

طراحی مدل‌های تراز-سطح برای دریاچه ارومیه با استفاده از مشاهدات زمینی و فضایی

وحید صادقی^{۱*}، حسین اعتمادفرد^۲ و یونس نعیمی^۳

چکیده

امروزه به لطف داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای، مشاهدات فضایی برای نظارت و پایش دقیق و مداوم سطح و تراز دریاچه ارومیه فراهم شده است؛ با این وجود، هنوز مدل مناسبی جهت تعیین ارتباط بین مساحت و تراز دریاچه ارومیه که یک فاکتور مهم در تجزیه و تحلیل‌های مختلف هیدرولوژیک و زیست‌محیطی است، پیشنهاد نشده است. هدف مقاله حاضر، استخراج خصوصیات تراز-سطح دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (فضایی)، مشاهدات زمینی و مدل‌های تحلیلی است. معادلات تراز-سطح دریاچه با استفاده از داده‌های تراز ایستگاه زمینی و داده‌های سطح مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای همزمان آن‌ها تعیین شد. در تحقیق حاضر ۶ مدل پیشنهادی شامل توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و شبکه عصبی به همراه مدل‌های موجود، شامل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و مدل دانشگاه سهند، با استفاده از داده‌های تعلیمی آموزش دیده و با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. با مقایسه معیارهای ارزیابی RMSE، MAPE و NSE، مشخص شد که تابع کسری به‌عنوان بهترین مدل پیشنهادی تراز-سطح دریاچه ارومیه، قادر است تنها با خطای جذر میانگین مربعات ۵۷/۸ کیلومتر مربع و با شاخص نش-ساتکلیف ۰/۹۹۵۸، مساحت دریاچه ارومیه را برآورد کند. با لحاظ معیار RMSE، مشخص شد که مدل تابع کسری پیشنهادی خطای تخمین سطح دریاچه را نسبت به بهترین مدل پیشین حدود ۵ برابر کاهش داده است. با توجه به اندازه‌گیری روزانه تراز دریاچه در ایستگاه زمینی، مدل پیشنهادی تراز-سطح، می‌تواند مساحت روزانه دریاچه را بدون نیاز به مشاهدات فضایی (تصاویر ماهواره‌ای) برآورد کند.

واژه‌های کلیدی: تخمین مساحت، سنجش‌ازدور، رگرسیون، تابع کسری، شبکه عصبی.

ارجاع: صادقی و. اعتمادفرد ح. و نعیمی ی. ۱۴۰۰. طراحی مدل‌های تراز-سطح برای دریاچه ارومیه با استفاده از مشاهدات زمینی و فضایی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۸۳-۹۶.

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- مربی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب.

* نویسنده مسئول: v.sadeghi@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹

مقدمه

دریاچه ارومیه با مساحت متغیر بین ۵۲۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومترمربع، یکی از بزرگترین دریاچه‌های فوق‌شور^۱ دائمی دنیا محسوب می‌شود (توریان و همکاران، ۲۰۱۵). این دریاچه بین استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در محدوده جغرافیایی ۴' و ۳۷° تا ۱۷' و ۳۸° شمالی و ۴۵° تا ۴۶° شرقی در ارتفاع ۱۲۵۰ متری از سطح آب‌های آزاد واقع شده است (شکل ۱). براساس گزارش‌های موجود از اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، عمق متوسط و بیشینه دریاچه به ترتیب، ۶ و ۱۶ متر است. دریاچه ارومیه توسط کنوانسیون رامسر در سال ۱۳۴۹ (وبسایت کنوانسیون رامسر^۲) به‌عنوان تالابی با اهمیت بین‌المللی اعلام شده است. علاوه بر این، به‌دلیل اهمیت اکولوژیک، این دریاچه به‌عنوان پارک ملی و ذخیره‌گاه بین‌المللی زیست‌کره تعریف شده است (عباس‌پور و نظری‌دوست، ۲۰۰۷). دریاچه ارومیه در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع شده است. متوسط دمای سالانه آن ۱۱/۲ درجه سانتی‌گراد بوده و میانگین بارش و تبخیر به ترتیب ۳۴۱ و ۱۲۰۰ میلی‌متر در سال است (جمالی و همکاران، ۲۰۰۸). به‌دلیل شوری اشباع دریاچه، تنوع زیستی آبریان بسیار محدود بوده و قابل‌توجه‌ترین موجودات زنده آبی دریاچه، گونه میگوی شور به‌نام «آرتمیا اورمیاننا»^۳ بوده و گیاه دیگری به‌جز «فیتوپلانکتون»^۴ است (قاهری و همکاران، ۱۹۹۹). بیش از یکصد جزیره کوچک و بزرگ در این دریاچه وجود دارد که از بین آن‌ها، چهار جزیره مهم در قسمت جنوبی دریاچه توسط اداره محیط‌زیست ایران به‌عنوان مناطق حفاظت‌شده معرفی و نگهداری می‌شوند (شکل ۱). میزان شوری آب دریاچه ارومیه بین ۲۱۷ تا بیش از ۳۰۰ گرم بر لیتر متغیر است که این میزان غلظت، تقریباً ۸ برابر مقدار متوسط آب دریاهاست (آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵).

در سال‌های اخیر، دریاچه ارومیه دستخوش تغییرات محیطی اسفناکی شده است. عوامل طبیعی همچون، افزایش دمای زمین و کاهش میزان بارندگی در حوزه آبریز دریاچه و عوامل انسانی، مانند احداث غیراصولی سدهای متعدد در مسیر رودخانه‌های منتهی به این دریاچه،

احداث میان‌گذر دریاچه ارومیه، حفر و استفاده بی‌رویه از چاه‌های عمیق، الگوی نامناسب کشت و کارایی پایین شیوه‌های آبیاری زمین‌های کشاورزی اطراف دریاچه سبب شده تا سطح تراز آبی این دریاچه به پایین‌ترین حد ممکن طی چند دهه قبل برسد، شوری آن از حد فوق‌اشباع بگذرد و قسمت اعظمی از سطح دریاچه خشک و به شوره‌زار تبدیل شود (عباس‌پور و نظری‌دوست، ۲۰۰۷؛ ایمانی‌فر و محبی، ۲۰۰۷؛ حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲؛ جعفری و همکاران، ۲۰۱۳؛ آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵؛ توریان و همکاران، ۲۰۱۵). در فاصله سال‌های ۱۳۵۱-۱۳۹۳ حدود ۸۸ درصد از سطح دریاچه خشک شده و همچنین ۸۰ درصد از حجم آب دریاچه کاهش یافته است (آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵). با پس‌رفت آب دریاچه، شوره‌زاری در حدود چندصد کیلومترمربع در منطقه به‌وجود آمده است که زمینه‌ساز وزش بادهای نمکی در منطقه است. در صورتی که اقدامی کارآمد برای احیای دریاچه ارومیه صورت نگیرد تجربه تلخ دریاچه آرال این بار در ایران تکرار خواهد شد (پنگرا، ۲۰۱۲؛ آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵). تغییرات آب‌وهوایی منطقه، وزش بادهای نمکی و سایر ریزگردها، کاهش حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی منطقه و شیوع انواع بیماری تنفسی و... از قابل‌ذکرترین مشکلاتی است که در آینده‌ای نزدیک به‌وقوع خواهد پیوست (کوک و همکاران، ۲۰۰۵؛ یاماگوچی و همکاران، ۲۰۱۲؛ آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵). برخی از این مشکلات هم‌اکنون در شهرها و روستاهای نزدیک دریاچه مشاهده می‌شود. دامنه این فاجعه علاوه بر مناطق آذربایجان و کردستان ایران، گریبان‌گیر کشورهای ترکیه، عراق، آذربایجان و ارمنستان نیز خواهد شد.

برای مقابله با بحران‌های موجود و پیشرو، وجود اطلاعات مکانی (همچون اطلاعات سطح دریاچه و خطوط ساحلی) و اطلاعات توصیفی (مانند: میزان شوری آب و خاک) صحیح و جامع از دریاچه ضروری است. تهیه این اطلاعات از مهمترین چالش‌های متخصصان این حوزه بوده که با انجام و به‌کارگیری مشاهدات زمینی و فضایی قابل‌حصول است. ازجمله مهم‌ترین مشاهدات زمینی می‌توان به اندازه‌گیری‌های منظم و دقیق تراز دریاچه در ایستگاه‌های زمینی، نقشه‌برداری محدود خطوط ساحلی و اندازه‌گیری موردی نمونه‌های خاک و آب اشاره کرد.

1- Hyper saline
2- www.ramsar.org
3- Artemia urmiana
4- Phytoplankton

زیادی در زمینه برقراری ارتباط بین این دو نوع مشاهدات انجام گرفته است. مشاهدات زمینی تراز دریاچه با دقت بالا، به‌طور روزانه و منظم به‌راحتی قابل‌اندازه‌گیری بوده و اطلاعات سطح دریاچه نه‌تنها با مشاهدات زمینی، بلکه با مشاهدات فضایی با دوره‌های زمانی چندروزه (یا چندماهه) قابل‌حصول است. برقراری ارتباط بین اطلاعات تراز دریاچه و سطح آن که به «تخمین مدل تراز-سطح» معروف است، می‌تواند تخمین روزانه سطح دریاچه را بدون نیاز به مشاهدات فضایی فراهم آورد و از این نظر بسیار مهم و قابل‌توجه است.

به‌دلیل اهمیت موضوع، تحقیقات متعددی برای تخمین مدل تراز-سطح بسیاری از دریاچه‌های جهان صورت گرفته است (کرتاکس و همکاران، ۲۰۱۱). در نتیجه تحقیق نامبرده، تغییرات سطح برای حدود ۱۵۰ دریاچه و مخازن آبی ارائه شده است که به‌صورت رایگان در وبسایت HYDROWEB² موجود است. همچنین تغییرات سطح-حجم حدود ۵۰ دریاچه بزرگ نیز از طریق ترکیب تصاویر ماهواره‌ای مختلف و ارتفاع‌سنجی راداری محاسبه شده و قابل‌دسترس عموم است. درخصوص دریاچه ارومیه تنها اطلاعات «تغییرات تراز»، «تغییرات سطح» و «تغییرات حجم» دریاچه در بازه سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۰ در وبسایت HYDROWEB فراهم شده و هیچ اقدامی برای تخمین مدل تراز-سطح این دریاچه صورت نگرفته است. درخصوص دریاچه ارومیه، سیما و تجربی (۲۰۱۳) چندجمله‌ای‌های درجات دو و سه را به‌عنوان مدل تراز-سطح دریاچه پیشنهاد کرده و مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در پژوهش دیگری احمدی و همکاران (۲۰۱۵) با تغییرات جزئی در مدل پیشنهادی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، یک چندجمله‌ای غیرخطی که از این پس با عنوان «مدل دانشگاه سهند» نام برده خواهد شد، برای تخمین سطح دریاچه معرفی کرده‌اند. در پژوهش نامبرده؛ محققان با به‌کارگیری معیار «ریشه میانگین مجموع خطا³» مدل پیشنهادی خود را با «مدل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی» مقایسه کرده و با ارائه خطای ۵۹/۴ کیلومترمربع برای مدل پیشنهادی در مقایسه با خطای ۳۲۲/۴ کیلومترمربع برای مدل پیشین، برتری نسبی مدل پیشنهادی خود را گزارش کرده‌اند. نظر به

در مقایسه با مشاهدات زمینی که مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد، مشاهدات فضایی با سنجش‌گرهای ماهواره‌ای، امکان اندازه‌گیری طیف وسیعی از خصوصیات دریاچه را فراهم کرده است. در سال‌های اخیر به لطف داده‌های سنجش‌ازدور، مشاهدات فضایی برای نظارت و پایش دقیق و مداوم وضعیت دریاچه ارومیه فراهم شده و تحقیقات متعددی در این حوزه صورت گرفته است که در چهار دسته کلی: ۱- پایش سطح دریاچه و تغییرات خطوط ساحلی (بنگرا، ۲۰۱۲؛ جعفری و همکاران، ۲۰۱۳؛ معروفی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۴؛ آقاچوکچ و همکاران، ۲۰۱۵؛ توریان و همکاران، ۲۰۱۵؛ محمدی و همکاران، ۲۰۲۰)، ۲- پایش تغییرات تراز دریاچه (دسترنج و توکلی، ۱۳۹۷؛ کرتاکس و همکاران، ۲۰۱۱)، ۳- پایش شوری آب دریاچه (آذرفزا و مختاری، ۱۳۹۲؛ زین‌الدین و همکاران، ۲۰۰۹) و ۴- پایش شوری خاک سواحل (فرهمند و صادقی، ۲۰۲۰؛ دلاور و همکاران، ۲۰۲۰) قرار می‌گیرند.

روش اندازه‌گیری زمینی برای تعیین سطح دریاچه، روشی بسیار زمان‌بر و پرهزینه بوده و عملاً مورد استفاده قرار نمی‌گیرد؛ به‌جز در موارد محدودی که برای اعتبارسنجی داده‌های فضایی و مدل‌های پیشنهادی استفاده می‌شود. این در حالی است که پردازش تصاویر سنجش‌ازدور چندزمانه، می‌تواند اطلاعات سطح دریاچه را با هزینه پایین‌تر و در دوره‌های زمانی منظم فراهم کند. به‌همین دلیل متداول‌ترین روش برای تعیین سطح دریاچه‌ها، پردازش تصاویر سنجش‌ازدور به‌عنوان مشاهدات فضایی از دریاچه‌ها است. روش‌ها و شاخص‌های طیفی متنوعی برای استخراج سطح دریاچه در تصاویر سنجش‌ازدور توسعه داده شده است. یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، حد‌آستانه‌گذاری روی شاخص NDWI¹ است که نویسندگان قبلاً از این روش برای استخراج سطح دریاچه ارومیه استفاده کرده و کارایی آن را گزارش کرده‌اند (فرهمند و صادقی، ۲۰۲۰). با این وجود نباید فراموش کرد، تکنولوژی سنجش‌ازدور نیز محدودیت‌های خاص خود را دارد که از آن جمله می‌توان به وابستگی به شرایط آب‌وهوایی، هزینه تهیه و پردازش تصاویر و محدودیت توان تفکیک مکانی و زمانی آن‌ها اشاره کرد.

به‌طورکلی؛ هر نوع از دسته مشاهدات زمینی و فضایی مزایا و محدودیت‌های خاص خود را داشته و تلاش‌های

2- <http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb>

3- Root Mean Sum of Error (RMSE)

1- Normalized Difference Water Index (NDWI)

همانطور که اشاره شد؛ این دریاچه بین دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در محدوده جغرافیایی ۴' و ۳۷' تا ۱۷' و ۳۸° شمالی و ۴۵° تا ۴۶° شرقی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه (دریاچه ارومیه) را در ایران و جهان نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل، اطلاعات سطح دریاچه (مشاهدات فضایی) و تراز دریاچه (مشاهدات زمینی) است. در پژوهش حاضر، اطلاعات سطح دریاچه بین مارس ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۵ جمعاً شامل ۴۴ نمونه از مقاله احمدی و همکاران، (۲۰۱۵) استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت تا با به‌کارگیری داده‌های مشابه، مقایسه منطقی بین مدل‌های پیشین و مدل‌های پیشنهادی فراهم شود. شکل ۲، مساحت‌های دریاچه در ۴۴ تاریخ متوالی (از مارس ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۵) را نشان می‌دهد که در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های تراز دریاچه نیز با اندازه‌گیری‌های زمینی و فضایی (ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای) قابل‌دسترس است. داده‌های تراز دریاچه ارومیه در ایستگاه‌های زمینی از سال ۱۳۴۴ شمسی تا به امروز به‌صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شود و این اطلاعات در پایگاه داده دریاچه با عنوان «آرشیو تراز دریاچه ارومیه» ثبت و نگهداری می‌شود. در مقاله حاضر، اطلاعات تراز دریاچه در تاریخ‌های منطبق با تاریخ اخذ تصاویر سنجش‌ازدور از پایگاه داده مذکور استخراج شده و به‌همراه داده‌های مساحت برای توسعه و ارزیابی مدل‌های تراز-سطح مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۲، نمودارهای تراز و سطح دریاچه و اسکاتریلات دو‌بعدی آن‌ها ارائه شده است. همان‌طور که اشاره شد، هدف از این پژوهش توسعه مدل‌هایی است که بتواند به بهترین نحو، ارتباط بین تراز دریاچه (مشاهدات زمینی) و سطح دریاچه (مشاهدات فضایی) را که در شکل ۲- ب نمایش داده شده است، برقرار سازد.

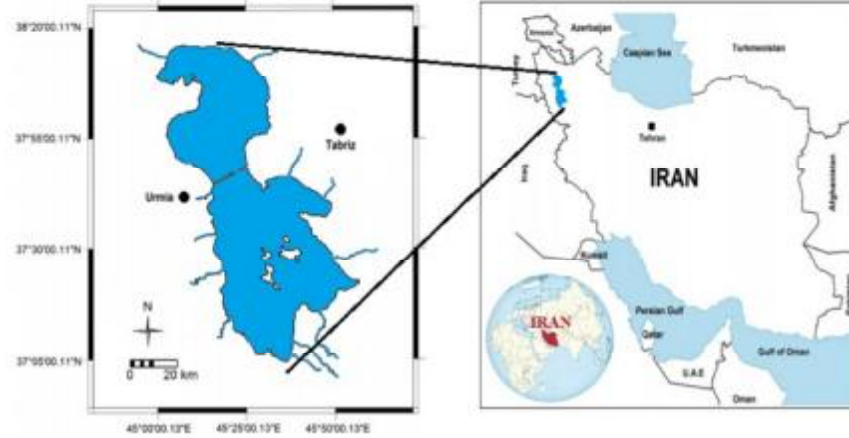
اینکه احمدی و همکاران (۲۰۱۵) از معیارهای کمی نادرستی برای ارزیابی مدل‌ها استفاده کرده‌اند، به اشتباه دقت مدل پیشنهادی‌شان بیش از مقدار واقعی گزارش شده است؛ زیرا «ریشه میانگین مجموع خطا» مجموع خطاهای مثبت و منفی را محاسبه کرده و همین امر سبب می‌شود که خطاهای مثبت و منفی اثر یکدیگر را تقلیل کنند. برای محاسبه خطای واقعی مدل‌ها، بهتر است به‌جای معیار «ریشه میانگین مجموع خطا» از معیار «ریشه میانگین خطای مربع» استفاده شود تا همه خطاهای مثبت و منفی بدون تقلیل اثر یکدیگر در ارزیابی مدل حضور داشته باشند.

به‌دلیل اهمیت بالای مدل تراز-سطح و نبود مدل‌های کارآمد برای دریاچه ارومیه، تحقیق حاضر، تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه را در دستور کار قرار داده و مدل‌های جدید و متنوعی شامل توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و شبکه عصبی را برای تخمین سطح دریاچه از داده‌های تراز دریاچه بررسی کرده و در نهایت مدل بهینه و مناسب را پیشنهاد می‌کند. مدل‌های تراز-سطح پیشنهادی برای تجزیه و تحلیل‌های مختلف هیدرولوژیک و محیطی بسیار مهم و ضروری بوده و می‌تواند در پایش و احیای دریاچه مؤثر واقع شود. تحقیق حاضر در پنج بخش تألیف شده است. در بخش یک، تحت عنوان مقدمه، اهمیت موضوع و مروری بر تحقیقات پیشین ارائه و ضرورت تحقیق حاضر تشریح شد. در ادامه در بخش دوم، منطقه و داده‌های مورد استفاده معرفی می‌شود و در بخش سوم مدل‌های تراز-سطح پیشنهادی به تفصیل معرفی و تشریح می‌شود. در بخش چهارم، مدل‌های تراز-سطح موجود و پیشنهادی، مورد مقایسه و ارزیابی دقیق قرار گرفته و نهایتاً در بخش پنجم، مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر ارائه می‌شود.

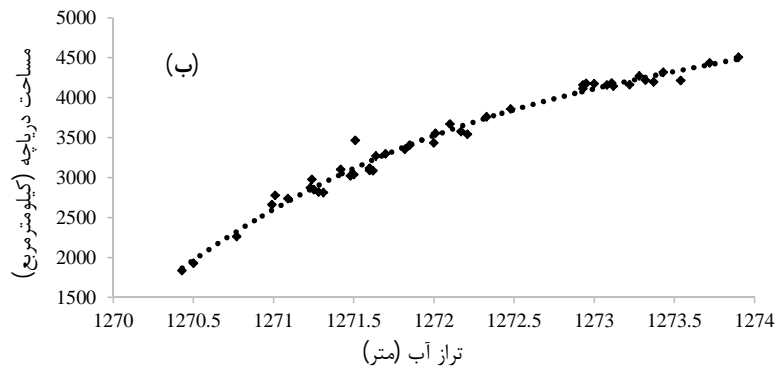
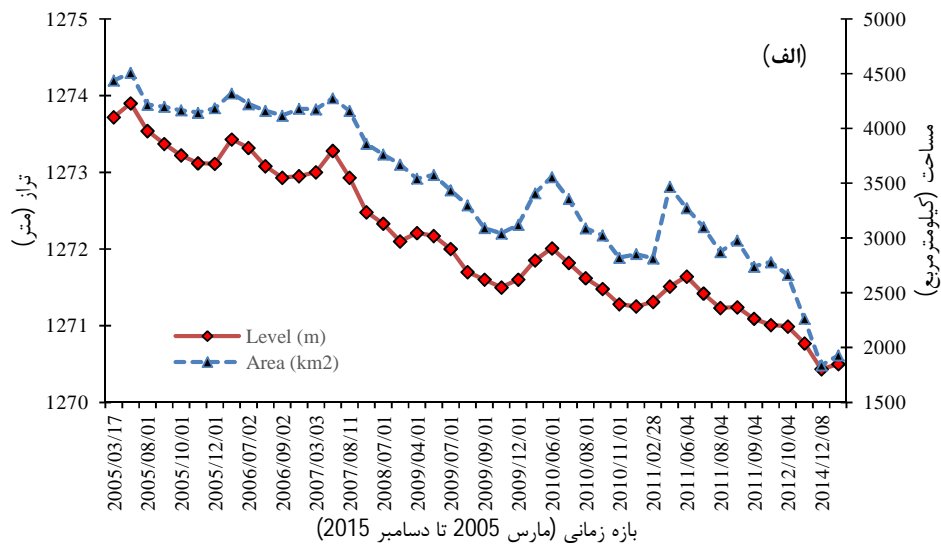
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

تحقیق حاضر به‌منظور تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه انجام گرفته است. در بخش مقدمه، توضیحات کاملی درخصوص معرفی دریاچه ارومیه ارائه شده و ضرورت پایش تغییرات سطح و تراز دریاچه تشریح شد.



شکل ۱- موقعیت دریاچه ارومیه در ایران و جهان



شکل ۲- الف) روند تغییرات مساحت و تراز دریاچه ارومیه در بازه مارس ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۵؛ ب) نمودار تراز آب به مساحت دریاچه این نمودارها از داده‌های ارائه شده در پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۵) و آرشیو تراز دریاچه ارومیه باز ترسیم شده است.

مدل‌ها شامل دو روش موجود؛ «مدل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی» و «مدل دانشگاه سهند» و شش مدل پیشنهادی مختلف با توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و همچنین روش شبکه عصبی

روش‌های مختلف مدل‌سازی تراز-سطح دریاچه ارومیه

در تحقیق حاضر ۸ مدل مختلف برای مدل‌سازی تراز-سطح دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. این

آذربایجان غربی (معادله (۲))، نسخه بهبودیافته‌ای از آن به فرم معادله (۳) پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفته که نسبت به مدل اولیه از دقت بسیار بالاتری برخوردار است.

$$S = 8.86 \times 10^5 - \frac{1.123 \times 10^9}{L} \quad (۳)$$

ب- مدل دانشگاه سهند

احمدی و همکاران (۲۰۱۵) با تغییرات جزئی در مدل تراز-سطح پیشنهادی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، یک چندجمله‌ای غیرخطی که از این پس با عنوان «مدل دانشگاه سهند» ارجاع‌دهی می‌شود، برای تخمین مساحت دریاچه از داده‌های تراز آب معرفی کرده‌اند. فرم ریاضی این مدل در معادله (۴) ارائه شده است. با توجه به توضیحاتی که در بخش ۳-۱ در خصوص ارزیابی غیرواقعی مدل‌های «آب منطقه‌ای» و «مدل دانشگاه سهند» در مقاله احمدی و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شد، در تحقیق حاضر، به منظور بهبود کارایی «مدل دانشگاه سهند»، پارامترهای این مدل مجدد محاسبه شد. معادله (۵)، نسخه بهبودیافته مدل دانشگاه سهند را نشان می‌دهد. پارامترهای این مدل به روش برآورد کمترین مربعات^۲ تعیین شده است.

$$S = 1.156 \times 10^8 + \frac{6.535 \times 10^8}{L^{1.5}} \quad (۴)$$

$$S = 3.605 \times 10^4 - \frac{1.477 \times 10^9}{L^{1.5}} \quad (۵)$$

ج- مدل تراز-سطح مبتنی بر تابع چندجمله‌ای

توابع توانی^۳ بلوک‌های سازنده اساسی بسیاری از توابع هستند. در ساده‌ترین شکل، توابع توانی موقعیت‌هایی را توصیف می‌کنند که متغیر وابسته مستقیماً با توان متغیر مستقل متناسب است. یک تابع توانی به فرم معادله (۶) تعریف می‌شود که در آن؛ k و n مقادیر ثابتی‌اند که بیانگر پارامترهای مدل هستند:

$$f(x) = k \times x^n \quad (۶)$$

هرچند توابع توانی رفتار قابل‌پیش‌بینی بالایی دارند، ترکیب چندین تابع توانی می‌تواند رفتار بسیار پیچیده‌تری را مدل کند. یک تابع که از مجموع چندین تابع توانی

می‌شود. روش‌های مذکور بر روی مجموعه داده یکسان و در اختیار (شکل ۲) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه این بخش مدل‌های نامبرده معرفی و تشریح می‌شود.

الف- مدل آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی

سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی به‌عنوان یکی از نهادهای مسئول در مسئله پایش تراز و سطح دریاچه ارومیه، پژوهش‌هایی در این زمینه انجام داده و در این راستا یک مدل تجربی برای تخمین ارتباط بین تراز و سطح دریاچه به‌صورت معادله (۱) پیشنهاد کرده‌اند. پارامترهای این مدل توسط کارشناسان تعیین شده و نهایتاً مدل آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی برای تخمین ارتباط بین تراز و سطح دریاچه ارومیه به‌صورت معادله (۲) تعیین شد. در همه روابط ارائه‌شده در بخش ۳، واحد تراز آب (L)، متر بوده و واحد مساحت (S)، کیلومتر مربع است.

$$S = a - \frac{b}{L} \quad (۱)$$

$$S = 479923 - \frac{6.05501 \times 10^8}{L} \quad (۲)$$

در معادله (۱)، S و L به ترتیب بیانگر مساحت و تراز دریاچه بوده و a و b نیز پارامترهای این مدل است که به‌طور تجربی تعیین شده و در معادله (۲) برای تخمین مساحت دریاچه ارومیه پیشنهاد شد. با توجه به اینکه پارامترهای این مدل به‌صورت تجربی تعیین شده‌اند، خطای مدل در تخمین سطح دریاچه بسیار بالا است. البته نظر به اینکه احمدی و همکاران (۲۰۱۵) از معیار کمی نادرست «ریشه میانگین مجموع خطا» برای ارزیابی مدل‌ها استفاده کرده‌اند، دقت ارائه شده برای مدل با مقدار واقعی آن تفاوت دارد. زیرا «ریشه میانگین مجموع خطا» برخلاف «ریشه میانگین خطای مربع»، از مجموع خطاهای مثبت و منفی استفاده می‌کند و همین امر سبب می‌شود که خطاهای مثبت و منفی اثر یکدیگر را تقلیل کنند. این ارزیابی غیرواقعی درباره «مدل دانشگاه سهند» که در ادامه معرفی خواهد شد نیز رخ داده است (احمدی و همکاران، ۲۰۱۵). به‌منظور ارزیابی صحیح مدل‌ها در تحقیق حاضر به‌جای معیار «ریشه میانگین مجموع خطا» از معیار «ریشه میانگین خطای مربع» استفاده شد. در این مقاله ضمن بررسی مدل اولیه آب منطقه‌ای استان

2- Least Squares Estimation (LSE)

3- Power functions

1- Root Mean Sum of Error (RMSE)

تحقیق حاضر با بررسی مدل‌های مختلفی از توابع نمایی، نهایتاً یک ترکیب خطی از دو مدل نمایی مختلف به صورت معادله (۱۰) برای تخمین ارتباط بین مساحت و تراز دریاچه ارومیه پیشنهاد شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$S = a_1 \times e^{a_2 \times L} + a_3 \times e^{a_4 \times L} + \dots + a_n \times e^{a_n \times L} \quad (9)$$

$$S = -1112 \times e^{-0.4711 \times L} + 4708 \times e^{0.0223 \times L} \quad (10)$$

ه- مدل تراز-سطح مبتنی بر تابع فوریه

سری فوریه در ریاضیات، روشی برای تعریف یک تابع به صورت مجموع چندین تابع نوسانی از نوع سینوسی و کسینوسی است که می‌توان از آن برای تعیین ارتباط بین متغیرهای وابسته و مستقل استفاده کرد. فرم کلی یک سری فوریه برای نمایش یک تابع به صورت معادله (۱۱) است:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi}{L}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}\right) \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، l ، نصف دوره تناوب تابع بوده و a_n و b_n نیز ضرایب سری فوریه هستند که متناسب با کاربرد و داده‌های مورد استفاده تعیین می‌شوند. در مقاله حاضر با بررسی مقادیر مختلف برای ضرایب سری فوریه، نهایتاً از مدل ارائه شده در معادله (۱۲) برای تخمین مدل سطح-تراز دریاچه ارومیه استفاده شده و نتایج این مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج آن در بخش بعدی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$S = -1.11 \times 10^9 + 8.73 \times 10^8 \times \cos(0.00052 \times L) + 6.93 \times 10^8 \times \sin(0.00052 \times L) \quad (12)$$

و- مدل تراز-سطح مبتنی بر تابع گوسین

یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین توابع ریاضی خصوصاً در مسائل آمار و مدل‌سازی، نوع خاصی از توابع نمایی به نام تابع گوسین^۲ است. توابع گوسین (گاوسی) را می‌توان به صورت تک‌متغیره^۳ یا چندمتغیره^۴ در نظر گرفت. فرم عمومی تابع گوسین تک‌متغیره به صورت معادله (۱۳) است که در آن؛ مقادیر a و b و c اعداد حقیقی بوده و a و c غیرصفر هستند. شکل تابع گوسین

ساخته می‌شود، تابع چندجمله‌ای (پلی‌نومیال)^۱ نام دارد که فرم کلی آن به صورت معادله (۷) است.

$$f(x) = a_n \times x^n + a_{n-1} \times x^{n-1} + \dots + a_1 \times x + a_0 \quad (7)$$

در معادله (۷)؛ n عدد صحیح غیرمنفی و $a_n \neq 0$ است. در این رابطه، n درجه چندجمله‌ای بوده و $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ ضرایب این چندجمله‌ای است.

چندجمله‌ای با درجه زوج، مشابه توابع توانی با درجه زوج عمل کرده و چندجمله‌ای با درجه فرد، رفتار مشابهی با توابع توانی درجه فرد دارد. همچنین حضور هریک از ترم‌های یک چندجمله‌ای قابلیت ویژه‌ای به آن می‌بخشد؛ به طوری که تعیین ترم‌های بهینه یک چندجمله‌ای از چالش‌های اساسی در کاربرد این مدل‌ها است. در تحقیق حاضر با بررسی ترکیب‌های مختلفی از ترم‌های چندجمله‌ای، از یک چندجمله‌ای مرتبه سوم به فرم معادله (۸) برای تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه استفاده شده که نسبت به اغلب مدل‌های مورد بررسی دقت بالاتری را در این کاربرد فراهم کرده است (جدول ۱).

$$S = 17.15 \times L^3 - 129.7 \times L^2 + 634 \times L + 3600 \quad (8)$$

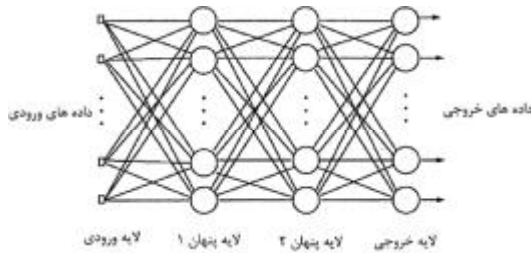
د- مدل تراز-سطح مبتنی بر تابع نمایی

تابع نمایی، مدلی است که در آن از یک عدد ثابت به عنوان پایه و از یک متغیر به عنوان توان برای برقراری ارتباط بین دو متغیر وابسته و مستقل استفاده می‌شود. گاهی تابع نمایی با تابع توانی اشتباه گرفته می‌شود. باید توجه داشت که اگر یک تابع دارای یک متغیر به عنوان پایه و یک ثابت به عنوان توان باشد، یک تابع توانی بوده و دیگر تابع نمایی نیست. در ریاضیات، یک تابع نمایی رابطه‌ای از نوع $f(x) = a^x$ است که در آن x یک متغیر و a یک ثابت است که پایه تابع نامیده می‌شود و باید بزرگ‌تر از صفر باشد. از اعداد مختلفی می‌توان به عنوان پایه تابع نمایی استفاده کرد که عدد نپر از مهم‌ترین آن‌هاست. شایان ذکر است تغییر پایه یک تابع نمایی می‌تواند سبب بروز تغییرات قابل توجهی در رفتار تابع نمایی شود. همین‌طور می‌توان از مجموع دو یا چند تابع نمایی مختلف به عنوان یک مدل نمایی ترکیبی برای برقراری ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته استفاده کرد (معادله (۹)). در

2- Gaussian Function
3- Univariate
4- Multivariate

1- Polynomial

ارسال آن به سایر نورون‌ها از طریق اتصالات بین آن‌ها است (کیم، ۲۰۱۷). یکی از پایه‌ای‌ترین مدل‌های شبکه عصبی، پرسپترون چندلایه^۲ است که از سه نوع لایه در شبکه‌های عصبی به نام‌های؛ لایه ورودی، لایه/لایه‌های پنهان و لایه خروجی که به ترتیب وظیفه دریافت، پردازش و ارائه نتایج نهایی را برعهده دارند، تشکیل شده است (شکل ۳).



شکل ۳- ساختار یک شبکه عصبی چندلایه (کیم، ۲۰۱۷)

دو مرحله اصلی در عملکرد یک شبکه عصبی وجود دارد: مرحله یادگیری و مرحله فراخوانی. مرحله یادگیری به مرحله پردازش و تنظیم و تغییر وزن‌های اتصال ($w_{i,j}$) اطلاق می‌شوند تا در نهایت این شبکه برای کاربرد خاصی بهینه شود. یادگیری معمولاً به دو طریق؛ یادگیری بانظارت و یادگیری بدون نظارت و در یک فرایند تکراری با استفاده از داده‌های آموزشی صورت می‌گیرد. الگوریتم‌های متنوعی برای آموزش بانظارت توسعه داده شده است که الگوریتم پس‌انتشار خطا^۳ از مهم‌ترین آن‌هاست. پس‌انتشار خطا، یک الگوریتم گرادینت تکراری برای کمینه‌کردن تابع خطا است. خطای تابع را می‌توان به فرم معادله (۱۷) تعریف کرد که در آن y_i خروجی حاصل از گره خروجی، d_i خروجی صحیح حاصل از نمونه‌های آموزشی و M تعداد گره‌های خروجی شبکه است.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (d_i - y_i)^2 \quad (17)$$

در اولین اجرای شبکه، پارامترهای وزن به‌طور تصادفی مقداردهی می‌شود. سپس در یک روش تکراری، تصحیح پارامترهای وزن محاسبه‌شده و به مقادیر قبلی اضافه می‌شود تا نهایتاً شبکه عصبی برای کاربرد مورد نظر کالیبره شود. بعد از یادگیری (کالیبراسیون) شبکه عصبی، نوبت به مرحله فراخوانی شبکه است تا در کاربرد مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد.

وابسته به پارامترهای a و b و c بوده و با تغییر آن‌ها می‌توان توابع گوسین با اشکال مختلف را طراحی کرد طوری که بهترین برازش را بین متغیرهای وابسته و مستقل فراهم آورد. در مقاله حاضر با بررسی انواع مختلفی از توابع گوسین، ترکیب دو تابع گوسین به فرم معادله (۱۴) برای مدل‌سازی ارتباط تراز و مساحت دریاچه ارومیه پیشنهاد شده و مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱).

$$f(x) = a \times e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2} \quad (13)$$

$$S = 4400 \times e^{-\left(\frac{L-1274}{3.21}\right)^2} + 826.1 \times e^{-\left(\frac{L-1271}{1.46}\right)^2} \quad (14)$$

ز- مدل تراز-سطح مبتنی بر تابع کسری (گویا)

یک تابع کسری (گویا)، نسبت دو تابع چندجمله‌ای به صورت معادله (۱۵) است که در آن P و Q دو چندجمله‌ای مختلف هستند.

$$f(x) = \frac{P(x)}{Q(x)} \quad (15)$$

دامنه این تابع مجموعه‌ای از همه اعداد حقیقی است که برای آن‌ها $Q(x) \neq 0$ تعیین می‌شود. با تغییر چندجمله‌ای‌های P و Q ، می‌توان توابع کسری مختلفی را طراحی کرد که هرکدام از آن‌ها رفتار منحصر به فردی خواهند داشت. در این راستا، با بررسی ترم‌های مختلف برای چندجمله‌ای‌های P و Q ، یک تابع کسری به فرم معادله (۱۶) برای تخمین ارتباط بین تراز آب و مساحت دریاچه ارومیه طراحی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. تابع کسری طراحی‌شده در این مقاله (معادله ۱۶)، در مقایسه با مدل‌های پیشین و حتی سایر مدل‌های پیشنهادی، بالاترین دقت را در کاربرد حاضر داشته است که جزئیات آن در بخش ۴ تشریح خواهد شد.

$$S = \frac{3026 \times L^2 - 3.84 \times 10^6 \times L - 6051}{L^2 - 1991 \times L + 9.17 \times 10^5} \quad (16)$$

ح- مدل تراز-سطح مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی

انواع مختلفی از مدل‌های محاسباتی با عنوان کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ با الهام از مکانیسم مغز انسان برای کاربردهای مختلف طراحی شده است. شبکه‌های عصبی از اتصالات گره‌ها (نودها) ایجاد می‌شود که عناصر متناظر نورون‌های مغز هستند. مهم‌ترین وظیفه هر نورون، دریافت ورودی از همسایه‌ها (سایر نورون‌ها) و محاسبه و

2- Multi-Layer Perceptron (MLP)
3- Back Propagation

1- Artificial Neural Networks (ANN)

در مقاله حاضر معماری‌های مختلفی از شبکه‌های عصبی MLP مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً یک شبکه عصبی MLP سه‌لایه با ۲ نورون در لایه پنهان و یک نورون در لایه‌های ورودی و خروجی برای کاربرد مورد نظر انتخاب شد. در شبکه عصبی طراحی شده، از توابع خطی و تانژانت-زیگموئید به عنوان توابع انتقال (توابع فعال‌سازی) برای انتقال اطلاعات بین نورون‌ها استفاده شد. بعد از مرحله طراحی، شبکه عصبی با نمونه‌های آموزشی کالیبره شده و در مرحله فراخوانی برای تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی شبکه عصبی به همراه همه مدل‌های مورد استفاده در بخش ۴ ارائه شده است.

پیاده‌سازی و مقایسه مدل‌ها

در تحقیق حاضر ۶ مدل پیشنهادی شامل توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و شبکه عصبی با جزئیات ارائه شده در بخش ۳ برای تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه پیشنهاد شده و به همراه مدل‌های پیشین (مدل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و مدل دانشگاه سهند) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرحله آموزش و همچنین ارزیابی همه مدل‌ها، از یک مجموعه داده کاملاً یکسان استفاده شد (جزئیات در بخش ۲). برای ارزیابی مدل‌ها، ضمن ترسیم برازش مدل روی اسکاتریلات، نمودار خطای مدل در تک‌تک نمونه‌ها ترسیم شد تا جزئیات دقیق‌تری از نحوه برازش مدل به هریک از نمونه‌ها فراهم شود. نتایج این ارزیابی‌ها در شکل‌های «۴-الف» تا «۴-ز» ارائه شده است. با بررسی شکل ۴ مشخص می‌شود که همه مدل‌های پیشنهادی نسبت به مدل‌های پیشین (الف-۴ و ب-۴) برازش بهتری به داده‌های مورد استفاده داشته است. بهترین نتایج در مدل «تابع کسری (ب-۴)» فراهم شده است. نمودار خطای مدل جزئیات بیشتری از عملکرد مدل را نشان می‌دهد. هرچقدر این مقادیر به عدد صفر نزدیک باشند، کارایی مدل در تخمین سطح دریاچه بالاتر خواهد بود. با بررسی اسکاتریلات‌های ارائه شده در شکل ۴ مشخص می‌شود که مدل تابع کسری پیشنهادی از کمترین خطا در تخمین سطح دریاچه برخوردار بوده و خطای آن در مقایسه با سایر مدل‌ها در پایین‌ترین سطح قرار دارد. نکته مهم دیگری که در این نمودارها جلب توجه می‌کند؛ کارایی پایین «مدل دانشگاه

سهند» است. خطاهای مثبت و منفی این مدل ضمن اینکه مقادیر بسیار بالایی هستند، با حالت تقارن نسبت به یکدیگر، خطای مجموع را تقلیل می‌دهند و اگر از معیارهای نادرستی مثل «مجموع خطا» برای ارزیابی استفاده شود، خطای مدل به اشتباه بسیار کمتر از مقدار واقعی به نظر خواهد رسید. این ارزیابی‌ها ناصحیح قبلاً در مقاله (احمدی و همکاران، ۲۰۱۵) صورت گرفته است.

در مقاله حاضر، برای بررسی و مقایسه دقیق مدل‌ها، علاوه بر اسکاتریلات، معیارهای کمی شامل $RMSE^1$ ، MAE^2 ، $MAPE^3$ و ضریب نش-ساتکلیف NSE^4 (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰) محاسبه شده و در جدول ۱ ارائه شده است. هرچقدر مقادیر $RMSE$ ، MAE و $MAPE$ به عدد صفر نزدیک‌تر باشند و معیار NSE به عدد یک نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل در تخمین سطح دریاچه بالاتر خواهد بود. چنانچه در جدول ۱ مشخص است؛ مدل تابع کسری پیشنهادی کمترین خطای رگرسیون را به همراه دارد؛ به طوری که $RMSE$ ، MAE و $MAPE$ این مدل به ترتیب برابر با $۵۷/۸۴$ ، $۴۶/۲۰$ و $۱/۵۴$ بوده و کمترین مقادیر در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی است. همچنین ضریب NSE برای مدل تابع کسری حدود $۰/۹۹۵۸$ برآورد شده که بالاترین مقدار در بین سایر مدل‌ها است. در مجموع، تابع کسری پیشنهادی را می‌توان بهترین مدل تخمین سطح-تراز دریاچه ارومیه معرفی کرد. در مرتبه بعدی مدل شبکه عصبی قرار دارد که خطای $RMSE$ آن حدود $۶۲/۳۴$ و ضریب NSE آن حدود $۰/۹۹۵۱$ بود. در مراتب پایین‌تر به ترتیب مدل‌های پیشنهادی؛ تابع گوسین درجه دوم ($RMSE=86.53$ و $NSE=0.9907$)، تابع فوریه مرتبه اول ($RMSE=145.30$ و $NSE=0.9251$)، تابع نمایی مرتبه دوم ($RMSE=173.46$ و $NSE=0.9626$) و مدل چندجمله‌ای درجه سوم ($RMSE=173.68$ و $NSE=0.9625$) قرار دارند که همگی این مدل‌ها، از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های پیشین برخوردار هستند. در بین مدل‌های پیشین نیز، عملکرد «مدل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی» با خطای $RMSE$ حدود $۳۱۱/۸۰$ و ضریب NSE حدود $۰/۸۷۹۲$ بهتر از «مدل دانشگاه سهند» با $RMSE$ بالای $۸۵۶/۷۹$ و ضریب NSE پایین $۰/۰۸۸$ بود.

1- Root Mean Square Error (RMSE)

2- Mean Absolute Error (MAE)

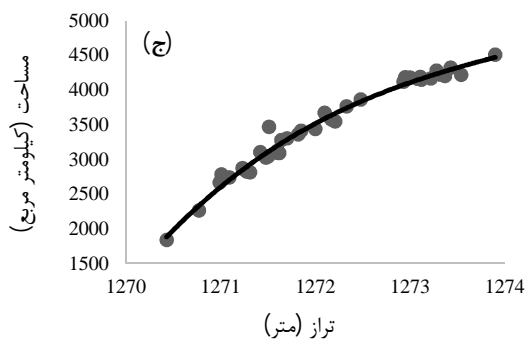
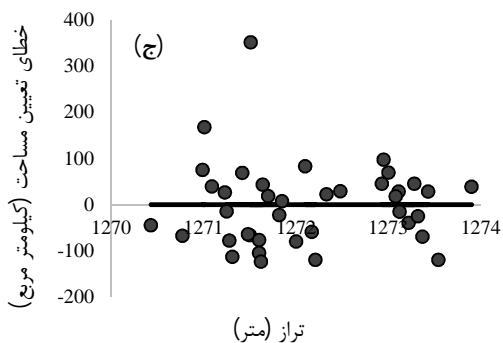
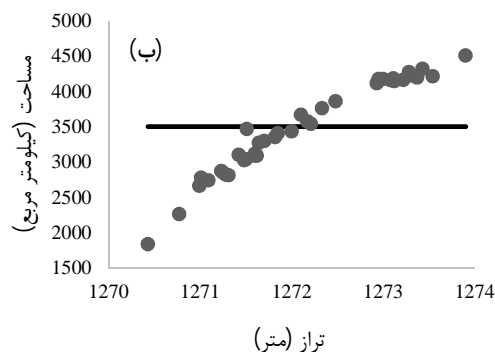
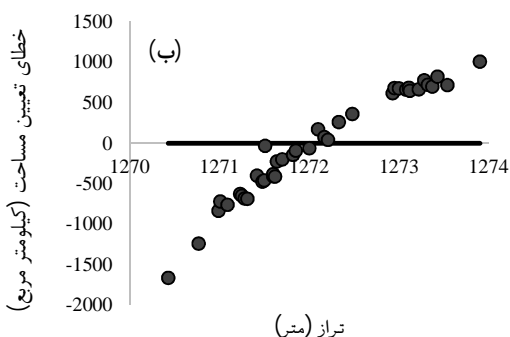
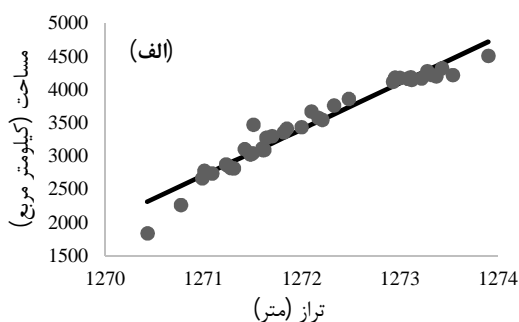
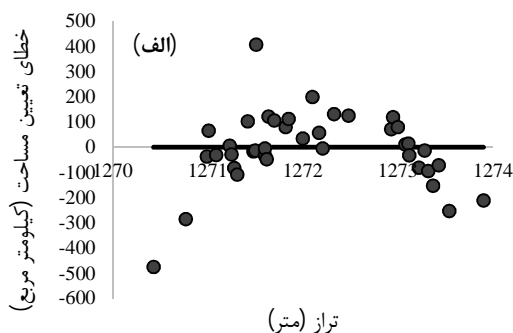
3- Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

4- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

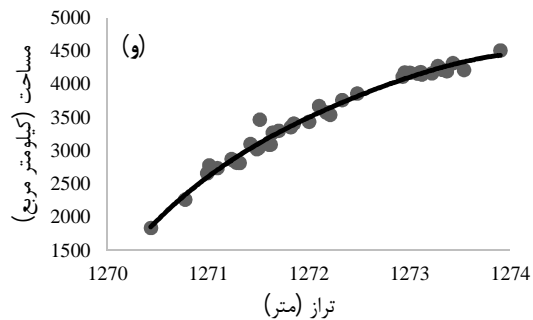
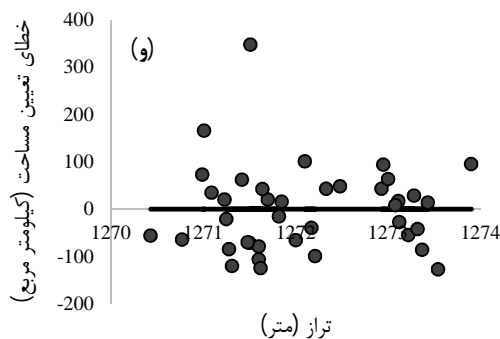
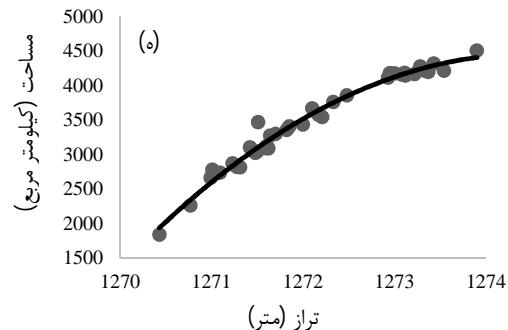
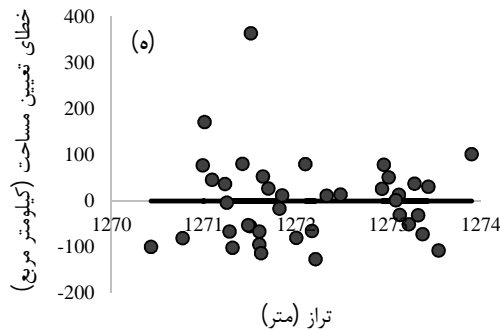
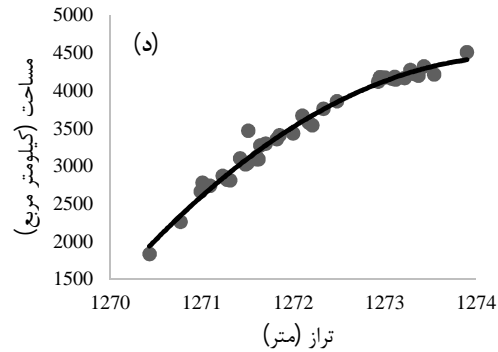
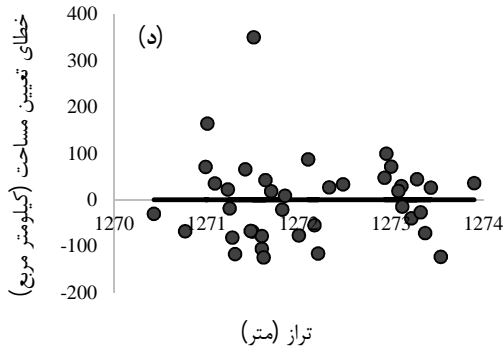
جدول ۱- ارزیابی کمی مدل‌های تراز-سطح دریاچه ارومیه

| نام مدل | RMSE (Km ²) | MAPE (%) | MAE (Km ²) | NSE (0-1) |
|--|-------------------------|----------|------------------------|-----------|
| تابع پایه مدل آب منطقه‌ای آذربایجان غربی | ۳۱۱/۸۰ | ۸/۸۲ | ۲۸۶/۲۶ | ۰/۸۷۹۲ |
| تابع پایه مدل دانشگاه سهند | ۸۵۶/۷۹ | ۲۶/۲۲ | ۷۱۷/۹۷ | ۰/۰۸۸۴ |
| چندجمله‌ای درجه سوم | ۱۷۳/۶۸ | ۵/۰۶ | ۱۱۸/۵۹ | ۰/۹۶۲۵ |
| تابع نمایی مرتبه دوم | ۱۷۳/۴۶ | ۵/۰۴ | ۱۱۷/۹۰ | ۰/۹۶۲۶ |
| تابع فوریه مرتبه اول | ۱۴۵/۳۰ | ۴/۶۶ | ۱۱۰/۸۷ | ۰/۹۲۵۱ |
| تابع گوسین مرتبه دوم | ۸۶/۵۳ | ۲/۸۶ | ۷۸/۱۳ | ۰/۹۹۰۷ |
| شبکه عصبی مصنوعی | ۶۲/۳۴ | ۱/۸۶ | ۶۰/۹۳ | ۰/۹۹۵۱ |
| تابع کسری | ۵۷/۸۴* | ۱/۵۴ | ۴۶/۲۰ | ۰/۹۹۵۸ |

بهترین نتایج به صورت بولد نشان داده شده است.



شکل ۴- نتایج رگرسیون روی اسکاتریپلات برای مدل‌های پیشنهادی و مدل‌های موجود: الف) مدل آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی (معادله (۳))، ب) مدل دانشگاه سهند (معادله (۵))، ج) مدل چندجمله‌ای درجه سوم (معادله (۸))



ادامه شکل ۴- نتایج رگرسیون روی اسکاتریپلات برای مدل‌های پیشنهادی و مدل‌های موجود: (د) مدل تابع نمایی مرتبه دوم (معادله (۱۴))، (ه) مدل تابع فوریه مرتبه اول (معادله (۱۲))، (و) مدل تابع گوسین مرتبه دوم (معادله (۱۴))

«دانشگاه سهند»، روابط (۲ و ۴)، ارتباط بین تراز آب دریاچه و مساحت دریاچه از نوع معکوس فرض شده است که از نظر منطقی صحیح به نظر نمی‌رسد و همین مسئله از دلایل پایین بودن دقت این دو مدل است. در بین مدل‌های پیشنهادی دو مدل «تابع کسری» و «شبکه عصبی مصنوعی» با ساختار پیچیده‌تر نسبت به سایرین، از دقت بالاتری نسبت به بقیه مدل‌ها برخوردار هستند. هرچند نتایج حاصل از این دو مدل خیلی نزدیک به یکدیگر است، اما پیچیدگی محاسباتی آن‌ها تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارد. تابع کسری (گویا) از نسبت دو تابع چندجمله‌ای شکل می‌گیرد و ساختار نسبتاً ساده‌ای

علاوه بر مقایسه کمی مدل‌ها که با استفاده از معیارهای MAPE، MAE، RMSE و NSE صورت گرفت، تفسیر موجز از این مدل‌ها ضروری به نظر می‌رسد. با بررسی ویژگی دریاچه ارومیه مشخص می‌شود که یک ارتباط مستقیم بین تراز آب دریاچه و مساحت دریاچه وجود دارد. هرچند این ارتباط از نوع خطی نیست، اما مستقیم است؛ به طوری که در نتیجه افزایش تراز دریاچه، مساحت آن افزایش می‌یابد. در توسعه مدل‌های پیشنهادی، ارتباط مستقیم بین تراز آب دریاچه و مساحت دریاچه لحاظ شده و به همین دلیل عملکرد بهتری نسبت به دو مدل پیشین دارد. در مدل‌های «آب منطقه‌ای آذربایجان غربی» و

دارند؛ در مقابل، شبکه‌های عصبی هرچند توانایی قابل‌توجهی در حل مسائل پیچیده دارند، طراحی و پیاده‌سازی آن‌ها نسبت به تابع کسری بسیار پیچیده‌تر است. تعیین معماری بهینه شبکه‌های عصبی، تعیین تعداد لایه‌ها، تعیین تعداد نورون‌های هر لایه، انتخاب توابع انتقال (فعال‌سازی)، وزن‌دهی اولیه شبکه و سایر پارامترهای دخیل در عملکرد آن، از چالش‌های مهم در پیاده‌سازی شبکه‌های عصبی است که باید به دقت انجام پذیرد. در کاربردهایی که مدل‌های ساده‌تر بتواند به نتایج رضایت‌بخشی نائل شوند، استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر توصیه نمی‌شود؛ بنابراین در تحقیق حاضر با لحاظ نکات یادشده و هم‌سطح بودن تقریبی دقت دو مدل شبکه عصبی و تابع کسری، مدل تابع کسری نسبت به مدل شبکه عصبی ارجح بوده و برای تخمین مدل تراز-سطح دریاچه ارومیه پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

کشور ایران از چند دهه قبل تاکنون با مشکلات جدی در حوزه آب درگیر بوده و در صورت عدم توجه مؤثر به این مسئله، بحران‌های بسیار بیشتر و شدیدتری در آینده نزدیک رخ خواهد داد. از نظر اقلیمی، ایران در ناحیه خشک جهانی قرار داشته و متوسط بارش آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. اقلیم خشک منطقه، بارش‌های پایین، رشد جمعیت، مصرف زیاد آب، برداشت بیش از حد آب‌های سطحی و زیرزمینی و توسعه ناهمگون و ناپایدار در بخش‌های مختلف از جمله دلایل اصلی بروز بحران‌های آبی در ایران است. از نشانه‌های این وضعیت، خشک‌شدن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب، فرسایش خاک، بیابان‌زایی و طوفان‌های ریزگردها است که با شدت‌های مختلف در مناطق مختلفی از ایران در حال وقوع است. یکی از منابع آبی ارزشمند ایران، دریاچه ارومیه است که در سال‌های اخیر به دلایل متعددی تراز آبی دریاچه به پایین‌ترین حد ممکن طی چند دهه قبل رسیده و قسمت اعظمی از سطح دریاچه خشک شده است. با پسر رفت آب دریاچه، شوره‌زاری در حدود چندصد کیلومترمربع در منطقه به وجود آمده است که زمینه‌ساز وزش بادهای نمکی در منطقه شده است. برای مقابله با بحران‌های آبی موجود و پیشرو، وجود اطلاعات مکانی و

توصیفی صحیح و جامع از دریاچه ضروری است. این اطلاعات را می‌توان با انجام مشاهدات زمینی و فضایی تهیه کرد. هر نوع از دسته مشاهدات زمینی و فضایی مزایا و محدودیت‌های خاص خود را داشته و تلاش‌های زیادی در زمینه برقراری ارتباط بین این دو نوع مشاهدات انجام گرفته است که به «تخمین مدل تراز-سطح» معروف هستند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تخمین روزانه سطح دریاچه را بدون نیاز به مشاهدات فضایی فراهم کرد. به دلیل اهمیت بالای مدل تراز-سطح و نبود مدل‌های کارآمد برای دریاچه ارومیه، در تحقیق حاضر ۶ مدل متنوع برای تخمین رگرسیون تراز-سطح دریاچه ارومیه شامل توابع پایه چندجمله‌ای، نمایی، فوریه، گوسین، کسری (گویا) و شبکه عصبی پیشنهاد شده و به همراه مدل‌های موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی‌های کمی انجام گرفته در تحقیق حاضر نشان داد که مدل تابع کسری پیشنهادی از کمترین خطا در تخمین سطح دریاچه برخوردار بوده و خطای آن در مقایسه با سایر مدل‌ها در پایین‌ترین سطح قرار دارد؛ به طوری که معیارهای RMSE، MAE و MAPE تابع کسری به ترتیب برابر با ۵۷/۸۴، ۴۶/۲۰ و ۱/۵۴ است که بهبود پنج برابری دقت نسبت به مدل موجود «آب منطقه‌ای آذربایجان غربی» را نشان می‌دهد. همچنین ضریب نش-ساتنکلیف (NSE) برای این مدل پیشنهادی حدود ۰/۹۹۵۸ بوده که بالاترین مقدار در بین سایر مدل‌های پیشنهادی و مدل‌های موجود است. در مرتبه بعدی مدل شبکه عصبی بوده که نتایج نزدیکی با مدل تابع کسری داشت. خطای RMSE شبکه عصبی حدود ۶۲/۳۴ و ضریب NSE آن ۰/۹۹۵۱ بود. با وجود دقت مشابه این دو مدل پیشنهادی، پیچیدگی طراحی و محاسباتی مدل شبکه عصبی نسبت به مدل تابع کسری بسیار بیشتر بوده؛ بنابراین مدل تابع کسری با دقت بالاتر و پیچیدگی کمتر نسبت به شبکه عصبی، به عنوان بهترین مدل برای تخمین تراز-سطح دریاچه ارومیه معرفی و توصیه می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در تجزیه و تحلیل‌های مختلف هیدرولوژیک و محیطی و برنامه‌های پایش و احیای دریاچه ارومیه مؤثر واقع شود.

11. Farahmand N. and Sadeghi V. 2020. Estimating Soil Salinity in the Dried Lake Bed of Urmia Lake Using Optical Sentinel-2 Images and Nonlinear Regression Models. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 48(4): 1-13.
12. Ghaheri M. Baghal-Vayjooee M.H. and Naziri J. 1999. Lake Urmia, Iran: a summary review. *International Journal of Salt Lake Research*. 8(1): 19-22.
13. Hassanzadeh E. Zarghami M. and Hassanzadeh Y. 2012. Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*. 26(1): 129-145.
14. Jaafari S. Danehkar A. and Alizadeh Shabani A. 2013. Investigation of coastline change of the Urmia Lake using remote sensing and GIS (1990-2012), *International Journal of Aquatic Biology*. 1(5): 215-220.
15. Kim P. 2017. *Matlab deep learning with machine learning, neural networks and artificial intelligence*. Apress, New York.
16. Merufinia E. Aram A. and Esmaeili F. 2014. Saving the Lake Urmia: from slogan to reality (challenges and solutions). *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*. 3(3): 277-288.
17. Nash J.E. Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles, *Journal of hydrology*. 10 (3): 282-290.
18. Mohammadi A. Shahabi H. Shirzadi A. Al-Ansari N. Ahmad B.B. Chen W. Khodadadi M. Ahmadi M. Khosravi K. Jaafari A. and Nguyen H. 2020. Monitoring and assessment of water level fluctuations of the lake urmia and its environmental consequences using multitemporal landsat 7 etm+ images. *International journal of environmental research and public health*. 17(12): 4210.
19. Pengra B. 2012. The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences. UNEP-GRID, Sioux Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS).
20. Sima S. and Tajrishy M. 2013. Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran. *Journal of Great lakes research*. 39(1): 90-99.
21. Tourian M.J. Elmi O. Chen Q. Devaraju B. Roohi Sh. and Sneeuw N. 2015. A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*. 156: 349-360.
22. Yamaguchi N. Sakotani A. Ichijo T. Kenzaka T. Tani K. Baba T. and Nasu M. 2012. Break down of Asian dust particle on

منابع

1. دسترنج ح. ر. توکلی ف. و سلطان پور ع. ۱۳۹۷. بررسی تغییرات سطحی و حجمی آب دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر. ۲۷(۱۰۷): ۱۴۹-۱۶۳.
2. آذرآفزا م. و مختاری م. ح. ۱۳۹۲. ارزیابی تغییرات شوری آب دریاچه ارومیه در اثر خشکسالی با استفاده از سنجش‌ازدور. فصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم. ۳(۲): ۱-۱۴.
3. Abbaspour M. and A Nazaridoust. 2007. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*. 64(2): 161-169.
4. AghaKouchaka A. Norouzi H. Madani K. Mirchi A. Azarderakhsh M. Nazemi A. Nasrollahi N. Farahmand A. Mehran A. and Hasanzadeh E. 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. *Journal of Great Lakes Research*. 41(1): 307-311.
5. Ahmadi J. Kahforoushan D. Fatehifar E. Zoroufchi Benis K. and Nadjafi M. 2015. Forecasting Surface Area Fluctuations of Urmia Lake by Image Processing Technique. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*. 2(2): 183-187.
6. Cook A. G. Weinstein P. and Centeno J.A. 2005. Health effects of natural dust. *Biological Trace Element Research*. 103(1): 1-15.
7. Crétaux J. F. Arsen A. Calmant S. Kouraev A. Vuglinski V. Bergé-Nguyen M. Gennero M.C. Nino F. Abarca Del Rio R. Cazenave A. and Maisongrande P. 2011. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in space research*. 47 (9): 1497-1507.
8. Delavar M. A. Naderi A. Ghorbani Y. Mehrpouyan A. and Bakhshi A. 2020. Soil salinity mapping by remote sensing south of Urmia Lake, Iran. *Geoderma Regional*. 22: e00317.
9. jamali M. de Beaulieu J.L. Shah-hosseini M. Andrieu-Ponel V. Ponel P. Amini A. Akhiani H. Leroy S. Stevens L. Lahijani H. and Brewer S. 2008. A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, NW Iran. *Quaternary Research*. 69(3): 413-420.
10. Eimanifar A. and Mohebbi F. 2007. Urmia Lake (northwest Iran): a brief review. *Saline systems*. 3(1): 1-8.

- wet surface and their possibilities of cause of respiratory health effects. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 35(7): 1187-1190.
23. 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.