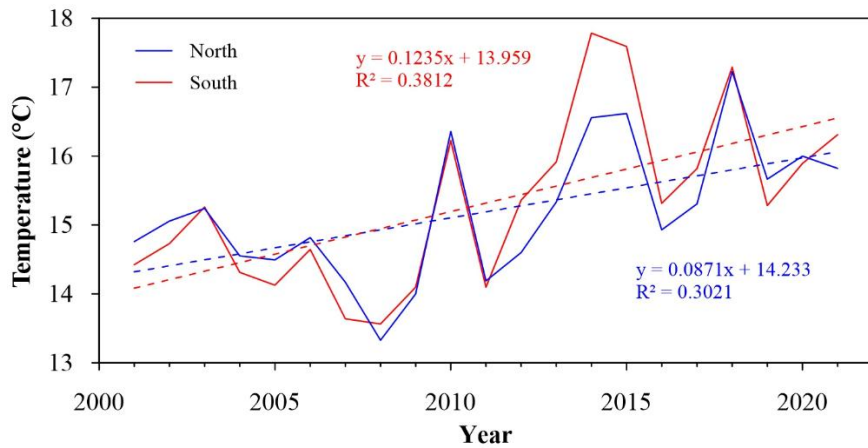


Fig. 2- Trend in annual average of the water surface temperature according to MODIS data in the north and south of the lake

شکل ۲- روند تغییرات میانگین سالانه دمای سطح آب بر اساس داده‌های MODIS در شمال و جنوب دریاچه

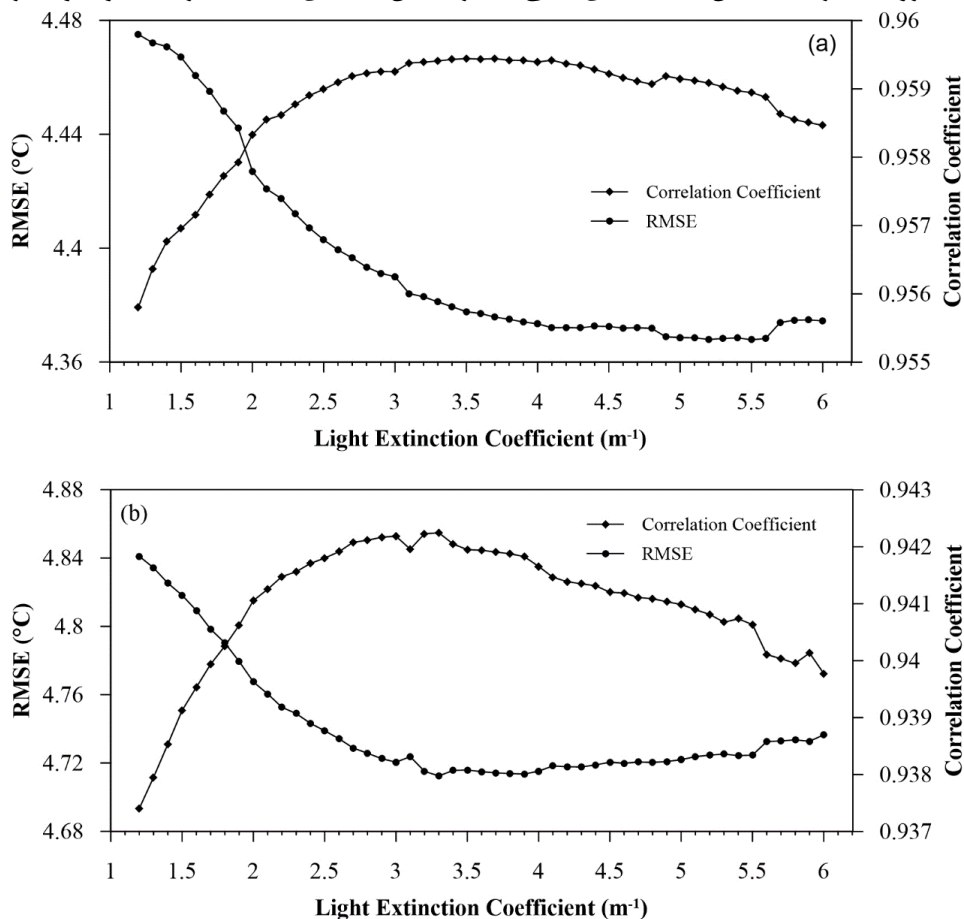


Fig. 3- Changes in RMSE and correlation coefficient for different values of light extinction coefficient in the north (a) and south (b) of the lake

شکل ۳- نمودار تغییرات RMSE و ضریب همبستگی به ازای مقادیر مختلف ضریب خاموشی نور در شمال (a) و جنوب (b) دریاچه

مقادیر شاخص‌های MBE و RMSE کمتر از یک انحراف معیار (به ترتیب  $9/75^{\circ}\text{C}$  و  $10/11^{\circ}\text{C}$ ) است.

معیارهای بررسی عملکرد مدل به تفکیک هر فصل نیز در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول، معیارهای خطا برای روزهای گرم سال (بهار و تابستان) کمتر از روزهای سرد سال (پاییز و زمستان) است. اریبی برای روزهای همه فصول مثبت (اریبی گرم) است. کمترین مقادیر اریبی مربوط به روزهای فصل تابستان ( $MBE_N=1/88$  و  $MBE_S=1/03^{\circ}\text{C}$ ) و بیشترین اریبی مربوط به روزهای فصل زمستان ( $MBE_N=4/4^{\circ}\text{C}$  و  $MBE_S=4/2^{\circ}\text{C}$ ) است.

شکل ۴ نمودار سری زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای روزانه سطح آب را، بر اساس مقادیر بهینه پارامتر ضریب خاموشی در دوره واسنجی (۲۰۱۶-۲۰۰۱)، برای دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه نشان می‌دهد. مقایسه نمودارها حاکی از این است که مدل FLake به طور مطلوبی قادر به شبیه‌سازی نوسانات دمای سطح آب است؛ به طوری که ضریب همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دو بخش شمالی (N) و جنوبی (S) برای کل روزها به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۴ است (جدول ۱). با این وجود مدل در هر دو بخش، اریبی گرم نشان می‌دهد. به طوری که میزان شاخص MBE در دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه به ترتیب  $3/25^{\circ}\text{C}$  و  $2/97^{\circ}\text{C}$  است. با این وجود،

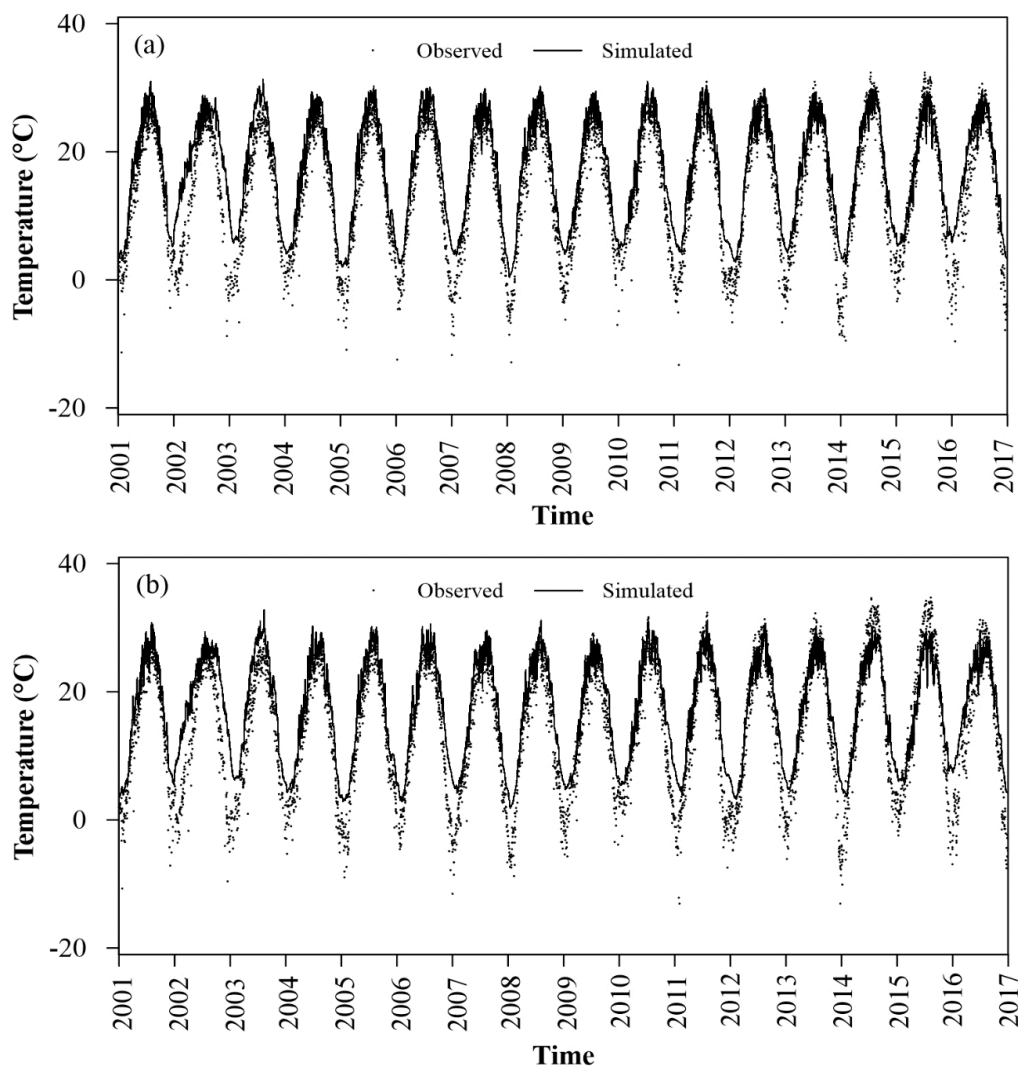


Fig. 4- Time series of the observed and simulated values of water surface daily temperature during the model calibration period (2001-2016) in the north (a) and south (b) of the lake

شکل ۴- نمودار سری زمانی مقادیر روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دمای سطح آب در دوره واسنجی مدل (۲۰۱۶-۲۰۰۱) در شمال (a) و جنوب (b) دریاچه

### ۳-۳- صحت‌سنجی مدل FLake

اجرای مدل برای دوره صحت‌سنجی (۲۰۱۷-۲۰۲۱) و بر اساس مقادیر بهینه پارامتر ضریب خاموشی نور برای دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه صورت گرفت. شکل ۵ نمودار پراکنش مقادیر روزانه دمای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را برای دو بخش نشان می‌دهد. الگوی پراکندگی نقاط در اطراف خط ۱:۱ بیانگر بیشتر بودن ضریب تبیین (و ضریب همبستگی) در بخش شمالی نسبت به بخش جنوبی است. به‌علاوه در هر دو بخش اغلب نقاط بالای خط ۱:۱ قرار دارند که حاکی از اریبی‌های گرم است و روزهای دارای اریبی سرد اغلب در دماهای بالاتر مشهود است.

۱ نشان داده شده‌اند. مشابه دوره واسنجی، در دوره صحت‌سنجی نیز، عملکرد مدل در مورد روزهای فصل تابستان بهتر ( $MBE_N = 0.83^\circ C$  و  $MBE_S = 0.1^\circ C$ ) و در مورد روزهای فصل زمستان ضعیف‌تر ( $MBE_N = 4.27^\circ C$  و  $MBE_S = 4.51^\circ C$ ) است. مدل FLake با فرض لایه‌بندی صرفاً حرارتی، اثر لایه‌بندی شوری را بر اختلاط دریاچه در نظر نمی‌گیرد. از طرف دیگر، بیش‌برآوردهای دما می‌تواند ناشی از عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی نقش رسوبات نمک در انعکاس تابش خورشید و بیش‌برآورد انرژی دریافتی در سطح آب باشد. عامل دیگر خطا، وجود خطا در داده‌های ورودی مدل و یا خطای ناشی از اثر پوسته خنک<sup>۱۴</sup> در محصولات MODIS هستند که سبب برآورد کمتر دمای سطح آب توسط سنجنده می‌شود (Swapna et al., 2022).

شیب خط روند در بخش شمالی نسبت به بخش جنوبی به عدد ۱ نزدیک‌تر است و معیار RMSE نیز در بخش شمالی ( $3.95^\circ C$ ) کمتر از بخش جنوبی ( $4.46^\circ C$ ) است (جدول ۱). با این وجود مقدار اریبی در بخش شمالی ( $2.37^\circ C$ ) اندکی بیشتر از بخش جنوبی ( $2.37^\circ C$ ) است. معیارهای ارزیابی به تفکیک روزهای فصول مختلف در جدول

روی هم رفته معیارهای بررسی عملکرد مدل در مرحله صحت‌سنجی اندکی بهتر از مرحله واسنجی بودند. لذا، استفاده از مقادیر واسنجی شده پارامتر ضریب خاموشی نور برای سال‌های دیگر نیز امکان‌پذیر است.

**Table 1- Statistical criteria for checking the performance of the model in simulating the daily temperature of the lake water surface according to different seasons and throughout the year in the model calibration period (2001-2016) and the model validation period (2017-2021)**

جدول ۱- معیارهای آماری بررسی عملکرد مدل در شبیه‌سازی دمای روزانه سطح آب دریاچه به تفکیک فصول مختلف و در کل سال در دوره واسنجی مدل (۲۰۱۶-۲۰۲۱) و دوره صحت‌سنجی مدل (۲۰۱۷-۲۰۲۱)

Zone	Time	Calibration					Validation				
		Mean (°C)	St. Dev. (°C)	r	RMSE (°C)	MBE (°C)	Mean (°C)	St. Dev. (°C)	r	RMSE (°C)	MBE (°C)
North	All days	14.93	9.75	0.96	4.37	3.25	15.98	10.22	0.97	3.95	2.58
	Spring days	18.72	4.93	0.83	4.07	3.01	20.63	5.30	0.88	3.19	1.91
	Summer days	24.42	2.85	0.63	2.75	1.88	25.52	3.05	0.74	2.28	0.83
	Autumn days	9.06	6.85	0.92	5.12	4.32	8.96	6.64	0.95	4.97	4.26
	Winter days	2.61	4.72	0.74	5.46	4.44	3.02	5.10	0.78	5.34	4.27
South	All days	15.05	10.11	0.94	4.71	2.97	16.11	10.55	0.95	4.46	2.37
	Spring days	19.19	5.36	0.78	3.97	2.10	21.18	5.51	0.81	3.37	0.92
	Summer days	25.08	3.44	0.54	3.11	1.03	26.24	3.36	0.69	2.46	0.01
	Autumn days	8.59	7.00	0.90	6.17	5.28	8.95	6.66	0.93	5.76	5.05
	Winter days	3.11	4.93	0.70	5.49	4.21	3.42	5.39	0.70	5.94	4.51



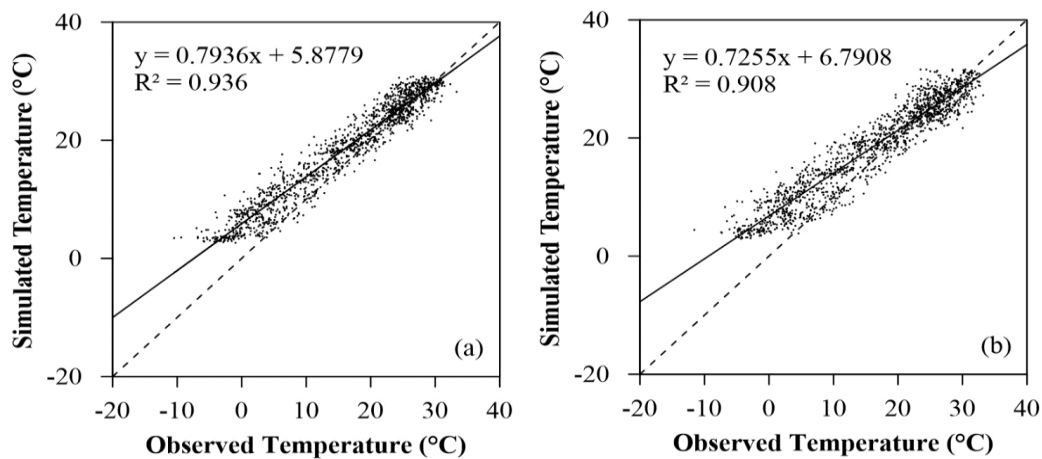


Fig. 5- Scatter plots of observed and simulated values of water surface daily temperature in the validation period of the model (2017-2021) in the north (a) and south (b) of the lake

شکل ۵- نمودار پراکنش مقادیر روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دمای سطح آب در دوره صحت‌سنجی مدل (۲۰۲۱-۲۰۱۷) در شمال (a) و جنوب (b) دریاچه

مقایسه الگوی لایه‌بندی حرارتی در شمال و جنوب دریاچه حاکی از شروع زودتر دوره آمیختگی در جنوب دریاچه (از اوایل دسامبر) است.

### ۳-۵- پاسخ شرایط حرارتی دریاچه به روندهای بلندمدت و اداهت‌های اقلیمی

با توجه به اهمیت سطح دریاچه به عنوان واسط تبادل گرما و جرم بین دریاچه و اتمسفر، رابطه بین روند تغییرات دمای سطح آب و مشخصه‌های اصلی جوی بررسی شد. بر اساس آزمون روند Mann-Kendall، روند افزایشی معنی‌دار ( $p\text{-value} < 0.05$ ) در دمای سالانه هوا در شمال ( $0.062\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) و جنوب ( $0.064\text{ }^{\circ}\text{C year}^{-1}$ ) دریاچه وجود دارد. لذا روند افزایشی دمای سطح آب با روند افزایشی دمای هوا مرتبط است. به‌علاوه، مقادیر شبیه‌سازی شده دمای سطح آب، همبستگی معنی‌داری ( $p\text{-value} < 0.05$ ) با دمای هوا در بخش شمالی ( $r=0.61$ ) و جنوبی ( $r=0.56$ ) دریاچه دارد (شکل‌های ۷ و ۸).

با توجه به آزمون Mann-Kendall، روند معنی‌داری در تابش سالانه خورشیدی وجود ندارد و همبستگی دمای سطح آب با تابش خورشیدی نیز در هر دو بخش شمالی و جنوبی ضعیف و غیر معنی‌دار است. لذا، تابش خورشید، روند افزایشی مشاهده‌شده در دمای سطح آب را تبیین نمی‌کند. همبستگی دمای سطح آب با رطوبت هوا در هر دو بخش شمالی و جنوبی مثبت و معنی‌دار با ضریب همبستگی  $r=0.51$  است. با این وجود روند افزایشی ضعیف اما غیر معنی‌داری در رطوبت هوا (بر حسب فشار بخار هوا) وجود دارد، لذا رطوبت هوا عامل مؤثر در شیب افزایشی دمای سطح آب محسوب نمی‌شود. همبستگی دمای سطح

### ۳-۴- الگوی لایه‌بندی حرارتی در ماه‌های مختلف

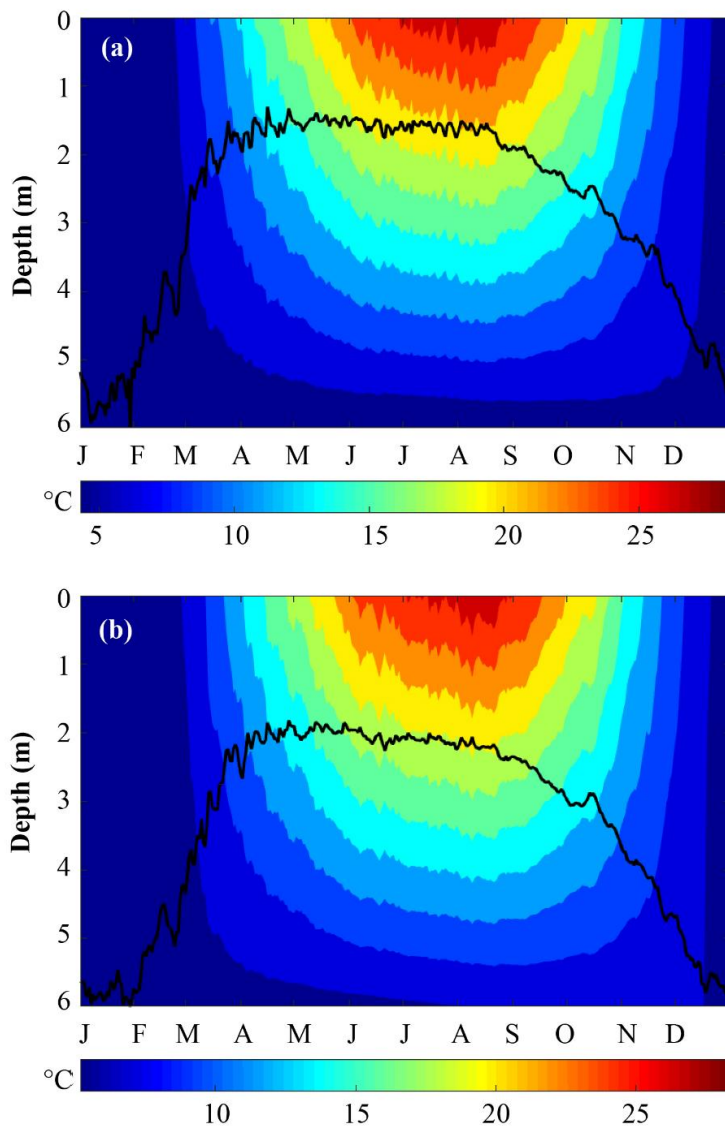
نتایج لایه‌بندی حرارتی مدل‌سازی شده برای شمال و جنوب دریاچه در شکل ۶ نشان داده شده است. لایه‌بندی مدل‌سازی شده دریاچه از نوع تک‌آمیختگی<sup>۱۵</sup> است. در دریاچه‌های تک‌آمیختگی یک بار در سال آمیختگی از بالا به پایین رخ می‌دهد.

این نوع از دریاچه‌ها به دو نوع سرد و گرم تقسیم می‌شوند. آب دریاچه ارومیه هرگز یخ نمی‌زند، لذا از نوع تک‌آمیختگی گرم است و در اغلب ماه‌های سال دارای لایه‌بندی حرارتی است. تفاوت چگالی بین آب‌های گرم سطحی و آب‌های سردتر عمق دریاچه مانع از آمیختگی این نوع از دریاچه‌ها در تابستان می‌شود. در فصل زمستان، آب‌های سطحی سرد می‌شوند و دمایشان به دمای اعماق دریاچه نزدیک می‌شود. لذا، به دلیل عدم لایه‌بندی حرارتی قابل توجه، این دریاچه‌ها در فصل زمستان از بالا به پایین آمیخته می‌شوند. شناسایی و طبقه‌بندی دریاچه‌های تک‌آمیختگی مبتنی بر شکل‌گیری روآب‌لایه<sup>۱۶</sup> (آب گرم سطحی) و زیرآب‌لایه<sup>۱۷</sup> (آب سرد زیرین) است که بیشتر سال با یک لایه گرمایش از هم جدا می‌شوند.

با توجه به شکل ۶a در اواسط ماه دسامبر تا اوایل ماه مارچ یک دوره واژگونی<sup>۱۸</sup> رخ می‌دهد که طی آن آب دریاچه از بالا به پایین آمیخته می‌شود. در این دوره عمق لایه آمیخته (خط ممتد سیاه در شکل ۶) به کف دریاچه نزدیک می‌شود. در فصل تابستان که لایه‌بندی حرارتی وجود دارد، فرایند آمیختگی تنها تحت تاثیر تغییرات روزانه دما رخ می‌دهد و عمق لایه آمیخته به تدریج با گذر زمان افزایش می‌یابد.

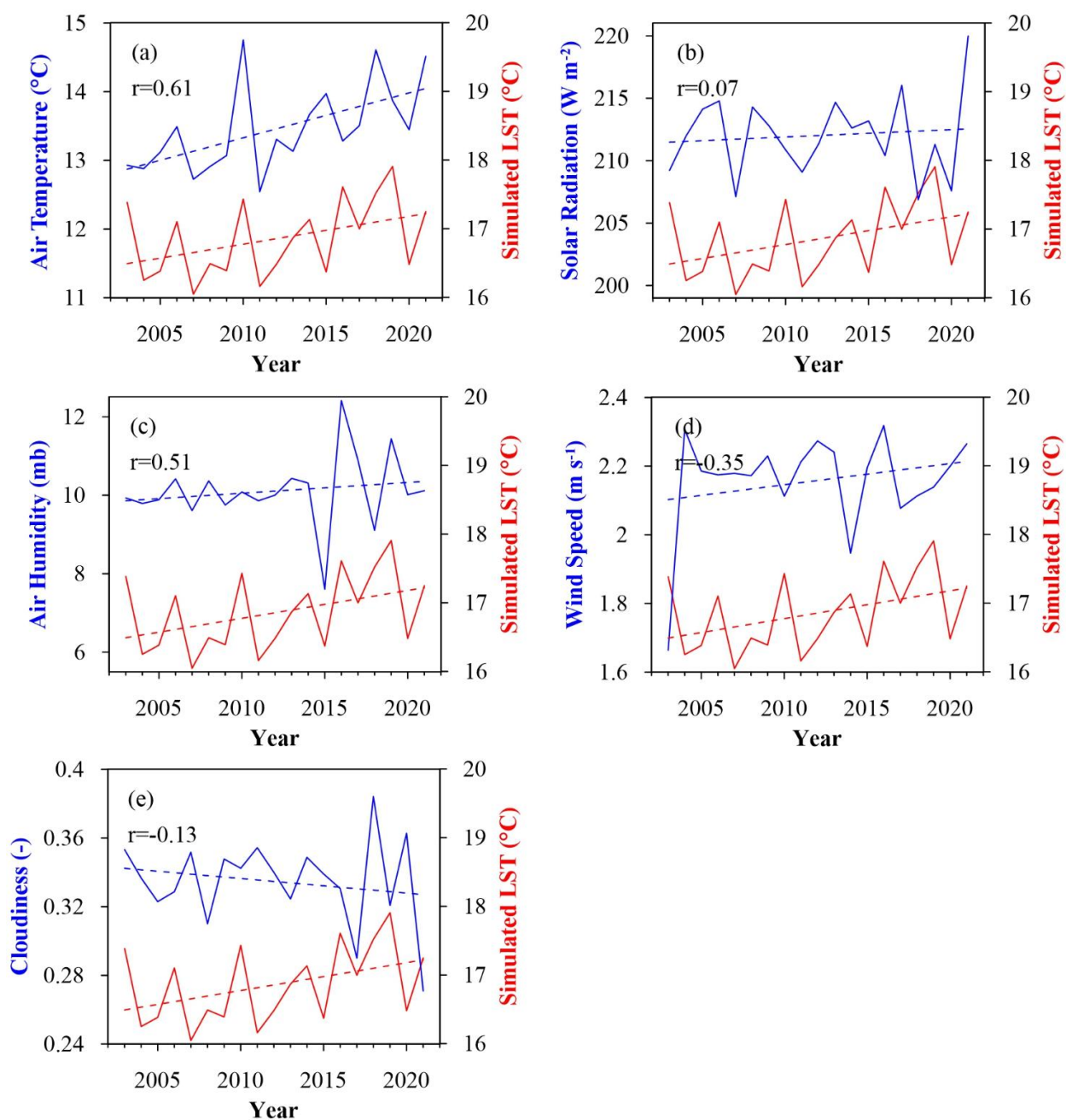
ترتیب  $r = -0.13$  و  $r = -0.08$  است. کاهش ابرناکی سبب افزایش تابش رسیده به سطح آب و افزایش دمای سطح آب می‌شود. با این وجود روند افزایشی ابرناکی از نظر آماری در هر دو بخش غیر معنی‌دار است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که از میان عوامل اقلیمی، عامل دمای هوا مهمترین عامل تاثیرگذار بر روند افزایشی دمای سطح آب بوده است.

آب با سرعت سالانه باد به صورت منفی و معنی‌دار و در بخش شمالی و جنوبی دریاچه ضریب همبستگی به ترتیب  $r = -0.33$  و  $r = -0.35$  است. افزایش سرعت باد باعث افزایش شدت تبخیر و کاهش دمای سطح آب می‌شود. با این وجود روند معنی‌داری در سرعت باد سالانه مشاهده نمی‌شود. لذا روند تغییرات دمای سطح آب ناشی از روند سرعت باد نیست. دمای سطح آب با ابرناکی هوا نیز همبستگی منفی دارد. به طوری که ضریب همبستگی در بخش شمالی و جنوبی به



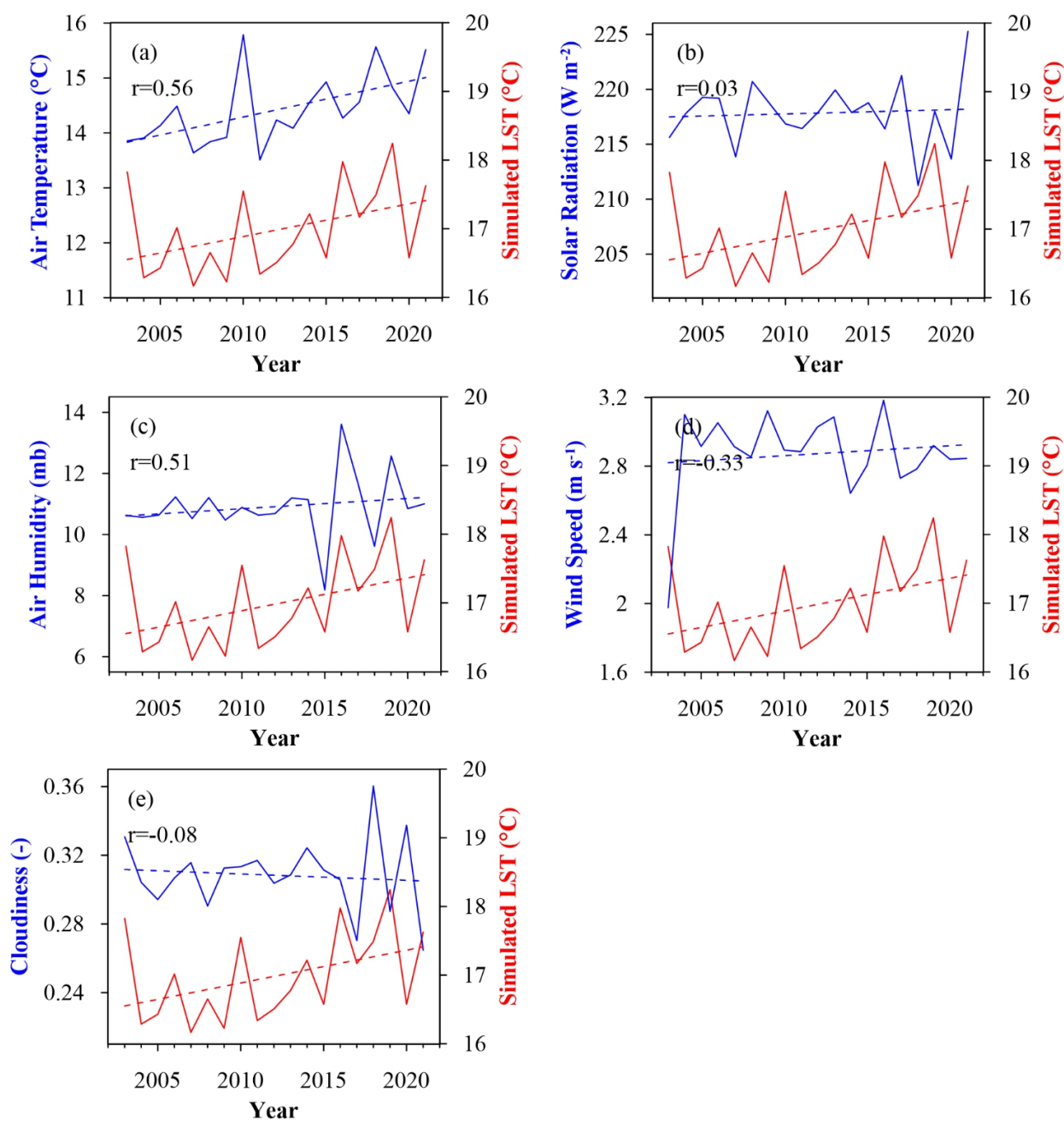
**Fig. 6- Modeled thermal stratification pattern in the north (a) and south (b) of Lake Urmia. The solid black line shows the depth of the mixed layer.**

شکل ۶- الگوی لایه‌بندی حرارتی مدل‌سازی شده در شمال (a) و جنوب (b) دریاچه ارومیه. خط ممتد سیاه، عمق لایه آمیخته را نشان می‌دهد.



**Fig. 7- Annual changes in air temperature (a), solar radiation (b), air humidity (c), wind speed (d), and cloudiness (e) in the north of Lake Urmia and their correlation with the simulated annual average of the lake water surface temperature**

شکل ۷- تغییرات سالانه دمای هوا (a)، تابش خورشیدی (b)، رطوبت هوا (c)، سرعت باد (d) و ابرناکی (e) در شمال دریاچه ارومیه و همبستگی آنها با میانگین سالانه شبیه‌سازی شده دمای سطح آب دریاچه



**Fig. 8- Annual changes in air temperature (a), solar radiation (b), air humidity (c), wind speed (d), and cloudiness (e) in the south of Lake Urmia and their correlation with the simulated annual average of the lake water surface temperature**

شکل ۸- تغییرات سالانه دمای هوا (a)، تابش خورشیدی (b)، رطوبت هوا (c)، سرعت باد (d) و ابرناکی (e) در جنوب دریاچه ارومیه و همبستگی آنها با میانگین سالانه شبیه‌سازی شده دمای سطح آب دریاچه

۴- نتیجه‌گیری  
در مطالعه حاضر، با هدف شبیه‌سازی دمای آب سطح دریاچه ارومیه، بررسی لایه‌بندی حرارتی دریاچه و همچنین بررسی رابطه بین روند تغییرات دمای سطح آب و مشخصه‌های اصلی جوی، از مدل یک‌بعدی

FLake برای یک دوره ۲۱ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۱) استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که:

- در هر دو بخش شمالی و جنوبی، روند افزایشی در دمای سطح آب مشاهده می‌شود و شیب تغییرات در جنوب دریاچه تندتر از شمال دریاچه است. تفاوت غلظت رسوبات و عمق دریاچه در

بخش بیشتری از واریانس دمای سطح آب دریاچه را تبیین می‌کنند. از آنجا که عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های ورودی، پارامترهای مدل و فرضیات مدل می‌توانند خروجی مدل را به شدت تحت تأثیر قرار دهند، بررسی عدم قطعیت‌های ناشی از هر یک از عوامل فوق‌الذکر می‌بایست در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اینکه مدل FLake با فرض لایه‌بندی صرفاً حرارتی، اثر لایه‌بندی شوری را بر اختلاط دریاچه در نظر نمی‌گیرد، پیشنهاد می‌شود از طریق تعدیل معادلات استفاده‌شده در مدل FLake، اثر شوری را پارامتره نمود. علاوه بر این، از آنجا که اثر پوسته‌خنک در محصولات MODIS می‌تواند سبب برآورد کمتر دمای سطح آب توسط سنجنده شود و واسنجی مدل FLake را تحت تأثیر قرار دهد، پیشنهاد می‌شود در صورت دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری‌شده دمای سطح آب، دقت محصولات MODIS بررسی شود. با توجه به توانایی قابل قبول مدل FLake در شبیه‌سازی دمای آب دریاچه، می‌توان از آن برای بررسی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر تبخیر و همچنین لایه‌بندی‌های حرارتی دریاچه ارومیه استفاده نمود.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Temperature Profile
- 2- Freshwater Lake Model
- 3- Mixed Layer
- 4- Self-Similarity
- 5- Land Surface Temperature
- 6- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 7- Light Extinction Coefficient
- 8- Offline
- 9- Thermocline
- 10- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 11- Data Assimilation
- 12- Root Mean Square Error
- 13- Mean Bias Error
- 14- Cool Skin Effect
- 15- Monomictic
- 16- Epilimnion
- 17- Hypolimnion
- 18- Overturn Period

بخش شمالی و جنوبی بر میزان نفوذ نور در آب و همچنین انعکاس نور تأثیر گذاشته و میزان انرژی دریافتی توسط آب را در شمال و جنوب دریاچه متفاوت می‌سازد (Rose et al., 2016; Noori et al., 2022).

- در تأیید مطالعات پیشین در سایر مناطق جهان (مانند، Kheyrollah Pour et al., 2012; Su et al., 2019; Huang et al., 2019) مدل FLake به طور نسبتاً مطلوبی قادر به شبیه‌سازی نوسانات دمای سطح آب است. با این وجود مدل در هر دو بخش، اریبی گرم نشان می‌دهد و به طور کلی مدل در شبیه‌سازی دمای ماه‌های سرد سال دقت کمتری نسبت به ماه‌های گرم سال دارد.
- در تأیید مطالعه (Layden et al. (2016)، تنظیم پارامتر ضریب خاموشی به تنهایی نقش مهمی در واسنجی مدل FLake دارد. همچنین، با توجه به اینکه ضریب خاموشی نور در جنوب دریاچه کمتر است، لذا در تأیید مطالعه (Hemmati et al. (2021) در جنوب دریاچه به دلیل رسوبات کمتر، شفافیت آب از شمال دریاچه بیشتر است.
- لایه‌بندی مدل‌سازی‌شده دریاچه از نوع تک‌آمیختگی گرم است و در تأیید مطالعه (Alipour (2006)، در بهار و تابستان آب سطح دریاچه گرم‌تر از عمق دریاچه بوده و این موضوع مانع آمیختگی و حرکت عمودی آب از سطح به طرف عمق دریاچه می‌شود. مقایسه الگوی لایه‌بندی حرارتی در شمال و جنوب دریاچه حاکی از شروع زودتر دوره آمیختگی در جنوب دریاچه (از اوایل دسامبر) است.
- بررسی رابطه بین روند تغییرات دمای سطح آب و مشخصه‌های اصلی جوی نشان داد که دمای هوا و رطوبت هوا بیشترین واریانس موجود در دمای سطح آب را تبیین می‌کنند. اما روند افزایشی دمای سطح آب تنها با روند افزایشی دمای هوا مرتبط است.
- Bernus et al. (2021) با تمرکز بر پارامترهای مهم مدل FLake شامل عمق دریاچه، آلبیدو، ضریب خاموشی نور آب، برف و یخ و ضریب افت فاکتور شکل گرمایش، به بررسی عدم قطعیت‌های ناشی از آنها پرداختند و نشان دادند که عمق دریاچه و ضریب خاموشی نور

## ۵- مراجع

- Adrian R, O'Reilly CM, Zagarese H, Baines SB, Hessen DO, Keller W, Livingstone DM, Sommaruga R, Straile D, Van Donk E, Weyhenmeyer GA (2009) Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54(6part2):2283-2297
- Alipour S (2006) Hydrogeochemistry of seasonal variation of Urmia Salt Lake, Iran. *Saline Systems* 2:1-19
- Alizadeh-Choobari O, Ahmadi-Givi F, Mirzaei N, Owlad E (2016) Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. *International Journal of Climatology* 36(13):4276-4286
- Armengol J, Caputo L, Comerma M, Feijoó C, García JC, Marcé R, Navarro E, Ordoñez J (2003) Sau reservoir's light climate: Relationships between Secchi depth and light extinction coefficient. *Limnetica* 22(1-2):195-210
- Bernus A, Ottlé C (2022) Modeling subgrid lake energy balance in ORCHIDEE terrestrial scheme using the FLake Lake model. *Geoscientific Model Development* 15(10):4275-4295
- Bernus A, Ottlé C, Raoult N (2021) Variance based sensitivity analysis of FLake Lake model for global land surface modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126(8):e2019JD031928
- Dadashzadeh M, Parsa J, Mojtahedi A (2020) Spatiotemporal evaluation of water temperature distribution in north-south parts of Lake Urmia using meteorological information and MIKE3 hydrodynamic model. *Iranian Water Researches Journal* 14(3):133-144
- Delju AH, Ceylan A, Pigué E, Rebetez M (2013) Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 111:285-296
- Fathian F, Morid S, Kahya E (2015) Identification of trends in hydrological and climatic variables in Urmia Lake basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 119:443-464
- Ghaheiri M, Baghal-Vayjooee MH, Naziri J (1999) Lake Urmia, Iran: A summary review. *International Journal of Salt Lake Research* 8:19-22
- Golosov S, Zverev I, Shipunova E, Terzhevik A (2018) Modified parameterization of the vertical water temperature profile in the FLake model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 70(1):1-7
- Hejabi S, Rezaeian H, Vazifekhah MA (2022) Evaluation of effective meteorological variables on reference evapotranspiration trend in Lake Urmia Basin. *Irrigation and Water Engineering* 12(4):310-333 (In Persian)
- Hemmati M, Ahmadi H, Hamidi SA, Naderkhanloo V (2021) Environmental effects of the causeway on water and salinity balance in Lake Urmia. *Regional Studies in Marine Science* 44:101756
- Huang A, Lazhu, Wang J, Dai Y, Yang K, Wei N, Wen L, Wu Y, Zhu X, Zhang X, Cai S (2019) Evaluating and improving the performance of three 1-D Lake models in a large deep Lake of the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124(6):3143-3167
- Huang L, Wang X, Sang Y, Tang S, Jin L, Yang H., Ottlé C, Bernus, A, Wang S, Wang C, Zhang Y (2021) Optimizing lake surface water temperature simulations over large lakes in China with FLake model. *Earth and Space Science* 8(8):e2021EA001737
- Karbassi A, Bidhendi GN, Pejman A, Bidhendi ME (2010) Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia. *Journal of Great Lakes Research* 36(3):419-424
- Kendall MG (1948) Rank correlation methods. Griffin, Oxford, UK.
- Kheyrollah Pour H, Duguay CR, Martynov A, Brown LC (2012) Simulation of surface temperature and ice cover of large northern lakes with 1-D models: A comparison with MODIS satellite data and in situ measurements. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 64(1):17614
- Kitaigorodskii SA, Miropolsky YZ (1970) On theory of open ocean active layer. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Fizika Atmosfery i Okeana* 6(2):178
- Langer M, Westermann S, Boike J (2010) Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of wet polygonal tundra in Siberia-implications for MODIS LST based permafrost monitoring. *Remote Sensing of Environment* 114(9):2059-2069
- Layden A, MacCallum SN, Merchant CJ (2016) Determining lake surface water temperatures worldwide using a tuned one-dimensional lake model (FLake, v1). *Geoscientific Model Development* 9(6):2167-2189
- Le Moigne P, Colin J, Decharme B (2016) Impact of lake surface temperatures simulated by the FLake scheme in the CNRM-CM5 climate model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 68(1):31274
- Livingstone DM (2003) Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate

- central European lake. *Climatic Change* 57(1-2):205-225
- Livingstone DM (2008) A change of climate provokes a change of paradigm: taking leave of two tacit assumptions about physical lake forcing. *International Review of Hydrobiology* 93(4-5):404-414
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 245-259
- Mironov DV (2008) Parameterization of lakes in numerical weather prediction: Description of a lake model. *Deutscher Wetter Dienst, Technical Report No. 11*, 44 p
- Mohammadi M, Safaie A, Nejatian A, Irajizad A, Tajrishy M (2022) Lake Urmia water evaporation suppression using self-assembled coating: case study of pools near the lake. *Journal of Hydrologic Engineering* 27(3):05022001
- Noori R, Bateni SM, Saari M, Almazroui M, Torabi Haghighi A (2022) Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: Results from approximately six decades of measurements (1964–2020). *Earth and Space Science* 9(2):e2021EA001973
- Parsinejad M, Rosenberg DE, Ghale YAG, Khazaei B, Null SE, Raja O, Safaie A, Sima S, Sorooshian A, Wurtsbaugh WA (2022) 40-years of Lake Urmia restoration research: Review, synthesis and next steps. *Science of The Total Environment* 832:155055
- Rose KC, Winslow LA, Read JS, Hansen GJ (2016) Climate-induced warming of lakes can be either amplified or suppressed by trends in water clarity. *Limnology and Oceanography Letters* 1(1):44–53
- Schneider P, Hook SJ, Radocinski RG, Corlett GK, Hulley GC, Schladow SG, Steissberg TE (2009) Satellite observations indicate rapid warming trend for lakes in California and Nevada. *Geophysical Research Letters* 36:L22402
- Sima S, Ahmadalipour A, Tajrishy M (2013) Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sensing of Environment* 136:374-385
- Sima S, Rosenberg DE, Wurtsbaugh WA, Null SE, Kettenring KM (2021) Managing Lake Urmia, Iran for diverse restoration objectives: Moving beyond a uniform target lake level. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 35:100812
- Su D, Hu X, Wen L, Lyu S, Gao X, Zhao L, ... & Kirillin G (2019) Numerical study on the response of the largest lake in China to climate change. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(4):2093-2109
- Swapna M, Nayak RK, Santhoshi T, Sai MS, Rajashekhar SS (2022) INSAT-3D SST and its diurnal variability assessment using in-situ and MODIS observations. *Progress in Oceanography* 201:102739
- 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. *Geoscientific Model Development* 7:317–337
- ULRP (2015) A Brief Report: Causes of dryness of Lake Urmia and its possible threats. *Urmia Lake Restoration Program, Tehran, Iran*
- Wang X, Shi K, Zhang Y, Qin B, Zhang Y, Wang W, Woolway RI, Piao S, Jeppesen E (2023) Climate change drives rapid warming and increasing heatwaves of lakes. *Science Bulletin* 68(14):1574-1584
- Wright DM, Posselt DJ, Steiner AL (2013) Sensitivity of lake-effect snowfall to lake ice cover and temperature in the Great Lakes region. *Monthly Weather Review* 141(2):670-689
- Zdorovenнова G, Palshin N, Golosov S, Efremova T, Belashev B, Bogdanov S, Fedorova I, Zverev I, Zdorovennov R, Terzhevik A (2021) Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes. *Water* 13(17):2435
- Zhou X, Yao X, Wang B (2023) Understanding two key processes associated with alpine lake ice phenology using a coupled atmosphere-lake model. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 46:101334