

## ارزیابی زمانی و مکانی توزیع دمای آب بخش‌های شمالی - جنوبی دریاچه ارومیه با استفاده از اطلاعات هواشناسی و مدل هیدرودینامیکی MIKE3

مهران داداش‌زاده<sup>۱</sup>، جواد پارسا<sup>۲\*</sup> و علیرضا مجتهدی<sup>۳</sup>

### چکیده

دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و دومین دریاچه آب شور جهان است. این دریاچه، به دلیل اهمیت محیط‌زیستی به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره در مجامع جهانی به ثبت رسیده و مورد حمایت بین‌المللی قرار گرفته است؛ با این وجود، این دریاچه در سال‌های اخیر با انواع مخاطرات طبیعی و انسانی مواجه بوده و تغییرات چشمگیری در وضعیت هیدرودینامیکی طبیعی آن به وجود آمده است؛ از این رو، مطالعه الگوی هیدرودینامیکی آن امری ضروری محسوب می‌شود. در این مطالعه، با هدف بررسی وضعیت هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه، به شبیه‌سازی تغییرات دمای آب در این دریاچه پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی بررسی شدند. به دلیل دقت بالای مقادیر به دست آمده، از داده‌های مدل ECMWF در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. علاوه بر این، مدل MIKE3 برای شبیه‌سازی عددی معرفی و چگونگی برپایی مدل برای دریاچه ارومیه تشریح شده است. در ادامه، نتایج مدل بر اساس داده‌های ماهواره‌ای صحت‌سنجی شد که ارزیابی‌ها حاکی از تطابق خوب نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری بود. همچنین تأثیر وجود میان‌گذر در توزیع زمانی و مکانی دمای آب دریاچه بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار دمای آب دریاچه در دو حالت با و بدون میان‌گذر تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشت و تبادل دما بین شمال و جنوب دریاچه در دو حالت انجام می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع دما، دریاچه ارومیه، داده‌های ماهواره‌ای، مدل ECMWF، مدل MIKE.

**ارجاع:** داداش‌زاده م.، پارسا ج. و مجتهدی ع. ۱۳۹۹. ارزیابی زمانی و مکانی توزیع دمای آب بخش‌های شمالی - جنوبی دریاچه ارومیه با استفاده از اطلاعات هواشناسی و مدل هیدرودینامیکی MIKE3. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۱۳۳-۱۴۴.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه‌های دریایی، دانشگاه تبریز.

1- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [jparsa@tabrizu.ac.ir](mailto:jparsa@tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲

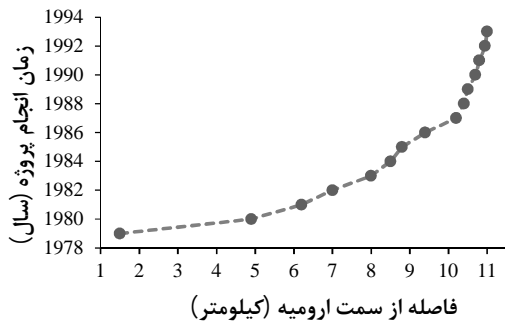
## مقدمه

دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران و میان دو استان آذربایجان شرقی و غربی واقع شده و بزرگ‌ترین و شورترین دریاچه دائمی داخل ایران است. این دریاچه در سال ۱۳۵۲ با مصوبه شورای عالی حفاظت محیط‌زیست به‌عنوان پارک ملی و در سال ۱۳۵۴ از سوی کنوانسیون جهانی تالاب‌ها (کنوانسیون رامسر) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تالاب‌های جهانی به ثبت رسید. تالاب بین‌المللی دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر، با انواع بلایای طبیعی و انسانی روبه‌رو بوده و بخش عظیمی از مساحت خود را از دست داده است. در مجامع مختلف نظرات متفاوتی درباره علت خشک شدن این اکوسیستم منحصربه‌فرد مطرح است. از جمله علل خشک شدن دریاچه، می‌توان به افزایش مصرف آب به خصوص در بخش کشاورزی، توسعه سازه‌های ذخیره آب در حوضه دریاچه، تغییرات اقلیمی و گرم شدن هوا و خشک‌سالی اشاره کرد (فرامرزی، ۲۰۱۲؛ شادکام و همکاران، ۲۰۱۶؛ قشقایی و نوذری، ۲۰۱۸ و حمیدی‌رزی و همکاران، ۲۰۱۹). از طرفی، با احداث میان‌گذر در سال ۱۳۵۸، دریاچه به دو بخش شمالی (با سطحی حدود ۳۸ درصد از کل مساحت دریاچه) و جنوبی (با سطحی حدود ۶۲ درصد مساحت کل دریاچه) تقسیم شده و تبادل جریان بین دو بخش، تنها از طریق آب‌گذری به طول ۱۲۵۰ متر انجام می‌شود (شرکت طرح نواندیشان، ۱۳۸۳). میان‌گذر دریاچه ارومیه در واقع جاده‌ای به طول حدود ۱۴ کیلومتر است که از میان دریاچه، بین دامنه کوه زنبیل در ساحل غربی و شبه جزیره اسلامی در ساحل شرقی دریاچه ارومیه می‌گذرد. این جاده به سه بخش عمده تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از: یک جاده ۱۱ کیلومتری از ساحل غربی و یک جاده ۳ کیلومتری از ساحل شرقی که سنگریزی و خاکریزی شده و یک قطعه ۱/۵ کیلومتری از بخش میانی میان‌گذر که احداث پل بر روی آن صورت گرفته است. در شکل ۱ پیشرفت زمانی احداث میان‌گذر در دریاچه نمایش داده شده است. با این تفاسیر، میان‌گذر احداثی می‌تواند اثر قابل توجهی بر الگوی جریان دریاچه داشته باشد و به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر خشک شدن آن مطرح شده است؛ از این‌رو، با توجه به تغییرات اعمال شده در وضعیت طبیعی دریاچه در طی سال‌های گذشته، بررسی دقیق وضعیت هیدرودینامیک و کیفیت آب آن امری حیاتی است؛ به

همین منظور، در سال‌های اخیر مطالعاتی در رابطه با بررسی الگوی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه و همچنین اندازه‌گیری‌های مربوطه انجام شده است. توفیقی و همکاران (۱۳۸۵) به شبیه‌سازی عددی دو بعدی میدان جریان در دریاچه ارومیه پرداختند. این پژوهشگران با اعمال آثار وزش باد (اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ارومیه)، رودخانه‌های ورودی، بارش و تبخیر و با استفاده از مدل MIKE21 به مدل‌سازی عددی جریان در دریاچه ارومیه پرداختند. زین‌الدینی و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی با استفاده از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی MIKE به بررسی تأثیر احداث میان‌گذر دریاچه ارومیه روی رژیم جریان و شوری آب این دریاچه از طریق مدل‌سازی عددی پرداختند. همچنین در پژوهشی دیگر، زین‌الدینی و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر امواج ناشی از باد بر الگوی جریان و شوری دریاچه ارومیه را با استفاده از مدل عددی MIKE3 ارزیابی قرار کردند. پیرانی (۱۳۹۵) به بررسی اثر میان‌گذر بر هیدرودینامیک و توزیع شوری در دریاچه ارومیه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی سه‌بعدی MIKE3-FM پرداخت. نتایج این پژوهشگر نشان داد که میان‌گذر تأثیر چندانی بر الگوهای جریان در بخش شمالی و جنوبی دریاچه ندارد؛ اما الگوی جریان در میانه دریاچه (محل احداث میان‌گذر) به شدت تغییر یافته است. سودی و همکاران (۲۰۱۹) نیز تأثیرات دوره خشک‌سالی بر هیدرودینامیک و توزیع شوری دریاچه را با استفاده از مدل سه‌بعدی MIKE3-FM بررسی کردند. نتایج مطالعه حاکی از قابل اجرا بودن مدل برای هر دوره زمانی و در هر دو وضعیت عادی و خشک‌سالی است. مطالعات مدل‌سازی دمای آب با استفاده از مدل هیدرودینامیکی MIKE21 را ماهانتی و همکاران (۲۰۱۶) برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و تغییرات دمای آب در تالاب چلیکا (هند) انجام دادند. لی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی دمای آب در دریاچه پویانگ چین با استفاده از مدل دو بعدی MIKE21 پرداختند. در این پژوهش تأثیر وضعیت آب-هواشناسی بر دمای آب دریاچه پویانگ با استفاده از مدل‌سازی هیدرودینامیکی بررسی شد.

اطلاعات و داده‌های هواشناسی از جمله ورودی‌های مورد نیاز و اثرگذار در شبیه‌سازی تغییرات دمای آب دریاچه هستند. مرجع این اطلاعات می‌تواند اندازه‌گیری‌های

دمای آب در این دریاچه با استفاده از قابلیت‌های مدل MIKE3 پرداخته شده است و نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای مقایسه شده‌اند. گفتنی است بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون در کشور چنین ارزیابی انجام نشده است.



شکل ۱- پیشرفت زمانی احداث خاکریز میان‌گذر، بازوی غربی (شرکت صدرا، ۱۳۸۳)

## مواد و روش‌ها

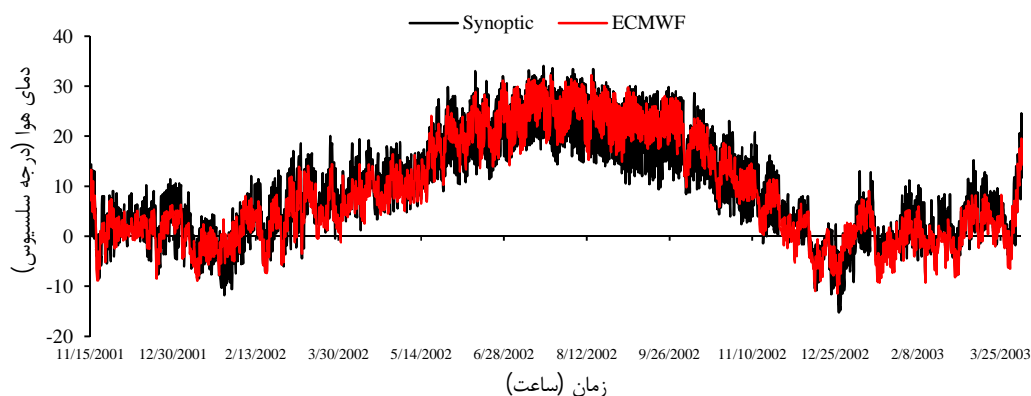
### داده‌های ورودی

در اغلب مدل‌سازی‌های هیدرودینامیک، تنها به شبیه‌سازی مشخصات جریان بسنده می‌شود و به شبیه‌سازی تغییرات دما پرداخته نمی‌شود؛ با وجود این، در مطالعه حاضر شبیه‌سازی تغییرات دمای آب در دریاچه ارومیه مدنظر قرار داده شده است. بهره‌گیری از داده‌ها و اطلاعات درست و موثق برای ورودی‌های مدل و نیز برای صحت‌سنجی نتایج آن، لازمه انجام صحیح شبیه‌سازی‌های عددی هیدرودینامیکی است. برای شبیه‌سازی تغییرات دما در دریاچه ارومیه، این اطلاعات شامل دمای هوا، رطوبت نسبی و ضریب روشنایی هوا بر روی سطح دریاچه است. ایستگاه‌های هواشناسی ثابت اطراف دریاچه ارومیه علاوه بر داده‌های باد، فشار هوا، تبخیر و بارش، به ثبت داده‌های دمای هوا، رطوبت نسبی و ... نیز می‌پردازند. مرجع دیگر داده‌های دمای هوا و رطوبت نسبی، خروجی مدل‌های هواشناسی مانند ECMWF است. اگرچه داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود بوده است و انتظار می‌رود به واقعیت نزدیک‌تر باشند، ثبت داده‌های این ایستگاه‌ها به صورت نقطه‌ای و در خشکی و ممکن است به کل دامنه محاسباتی تعمیم‌پذیر نباشند؛ بنابراین، ترجیح بر این است که از داده‌هایی که برای کل دامنه محاسباتی موجود است

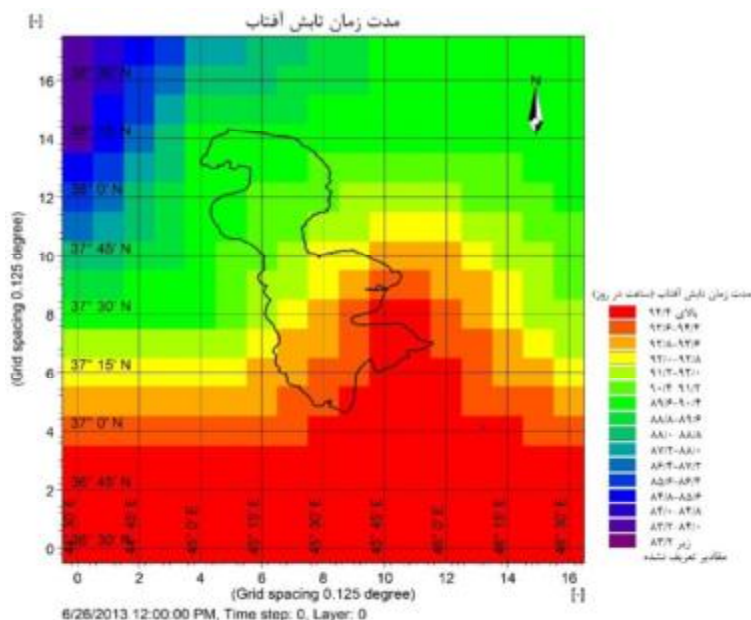
ایستگاه‌های هواشناسی سازمان هواشناسی کشور، مشاهدات ماهواره‌ای یا نتایج حاصل از مدل‌های هواشناسی باشد. برای مدنظر قرار دادن تأثیر تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی روی وضعیت هیدرودینامیک دریاچه، استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی چندان مناسب نیست. از طرفی، اطلاعات باد ماهواره‌ای نیز در شبکه‌بندی منظم زمانی و مکانی در منطقه دریاچه ارومیه موجود نیست؛ بنابراین مناسب‌ترین داده موجود در این زمینه برای استفاده در شبیه‌سازی‌ها، استفاده از خروجی مدل‌های هواشناسی است. این اطلاعات به صورت میدان باد سطحی دوبعدی وجود دارند؛ از جمله داده‌های در دسترس مربوط به مدل‌های اتمسفری جهانی، می‌توان داده‌های ارائه شده توسط ECMWF<sup>1</sup> (دی و همکاران، ۲۰۱۱) را نام برد. مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت وضع هوا (ECMWF)، پیش‌بینی‌های هواشناسی جهانی را به صورت میان‌مدت تا ۱۵ روز و پیش‌بینی‌های فصلی تا ۱۲ ماه با استفاده از یک مدل عددی ارائه می‌دهد (<http://ecmwf.int>). در سال‌های اخیر، مطالعاتی با استفاده از این مدل در رابطه با دریاچه ارومیه انجام پذیرفته است. تانارت و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی روند بارندگی و دما بر اساس اطلاعات هشت پایگاه از جمله ECMWF در مناطق مدیترانه و خاورمیانه پرداختند. نتایج حاکی از این بود که در اکثر موارد، همبستگی اطلاعات پایگاه‌های مختلف مناسب است و تمام پایگاه‌ها روند افزایشی در دما و کاهش در بارش را در منطقه نشان دادند. جلیلی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیرات انواع گردش آب و هوایی بر تراز آب دریاچه ارومیه را در چند دهه گذشته به واسطه اقلیم محلی و منطقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش، ایشان داده‌های به دست آمده از مدل ECMWF را با اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در حوضه دریاچه ارومیه مقایسه کردند. مقایسه‌ها نشان داد که نتایج مدل، نمایش مناسبی از اقلیم منطقه‌ای را ارائه می‌دهد که در توصیف آثار تحمیلی اقلیمی بر هیدرولوژی دریاچه سودمند است. سبزه‌ای و همکاران (۲۰۱۷) با هدف تعیین برخی از عوامل خشک‌سالی دریاچه ارومیه، از داده‌های ECMWF برای نشان دادن میزان بخار آب موجود در جو دریاچه استفاده کردند. در مطالعه حاضر، با هدف بررسی وضعیت هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه به شبیه‌سازی تغییرات

نیز به نتایج مشابهی منجر شده است. پارامتر دیگری که به‌عنوان ورودی مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات دمای آب محسوب می‌شود، پارامتر ضریب روشنایی هوا است که بر حسب درصد بیان می‌شود. این پارامتر ترکیبی از اثر ابرناکی و آفتابی بودن هوا را به مدل معرفی می‌کند. مقدار این ضریب نیز از مدل هواشناسی ECMWF به دست می‌آید. در شکل ۳ نمونه‌ای از توزیع مکانی این ضریب در محدوده مورد مطالعه نمایش داده شده است.

(مانند ECMWF) استفاده شود. برای ارزیابی دقت این داده‌ها، مقایسه‌ای میان داده‌های دمای هوای ثبت شده در ایستگاه هواشناسی ارومیه و داده‌های مدل هواشناسی ECMWF انجام و نمونه‌ای از این مقایسه در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مقادیر دمای هوای ECMWF از دقت بسیار خوبی برخوردار است؛ و بنابراین به دلایل تشریح شده در فوق، برای داده‌های دمای هوای مورد نیاز در شبیه‌سازی‌ها، از داده‌های مدل ECMWF استفاده می‌شود. مقایسه مقادیر رطوبت نسبی



شکل ۲- مقایسه‌ای بین داده‌های دمای هوای ثبت شده در ایستگاه هواشناسی ارومیه و داده‌های مدل هواشناسی ECMWF



شکل ۳- نمونه‌ای از توزیع مکانی ضریب روشنایی هوا در محدوده دریاچه ارومیه

هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار، حاوی مدل‌های شبیه‌سازی قابل اطمینان و رایج در حوزه هیدرودینامیک دریاها و سواحل بوده و دارای

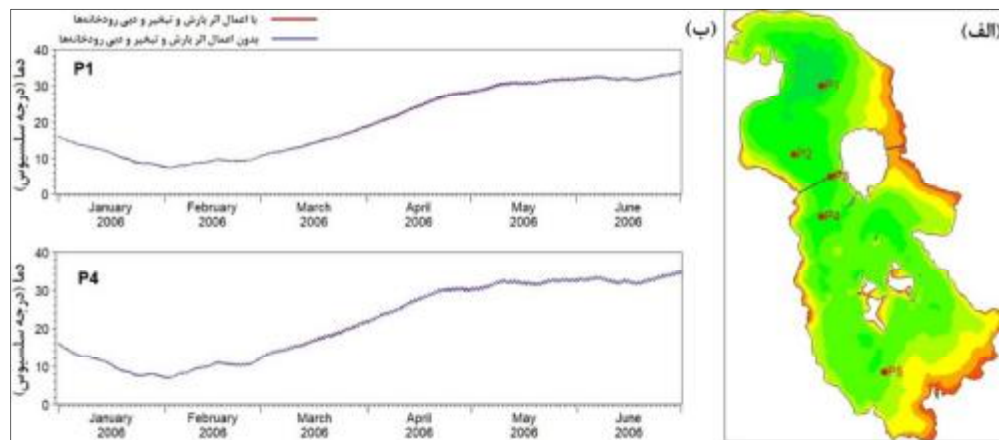
### برپایه مدل

در این مطالعه، از مدل جریان MIKE3 برای انجام شبیه‌سازی تغییرات دمای آب و ارزیابی وضعیت

از آنجا که دما و رطوبت نسبی هوا به صورت ورودی به مدل داده می‌شوند، آثار بارش و تبخیر به صورت غیرمستقیم در معادلات انتقال حرارت دیده می‌شود؛ از این رو انتظار می‌رود اعمال یا عدم اعمال بارش و تبخیر در مدل، تنها بر بیلان آبی و تراز سطح آب دریاچه اثرگذار باشد و تأثیر مستقیمی روی نتایج دمای آب نداشته باشد. از سوی دیگر، آب ورودی از رودخانه‌ها می‌تواند دمایی متفاوت از دریاچه داشته باشد و سبب تغییر دمای موضعی در محل ورودی رودخانه‌ها شود. اگرچه در مدل MIKE امکان اعمال دمای آب رودخانه‌ها به مدل وجود دارد، به دلیل نبود اندازه‌گیری دمای آب یا در دسترس نبودن این داده‌ها برای رودخانه‌های ورودی به دریاچه، امکان شبیه‌سازی آن وجود ندارد؛ از این رو، عملاً دمای ورودی رودخانه‌ها برابر دمای آب دریاچه در محل ورودی رودخانه‌ها در نظر گرفته می‌شود. انتظار می‌رود اعمال و یا عدم اعمال دبی رودخانه‌ها نیز اثری روی تغییرات دمای آب در دریاچه نداشته باشد. برای بررسی این موضوع، دو مدل، یکی با در نظر گرفتن اثر بارش، تبخیر و دبی رودخانه‌ها و دیگری بدون در نظر گرفتن این عوامل اجرا و دمای آب در این دو مدل را با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۴- الف موقعیت نقاطی که در آن نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده، نشان داده شده است. مقایسه نتایج دمای آب خروجی مدل در نقاط P1 و P4 را برای حالت وجود یا عدم وجود اثر بارش، تبخیر و دبی رودخانه‌ها نیز در شکل ۴- ب آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر دمای آب برای دو حالت تقریباً با هم برابر است.

قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی بالایی در زمینه مدل کردن پدیده‌های مربوط به خورها، دریاچه‌ها، نواحی کم‌عمق ساحلی، خلیج‌ها و دریاهاست (DHI, 2011). در فرآیند مدل‌سازی، شبیه‌سازی جریان به صورت هم‌زمان با مدل انتقال حرارت انجام گرفته و دربرگیرنده تمام شرایط هیدرودینامیکی دریاچه است. تغییرات دمای هوا در طی روز و شب و نیز تغییرات بلندمدت و فصلی دمای هوا در منطقه روی دمای سطح آب دریاچه اثرگذار است. در مدل هیدرودینامیک MIKE، برای شبیه‌سازی دمای آب و بررسی آثار آن روی هیدرودینامیک دریاچه، چگالی به‌عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شده است و معادلات انتقال حرارت در هر گام زمانی حل می‌شود. نیروهای حاکم بر معادلات هیدرودینامیک شامل مواردی از جمله باد، فشار هوا، جزر و مد، موج و نیروی کوریولیس هستند. نیروهای حاکم بر معادلات انتقال - انتشار حرارت ماهیتی متفاوت دارند و شامل دمای هوا، رطوبت نسبی هوا و تابش خورشید هستند. علاوه بر این موارد، پارامترهایی نیز باید به مدل معرفی شوند که در حقیقت ضرایب حل معادلات عددی انتقال - انتشار حرارت هستند. این پارامترها شامل ضریب پخشیدگی افقی و قائم اند که از روابط ویسکوزیته گردابه‌ای استفاده می‌کنند. همچنین شرط مرزی گردایان حرارتی صفر روی مرزها در نظر گرفته شد و تمامی پارامترهای تبادل حرارتی با محیط نیز در نظر گرفته شده‌اند.

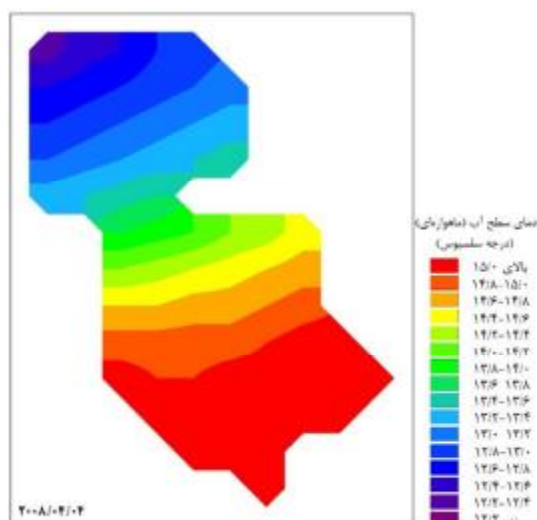
مواردی مانند بارش روی سطح دریاچه و تبخیر از آن به‌طور مستقیم در معادلات انتقال حرارت نقشی ندارند و در حالت طبیعی روی دما و رطوبت هوا اثرگذارند؛ بنابراین



شکل ۴- الف) موقعیت نقاطی که در آن نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است، ب) مقایسه نتایج دمای آب جریان خروجی مدل در نقاط P1 و P4 برای مدل‌های با و بدون اعمال اثر بارش و تبخیر و دبی رودخانه‌ها

### صحت‌سنجی مدل

برای صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی دمای سطح آب، از داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده است. این اطلاعات شامل مجموعه‌ای از اطلاعات دمای سطح آب با درشت‌نمایی بالا<sup>۱</sup> (GHRSSST) است. در این مجموعه با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی دوبعدی متغیر چند مقیاسه<sup>۲</sup>، داده‌های جهانی دمای سطح آب تولید می‌شوند. این داده‌های دمای سطح آب بر اساس داده‌های ماهواره‌های مختلف با حس‌گرهای متعدد (مانند AVHRR، AATSR، SEVIRI، AMSRE، TMI، MODIS، GOES، MTSAT-1R و ...) به دست آمده‌اند. این مجموعه شامل یک برداشت در هر روز است. شکل ۵ مختص به نمونه‌ای از برداشت این داده‌ها در یک گام زمانی خاص روی سطح دریاچه است.



شکل ۵ - نمونه‌ای از برداشت داده‌های ماهواره‌ای GHRSSST در یک گام زمانی خاص روی سطح دریاچه

### نتایج و بحث

#### ارزیابی نتایج مدل‌سازی دمای آب دریاچه

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، برای شبیه‌سازی تغییرات دما در دریاچه ارومیه، از اطلاعات دمای هوا، رطوبت نسبی و ضریب روشنایی هوای ECMWF استفاده شد. تغییرات دمای هوا روی دریاچه هم در طی روز و شب وجود داشته است و هم تغییرات بلندمدت و فصلی دمای

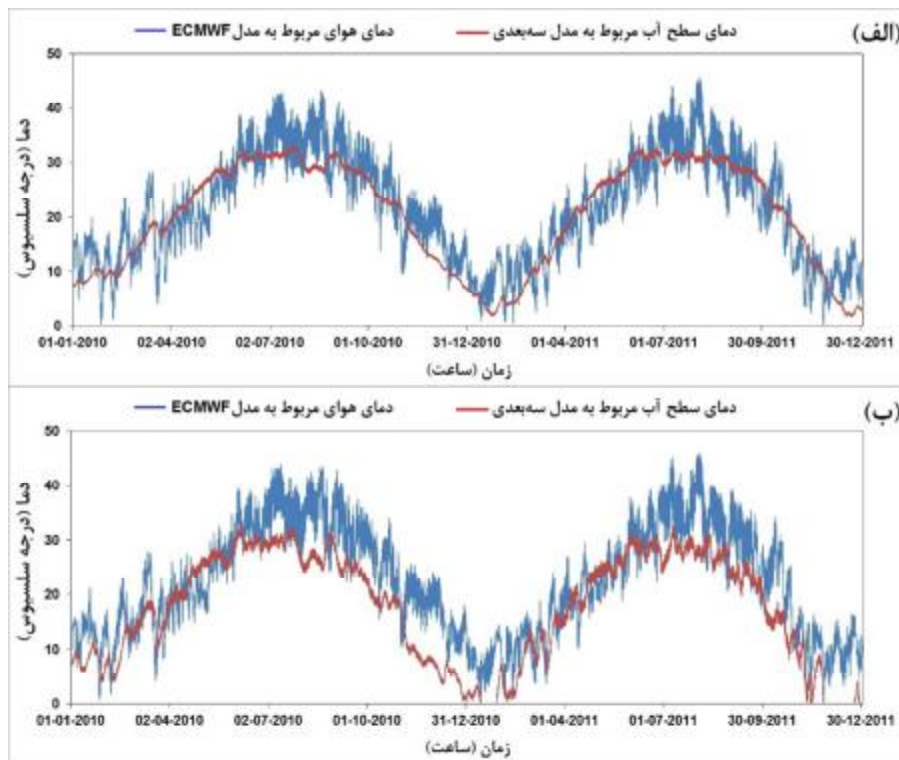
هوا در منطقه انجام می‌شود. در مقیاس روزانه، در فصل بهار و تابستان بعضاً تا بیش از ۱۵ درجه اختلاف دمای هوا میان شب و روز مشاهده می‌شود که مقداری قابل توجه است. در مقیاس فصلی نیز دمای هوا از کمتر از حداقل ۱۵- درجه در فصل زمستان به بیش از حداکثر ۳۵ سلسیوس در تابستان می‌رسد.

مقایسه سری زمانی داده‌های دمای هوای ورودی مدل و دمای سطح آب خروجی از آن برای دو سال نمونه (۲۰۱۰ و ۲۰۱۱) و برای دو نقطه در شمال و جنوب دریاچه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، تغییرات شدید دمای هوا در طی روز و شب اثر کمی روی تغییرات دمای آب دارد و بیش از ۱۵ سلسیوس اختلاف دمای هوا میان شب و روز به نزدیک به ۱/۵ سلسیوس اختلاف دمای آب میان شب و روز منجر شده است. علاوه بر این، تغییرات شدید ماهانه تا نزدیک به ۲۰ سلسیوس دمای هوا ناشی از عبور پدیده‌های مختلف جوی از روی دریاچه، در دمای آب بسیار کمتر دیده می‌شود. دمای هوا به‌طور متوسط بالاتر از دمای سطح آب است؛ هر چند در طی شب یا تغییرات ناگهانی دما، بعضاً دمای هوا کمتر از دمای آب می‌شود.

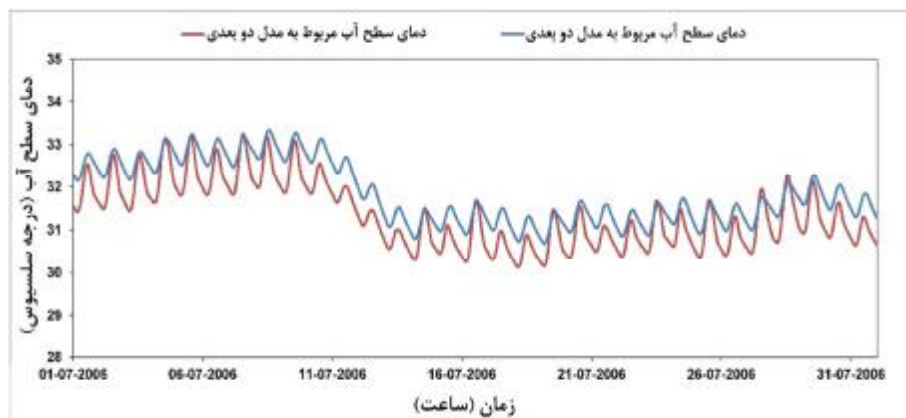
همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده، تغییرات دمای روزانه در مدل سه‌بعدی بهتر از مدل دوبعدی قابل رؤیت است. در مدل سه‌بعدی تغییرات دمای سطح آب در طی شب و روز نزدیک به ۲ درجه می‌رسد؛ در حالی که در مدل دوبعدی این تغییرات کمتر از نیمی از آن است. دلیل این امر، این است که در مدل دوبعدی، تبادل حرارتی در یک نقطه بین هوا و ستون آب صورت می‌گیرد؛ در حالی که در مدل سه‌بعدی این تبادل تنها بین هوا و لایه سطحی آب (نه کل ستون آب) انجام می‌شود.

مقایسه بین نتایج خروجی دمای آب در اعماق مختلف، نشان می‌دهد که به‌دلیل عمق کم دریاچه، اختلاف درجه حرارت بین لایه سطحی و لایه نزدیک بستر کم است و به حداکثر ۰/۲ سلسیوس می‌رسد.

1- The Group for High Resolution Sea Surface Temperature  
2- Multi-scale two-dimensional variational (MS-2DVAR) blending algorithm



شکل ۶- مقایسه سری زمانی داده‌های دمای هوای ورودی مدل و دمای سطح آب خروجی از آن برای دو سال نمونه (۲۰۱۱ و ۲۰۱۰) و برای (الف) نقطه‌ای در شمال (Long: 45.3, Lat: 38) و (ب) نقطه‌ای در جنوب دریاچه (Long: 45.4, Lat: 37.5)



شکل ۷- مقایسه تغییرات دمای سطح آب خروجی مدل‌های دو و سه‌بعدی برای یک ماه نمونه (جولای ۲۰۰۶)

مقایسه نتایج دمای سطح آب خروجی مدل با اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای نیز برای دو سال نمونه و برای دو نقطه در شمال و جنوب دریاچه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، نتایج مدل از تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده برخوردار و تغییرات فصلی دمای سطح آب نیز به خوبی شبیه‌سازی شده است. نمودارهای زیر صحت شبیه‌سازی انجام شده را برای باز تولید تغییرات زمانی دمای سطح آب در دو نقطه نشان

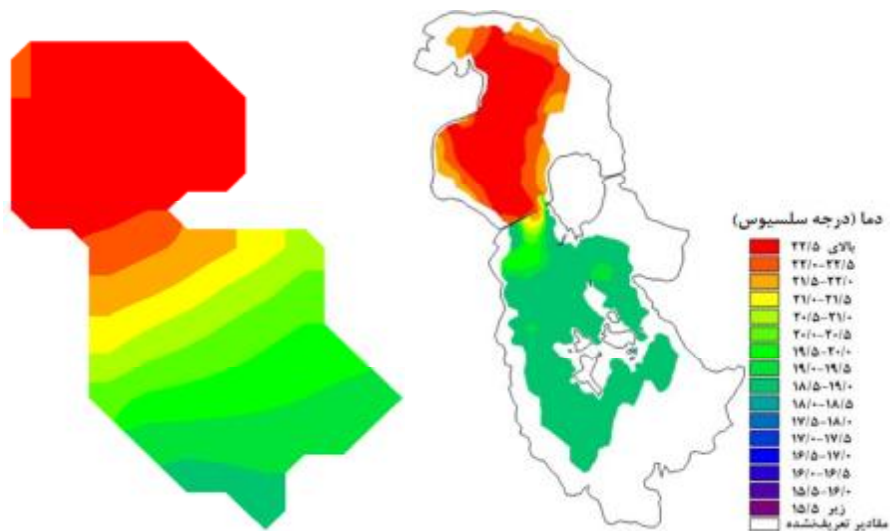
### نتایج مربوط به صحت سنجی مدل

برای بررسی صحت نتایج مدل در شبیه‌سازی تغییرات مکانی دمای سطح آب، شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه دمای سطح آب خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای را برای سطح دریاچه به ترتیب در یک روز تابستانی (تاریخ ۲۰۱۱/۰۹/۱۶) و زمستانی (تاریخ ۲۰۱۱/۰۱/۰۹) نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مقدار دمای سطح آب شبیه‌سازی شده در تطابق بسیار مناسبی با مقدار اندازه‌گیری شده قرار دارد.

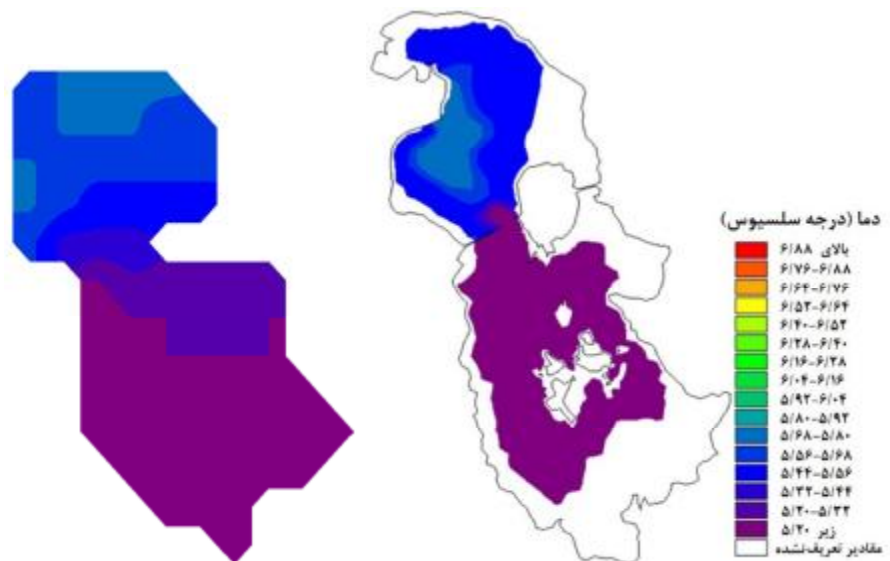


برای بخش شمالی و جنوبی و همچنین با ضریب همبستگی معادل ۰/۸۹ و ۰/۸۶ به ترتیب برای بخش شمالی و جنوبی حاکی از دقت مناسب مدل در بازتولید دمای آب در این دریاچه است.

این دو نقطه در قسمت‌های شمالی و جنوبی دریاچه انتخاب شدند تا به نوعی شبیه‌سازی تغییرات مکانی دما را نیز نشان دهند. مقایسه بین نتایج حاصل برای دمای آب در این دو نقطه با جذر میانگین مربعات خطای معادل ۵/۵ و ۴/۵۳ سلسیوس به ترتیب

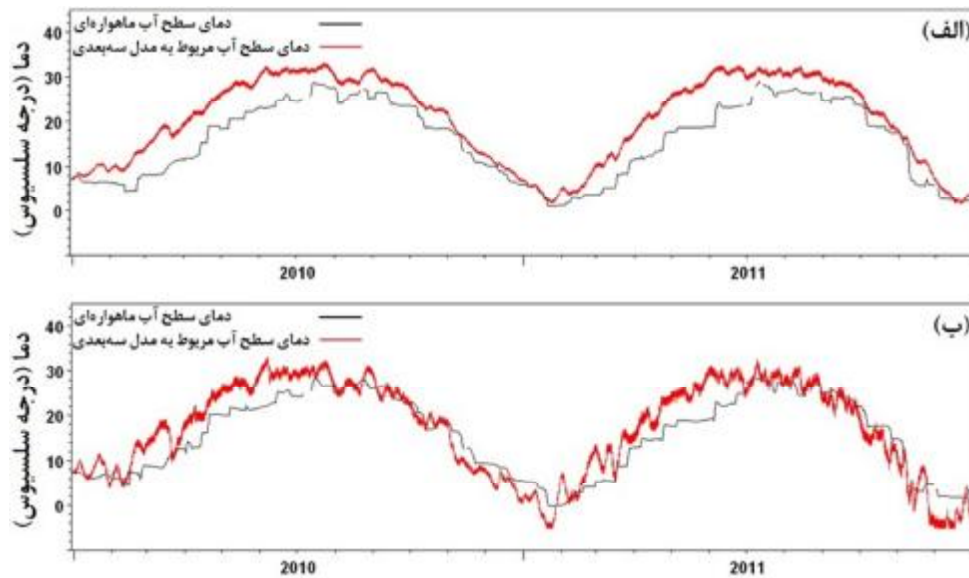


شکل ۸ - مقایسه دمای سطح آب خروجی مدل (سمت راست) و داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای (سمت چپ) برای یک روز نمونه تابستانی (۲۰۱۱/۰۹/۱۶)



شکل ۹ - مقایسه دمای سطح آب خروجی مدل (سمت راست) و داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای (سمت چپ) برای یک روز نمونه زمستانی (۲۰۱۱/۰۱/۰۹)



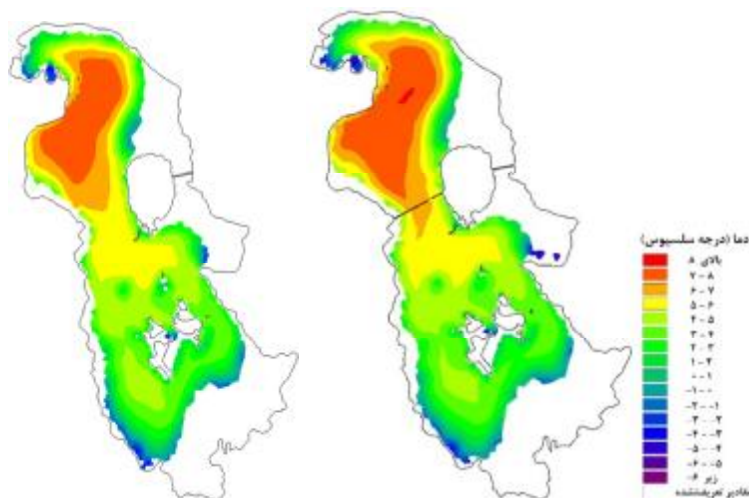


شکل ۱۰- مقایسه دمای سطح آب خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری ماهواره‌ای برای دو سال نمونه و برای الف) نقطه‌ای در شمال (Long: 45.4, Lat: 37.5) و ب) نقطه‌ای در جنوب دریاچه (Long: 45.3, Lat: 38)

مربوط به دمای هوا، رطوبت نسبی و تابش خورشید بوده است. شکل ۱۱ دمای سطح آب دریاچه را در انتهای شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت با و بدون وجود میان‌گذر نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقدار دمای آب دریاچه در دو حالت تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد و تبادل جریان بین شمال و جنوب دریاچه در دو حالت، موجب تبادل دمایی نیز می‌شود.

#### ارزیابی نتایج بلندمدت دمای آب دریاچه

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی تغییرات دما در دریاچه برای یک دوره یک‌ساله نیز مدنظر قرار گرفت تا به ارزیابی آثار بلندمدت وقوع طوفان‌ها روی این عامل پرداخته شود. برای این منظور شبیه‌سازی‌ها برای تراز نزدیک به تراز اکولوژیک دریاچه انجام شد. داده‌های ورودی به مدل، علاوه بر اطلاعات هیدرودینامیک و تراز آب، داده‌های



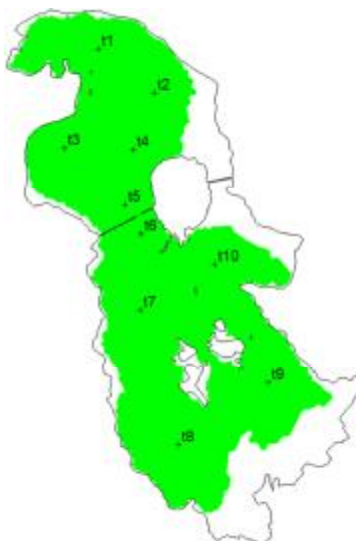
شکل ۱۱- مقایسه دمای سطح آب دریاچه ارومیه در انتهای شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت با و بدون وجود میان‌گذر

وجود میان‌گذر با یکدیگر مقایسه شد. دو نمونه از این مقایسه‌ها برای نقاط t1 و t8 در شکل ۱۳ آورده شده است. برای دمای آب با وجود تغییرات فصلی بیش از ۳۰ درجه

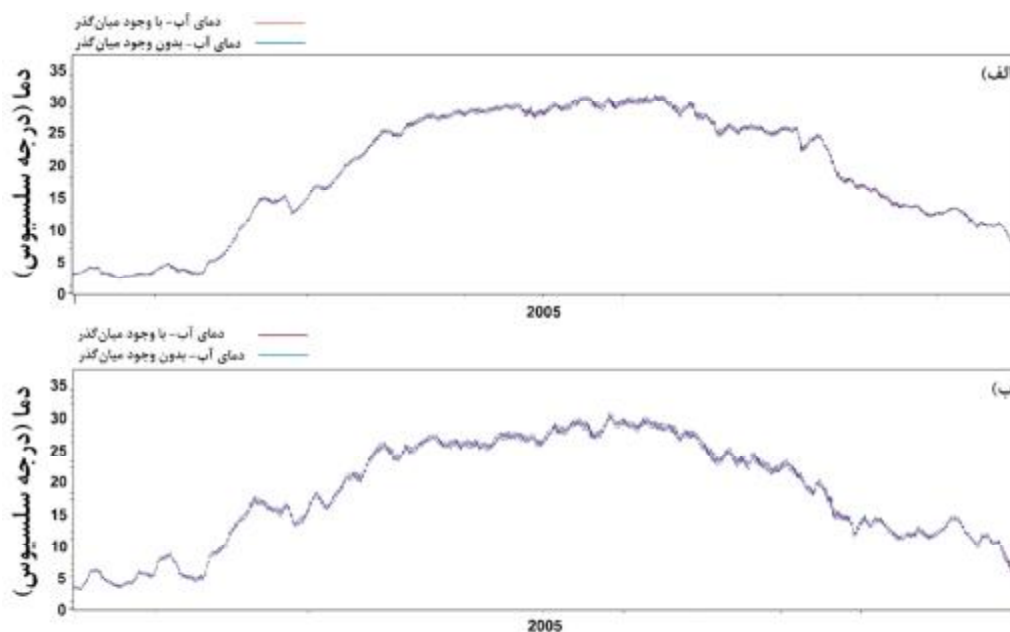
برای ارزیابی سری زمانی تغییرات دما در نقاط مختلف دریاچه طی دوره شبیه‌سازی، سری زمانی این تغییرات در ۱۰ نقطه، مطابق با شکل ۱۲ برای دو حالت وجود و عدم

با نتایج مطالعه مجتهدی و همکاران (۱۳۹۷) دارد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و به کمک سنجش از دور و همچنین عملیات میدانی سعی در انجام پایش نظارت شده در زمینه ارزیابی و بررسی بحران دریاچه ارومیه داشتند.

سلسیوس در هر نقطه، اختلاف در دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر کمتر از ۰/۵ سلسیوس است؛ بنابراین وجود یا عدم وجود میان‌گذر تغییر قابل توجهی در توزیع زمانی و مکانی دمای آب دریاچه ایجاد نمی‌کند. نتایج مطالعه حاضر در مورد اختلاف دمای آب، مطابقت خوبی



شکل ۱۲- نقاطی روی دریاچه که سری زمانی دما در آنها برای دو حالت با و بدون وجود میان‌گذر مقایسه شده است.



شکل ۱۳- مقایسه دما برای حالت با و بدون وجود میان‌گذر برای الف) نقطه t1 و ب) نقطه t8

مورد استفاده در شبیه‌سازی تغییرات دمای آب معرفی شده‌اند. این داده‌ها شامل دمای هوا، رطوبت نسبی و ضریب روشنایی هوا روی سطح دریاچه بوده است. برای هر یک از اطلاعات فوق منابع در دسترس اشاره و سعی شد

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی وضعیت هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه، به شبیه‌سازی تغییرات دمای آب در این دریاچه پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا، داده‌های

کلانتری در دریاچه ارومیه، بازنگری صفر، جلدهای اول و دوم. ۴۵۲ ص.

۴. شرکت طرح نو اندیشان. ۱۳۸۳. مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه طرح آزادراه شهید کلانتری، گزارش مرحله دوم: اطلاعات محیطی پایه، بازنگری صفر. ۹۵ ص.

۵. مجتهدی ع. الماسی ر. و داداشزاده م. ۱۳۹۷. ارزیابی اثرگذاری عوامل انسان‌پدید بر بحران دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل مکانی. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز. ۲۰۴۸(۹۱): ۵۹-۷۰.

6. Dee D. P. Uppala S. M. Simmons A. J. Berrisford P. Poli P. Kobayashi S. Andrae U. Balsameda M. A. Balsamo G. Bauer P. Bechtold P. Beljaars A. C. M. van de Berg L. Bidlot J. Bormann N. Delsol C. Dragani R. Fuentes M. Geer A. J. Haimberger L. Healy S. B. Hersbach H. Hólm E. V. Isaksen L. Kållberg P. Köhler M. Matricardi M. McNally A. P. Monge-Sanz B. M. Morcrette, J. J. Park B. K. Peubey C. de Rosnay P. Tavolato C. Thépaut J. N. and Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 137(656): 553-597.
7. DHI, 2011. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Denmark: Danish Hydraulic Institute.
8. Faramarzi N. 2012. Agricultural Water Use in Lake Urmia Basin, Iran: An Approach to Adaptive Policies and Transition to Sustainable Irrigation Water Use. Department of Earth Sciences, Master Thesis in Sustainable Development at Uppsala University. 107(59): 30.
9. Ghashghaie M. and Nozari H. 2018. Effect of dam construction on Lake Urmia: Time series analysis of water level via ARIMA. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 20: 1541-1553.
10. Hamidi-Razi H. Mazaheri M. Carvajalino-Fernández M. and Vali-Samani J. 2019. Investigating the restoration of Lake Urmia using a numerical modelling approach. *Journal of Great Lakes Research*. 45(1): 87-97.
11. <https://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction>
12. Jalili S.h. Kirchner I. Livingstone D. M. and Morida S. 2012. The influence of large-scale atmospheric circulation weather types

مناسب‌ترین اطلاعات موجود برای ادامه شبیه‌سازی‌ها انتخاب شود. با توجه به دقت بالا و تعمیم‌پذیری خروجی مدل هواشناسی ECMWF به کل دامنه محاسباتی، برای تهیه داده‌های مربوط به دمای هوا، رطوبت نسبی و ضریب روشنایی هوا از خروجی این مدل استفاده شده است.

به منظور انجام شبیه‌سازی‌ها نیز از مدل هیدرودینامیک MIKE3 بهره گرفته شده است. در این مطالعه به منظور بررسی اثر اعمال و عدم اعمال بارش، تبخیر و دبی رودخانه‌ها روی تغییرات دمای آب، دو مدل، یکی با در نظر گرفتن و دیگری بدون در نظر گرفتن این عوامل اجرا و دمای آب در این دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر دمای آب برای دو حالت تقریباً یکسان است. سپس برای صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج مدل از داده‌های ماهواره‌ای GHRSSST استفاده شد. برآیند ارزیابی‌ها حاکی از این است که نتایج مدل از تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده برخوردار و تغییرات فصلی دمای سطح آب نیز به خوبی شبیه‌سازی شد.

در ادامه، برای ارزیابی نتایج بلندمدت دمای آب دریاچه، شبیه‌سازی تغییرات دما برای یک دوره یک ساله مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد برای دمای آب با وجود تغییرات فصلی بیش از ۳۰ درجه سلسیوس در هر نقطه، اختلاف در دو حالت وجود و عدم وجود میان‌گذر کمتر از ۰/۵ درجه سلسیوس بود؛ از این رو، وجود میان‌گذر در وضعیت فعلی یا عدم وجود آن تأثیر معناداری در توزیع زمانی و مکانی دمای آب دریاچه ایجاد نکرد و تبادل دما بین شمال و جنوب دریاچه در دو حالت انجام می‌شود.

## منابع

۱. پیرانی ز. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی سه‌بعدی اثر میان‌گذر شهید کلانتری بر هیدرودینامیک و شوری دریاچه ارومیه (با استفاده از MIKE 3 Flow Model (FM). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه. ۱۴۹ ص.
۲. توفیقی م. ع. زین‌الدینی م و گلشنی ع. ا. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای تعیین الگوی جریان. نشریه مهندسی دریا. ۳(۴): ۳۷-۴۷.
۳. شرکت صدر ا. ۱۳۸۳. مطالعات هیدرولیک، هیدرودینامیک و زیست‌محیطی طرح شهید

- on variations in the water level of Lake Urmia, Iran. *International Journal of Climatology*. 32: 1990-1996.
13. Li Y. Zhang Q. Zhang L. Tan Z. and Yao J. 2017. Investigation of Water Temperature Variations and Sensitivities in a Large Floodplain Lake System (Poyang Lake, China) Using a Hydrodynamic Model. *Remote Sensing*. 9: 1231.
  14. Mahanty M. M. Mohanty P. K. Pattnaik A. K. Panda U. S. Pradhan S. and Samal R. N. 2016. Hydrodynamics, temperature/salinity variability and residence time in the Chilika lagoon during dry and wet period: Measurement and modelling. *Continental Shelf Research*. 125: 28-43.
  15. Sabzehee F. Nafisia V. and Iran Pour S. 2017. Investigation on the Urmia lake drought using satellite altimetry and weather reanalysis products. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-4/W4: 231-235.
  16. Shadkam S. Ludwig F. Oel PV. Kirmir Ç. and Kabat P. 2016. Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake. *Journal of Great Lakes Research*. 42(5): 942-952.
  17. Soudi M. Ahmadi H. Yasi M. Sibilla S. Fenocchi A. and Hamidi S. A. 2019. Investigation over the capability of MIKE 3 flow model FM to simulate the hydrodynamics and salinity distribution of hypersaline lakes: Lake Urmia (Iran) as case study. *Coastal Engineering Journal*. 61(4): 486-501.
  18. Tanarhte M. Hadjinicolaou P. and Lelieveld J. 2012. Intercomparison of temperature and precipitation data sets based on observations in the Mediterranean and the Middle East. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 117(D12): 1-24.
  19. Zeinoddini M. Bakhtiari A. and Ehteshami M. 2015. Long-term impacts from damming and water level manipulation on flow and salinity regimes in Lake Urmia, Iran. *Water and Environment Journal*. 29(1): 71-87.
  20. Zeinoddini M. Tofighi M.A. and Vafae F. 2009. Evaluation of dike-type causeway impacts on the flow and salinity regimes in Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*. 35(1): 13-22.