

Numerical Study of Hydrodynamics and Water Quality Properties in Lake Urmia Considering Different Causeway Opening Configurations

A. Safaie^{1*} and M. Asadina²

Abstract

To study effects of the Lake Urmia's causeway opening configurations at different water levels on the hydrodynamics and water quality of the lake, a three-dimensional biophysical model of the Lake has been developed based on FVCOM. The causeway opening configurations, proposed by the Urmia Lake Restoration Program, include the current situation of the causeway of the lake, without the causeway, without any opening, and a modified causeway with an additional 500-meter opening. The results of this research for the water level of 1274.1 m (the desirable restoration level which is called the ecological level) showed that in the absence of the causeway and in the case of adding an additional opening of 500-meter to the present causeway, the salinity difference between the north and south parts will be reduced respectively by 11 and 19 P.S.U. due to the flow exchange between these two parts. The closure of the causeway opening or reducing the flow exchange between the northern and southern parts will cause a decrease in dissolved oxygen (DO) and a doubling of chlorophyll-a in the northern part of the lake. At the water level of 1270.7 m (the existing water level), changing the causeway opening has no significant effect on the concentration of dissolved oxygen and the lake is always experiencing the low-oxygen condition. At the water level of 1272 m (the restoration level most likely to be achieved), changing the causeway opening increased the growth of phytoplankton, especially in the northern part, which can cause eutrophication of the lake. This study highlights that in addition to increasing the water level and reducing salinity, water quality indicators should also be addressed in the main objectives of Lake Urmia restoration plan.

Keywords: Lake Urmia, Hydrodynamics, Water Quality Modeling, FVCOM, Causeway.

Received: March 15, 2023

Accepted: June 18, 2023

شبیه‌سازی هیدرودینامیکی - کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف بازشدگی میانگذر

عمار صفائی^{۱*} و میلاد اسدی‌نیا^۲

چکیده

در این پژوهش اثرات تغییرات احتمالی در بازشدگی میانگذر بر روی خصوصیات فیزیکی و کیفی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور یک مدل سه‌بعدی عددی هیدرودینامیکی - کیفی برپایه مدل FVCOM توسعه داده شده است. از این مدل برای شبیه‌سازی وضعیت دریاچه در ترازهای مختلف آب و شرایط مختلف بازشدگی میانگذر استفاده شده است. حالت‌های مختلف بازشدگی میانگذر به پیشنهاد ستاد احیای دریاچه ارومیه شامل شرایط فعلی میانگذر، بدون در نظر گرفتن میانگذر، بدون بازشدگی و همچنین اصلاح میانگذر با اضافه شدن یک بازشدگی ۵۰۰ متری بوده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در تراز ۱۲۷۴/۱ متر (تراز مطلوب برای احیای دریاچه که تراز اکولوژیک نامیده شده است)، در نبود میانگذر و در حالت اضافه شدن بازشدگی ۵۰۰ متری، اختلاف شوری بخش‌های شمال و جنوب در اثر تبادل جریان بین این دو بخش به ترتیب به اندازه ۱۱ و ۱۹ P.S.U. کم خواهد شد. بسته شدن بازشدگی میانگذر یا کم شدن تبادل جریان بین بخش شمالی و جنوبی سبب کاهش اکسیژن محلول به محدوده بی‌اکسیژنی و افزایش دو برابری کلروفیل-ا در شمال دریاچه خواهد شد. در تراز ۱۲۷۰/۷ متر تغییرات میانگذر تأثیر چندانی بر روی غلظت اکسیژن محلول نداشته و دریاچه همواره در شرایط کم‌اکسیژنی است. در تراز ۱۲۷۲ متر نیز اصلاح میانگذر سبب افزایش رشد فیتوپلانکتون‌ها به خصوص در قسمت شمالی گشته و دریاچه را به سمت تغذیه‌گرایی سوق می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد علاوه بر افزایش تراز آب و کاهش شوری شاخص‌های کیفی نیز می‌بایست در اهداف اصلی احیای دریاچه ارومیه مدنظر قرار گیرند.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، هیدرودینامیک، مدل‌سازی کیفی آب، مدل FVCOM، میانگذر شهید کلاتری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۸

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: asafaie@sharif.edu

2- Ph.D. Student in Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.2.10.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.2.10.7)

۱- استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

*- نویسنده مسئول

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



۱- مقدمه

۱-۱- مقدمه و مرور ادبیات فنی

دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران، در حد فاصل میان دو استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی قرار دارد. بزرگترین و شورترین دریاچه داخل ایران است که بین طول‌های جغرافیایی $37^{\circ} 06'$ تا $38^{\circ} 15'$ واقع شده است. 45° و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 06'$ تا $38^{\circ} 15'$ واقع شده است. کاهش مستمر حجم آب دریاچه در اثر تبخیر و کاهش منابع آب ورودی به دریاچه منجر به کاهش تراز سطح آب دریاچه شده است (Mohammadi et al., 2022). سطح آب دریاچه ارومیه در دهه اخیر با شیب نسبتاً تندی کاهش یافته است. به طوری که در طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۴ حدود ۸۰ درصد از حجم آب دریاچه کاسته شده است (AghaKouchak et al., 2014). این امر سبب افزایش شوری دریاچه در طول زمان شده و شوری آن به حد فوق اشباع رسیده است. در سال‌های اخیر شوری دریاچه به حدود ۴۰۰ گرم در لیتر رسیده است. خشک شدن دریاچه و شوری زیاد آن باعث تهدید اکوسیستم دریاچه شده است.

در سال‌های گذشته حجم زیادی از منابع آب تجدیدپذیر حوضه توسط بخش‌های مختلف برداشت شده است. از سوی دیگر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به واسطه حفر چاه‌های متعدد در سطح حوضه به طور غیر مستقیم بر کاهش تراز آب دریاچه تأثیر گذاشته است. ساخت و بهره‌برداری از سدهای متعدد در سطح حوضه آبریز بر کاهش رواناب ورودی به دریاچه تأثیرگذار بوده و توسعه نامتوازن کشاورزی با برداشت بیش از حد از منابع آب تجدیدپذیر مرتبط است (Parsinejad et al., 2022). علاوه بر این عوامل انسانی، تغییر در پارامترهای اقلیمی مانند افزایش نسبی دمای هوا و کاهش بارندگی در سطح حوضه نیز در کاهش تراز آب دریاچه مؤثر است (Malaekheh et al., 2022). عامل انسانی دیگری که در خشک شدن دریاچه مطرح می‌شود احداث میانگذر شهید کلانتری است که با تغییر شرایط جریان احتمالاً کیفیت آب در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه را تغییر خواهد داد.

برای خروج از این وضعیت بحرانی، هدف اصلی ستاد ملی برنامه احیای دریاچه ارومیه افزایش سطح آب دریاچه به $1274/1$ متر تعریف شده است (Abbaspour & Nazaridoust., 2007; Jaihouni et al., 2021; Sima et al., 2017). در این تراز آب که آن را تراز اکولوژیکی نامیده‌اند، انتظار می‌رود شوری ناشی از سدیم کلرید به 240 گرم در لیتر برسد و کاهش آن به بقای میگوی آرتیمیا کمک کند. اما با وجود تلاش‌های صورت گرفته در زمینه احیای دریاچه ارومیه، هنوز سطح

آب و غلظت شوری دریاچه ارومیه به حد مطلوب نرسیده است. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد نبود داده‌های میدانی جامع و مناسب، برنامه‌ریزی برای دریاچه ارومیه را غیرواقعی کرده است (Danesh- Yazdi & Ataie-Ashtiani, 2019). از آنجایی که داده‌های میدانی دریاچه ارومیه برای درک فرآیندهای هیدرودینامیکی و شوری محدود است یا در دسترس نیست، یک مدل سه بعدی جامع برای بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی دریاچه و دینامیک شوری به منظور ارائه طرح‌های احیا قابل اعتمادتر و تصمیم‌گیری بهتر مورد نیاز است (MacWilliams et al., 2015; Parsinejad et al., 2022).

تاکنون مدل‌های عددی متعددی برای بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی و شوری دریاچه ارومیه اتخاذ شده‌اند (Hamidi-Razi et al., 2019; Marjani & Jamali et al., 2014; Safavi et al., 2018, 2020; Soudi et al., 2021; Zeinoddini et al., 2015). در بیشتر مطالعات قبلی اغلب مدل‌های مبتنی بر MIKE مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل برای مدل‌سازی محیط‌های آبی نظیر سواحل و دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل سادگی و سهولت در اجرای آن در ایران محبوبیت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های بین‌المللی دارد. این در حالی است که این مدل‌ها از حداکثر چگالی پیش فرض تابع یونسکو (1037 کیلوگرم بر متر مکعب) استفاده کرده‌اند که با چگالی واقعی دریاچه ارومیه فاصله زیادی دارد (Hemmati et al., 2020; Dadashzadeh et al., 2020; Soudi et al., 2019; Zeinoddini et al., 2015). همچنین، با توجه به عمق کم دریاچه ارومیه، در برخی از این مطالعات با فرض اینکه ستون آب اختلاط کامل بوده و شوری در جهت عمودی همگن است، از مدل‌های دو بعدی استفاده شده است. به عنوان مثال، محققان قبلی با استفاده از مدل دو بعدی MIKE 21 و مدل سه بعدی MIKE 3 HD/AD، گردش و توزیع شوری را برای یک سال $1986-1987$ شبیه‌سازی کردند. مقایسه نتایج این دو مدل نشان داد که نتایج شبیه‌سازی شده سه بعدی با داده‌های میدانی همبستگی بیشتری دارد. البته اثرات سرعت عمودی، شوری و گرادیان دما در مدل‌های دو بعدی نادیده گرفته شده است (Hamidi-Razi et al., 2019; Soudi et al., 2017; Zeinoddini et al., 2009, 2014).

علاوه بر موارد فوق، در برخی از مطالعات برای تولید میدان باد تنها از یک ایستگاه استفاده شده است و فرض بر این بوده است که توزیع مکانی پارامترهای هواشناسی بر روی دریاچه ثابت است. با توجه به اهمیت در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای هواشناسی بر روی تغییرات جریان آب، این فرض می‌تواند نتایج شبیه‌سازی متناقضی را ایجاد نماید (Safavi et al., 2020; Zeinoddini et al., 2014). علاوه بر

این، در چند تحقیق تعدادی از رودخانه‌های فصلی نادیده گرفته شده و عمدتاً رودخانه‌های جنوبی را در نظر گرفته‌اند (Safavi et al., 2018) که می‌تواند بر دقت جریان و الگوهای شوری تأثیر منفی بگذارد. اثرات توزیع دمای آب بر هیدرودینامیک دریاچه نیز به ندرت در مدل‌های قبلی در نظر گرفته شد (Dadashzadeh et al., 2020)، در حالی که برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد، معادلات حاکم یعنی معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی باید به طور همزمان حل شوند. بعلاوه، حتی به منظور تصمیم‌گیری برای برنامه احیای دریاچه ارومیه، هیدرودینامیک و شوری دریاچه به صورت همزمان انجام نشده و به صورت دو قسمت کاملاً مجزا شبیه‌سازی شده است (Tabriz University, 2017). همچنین نتایج شبیه‌سازی شده باید در برابر داده‌های میدانی مانند تراز سطح آب، شوری، دما و سرعت اعتبارسنجی شوند تا از هرگونه نتیجه‌گیری گمراه‌کننده جلوگیری شود. با این حال، در برخی از مطالعات، این امر یا اصلاً انجام نشده است یا فقط برای بخشی از خروجی مدل‌سازی انجام شده است (Hamidi_Razi et al., 2019; Sabbagh_Yazdi et al., 2020; Zeinoddini et al., 2014).

(Zeinoddini et al., 2014) در هر دو دوره کم‌آبی و پرآبی دریاچه نشان داد که نه احداث بازشدگی‌های جدید و نه حذف کل میانگذر نمی‌تواند رژیم هیدرودینامیکی و شوری دریاچه را بهبود بخشد. همچنین صباغ یزدی و همکاران (Sabbagh_Yazdi et al., 2020) نشان دادند که افزودن دهانه بازشدگی دیگری در میانگذر، بهبودی در الگوی گردش جریان بین بازوهای شمالی و جنوبی نخواهد داشت یا بسیار ناچیز است. بعلاوه حمیدی رازی و همکاران (Hamidi-Razi et al., 2019) از یک مدل دو بعدی برای تعیین اثربخشی سناریوهای احیا برای دریاچه استفاده کردند. این سناریوها شامل تخریب پل و بستن بازشدگی (تقسیم دریاچه به دو اکوسیستم مستقل)، حفظ وضعیت فعلی، احداث دایک در قسمت جنوبی دریاچه و کاهش مصرف آب کشاورزی در دریاچه بود. نتایج نشان داد که اصلاح روش‌های کشاورزی و کشت محصولات کم‌آب می‌تواند مؤثرترین نقش را در احیای نسبی دریاچه داشته باشد و سایر سناریوها تأثیر چندانی در احیای دریاچه ندارند.

همانطور که در بالا اشاره شد به منظور احیای دریاچه ارومیه تا کنون راهکارهای متعددی در خصوص تغییر در بازشدگی پل میانگذر شهید کلاتری پیشنهاد شده است. برای بررسی هر یک از سناریوهای پیشنهادی لازم است اثرات تغییرات احتمالی هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در این پژوهش یک مدل هیدرودینامیکی-شیمیایی-کیفی برای دریاچه ارومیه توسعه داده شده است. این مدل الگوی دما، شوری، جریان و خصوصیات کیفی را به صورت سه بعدی و همزمان شبیه‌سازی می‌کند. برای توسعه مدل از داده‌های دبی، دما و شوری رودخانه‌های ورودی به صورت روزانه استفاده شده است. داده‌های هواشناسی نیز برای دقت بهتر مدل به صورت سری زمانی ساعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از معرفی مدل توسعه داده شده، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های میدانی صحت‌سنجی و ارائه شده‌اند.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-کیفی دریاچه ارومیه

در این پروژه مدل سه‌بعدی هیدرودینامیکی-شیمیایی-کیفی دریاچه ارومیه توسعه داده شد. بدین منظور مدل انتخابی می‌بایست قابلیت شبیه‌سازی پدیده‌های موجود در دریاچه ارومیه را داشته باشد. در این پروژه از مدل سه بعدی FVCOM¹ با مش نامنظم استفاده شده است (Chen et al., 2003, 2006). این مدل در محیط‌های آبی مختلفی نظیر رودخانه (Chen et al., 2022b)، دریاچه (Safaie et al.,

به منظور کاهش اثرات منفی احداث میانگذر بر روی دریاچه، اقدامات اصلاحی متعددی پیشنهاد شده است؛ اما مدل‌سازی‌های صورت گرفته در مطالعات قبلی نتایج متناقضی را در مورد اثربخشی اقدامات اصلاحی ارائه کرده است. به عنوان مثال، صدرا (Sadra et al., 2004) یک مدل هیدرودینامیکی دو بعدی برای بررسی اثربخشی راه‌حل‌های اصلاحی بر جریان و گردش شوری در دریاچه به کار گرفته و توصیه کرده است که یک دهانه ۵۰۰ متری جدید در بازوی غربی میانگذر اضافه شود. این مطالعه پیش‌بینی کرده است این راه‌حل باعث افزایش ۴۰ درصدی تبادل آب بین حوضه‌های جنوبی و شمالی و همچنین بهبود گردش شوری می‌شود. (Tabriz University (2017) و Tarh- Noandishan (2020) نیز پیشنهاد کردند که برای کمک به دریاچه برای بازگشت به شرایط طبیعی خود (مانند قبل از سال ۱۳۵۸) نیاز به افزودن دهانه‌های اضافی به میانگذر وجود دارد. از طرفی دیگر زین‌الدینی و همکاران (Zeinoddini et al., 2014) دریاچه را با در نظر گرفتن راه‌حل‌های اصلاحی مورد مطالعه توسط صدرا (Sadra et al., 2004) شبیه‌سازی کرده و به این نتیجه رسید که هیچ یک از این راه‌حل‌ها نمی‌توانند تغییرات قابل توجهی در الگوهای شوری کلی دریاچه در مقایسه با شرایط پیش از احداث میانگذر ایجاد کنند. نتایج آنها همچنین نشان می‌دهد که افزودن دهانه‌های جدید تنها اثرات محلی محدودی بر روی جریان و رژیم شوری در نزدیکی گذر خواهد داشت. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی زین‌الدینی و همکاران

مختصات $E 22^{\circ} 45'$ و $N 47^{\circ} 37'$ نظیر دمای آب، شوری، نترات، فسفر آلی، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ صحت‌سنجی شده‌اند. همچنین برای اطمینان از دقت مدل در محاسبه بیلان آب تراز آب شبیه‌سازی شده نیز با مقادیر میدانی مقایسه شده است. معادلات حاکم بر مدل هیدرودینامیکی دریاچه معادلات ناویر-استوکس (معادلات مومنتوم به همراه معادله پیوستگی) و معادلات انتقال حرارت و شوری هستند (Chen et al., 2006):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial u}{\partial z}) + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial v}{\partial z}) + F_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial w}{\partial z}) + F_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

در این مدل چگالی تابعی از دما و شوری در نظر گرفته شده است. u و v به ترتیب سرعت در جهت‌های x ، y و z هستند. T دما و S شوری هستند. K_m ضریب ویسکوزیته eddy در راستای عمودی، K_h ضریب پخش حرارت eddy در راستای عمودی و F_u ، F_v ، F_w ، F_S به ترتیب روابط مربوط به پخش افقی مومنتوم، حرارت و شوری هستند. معادله تعادل جرم (انتقال و انتشار) برای المان‌های کیفی آب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (A_h \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h \frac{\partial C_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial C_i}{\partial z}) + S_i \quad (8)$$

در این معادله C_i ($i = 1, \dots, 8$) غلظت متغیرهای کیفی آب است که به ترتیب عبارتند از: اکسیژن محلول ($\text{mg O}_2/\text{L}$)، اکسیژن خواهی بیولوژیکی کربن (mg C/L)، فیتوپلانکتون (mg C/L)، آمونیاک (mg N/L)، نترات (mg N/L)، نیتروژن آلی (mg N/L)، اورتوفسفات (mg P/L)، فسفات (mg P/L) و کلروفیل-آ (mg chl a/L) هستند.

(Rowe et al., 2019; Zhang et al., 2020) در سراسر دنیا با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل به صورت منبع باز بوده و با توجه به مطالعه موردی و در صورت نیاز می‌توان کد آن را بهبود بخشید. مش‌بندی این مدل به صورت شبکه نامنظم مثلثی بوده که می‌تواند ویژگی‌های پیچیده سواحل را با دقت بیشتری نسبت به شبکه‌های منظم مدل‌سازی کند. در این مدل معادلات ناویر-استوکس، پیوستگی، دما و شوری به صورت هم‌زمان در هر گره از شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن خشک‌شدگی/ترشدگی حل می‌شود (Chen et al., 2022a, 2022b). (Safaie et al., 2017) در مطالعات خود در دریاچه میشگان و دریاچه گال در ایالات متحده آمریکا با توسعه مدل FVCOM نشان دادند نتایج این مدل در پیش‌بینی گردش آب، ساختار دما و شوری آب قابل اعتماد بوده و قادر خواهد بود با محاسبه تبخیر و در نظر گرفتن سایر مولفه‌های بیلان آب دریاچه از جمله آب زیرزمینی، نوسانات ساعتی تراز سطح آب دریاچه را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی نماید. همچنین این مدل در پیش‌بینی کیفیت آب و شبیه‌سازی باکتری، پاتوژن، کلروفیل-آ و اکسیژن محلول نیز عملکرد خوبی داشته است (Safaie et al., 2020, 2021a, 2021b).

در این مطالعه بازه مدل‌سازی از تاریخ ۲۰۱۶/۲/۱۸ تا ۲۰۱۶/۱۲/۱۸ میلادی برابر با ۲۲ بهمن ماه ۱۳۹۴ تا ۲۸ آذر ماه ۱۳۹۵ هجری شمسی و برای ۱۰ ماه در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی شرایط اعمالی بر روی دریاچه عواملی مانند میدان باد، شار حرارتی، بارش، تبخیر و رودخانه‌های ورودی باید در نظر گرفته شوند. برای آماده‌سازی مدل هیدرودینامیکی داده‌های هواشناسی مانند سرعت و جهت باد، دمای هوا، میزان پوشش ابر، نقطه شبنم، رطوبت نسبی، تابش موج کوتاه و موج بلند خورشید، از داده‌های ساعتی بازگاو شده ERA5 استفاده شده است. این داده‌های هواشناسی به منظور محاسبه تنش باد و شار حرارتی بر روی شبکه محاسباتی در هر گام زمانی در مدل‌سازی استفاده شده‌اند. میزان بارش از ایستگاه‌های مشاهداتی باران‌سنجی اطراف دریاچه بدست آمده است. از دیگر ورودی‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی دریاچه ارومیه دبی، دما، شوری، غلظت مواد مغذی، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ رودخانه‌های ورودی و همچنین میزان بارش ورودی به دریاچه است. داده‌های مورد نیاز رودخانه‌های اصلی در ایستگاه‌های R1 تا R8 و داده‌های دریاچه در ایستگاه U1 (شکل ۱) توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران در سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ به صورت ماهیانه اندازه‌گیری شده است. نتایج مدل با مقایسه با داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده در ایستگاه U1 به

(P/L) و فسفر آلی (mg P/L). مولفه S_i ($i = 1, \dots, 8$) نیز بیانگر روابط منبع/خروجی^۲ هر یک از متغیرهای کیفی هستند. روابط حاکم بر منبع/خروجی تمام متغیرهای کیفی به تفصیل در مقاله Safaie et al. (2021b) تعریف شده است. کلروفیل-آ یک شاخص قابل اعتماد برای تخمین توده‌های جلبک است که در بسیاری از مدل‌های کیفیت آب از آن استفاده می‌شود. از آنجایی که به طور معمول داده‌های مشاهداتی جلبک به تفکیک هر گونه فیتوپلانکتون در دسترس نیست، غلظت کل کلروفیل-آ به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری مجموع همه گونه‌های فیتوپلانکتون در مدل‌های کیفی استفاده می‌شود (Mao et al., 2015).

در سال‌های اخیر به دلیل شوری بسیار بالا و عمق کم، امکان اندازه‌گیری سرعت آب در دریاچه ارومیه وجود نداشته است. به عنوان مثال، همزمان با داده برداری میدانی سال ۱۳۹۵ از دستگاه ADCP برای سنجش سرعت استفاده شده است، اما به دلیل شوری بسیار بالای دریاچه دستگاه سرعت سنج بعد از زمان کوتاهی از کار افتاده است. در سال ۱۴۰۱ نیز از سرعت سنج لاگراژی استفاده شد، اما شوری بالا باعث شد روی دستگاه لایه‌ای نمک تشکیل شده و سیگنال دستگاه از کار بیفتد. با این حال برای اطمینان از اینکه مدل توانایی مدل‌سازی میدان سرعت را دارد، از داده‌های سرعت جمع‌آوری شده در سال ۱۹۹۱ میلادی (۱۳۷۰ هجری شمسی) که دریاچه پرآب بود استفاده شده است (Sadra, 2004). در این داده‌برداری ۳۴ پروفایل سرعت در عمق آب در ده ایستگاه در روزهای ۸ تا ۱۳ نوامبر سال ۱۹۹۱ برداشت شده است.

۲-۲- هیدرولوژی حوضه ارومیه

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ۱۶ رودخانه به دریاچه ارومیه می‌ریزند که مقادیر دبی و شوری آن‌ها با توجه به اطلاعات موجود درونیابی و به صورت ساعتی به عنوان ورودی مدل تعریف شدند. مقادیر بارش با استفاده از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های اطراف دریاچه ارومیه به‌دست‌آمده و بر روی مش محاسباتی دریاچه با استفاده از روش Natural Neighbor درونیابی شده‌اند. مقادیر تبخیر نیز با استفاده از الگوریتم COARE³ به‌دست آمده‌اند (Chen et al., 2006).

این الگوریتم با استفاده از دمای هوا، دمای آب، رطوبت نسبی، فشار هوا، تابش با طول موج بلند و کوتاه، سرعت باد، بارش و پوشش ابر،

تخمینی از شار حرارتی سطح می‌دهد که برای بدست آوردن مقدار تبخیر استفاده می‌شود. تبخیر E بر اساس میلی‌متر بر ساعت از رابطه زیر به دست می‌آید (Edson et al., 2013; Fairall et al., 1996):

$$E = \frac{Q_{lat}}{L_v \rho} \quad (9)$$

که در آن L_v گرمای نهان بخار شدن آب برابر $2.44 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ، ρ چگالی آب دریاچه و Q_{lat} گرمای نهان تبخیر سطحی است.

در نظر گرفتن پدیده بارش و تبخیر در مدل‌سازی صحیح نوسانات تراز آب و به تبع در محاسبه صحیح شوری و سایر پارامترهای کیفی بسیار تأثیرگذار است. به خصوص با در نظر گرفتن اینکه تبخیر سطحی تنها مؤلفه خروجی در بیلان آب دریاچه ارومیه است، تخمین دقیق آن از اهمیت زیادی برخوردار است. در طول دوره مدل‌سازی متوسط تبخیر سطحی دریاچه ارومیه ۱۲۳۸ میلی‌متر در سال و متوسط بارش نیز حدود ۵۸۱ میلی‌متر برآورد شده است.

۳-۲- شبیه‌سازی حالت‌های مختلف بازشدگی میانگذر و تراز آب

به منظور بررسی اثرات میانگذر با بازشدگی‌های متفاوت و در ترازهای ۱۲۷۰/۷، ۱۲۷۲ و ۱۲۷۴/۱ متر، سناریوهای موجود در جدول ۱ در بازه زمانی یکساله توسط مدل توسعه یافته دریاچه براساس مدل FVCOM شبیه‌سازی شده‌اند. این سه تراز منتخب، نشانگر تراز آب فعلی (۱۲۷۰ متر)، تراز اکولوژیکی مد نظر ستاد احیا (۱۲۷۴/۱ متر) و تراز ۱۲۷۲ متر تراز هاست که از نظر ستاد احیا رسیدن به آن محتمل‌تر است. لازم به ذکر است که برای اعمال این ترازها در مدل‌سازی، نیاز است تا تراز آب در شرایط اولیه در تنظیمات مدل اصلاح شود. برای تراز ۱۲۷۴/۱ متر دریاچه، چهار حالت مختلف میانگذر مدل‌سازی شده است. از مقایسه نتایج این مدل‌سازی‌ها می‌توان برای تحلیل تأثیرات میانگذر بر روی شرایط هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه استفاده نمود. در حالت اول حالت طبیعی دریاچه در گذشته و قبل از احداث میانگذر در نظر گرفته شده است. در حالت بعدی شرایط میانگذر فعلی دریاچه (مطابق با تراز سال ۲۰۱۵) شبیه‌سازی شده است. در حالت سوم، یک بازشدگی جدیدی به طول ۵۰۰ متر در میانگذر شهید کلانتری در کیلومتر ۵+۳۰۰ در نظر گرفته شده است. در حالت چهارم نیز شرایط دریاچه در حالتی بررسی شده است که بخش شمالی و جنوبی کاملاً توسط خاکریز از هم جدا شده باشند. در شکل ۲ شبکه‌بندی این چهار حالت با یکدیگر مقایسه شده است.

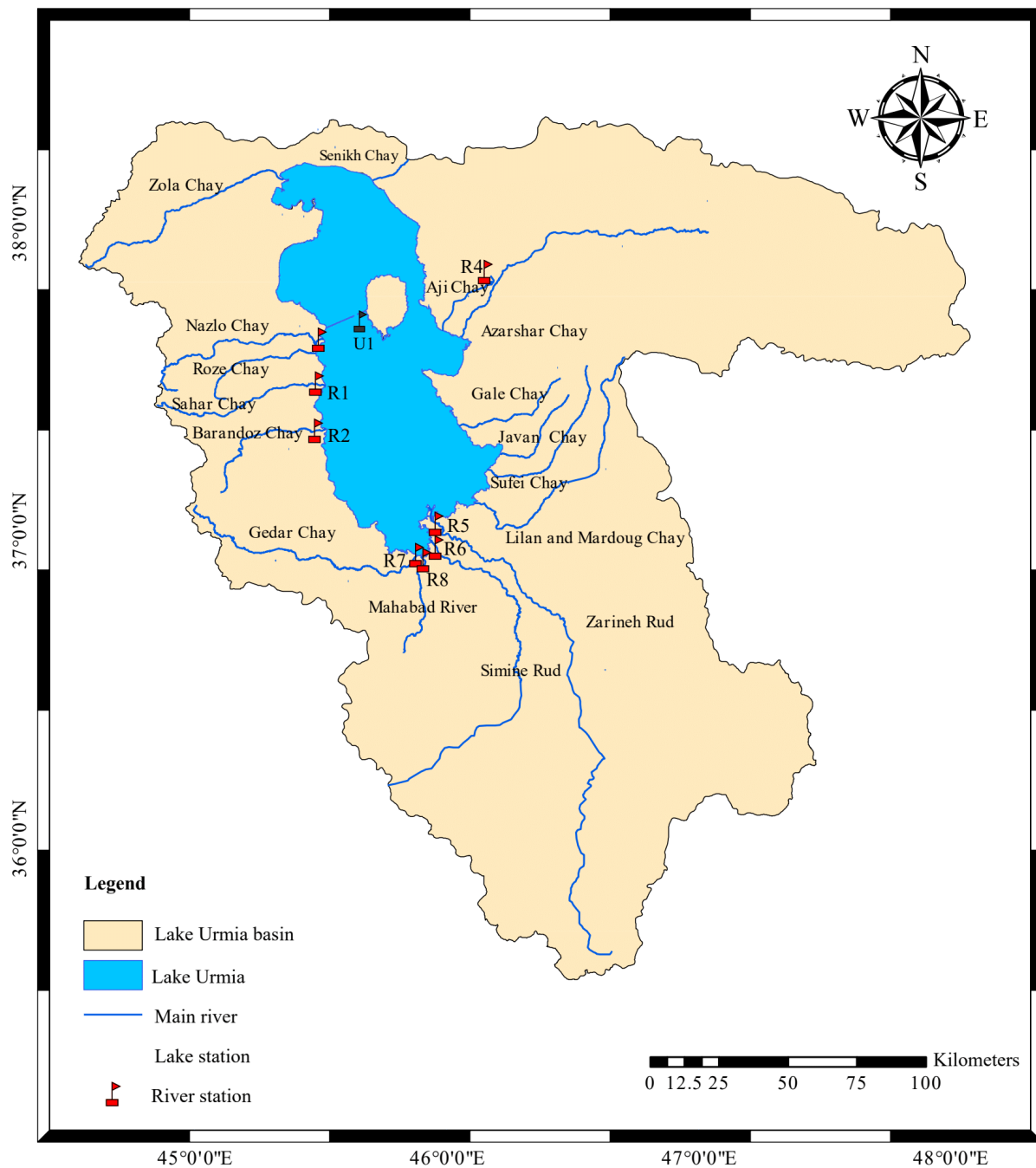


Fig. 1- Rivers flowing to Lake Urmia and the location of the in-situ measurement stations

شکل ۱- نقشه رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری

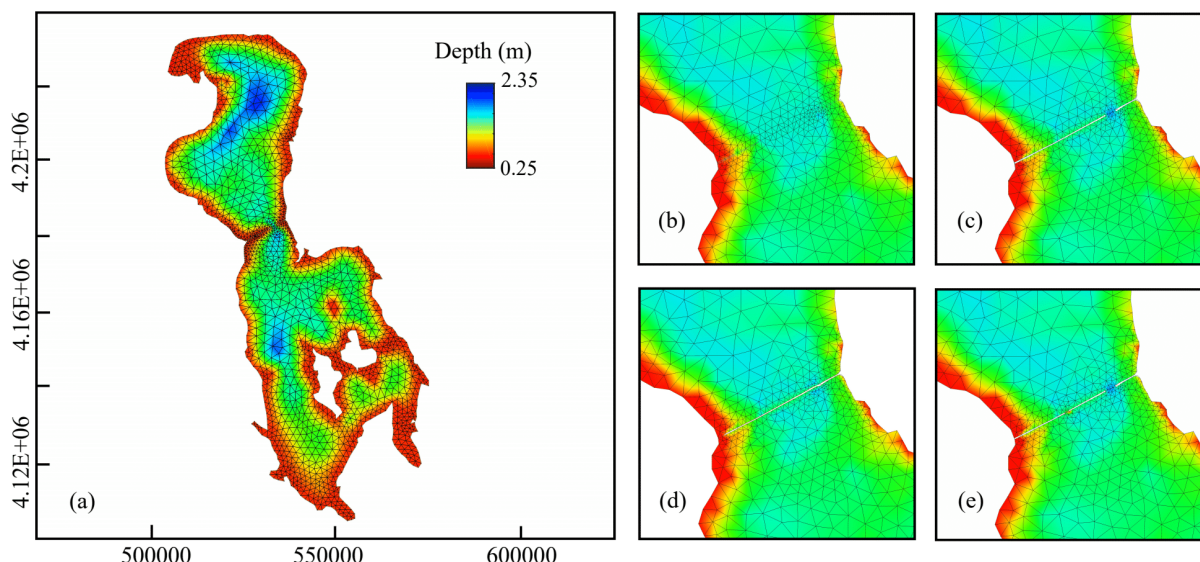


Fig. 2- (a) Numerical mesh of different scenarios in Lake Urmia: (b) without causeway, (c) current situation, (d) without opening, and (e) modified causeway

شکل ۲- شبکه‌بندی عددی دریاچه برای حالت‌های مختلف میانگذر

Table 1- Scenarios with different causeway openings in Lake Urmia

جدول ۱- سناریوهای بررسی اثرات میانگذر با بازشدگی‌های متفاوت

Elevation (m)	Modifeid causeway	Current situation	Without causeway	Wthout opening
1270.7	✓	✓	✓	
1272	✓	✓		
1274.1	✓	✓	✓	✓

پارامترهای R2 و RMSE برای دمای آب دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۹۶۷ و ۱/۰۴ °C است. میانگین دمای آب شبیه‌سازی شده برای کل دریاچه ۲۱ °C با کمینه ۳ °C و بیشینه ۳۵ °C است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل عملکرد خوبی در پیش‌بینی تراز آب، دما و شوری دریاچه ارومیه داشته است. مقایسه نتایج مدل‌سازی با پروفایل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در ۱۰ ایستگاه نشان می‌دهد مقدار R2 بین ۰/۸۱ و ۰/۹۹۸ و میانگین آن ۰/۹۶ بوده است. مقادیر RMSE نیز بین ۰/۰۰۴ و ۰/۰۲۵ متر بر ثانیه و میانگین آن نیز ۰/۰۱ متر بر ثانیه بوده است. لازم به ذکر است (Zeinoddini et al. (2014 برای واسنجی مدل خود از داده‌های ۴ ایستگاه از این ۱۰ ایستگاه استفاده کرده‌اند و مقادیر R2 و RMSE برای آنها به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۱۵ متر بر ثانیه بوده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد دمای آب که در روز ۵۰ از سال حدود ۱۰ °C بوده روندی افزایش داشته و در روز ۲۳۰ به بیشینه مقدار خود

۳- نتایج و بحث

در شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده تراز آب، دمای آب، شوری، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ با داده‌های میدانی (نقاط توپر شکل) ارائه شده است. لازم به ذکر است که داده‌های میدانی عمدتاً در ۳ عمق متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند و مدل نیز قادر به در نظر گرفتن ده لایه ارتفاعی است که این موضوع در شکل ۳ قابل رویت است. در جدول ۲ به مقایسه آماری پارامترهای شبیه‌سازی شده با مشاهدات پرداخته شده است. مدل‌سازی عددی توانسته است با دقت بالایی تراز آب دریاچه را پیش‌بینی کند. به طوری که پارامترهای R2 و RMSE برای تراز آب دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۹۰۷ و ۰/۰۰۴ متر است. به طور میانگین اختلاف تراز آب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ۴/۵۶ سانتی‌متر است. پارامترهای R2 و RMSE برای شوری دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۸۵۶ و ۱۳/۴۲۷ P.S.U بوده است. مدل عددی با دقت قابل قبولی دمای آب دریاچه را نیز پیش‌بینی کرده است.

محدود شود. در نتیجه غلظت اکسیژن محلول نیز در وضعیت نامطلوبی قرار گرفته و در بازه روزهای ۲۲۰ تا ۲۵۰ غلظت اکسیژن محلول در بستر دریاچه به مقداری نزدیک به صفر می‌رسد. لازم به ذکر است به طور کلی نیز تغییرات غلظت اکسیژن محلول در بازه کم‌اکسیژنی بوده و غلظت آن به ندرت از ۳ mg/L بیشتر می‌شود. در ادامه نتایج تأثیر سناریوهای میانگذر و ترازهای مختلف آورده شده‌اند.

۳-۱- نتایج تراز ۱۲۷۴/۱

به منظور تحلیل تأثیرات میانگذر بر روی شرایط هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه، چهار سناریوی مختلف میانگذر برای تراز ۱۲۷۴/۱ متر دریاچه شبیه‌سازی شده است. در شکل ۴ تفاوت میانگین شوری، دما، کلروفیل-آ، اکسیژن محلول و تراز آب دریاچه برای ۴ حالت (جدول ۱) در تراز ۱۲۷۴/۱ متر ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود غلظت اکسیژن محلول در هر چهار حالت نشان‌دهنده وضعیت کم‌اکسیژنی دریاچه است (شکل ۴).

به بیش از ۳۶ °C می‌رسد. همچنین، نتایج بیانگر وجود لایه‌بندی حرارتی و شوری در دریاچه در طول سال است. به عنوان مثال تفاوت دمای سطح آب و کف دریاچه در ایستگاه اندازه‌گیری نزدیک میانگذر (U1) به دلیل لایه‌بندی حرارتی در روز ۱۰۲م از سال به بیش از ۱۳ و تفاوت شوری آب نیز در همین روز حدود ۱۶۱ P.S.U بوده است. در سه ماه ابتدایی به دلیل آورد رودخانه‌ها، تراز آب دریاچه حدود ۶۰ cm افزایش پیدا می‌کند. این افزایش تراز آب موجب کاهش شوری آب به مقدار ۲۰۹ P.S.U می‌شود. همراه با گرم شدن دمای آب، افزایش تبخیر و خشک شدن رودخانه‌ها، تراز آب بعد از روز ۱۴۰ روندی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین شوری دریاچه مجدد افزایش پیدا کرده و در انتهای مدل‌سازی به بیش از ۳۰۰ P.S.U می‌رسد. در اثر افزایش دما و تراز آب، مقدار کلروفیل-آ افزایش یافته و در روز ۱۴۰ به بیشینه خود می‌رسد به طوریکه غلظت آن نسبت به ابتدای مدل‌سازی ۲/۷ برابر می‌شود. با کاهش تراز آب و خشک شدن رودخانه‌ها، مقدار مواد مغذی، اکسیژن محلول و کلروفیل-آ ورودی از طریق رودخانه‌ها به کمترین مقدار خود رسیده و باعث می‌شود رشد کلروفیل-آ بعد از روز ۲۵۰

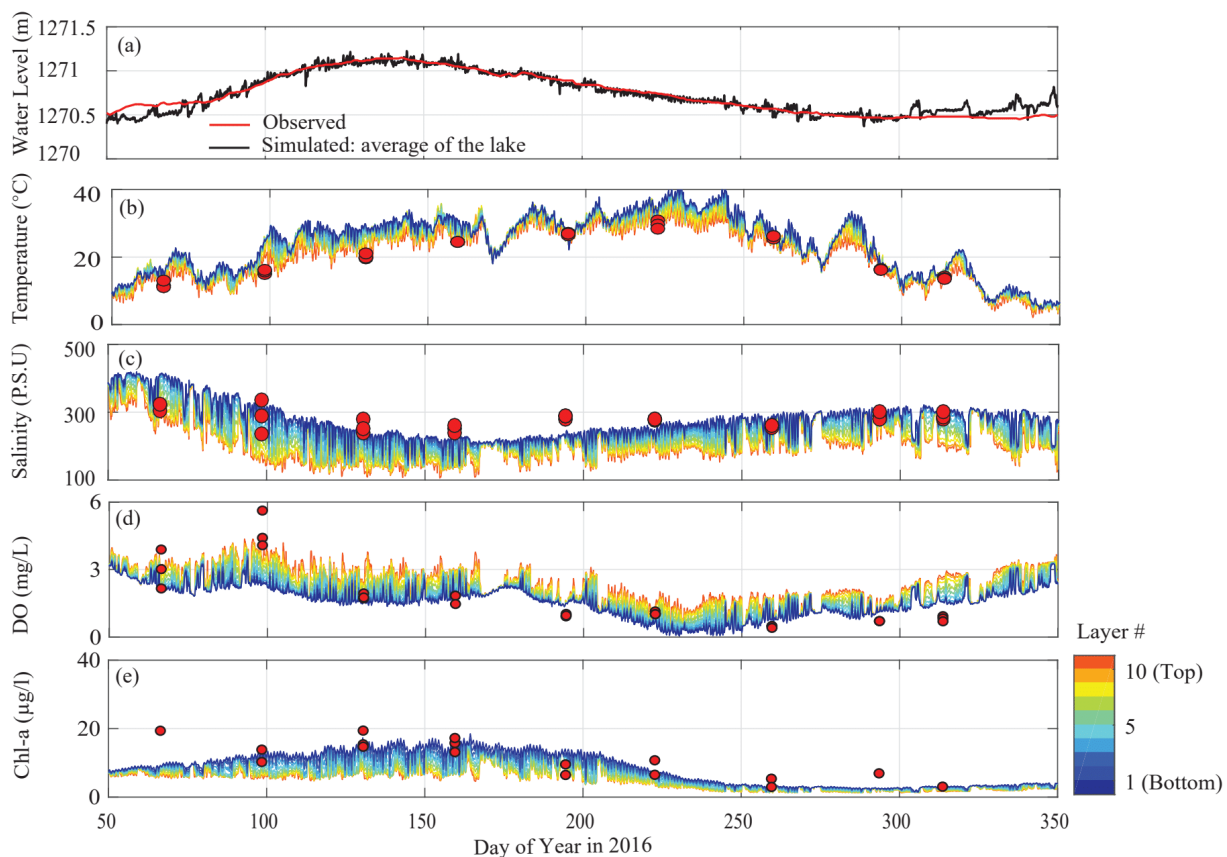


Fig. 3- Comparison of simulated results with observations (solid point) in Lake Urmia
شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های میدانی (نقاط توپر) در دریاچه ارومیه

Table 1- Statistical metrics for comparison of simulated variables with observations

PARAMETER	R ²	RMSE
WATER ELEVATION	0.907	0.004 M
WATER TEMPERATURE	0.967	1.04 °C
WATER SALINITY	0.856	13.427 P.S.U.
CHL-A	0.759	5.96 MG/L
NITRATE NITROGEN	0.48	15.4 MG/L
ORGANIC PHOSPHORUS	0.752	0.183 MG/L

جدول ۲- مقایسه آماری متغیرهای مدل سازی شده با مشاهدات

لازم به ذکر است در محاسبه شوری اولیه از اثر ترسیب و انحلال صرف نظر شده است و با افزایش تراز آب دریاچه به تراز ۱۲۷۴/۱ متر شوری اولیه در اثر فرآیند ترسیب و انحلال نمک بستر ممکن است بیشتر از مقدار فرض شده باشد. نتایج نشان می‌دهد در هر چهار حالت شبیه‌سازی شوری روندی افزایشی داشته و بعد از روز ۲۵۰ به حداکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ۴). حداکثر میانگین شوری در کل دریاچه در این بازه برای سه حالت وضعیت فعلی، اصلاح بازشدگی و بدون میانگنر تفاوت چندانی نداشته و بین ۲۱۰ تا ۲۲۰ P.S.U بدست آمده است. با توجه به اینکه رودخانه‌های موجود در شمال دریاچه سهم قابل توجهی در انتقال شوری به دریاچه دارند و رودخانه‌های جنوبی نیز آب شیرین هستند، در حالت مسدود بودن بازشدگی میانگنر، میانگین شوری در شمال دریاچه (حداکثر غلظت ۳۵۰ P.S.U) بیشتر و در جنوب آن (حداکثر غلظت ۱۴۰ P.S.U) کمتر از سایر حالت‌ها است. نتایج نشان می‌دهد اختلاف میانگین شوری در بخش شمالی و جنوبی دریاچه به ترتیب در حالت میانگنر فعلی (حداکثر اختلاف غلظت ۶۳ P.S.U)، میانگنر اصلاح شده (حداکثر اختلاف غلظت ۵۲ P.S.U) و بدون میانگنر (حداکثر اختلاف غلظت ۴۴ P.S.U) کاهش می‌یابد. بنابراین هرچه میزان بازشدگی در محل میانگنر بیشتر می‌شود این اختلاف شوری بین شمال و جنوب دریاچه کمتر می‌گردد. اما حتی بدون وجود میانگنر نیز حداکثر مقدار شوری در شمال دریاچه به بیش از ۲۴۰ P.S.U می‌رسد و همچنان اختلاف شوری بین شمال و جنوب وجود دارد. البته برخلاف سایر حالت‌ها در حالت بدون میانگنر در اثر تبادل جریان بین شمال و جنوب دریاچه بخصوص در روزهایی از سال که رودخانه‌ها جاری هستند (تا روز ۱۵۰م از سال) چندین بار شوری بین شمال و جنوب دریاچه مساوی می‌شود که نشان دهنده این است که در دریاچه اختلاط کامل بوجود آمده است. بعلاوه با زیاد شدن بازشدگی در محل میانگنر و امکان برقراری تبادل جریان قوی‌تر بین شمال و جنوب، تراز آب نوسانات بیشتری پیدا می‌کند، به طوری که در حالت مسدود بودن بازشدگی میانگنر کمترین نوسانات مشاهده می‌شود و بیشترین نوسانات مربوط به حالتی است که میانگنری وجود

حتی بدون وجود میانگنر نیز این شرایط نامطلوب بهبود نیافته است و مقدار اکسیژن محلول در این حالت در بین روزهای ۱۵۰ تا ۲۵۰ حداکثر ۰/۴ mg/L بیشتر از مقدار آن در وضعیت فعلی دریاچه شده است. در حالت مسدود بودن بازشدگی میانگنر، به دلیل رشد بیش از حد کلروفیل-آ در قسمت شمالی، میزان DO در این قسمت بعد از روز ۱۰۰م از سال به شدت پایین کاهش پیدا می‌کند و در روز ۱۶۳م به کمترین مقدار خود معادل ۰/۲۸ mg/L می‌رسد. در مورد DO نیز مشاهده می‌شود که با زیاد شدن بازشدگی بین شمال و جنوب و در نهایت حذف میانگنر، اختلاف مقادیر DO در شمال و جنوب کاهش می‌یابد.

بیشترین اختلاف میانگین اکسیژن محلول در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه در حالت مسدود بودن بازشدگی ۳/۱، در وضعیت فعلی ۱/۳۱، در صورت افزایش بازشدگی ۱/۲ و در صورت نبود میانگنر ۰/۸۳ mg/L است. به علاوه شرایط اکسیژن محلول رودخانه‌های جنوبی بهتر از رودخانه‌های شمالی است و به همین دلیل در شرایطی که بازشدگی میانگنر مسدود است، اکسیژن محلول در جنوب دریاچه در محدوده ۲/۷ تا ۴ mg/L باقی می‌ماند. در حالیکه در سه حالت دیگر غلظت اکسیژن محلول میانگین در جنوب دریاچه به زیر ۱/۷ mg/L نیز می‌رسد. به خصوص اینکه به دلیل غلظت پایین کلروفیل-آ در بخش جنوبی، در این بخش از دریاچه اکسیژن کمتری به منظور تنفس جلبک‌ها مصرف می‌شود. در جنوب دریاچه در حالتی که بازشدگی مسدود است، گردش جریان و هوادهی به واسطه زیاد بودن دبی رودخانه‌های جنوبی قوی‌تر از حالت‌های دیگر است. در کل جنوب دریاچه از لحاظ DO کیفیت بهتری دارد و هر چه ارتباط جنوب با شمال بیشتر می‌شود باعث بهبود شرایط کیفی شمال دریاچه نیز می‌شود.

در تراز آب ۱۲۷۴/۱ متری که دریاچه نسبتاً پرآب است، شوری اولیه در مدلسازی با استفاده از نسبت حجمی ۱۰۰ P.S.U فرض شده است.

جنوب دریاچه رخ نمی‌دهد و میزان کلروفیل-آ در شمال دریاچه در روز ۱۱۵ بیش از ۱۰ برابر بیشتر از جنوب دریاچه می‌شود. این اختلاف در حالت میانگذر فعلی (۲/۱۷ برابر)، میانگذر اصلاح شده (۱/۹ برابر) و بدون میانگذر (۱/۵۲ برابر) به ترتیب رو به کاهش است. میانگین غلظت کلروفیل-آ در کل دریاچه در حالت مسدود بودن بازشدگی، میانگذر فعلی، میانگذر اصلاح شده و بدون میانگذر به ترتیب ۷/۲۸، ۶/۲۶، ۶/۰۲ و ۴/۶۶ $\mu\text{g/L}$ بوده است. با توجه به اینکه در صورت عدم وجود میانگذر اختلاط کامل در دریاچه صورت می‌گیرد، مواد مغذی در حجم بیشتری از آب رقیق می‌شوند. بنابراین در این حالت در کل میزان رشد فیتوپلانکتون‌ها کمتر شده و باعث می‌شود میانگین کلروفیل-آ موجود در دریاچه حداقل باشد.

از لحاظ توزیع مکانی حداقل میزان کلروفیل-آ در سناریوی مسدود بودن بازشدگی میانگذر و در جنوب به دلیل محدود بودن مواد مغذی و حداکثر میزان کلروفیل-آ نیز در همین سناریو در شمال دریاچه قابل مشاهده است. البته مقادیر زیاد کلروفیل-آ در این حالت در شرایط واقعی ممکن است به دلیل شوری زیاد دریاچه اتفاق نیفتد، اما به طور کل نشان دهنده تغذیه گرایشی شدن شدید دریاچه و زوال آن در این تراز است.

ندارد (شکل ۴). به عنوان مثال در روز ۳۰۶ دامنه نوسانات تراز آب در حالت بدون میانگذر حدود ۳۰ cm است، اما در حالت مسدود بودن بازشدگی به ۱۵ cm کاهش پیدا می‌کند. وجود میانگذر باعث بالا آمدن تراز آب در جنوب دریاچه در نیمه دوم زمان شبیه‌سازی می‌شود که خود سبب ایجاد اختلافی در حدود ۱۰ cm بین تراز شمال و جنوب دریاچه می‌شود. در حالت مسدود بودن بازشدگی میانگذر، آب در شمال و جنوب دریاچه محبوس شده است که باعث شده است که شمال و جنوب دریاچه تراز نزدیک به هم پیدا کنند به طوری که بیشترین اختلاف تراز میانگین بین شمال و جنوب دریاچه کمتر از ۱۰ cm است.

همانطور که در شکل ۴ مشخص است در هر چهار حالت غلظت کلروفیل-آ در روز ۱۱۵ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. پس از آن غلظت کلروفیل-آ روندی کاهشی پیدا کرده و در هر چهار حالت بعد از روز ۲۰۰ به کمترین مقدار خود نزدیک به ۰/۰۱ $\mu\text{g/L}$ می‌رسد. در حالت بدون میانگذر دریاچه از نظر تغذیه‌گرایی در وضعیت بهتری قرار دارد و حداکثر غلظت کلروفیل-آ در این شبیه‌سازی حدود ۲۸ درصد کمتر از مقادیر بدست آمده در سه حالت دیگر است با توجه اینکه بیشتر مواد مغذی از طریق رودخانه‌های شمالی به دریاچه وارد می‌شوند، در حالتی که بازشدگی میانگذر مسدود شده باشد، تبادل مواد مغذی با

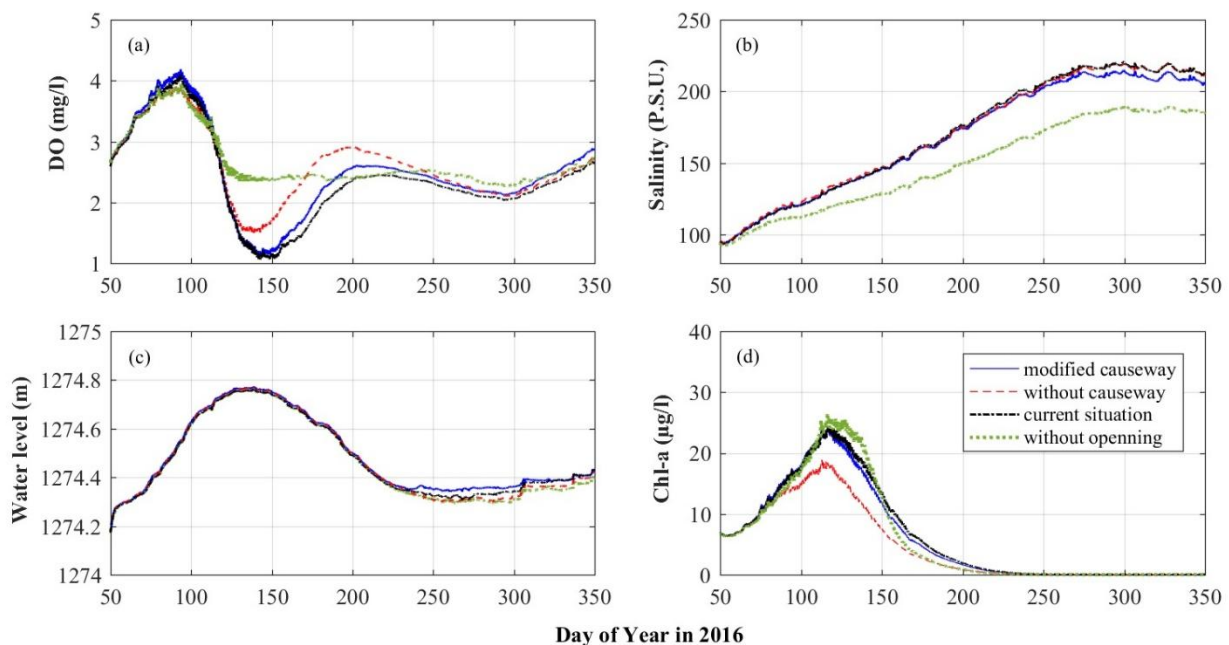


Fig. 4- Comparison of different causeway scenarios simulated for the water level of 1274.1 m (desirable restoration level)

شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف میانگذر در تراز ۱۲۷۴/۱

۲-۳- نتایج تراز ۱۲۷۲ متر

برای تراز ۱۲۷۲ متری دریاچه، دو حالت مختلف میانگذر، یکی وضعیت فعلی و دیگری اصلاح بازشدگی، شبیه‌سازی شده است. از مقایسه این نتایج می‌توان برای تحلیل تأثیرات میانگذر بر روی شرایط هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه استفاده نمود. در شکل ۵ تفاوت میانگین شوری، دما، کلروفیل-آ، اکسیژن محلول و تراز آب دریاچه برای دو حالت (جدول ۱) در تراز ۱۲۷۲ متر ارائه شده است. در این تراز به دلیل کاهش رشد فیتوپلانکتون‌ها دریاچه از نظر میزان اکسیژن محلول شرایط بهتری دارد و غلظت بیشینه و میانگین آن به ترتیب $4/3$ و $3/5$ mg/L است (شکل ۵). البته غلظت اکسیژن محلول در ابتدای شبیه‌سازی و همچنین بین روزهای ۲۶۸ تا ۳۰۰ به زیر $3/3$ mg/L می‌رسد. شوری اولیه در مدل‌سازی با استفاده از نسبت حجمی برای هر دو حالت 227 P.S.U فرض شده است. مطابق با شکل ۵ اصلاح بازشدگی میانگذر باعث کاهش جزئی در شوری کل دریاچه شده و به طور میانگین شوری تنها حدود 5 P.S.U کمتر می‌شود. در هر دو حالت با ورود آب از رودخانه‌ها در ابتدای شبیه‌سازی تا روز ۱۵۰ شوری تا غلظت 122 P.S.U کاهش یافته و سپس در اثر افزایش تبخیر و خشک شدن رودخانه‌ها روندی افزایشی پیدا می‌کند. بیشترین شوری در شمال دریاچه در روز ۲۶۸ معادل 216 P.S.U بوده که این مقدار در حالت اضافه شدن بازشدگی به غلظت 200 P.S.U کاهش پیدا می‌کند. در تراز ۱۲۷۲ متر روند تغییرات و نوسانات تراز آب در هر دو حالت شبیه به هم است (شکل ۵). روند تغییرات کلروفیل-آ نیز در هر دو حالت شبیه بوده، اما غلظت میانگین کلروفیل-آ در حالتی که بازشدگی میانگذر اصلاح شده است به علت توزیع بهتر مواد مغذی در سطح دریاچه به اندازه $0/31$ $\mu\text{g/L}$ بیشتر از مقدار بدست آمده در وضعیت موجود است. بیشترین غلظت کلروفیل-آ در این تراز در روز ۱۱۹ رخ داده و برای حالت‌های بازشدگی اصلاح شده و وضعیت موجود به ترتیب $8/34$ و $7/45$ $\mu\text{g/L}$ بوده است. بعد از روز ۱۳۰ غلظت کلروفیل-آ روندی کاهشی پیدا کرده و بعد از روز ۲۵۰ به کمترین مقدار خود به حدود $0/15$ $\mu\text{g/L}$ می‌رسد.

۳-۳- نتایج تراز ۱۲۷۰/۷ متر

برای تراز ۱۲۷۰/۷ متری دریاچه، سه حالت مختلف میانگذر مطابق با جدول ۱ شبیه‌سازی شده است. در شکل ۶ تفاوت میانگین شوری، دما، کلروفیل-آ، اکسیژن محلول و تراز آب دریاچه برای سه حالت وضعیت

فعلی، بدون میانگذر و بازشدگی اصلاح شده در تراز ۱۲۷۰/۷ متر ارائه شده است. مطابق با شکل ۶ نوسانات اکسیژن محلول در تراز ۱۲۷۰/۷ متر نشان می‌دهد دریاچه همواره در وضعیت کم‌اکسیژنی قرار داد و تنها در دو روز ۹۳ و ۳۴۹ به کمی بیشتر از 3 mg/L می‌رسد. به طور کلی میانگین اکسیژن محلول در کل دریاچه در وضعیت فعلی، در حالت اصلاح میانگذر و در حالت بدون میانگذر به ترتیب $2/19$ ، $2/04$ و $2/27$ mg/L بوده است. بنابراین در این تراز تغییرات میانگذر تأثیر چندانی بر روی غلظت اکسیژن محلول نداشته است. شوری میانگین در کل دریاچه در وضعیت موجود، در حالت اصلاح میانگذر و در حالت بدون میانگذر به ترتیب 220 ، $203/5$ و $198/7$ P.S.U بدست آمده است. در تراز ۱۲۷۰/۷ متر نیز اصلاح میانگذر و یا نبود میانگذر سبب اختلاط بیشتر آب‌های شمال و جنوب دریاچه شده و باعث کاهش شوری در دریاچه و کاهش اختلاف شوری شمال و جنوب دریاچه در حدود $16/5$ تا $21/3$ P.S.U می‌شود (شکل ۶). اختلاف شوری بین قسمت شمالی و جنوبی دریاچه از بعد از روز ۲۰۰ برای حالت فعلی و حالت میانگذر اصلاح شده حدود 80 P.S.U و برای حالت بدون میانگذر حدود 50 P.S.U بوده است. در بازه یک ماهه‌ای بین روزهای ۱۳۶ تا ۱۶۶ نیز اختلاف شوری بین شمال و جنوب دریاچه در حالت بدون میانگذر بسیار ناچیز می‌شود.

در این تراز نیز مطابق با شکل ۶ روند تغییرات و نوسانات تراز آب در هر سه حالت شبیه به هم بدست آمده است. در این تراز روند تغییرات غلظت کلروفیل-آ برای حالت بدون میانگذر و حالت وضعیت فعلی مشابه هم است. برای هر دو حالت در ابتدا غلظت در محدوده ۶ تا 7 $\mu\text{g/L}$ بوده، بعد از روز ۱۵۰ روندی کاهشی داشته و در روز ۲۵۰ به محدوده تغییرات ۲ تا 3 $\mu\text{g/L}$ برای حالت بدون میانگذر و $3/2$ تا $4/3$ $\mu\text{g/L}$ برای وضعیت موجود می‌رسد.

در شبیه‌سازی مربوط به حالت میانگذر اصلاح شده میانگین غلظت کلروفیل-آ در روز ۱۹۶ به بیشینه مقدار خود معادل $10/53$ $\mu\text{g/L}$ رسیده است و بعد از روز ۲۵۰ نیز به محدوده تغییرات $4/6$ تا $4/6$ $\mu\text{g/L}$ می‌رسد. بنابراین نتایج حالت اصلاح میانگذر در این تراز سبب افزایش رشد فیتوپلانکتون‌ها به خصوص در قسمت شمالی گشته و می‌تواند دریاچه را به سمت تغذیه‌گرایی سوق دهد.

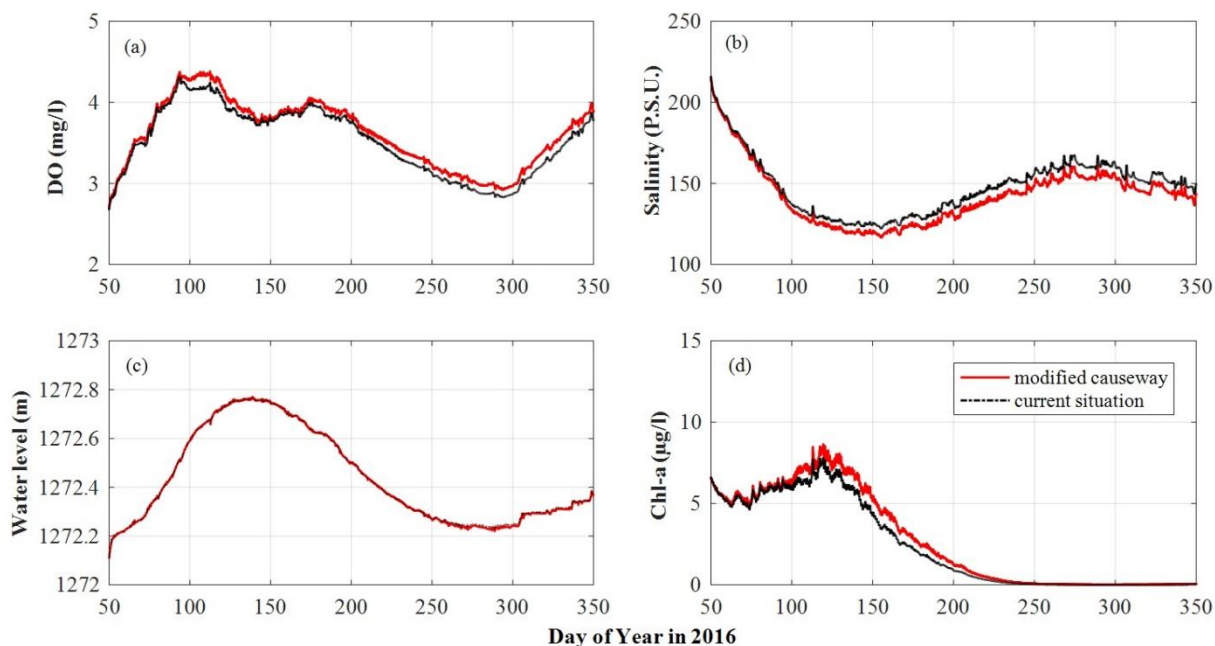


Fig. 5- Comparison of different causeway scenarios simulated for the water level of 1272 m (restoration level most likely to be achieved)

شکل ۵ - مقایسه نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف میانگذر در تراز ۱۲۷۲ متر

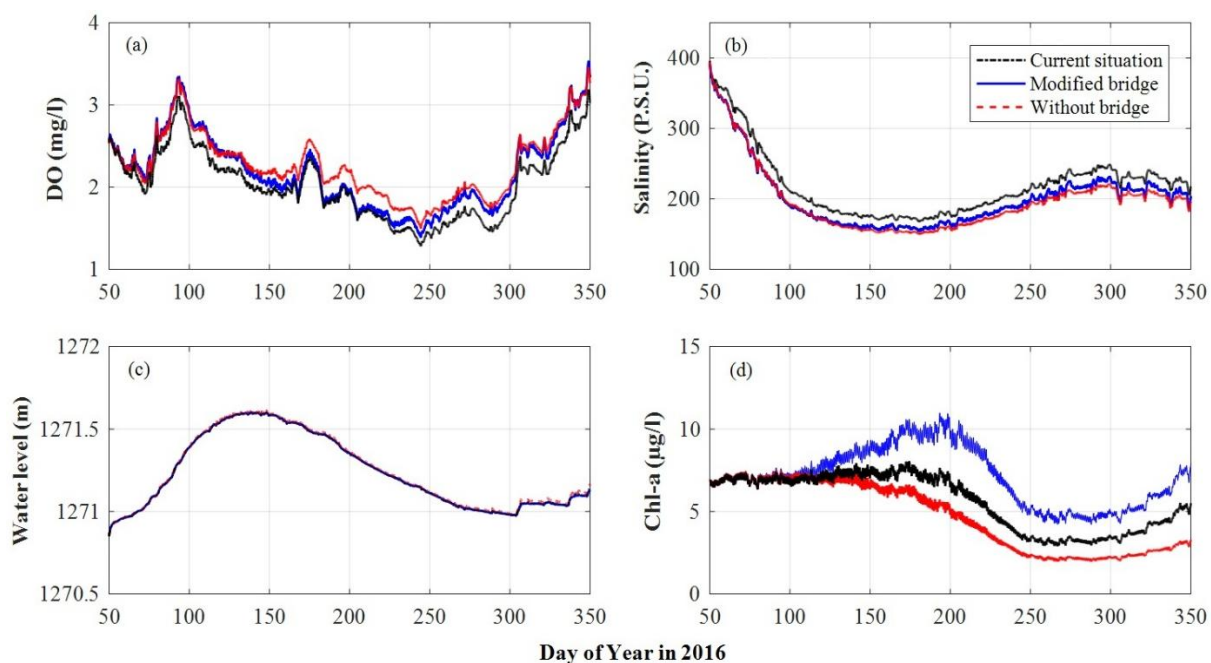


Fig. 6- Comparison of different causeway scenarios simulated for the water level of 1270 m (current level)

شکل ۶ - مقایسه نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف میانگذر در تراز ۱۲۷۰ متر

۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات تراز آب

تأثیر تغییرات تراز آب بر روی دریاچه در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. با توجه به آن می‌توان گفت: (الف) روند تغییرات شوری در تراز ۱/۱۲۷۴ متر با دو تراز دیگر متفاوت است (شکل ۷). با توجه به اینکه شوری اولیه در این تراز کمتر است، با گذشت زمان شوری فقط روند افزایش خواهد داشت. بعلاوه همانطور که انتظار می‌رود با افزایش تراز آب، شوری دریاچه کاهش می‌یابد. به عنوان مثال شوری میانگین در کل دریاچه در دو حالت وضعیت موجود و اصلاح میانگدر با افزایش تراز آب از ۷/۱۲۷۰ به ۲۲۷۲ متر به ترتیب معادل ۷۲ و ۶۰ P.S.U کاهش داشته است.

(ب) در تراز ۱/۱۲۷۴ متری دریاچه غلظت کلروفیل-آ دارای مقدار بیشینه بالاتری نسبت به ترازهای کمتر است (۲/۲ تا ۳ برابر)، زیرا به علت عمیق‌تر بودن آب در این تراز، رشد فیتوپلانکتون‌ها دیرتر به حالت اشباع رسیده و افزایش عمق شرایط مناسب‌تری را برای رشد آنها بوجود می‌آورد. در حالت کلی نیز میانگین کلروفیل-آ در کل دریاچه در تراز ۷/۱۲۷۰ متر ۳/۲ تا ۶/۲ برابر بیشتر از تراز ۲۲۷۲ متر است (شکل ۷). در حالت‌های شبیه‌سازی شده در تراز ۱/۱۲۷۴ متری کلروفیل-آ در جنوب دریاچه یک روند افزایشی و سپس کاهشی دارد. ولی در سناریوهای تراز ۷/۱۲۷۰ متر با یک شیب ملایم رو به کاهش است و مقادیر کمتری دارد. مقدار کلروفیل-آ در نیمه دوم مدل‌سازی در تراز ۱/۱۲۷۴ متر افت بسیار شدیدی می‌کند و کمترین غلظت کلروفیل-آ در تراز ۷/۱۲۷۰ نسبت به دو تراز دیگر حدود ۲ تا ۹/۴ μg/L بیشتر می‌شود. در تراز ۷/۱۲۷۰ متر، کلروفیل-آ در حالت میانگدر اصلاحی و میانگدر کنونی اختلاف قابل توجهی دارند. در صورتی که در تراز ۱/۱۲۷۴ متری اختلاف آن‌ها ناچیز بوده است.

(ج) انتظار می‌رود که با افزایش تراز آب و گردش بیشتر جریان آب، میزان DO بیشتر باشد، ولی در تراز ۱/۱۲۷۴ متر افزایش عمق آب سبب می‌شود شرایط نفوذ نور در ستون آب برای رشد کلروفیل-آ مناسب شده و غلظت آن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. به همین دلیل افزایش کروفیل-آ سبب افت شدیدی در DO می‌شود (شکل ۷). به طوریکه بعد از اینکه بیشینه کلروفیل-آ اتفاق می‌افتد، میانگین غلظت اکسیژن محلول به غلظت ۱/۱ تا ۱/۶ mg/L کاهش می‌یابد. اختلاف DO در سناریوهای مختلف در تراز ۷/۱۲۷۰ متر کمتر از همین سناریوها در تراز ۱/۱۲۷۴ است.

۴- جمع‌بندی

در ابتدا به توانایی مدل در مدل‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی و کیفی پرداخته شد و مطابق با نتایج مدل قابلیت بالایی در این خصوص داشت به گونه‌ای که مقادیر R2 و RMSE برای تراز آب دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۹۰۷ و ۰/۰۰۴، متر، برای شوری دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۸۵۶ و ۱۳/۴۲۷ P.S.U، برای دمای آب دریاچه ارومیه به ترتیب برابر ۰/۹۶۷ و ۱/۰۴°C، برای کلروفیل-آ به ترتیب برابر ۰/۷۵۹ و ۵/۹۶ μg/L و برای پروفیل سرعت به ترتیب برابر ۰/۹۶۰ و ۰/۱۰۱ m/s به دست آمد. در ادامه همانطور که پیشتر اشاره شد در راستای احیای دریاچه ارومیه و اکولوژی منطقه، تاکنون راهکارهای مختلفی برای اصلاح میانگدر شهید کلاتتری (شامل بستن یا افزایش بازشدگی) به ستاد احیای دریاچه ارومیه پیشنهاد شده است. در این پژوهش با توسعه یک مدل کوپل هیدرودینامیکی-کیفی به بررسی اثرات این راهکارهای بر خصوصیات دریاچه ارومیه پرداخته شده است. با توجه به اینکه در این مطالعه تنها یک سال تاریخی مبنای صحت‌سنجی مدل قرار گرفته است، امکان استفاده از مدل برای اثرات دراز مدت هیدرولوژی منطقه نبوده و لازم است برای این منظور داده‌برداری بلند مدت در دریاچه صورت گیرد. بعلاوه در این مطالعه از تغییرات عمق بستر دریاچه در اثر فرآیند ترسیب و انحلال صرف‌نظر شده است و برای تحلیل دقیق‌تر لازم است عمق‌سنجی دریاچه نیز به صورت متغیر با زمان داده‌برداری و شبیه‌سازی شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که با افزایش بازشدگی میانگدر اختلاف شوری بخش‌های شمال و جنوب دریاچه در اثر تبادل جریان بین این دو بخش کم خواهد شد. در مقابل در اثر بسته شدن میانگدر نیز کاهش کیفیت آب دریاچه ارومیه را شاهد خواهیم بود؛ به طوری که حتی با افزایش تراز آب دریاچه، شوری و اکسیژن محلول به صورت یکنواخت در دریاچه توزیع نخواهند شد.

با افزایش تراز آب در صورتیکه تبادل جریان بین شمال و جنوب اتفاق نیفتد؛ علاوه بر شوری، مواد مغذی و اکسیژن محلول نیز به صورت متوازن در دریاچه توزیع نشده و سبب تغییرات شدید در فرآیند رشد فیتوپلانکتون می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تراز دریاچه به دلیل کیفیت پایین آب رودخانه‌های ورودی و کم بودن اکسیژن محلول در آن‌ها، همچنان کمبود اکسیژن در دریاچه حاکم بوده و بخصوص پس از رشد فیتوپلانکتون‌ها و همزمان با خشک شدن رودخانه‌ها به کمترین حد خود خواهد رسید.

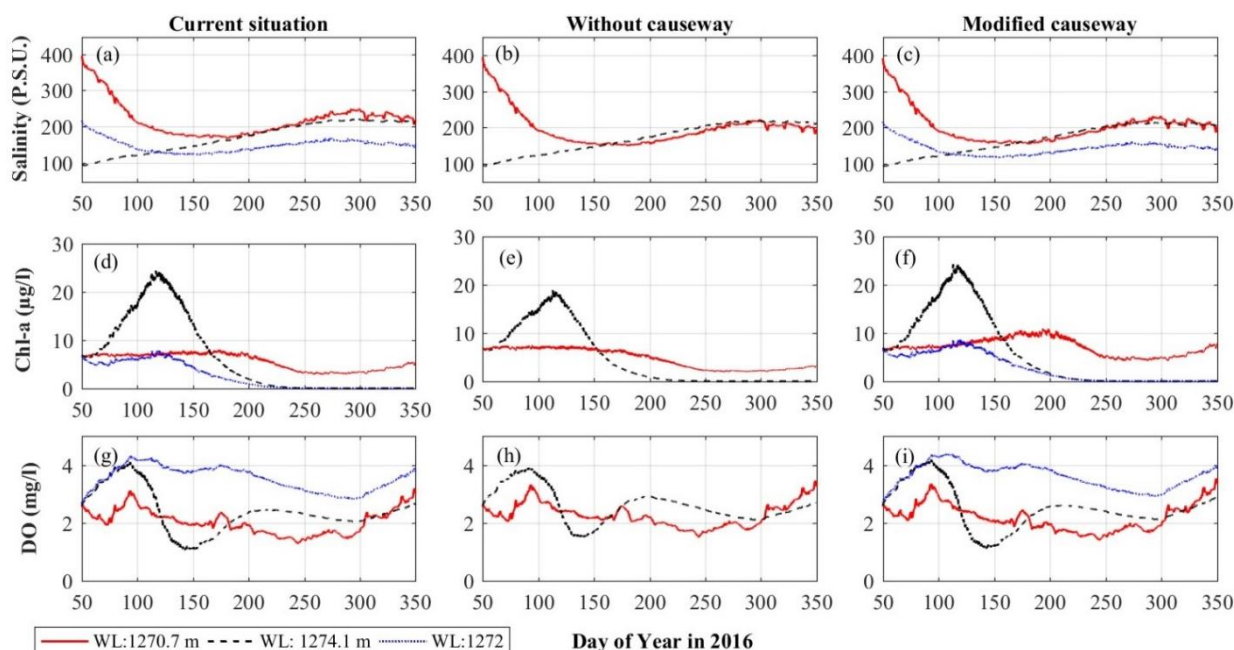


Fig. 7- Comparison of causeway scenarios simulated for different water levels

شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی حالت‌های مختلف میانگذر در ترازهای متفاوت

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از ستاد احیای دریاچه ارومیه جهت حمایت از انجام این پروژه و در اختیار گذاشتن داده‌های میدانی قدردانی می‌کنند. همچنین از آقایان علی عالی‌فر، محمدعلی معلمی، امیرمعز پیرمحمد جماعت و خانم‌ها فاطمه چمن مطلق و معصومه نیکفر که در واسنجی مدل و اجرای سناریوها کمک کردند کمال تشکر و سپاس را داریم. در انتها از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف نیز تشکر و قدردانی می‌کنیم.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Finite-Volume Community Ocean Model
- 2- Source\Sink
- 3- Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment

با توجه به وجود تناقض در نتایج مطالعات گذشته در خصوص تأثیر افزایش بازشدگی بر روی بهبود گردش جریان و توزیع شوری در دریاچه لازم است جریان تبدلی بین بخش شمالی و جنوبی دریاچه اندازه‌گیری شده و در مطالعات آینده مدل‌سازی دریاچه بر اساس مقادیر میدانی جریان تبدلی و سرعت جریان آب واسنجی و صحت‌سنجی شوند. بعلاوه تأثیر انجام عملیات عمرانی مثل خاکبرداری به منظور ایجاد بازشدگی نیاز به انجام بررسی دقیق اثرات زیست محیطی این تغییرات بر روی اکوسیستم دریاچه دارد. لازم به ذکر است که علاوه بر شوری و گردش جریان که تا کنون در مطالعات دیگر مورد توجه بوده است لازم است اثر هر گونه اصلاح بازشدگی میانگذر دریاچه بر روی خصوصیات کیفی دریاچه نیز نظیر توزیع مواد مغذی، اکسیژن محلول و فیتوپلانکتون نیز دیده شود. بدین منظور لازم است برنامه جامع پایش خصوصیات کیفی (به عنوان مثال غلظت باکتری، مواد مغذی، کلروفیل-ا) و خصوصیات شیمیایی (شوری، غلظت آنیون- کاتیون‌ها) دریاچه طراحی و اجرایی گردد. با توجه به اینکه حیات اکوسیستم دریاچه ارومیه و آرتمیا تنها وابسته به شوری نیست و در کیفیت پایین آب غیرممکن خواهد بود. لذا لازم است علاوه بر تراز آب و شوری شاخص‌های کیفی دیگر نیز به عنوان اهداف احیای دریاچه مدنظر قرار گیرند.

۶- مراجع

- Abbaspour M, Nazaridoust A (2007) Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: An ecological approach. *International Journal of Environmental Studies* 64(2):161–169
- AghaKouchak A et al. (2014) Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: Call for action. *Journal of Great Lakes Research* 41(1):307-311
- Bakhtiari A, Zeinoddini M, Tofighi MA (2011) Effects of inflow reduction on water level, morphology and salinity pattern of the Urmia Lake. *Journal of Hydraulics* 6(3):83–93
- Chen C, Liu H, Beardsley RC (2003) An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20(1):159–186
- Chen C, Beardsley R, and Cowles G (2006) An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) System. *Oceanography* 19(1):78–89
- Chen C, Qi J, Liu H, Beardsley RC, Lin H, and Cowles G (2022a) A wet/dry point treatment method of FVCOM, Part I: Stability experiments. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(7):896
- Chen C, Huang H, Lin H, Blanton J, Li C, and Andrade F (2022b) A wet/dry point treatment method of FVCOM, Part II: Application to the Okatee/Colleton River in South Carolina. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(7):982
- Danesh-Yazdi M, Ataie-Ashtiani B (2019) Lake Urmia crisis and restoration plan: Planning without appropriate data and model is gambling. *Journal of Hydrology* 576:639–651
- Edson JB, Jampana V, Weller RA, Bigorre SP, Plueddemann AJ, Fairall CW, Miller SD, Mahrt L, Vickers D, and Hersbach H (2013) On the exchange of momentum over the open ocean. *Journal of Physical Oceanography* 43(8):1589–1610
- Fairall CW, Bradley EF, Rogers DP, Edson JB, and Young GS (1996) Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled ocean atmosphere response experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101:3747–3764
- Hamidi-Razi H, Mazaheri M, Mohammadvali Samani J, and Carvajalino Fernandez M (2019) Investigating the effectiveness of urmia lake different restoration scenarios using a 2D hydrodynamic model. *Journal of Civil and Environmental Engineering* 49(2):71–81
- 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
- Hemmati M, Ahmadi H, and Hamidi SA (2020) 3D numerical simulation of wind direction effect on flow circulation and salinity patterns at Lake Urmia. *Irrigation and Water Engineering* 10(3):22–33
- Ge J, Torres R, Chen C, Liu J, Xu Y, Bellerby R, Shen F, Bruggeman J, and Ding P (2020) Influence of suspended sediment front on nutrients and phytoplankton dynamics off the Changjiang Estuary: A FVCOM-ERSEM coupled model experiment. *Journal of Marine Systems* 204:103292
- Jeihouni M, Toomanian A, Alavipanah SK, and Hamzeh S (2017) Quantitative assessment of Urmia Lake water using spaceborne multisensor data and 3D modeling. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(11):572
- Karbassi A, Bidhendi GN, Pejman A, and Bidhendi ME (2010) Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia. *Journal of Great Lakes Research* 36(3):419–424
- MacWilliams ML, Bever AJ, Gross ES, Ketefian GS, Kimmerer WJ, Franks SE, and Lackey RT (2015) Three-dimensional modeling of hydrodynamics and salinity in the san francisco estuary: An evaluation of model accuracy, X2, and the low salinity zone. *San Francisco Estuary and Watershed Science* 13(1):1–37
- Malaekheh S, Safaie A, Shiva L, Tabari H (2022) Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 36:3725-3752
- Mao J, Jiang D, and Dai H (2015) Spatial-temporal hydrodynamic and algal bloom modelling analysis of a reservoir tributary embayment. *Journal of Hydro-environment Research* 9(2):200–215
- Marjani A (2007) Three-Dimensional Numerical Modeling of Water Balance and Salt Water Transport in Urmia Lake [Master's Thesis]. Sharif University of Technology (In Persian)
- Marjani A, Jamali M (2014) Role of exchange flow in salt water balance of Urmia Lake. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 65:1–16
- Mohammadi M, Safaie A, Nejatian A, Irajizad A, and 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
- Dadashzadeh M, Parsa J, and 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 Research Journal* 14(3):133-144 (In Persian)
- Parsinejad M, Rosenberg DE, Ghale YAG, Khzaei B, Null SE, Raja O, Safaie A, Sima S, Sorooshian A, and Wurtsbaugh WA (2022) 40-years of Lake Urmia restoration research: Review, synthesis and next steps. *Science of the Total Environment* 832:155055
- Rowe MD, Anderson EJ, Beletsky D, Stow CA, Moegling SD, Chaffin JD, May JC, Collingsworth PD, Jabbari A, and Ackerman JD (2019) Coastal upwelling influences hypoxia spatial patterns and nearshore dynamics in Lake Erie. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124:6154–6175
- Sabbagh-Yazdi SR, Ghelich Khany L, and Kalhor K (2020) Numerical investigation of the effects of causeway opening configurations on horizontal currents of Lake Urmia. *International journal of Environmental Science and Technology* 17(4):1885–1898
- Sadra Co. (2004) Hydrodynamic & Hydraulic and Environmental (sediment & Salinity) Investigation Report (No. TEP81449YGP10002), Design & Construction of the Oromieh Lake Causeway. Sadra Company, Tehran, Iran
- Safaie A, Litchman E, and Phanikumar M S (2017) Evaluating the role of groundwater in circulation and thermal structure within a deep inland lake. *Advances in Water Resources* 108:310–327
- Safaie A, Wendzel A, Ge Z, Nevers MB, Whitman RL, Corsi SR, and Phanikumar MS (2016) Comparative evaluation of statistical and mechanistic models of *Escherichia Coli* at beaches in Southern Lake Michigan. *Environmental Science & Technology* 50(5):2442–2449
- Safaie A, Dang C, Qiu H, Radha H, and Phanikumar M S (2017) Manifold methods for assimilating geophysical and meteorological data in Earth system models and their components. *Journal of Hydrology* 544:383–396
- Safaie A, Litchman E, and Phanikumar MS (2021a) Decreasing groundwater supply can exacerbate lake warming and trigger algal blooms. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 126(9)
- Safaie A, Weiskerger CJ, Nevers MB, Byappanahalli MN, and Phanikumar MS (2021b) Evaluating the impacts of foreshore sand and birds on microbiological contamination at a freshwater beach. *Water Research* 190:116671
- Safaie A, Weiskerger CJ, Nguyen TD, Acrey B, Zepp RG, Molina M, Cyterski M, Whelan G, Pachepsky YA, and Phanikumar MS (2020) Modeling the photoinactivation and transport of somatic and F-specific coliphages at a Great Lakes beach. *Journal of Environmental Quality* 49(6):1612–1623
- Safavi S, Saghafian B, and Hosseini SA (2020) Characterizing flow pattern and salinity using the 3D MIKE 3 model: Urmia Lake case study. *Arabian Journal of Geosciences* 13(3):115
- Safavi S, Shamsai A, and Saghafian B (2018) Reduced-order salinity modeling of the Urmia Lake using MIKE3 and proper orthogonal decomposition models. *Water Resources* 45:728–737
- Shafieefar M (2004) Hydraulics and environmental study of Shahid Kalantari Project in the Urmia Lake. Sadra Company, Teheran, Iran (in Persian)
- Sima S, Rosenberg DE, Wurtsbaugh WA, Null SE, and 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
- 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* 61(4):486–501
- Tabriz University (2017) Investigation of the effects of the causeway on the ecosystem of Lake Urmia and presenting corrective action plan. Tabriz University (TU), Tabriz, Iran (In Persian)
- Tarh-e-Noandishan (2020) Hydrodynamic investigation of adding extra openings along the causeway of Lake Urmia. Tarh-e-Noandishan Consulting Company, Tehran, Iran (In Persian)
- Zhang Y, Chen C, Beardsley RC, Perrie W, Gao G, Zhang Yu, Qi J, and Lin H (2020) Applications of an unstructured grid surface wave model (FVCOM-SWAVE) to the Arctic Ocean: The interaction between ocean waves and sea ice. *Ocean Modelling* 145:101532
- Zeinoddini M, Tofighi MA, 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

Zeinoddini M, Tofighi MA, Bakhtiari A (2014)
Assessment of 2DH and pseudo-3D modelling
platforms in a large saline aquatic system: Lake
Urmia, Iran. Hydrological Processes 28:4953–4970

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