

بررسی اثربخشی سناریوهای مختلف احیای دریاچه ارومیه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی

حسن حمیدی رزی^۱، مهدی مظاهری^{۲*}، جمال محمدولی سامانی^۳ و مارکوس کارواجالینو فرناندز^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
^۲ استادیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
^۳ استاد گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
^۴ گروه تحقیقاتی آب و هوا و اقیانوس‌شناسی، مؤسسه تحقیقات دریایی بلژیک

(دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲، پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۷، نشر آنلاین: ۱۳۹۶/۷/۱۷)

چکیده

به دلیل ضرورت و اهمیت ارائه یک بستر علمی برای گزینه‌های احیا و مدیریت سطح دریاچه ارومیه، در این تحقیق به بررسی اثربخشی سناریوهای مطرح با استفاده از مدل هیدرودینامیک دوبعدی MOHID پرداخته شده است. سناریوهای در نظر گرفته شده عبارتند از: S1 سناریوی ادامه وضع موجود، S2 سناریوی بستن گذرگاه شهید کلانتری و S3 سناریوی عدم یکپارچه‌سازی دریاچه و تقسیم آن به دو بخش از محل جزیره‌ها. داده‌های دوره آماری ۸ ساله ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ به دلیل در بر گرفتن افت شدید تراز آب دریاچه و همچنین وجود نوسانات زیاد، برای شبیه‌سازی سناریوها انتخاب شدند. پس از گردآوری داده‌ها و ورودی‌های مورد نیاز، واسنجی مدل انجام شد و در ادامه مدل برای هر یک از سناریوها اجرا گردید. نتایج نشان داد بخش جنوبی دریاچه در سناریوی S2 در مواقعی با رسیدن به تراز اکولوژیک دریاچه (۱۲۷۴/۱ متر از سطح دریا)، در کل شرایط بهینه و بهبود یافته‌ای از نظر تراز آب، سطح دریاچه، حجم آب و همچنین حجم تلفات تبخیر نسبت به سناریوی S1 پیدا می‌کند. در سناریوی S3، علی‌رغم کاهش تلفات تبخیر در بخش جنوبی دریاچه، تراز اکولوژیک دریاچه در هیچ دوره‌ای حفظ نمی‌شود و در نهایت هم تراز دریاچه به ۱۲۷۱/۴ متر می‌رسد. بخش شمالی دریاچه نیز با تراز آب ۱۲۷۱/۰۳ متر و تلفات تبخیر بالا، در انتهای دوره مدل‌سازی وضعیت خوبی را تجربه نخواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: دریاچه ارومیه، احیای بخشی، تراز اکولوژیک، تلفات تبخیر، مدل هیدرودینامیکی MOHID.

۱- مقدمه

گردشگری هم اکنون در حال نابودی بوده و در دهه‌های اخیر یکی از بحرانی‌ترین شرایط خود را تجربه می‌کند. طبق گزارش‌های ارائه شده، سطح و تراز آب دریاچه ارومیه به ترتیب از مقادیر ۶۱۰۰ کیلومتر مربع و ۱۲۷۸ متر از سطح آب‌های آزاد (Eimanifar و Mohebbi، ۲۰۰۷)، به کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر مربع و زیر ۱۲۷۰ متر کاهش پیدا کرده است (مقدسی و همکاران، ۱۳۹۴). متوسط بلندمدت سالانه آب ورودی به دریاچه ۵ میلیارد متر- مکعب بوده است که در سالیان اخیر این رقم به دلیل کاهش بارش و رواناب در سطح حوضه و همچنین برداشت‌های بالادست به طور متوسط به کمتر از ۲/۵ میلیارد متر مکعب رسیده است (گزارش وزارت نیرو، ۱۳۹۴). برنامه محیط زیست ملل متحد^۱ در بولتن

دریاچه ارومیه به عنوان سومین دریاچه بزرگ فوق‌العاده شور در دنیا (Garousi و همکاران، ۲۰۰۸)، به دلیل برخورداری از ارزش‌های بی‌نظیر طبیعی و اکولوژیکی، به عنوان پارک ملی (Abbaspour و Nazaridoust، ۲۰۰۷)، سایت رامسر (<https://rsis.ramsar.org>) و ذخیره‌گاه زیست‌کره یونسکو (<http://www.unesco.org>) معرفی شده است. اخیراً، این دریاچه به دلیل خشکسالی‌های رخ داده در طی سال‌های اخیر و کم شدن نزولات، و همچنین کم شدن جریان آب رودخانه‌های ورودی به دریاچه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که دریاچه ارومیه با کارکردهای مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و

1. United Nations Environment Program (UNEP)

* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۹۸۲۱ ۴۸۲۹۲۵۹۸

آدرس ایمیل: h.hamidi@modares.ac.ir (ح. حمیدی رزی)، m.mazaheri@modares.ac.ir (م. مظاهری)، samani_j@modares.ac.ir (ج. محمدولی سامانی)، marcos.carvajalino.fernandez@hi.no (م. کارواجالینو فرناندز).

خدمات هشدار محیط زیست جهانی خود در فوریه ۲۰۱۲، وضعیت دریاچه ارومیه را "نگران‌کننده" بیان کرده است که مستلزم توجه ویژه و اقدامات فوری برای جلوگیری از یک فاجعه زیست‌محیطی می‌باشد (Pengra, ۲۰۱۲). بر اساس مطالعات انجام شده طی دهه اخیر (Sima و Tajrishy, ۲۰۱۳؛ Abbaspour و Nazaridoust, ۲۰۰۷)، مادامی که تراز آب دریاچه بیش از ۱۲۷۴/۱ متر از سطح آب‌های آزاد باشد، دریاچه به عملکرد عادی اکولوژیک خود برای حفظ تنوع زیستی ادامه خواهد داد. وضعیت کنونی دریاچه ارومیه که حاصل مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است، از منظر تخصص‌های مختلف، طی چند سال گذشته مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است (Maruyama و Reveshty, ۲۰۱۰؛ Stevens و همکاران, ۲۰۱۲؛ Zarghami, ۲۰۱۱؛ Zeinoddini و همکاران, ۲۰۰۹؛ Karbassi و همکاران, ۲۰۱۰؛ Heidari و همکاران, ۲۰۱۰).

با توجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی دریاچه ارومیه و همچنین وابستگی معیشتی، هویتی و تاریخی مردم منطقه به آن، موضوع احیای دریاچه و جلوگیری از خشک شدن آن بیش از پیش نمایان می‌شود. طبق موارد بیان شده و با هدف اعمال رویکردهای یکپارچگی در مدیریت حوضه آبریز و ارائه راهکارها، ستاد احیای دریاچه ارومیه در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ به ریاست معاون اول رئیس‌جمهور تشکیل گردید (<http://ulrp.sharif.ir>, ۱۳۹۳). با توجه به فعالیت‌های کارگروه احیای دریاچه ارومیه، سناریوها و راه‌حل‌های متفاوتی جهت احیای دریاچه ارومیه و بهبود وضعیت موجود آن مطرح است. یکی از رویکردهای تحت بررسی در سطح جهانی در ارتباط با احیای دریاچه‌هایی که با خطر خشکی مواجهه هستند، رویکرد احیای بخشی^۱ و یا عدم یکپارچه‌سازی سطح دریاچه به منظور حفظ شرایط اکولوژیکی و زیستی قسمت‌هایی از دریاچه می‌باشد. در این راستا، (Micklin, ۲۰۰۷) با به کارگیری رویکرد احیای بخشی به بررسی احیای قسمت‌هایی از سطح دریاچه آرال پرداخته است. در این بررسی محقق نشان داده است که با عدم یکپارچه‌سازی سطح دریاچه آرال و ایجاد دایک در قسمت‌های مختلف دریاچه می‌توان از خشک شدن کل سطح دریاچه جلوگیری کرده و همچنین تراز آب اکولوژیکی بخش‌های مورد نظر دریاچه را تا حدی برای ادامه شرایط زیستی حفظ کرد. بدین ترتیب، هدف از این پژوهش نیز بررسی احیای بخشی سطح دریاچه ارومیه و بررسی وضعیت تراز آب دریاچه در بخش‌های مختلف می‌باشد. برای این منظور سناریوهایی در نظر گرفته شد و بررسی و تحلیل هر یک از سناریوها، با استفاده از یک مدل هیدرودینامیکی دو بعدی به نام MOHID انجام خواهد گرفت. Santoro و همکاران (۲۰۱۱)، از این مدل برای شبیه‌سازی

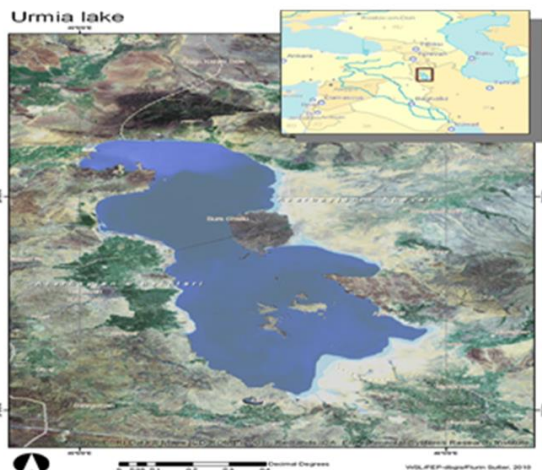
هیدرودینامیک و پیش‌بینی تغییرات تراز آب در ریودلا پلاتا پرداختند. نتایج به دست آمده شامل تغییرات تراز دریا ناشی از آب و هوا و جزرومد در ریودلا پلاتا بود. مقایسه مقادیر تراز آب مدل شده با داده‌های واقعی نشان از سازگاری کیفی و کمی بسیار خوب داشت. Janeiro و همکاران (۲۰۰۸)، از این مدل هیدرودینامیکی برای بررسی هیدرودینامیک تالاب پاتوس در برزیل استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که هیدرودینامیک این محیط آبی بیشتر تحت تأثیر باد و تخلیه آب شیرین به داخل آن می‌باشد که کار ارزشمندی در جهت مدیریت سواحل به حساب می‌آید. در این تحقیق از دوره آماری ۸ ساله از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸، به دلیل کامل بودن داده، افت شدید تراز آب دریاچه و همچنین وجود نوسانات زیاد در این دوره استفاده شده است. بررسی هیدرودینامیکی اثربخشی سناریوهای مطرح برای احیای دریاچه ارومیه و استفاده از یک مدل هیدرودینامیکی در محاسبه دقیق پهنه آبی و تلفات تبخیر که عمده‌ترین راه تلفات آب از دریاچه ارومیه می‌باشد، به طور خاص از نوآوری‌های این تحقیق به حساب می‌آیند.

۲- مواد و روش

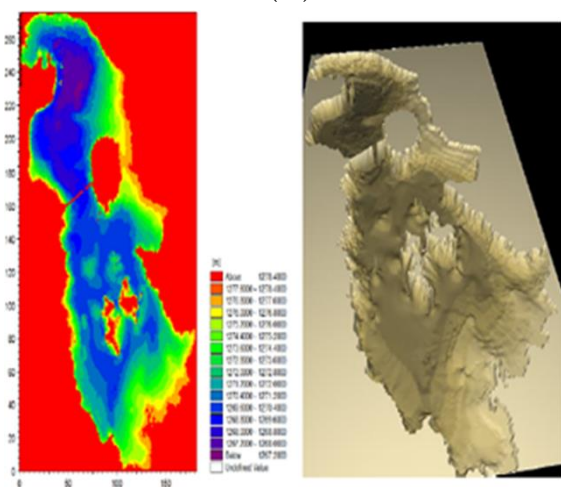
این بخش به تشریح مدل هیدرودینامیکی، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز به منظور برپایی مدل برای دریاچه ارومیه و بررسی سناریوهای مرتبط با احیای آن می‌پردازد. بدین منظور اطلاعات مربوط به سناریوها، منطقه مورد مطالعه و داده‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی، هیدرولیکی و همچنین داده‌های ایستگاه‌های آب-سنجی رودخانه‌ها جمع‌آوری گردیدند که در زیر به طور مفصل تشریح می‌شوند.

۲-۱- سناریوها

با توجه به اهمیت بررسی و مطالعه علمی جلوگیری از فرایند خشک شدن و نابودی کامل دریاچه ارومیه و همچنین ارائه راهکارهای علمی جهت احیای آن، سناریوها و راه‌حل‌های متفاوتی در جهت بهبود وضعیت موجود دریاچه از طرف جامعه متخصصین کارگروه احیای دریاچه ارومیه مطرح است. یکی از رویکردهای تحت بررسی، رویکرد احیای بخشی و مدیریت سطح دریاچه ارومیه می‌باشد که سناریوهای مختلفی جهت ارزیابی و بررسی این رویکرد ارائه شده است. جدول (۱) سناریوهای در نظر گرفته شده برای بررسی احیای بخشی و کامل دریاچه ارومیه در این تحقیق را تشریح می‌کند:



(الف)



(ب)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (Delju و همکاران، ۲۰۱۲):
الف) بسیمتری دریاچه ارومیه، ب) مؤسسه تحقیقات آب
وزارت نیرو

در ادامه جزئیات مربوط به داده‌های مورد استفاده در مدل-سازي حاضر تشریح می‌گردند. داده‌های مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری، تبخیر، بارندگی و تراز آب دریاچه ارومیه به صورت روزانه تأمین شدند. در ادامه جزئیات مربوط به داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی حاضر تشریح می‌گردند.

۲-۴-۱- داده‌های هواشناسی، بارندگی و تبخیر

داده‌های تبخیر و بارندگی ایستگاه بناب به صورت روزانه و همچنین داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک بناب (دما هوا، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد، ساعات آفتابی) به صورت متوسط ماهانه در طول مدل‌سازی استفاده شدند. همچنین نقش بادهای طوفانی با توجه به وارد کردن مقادیر

جدول ۱- سناریوهای مطرح به منظور احیای دریاچه ارومیه

S1	سناریوی ادامه وضع موجود: در این سناریو، فرض ادامه دوره آماری ۸ ساله در نظر گرفته شده است و بدون هیچ اقدامی بر روی بسیمتری دریاچه ارومیه، وضعیت دریاچه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
S2	سناریوی بستن کامل گذرگاه شهید کلانتری: در این سناریو با قطع ارتباط شمال و جنوب دریاچه از محل گذرگاه شهید کلانتری، وضعیت دریاچه در دو طرف گذرگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.
S3	سناریوی عدم یکپارچه دیدن دریاچه و تقسیم دریاچه به دو بخش جداگانه از محل جزیره‌ها: این قسمت از دریاچه به دلیل هزینه‌های پایین خاکبرداری و خاکریزی و همچنین موقعیت جزیره‌ها به عنوان زیستگاه گونه‌های در معرض خطر انتخاب شد.

۲-۲- معرفی منطقه

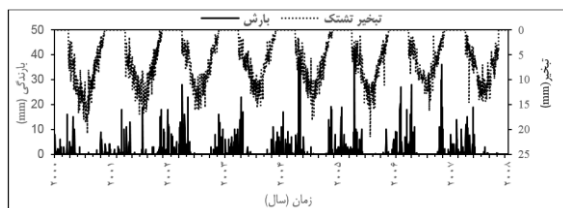
حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع، در ارتفاعی بین ۱۲۸۰ تا ۳۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا، در ناحیه کوهستانی شمال غربی ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی و کردستان قرار گرفته است. پست‌ترین نقطه این حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که با مساحت حدوداً ۵۰۰۰ کیلومتر مربع (گزارش وزارت نیرو، ۱۳۹۴)، در یک حوضه بسته بین ۳۷ درجه و ۰۴ دقیقه عرض شمالی و ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی در شمال غربی ایران (Sima و Tajrishy، ۲۰۱۳)، بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی واقع شده است. این دریاچه در یک ناحیه نیمه‌خشک با دمای متوسط سالانه ۱۱/۲ درجه سانتی-گراد و به ترتیب با متوسط نرخ بارش و تبخیر ۳۴۱ و ۱۲۰۰ میلی‌متر در هر سال قرار گرفته است (Djamali و همکاران، ۲۰۰۸). موقعیت قرارگیری دریاچه ارومیه در شکل (۱-الف) نشان داده می‌شود.

۲-۳- بسیمتری^۲ دریاچه ارومیه

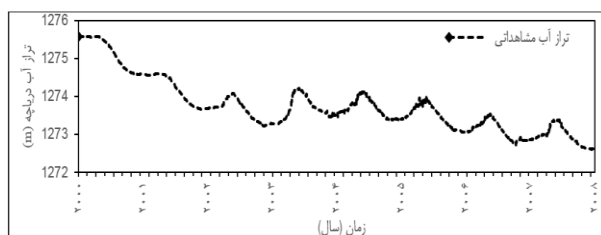
شکل (۱-ب) بسیمتری دریاچه ارومیه را در حالت‌های دو-بعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد. براساس توپوگرافی نشان داده شده در این شکل، حداکثر تراز بستر دریاچه به ترتیب برابر با ۱۲۶۷/۱۱ و ۱۲۷۸/۰۴ متر از سطح دریا می‌باشد. بنابر این با استفاده از این توپوگرافی می‌توان حداکثر تا ۱۰/۹۳ متر عمق در دریاچه را مدل نمود.

۲-۴-۲- داده‌های مورد نیاز

داده‌های مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری، تبخیر، بارندگی و تراز آب دریاچه ارومیه به صورت روزانه تأمین شدند.



شکل ۲- داده‌های بارندگی و تبخیر از تشتک (شرکت مدیریت منابع آب ایران و ستاد احیای دریاچه ارومیه)



شکل ۳- تراز آب دریاچه به صورت روزانه در طول دوره مدل-ساز (شرکت مدیریت منابع آب ایران و ستاد احیای دریاچه ارومیه)

ماهانه باد و جهت غالب آن به مدل، تا حدی در مدل سازی دیده شده است. شکل (۲) نمودار داده‌های مربوط به بارندگی و تبخیر تشتک را برای دوره آماری مورد نظر نشان می‌دهد.

۲-۴-۲- داده‌های دبی رودخانه‌های ورودی به دریاچه

دبی روزانه ۱۸ رودخانه منتهی به دریاچه ارومیه با استفاده از مختصات ایستگاه آب‌سنجی مربوط به هر رودخانه، به صورت ورودی به مدل معرفی گردید. جدول (۲) رودخانه‌ها، ایستگاه‌های آب‌سنجی و موقعیت مربوط به هر رودخانه را نشان می‌دهد. همچنین دبی حداقل، متوسط و حداکثر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی مربوطه برای هر یک از رودخانه‌ها در جدول (۳) بیان شده است.

۲-۴-۳- داده‌های تراز آب دریاچه

داده‌های مشاهداتی روزانه تراز آب دریاچه ارومیه جهت واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۳) تراز آب دریاچه ارومیه را به صورت روزانه در طول دوره مدل سازی نشان می‌دهد.

جدول ۲- فهرست و مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده در مدل سازی (شرکت مدیریت منابع آب ایران)

رودخانه	نام ایستگاه	کد ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض	رودخانه	نام ایستگاه	کد ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض
آذرشهر چای	آذرشهر	۳۱-۰۳۹	۱۴۲۵	۴۵-۵۹	۳۷-۴۵	مهاباد چای	گردیعقوب	۳۴-۰۰۹	۱۲۸۰	۴۵-۴۲	۳۷-۰۰
آجی چای	آخولا	۳۱-۰۴۵	۱۳۱۰	۴۶-۰۳	۳۸-۰۱	گادار چای	پل بهراملو	۳۴-۰۲۱	۱۲۸۵	۴۵-۳۹	۳۶-۵۴
صوفی چای	تازه‌کند	۳۲-۰۰۷	۱۶۰۰	۴۶-۱۶	۳۷-۲۸	باراندوز چای	بابارود	۳۵-۰۰۷	۱۲۸۵	۴۵-۱۴	۳۷-۲۴
چکان	چکان	۳۲-۰۱۱	۱۵۵۰	۴۶-۱۹	۳۷-۲۱	شهر چای	کشتیبان	۳۵-۰۱۳	۱۲۸۵	۴۵-۱۵	۳۷-۳۳
قلعه چای	شیشوان	۳۲-۰۲۱	۱۲۷۰	۴۵-۵۳	۳۷-۲۷	نازلو چای	آباجلو	۳۵-۰۳۳	۱۲۹۰	۴۵-۰۸	۳۷-۴۳
مردوق چای	قشلاق امیر	۳۳-۰۰۳	۱۴۵۰	۴۶-۱۷	۳۷-۱۸	روضه چای	گویجلی	۳۵-۰۲۷	۱۲۸۵	۴۵-۱۱	۳۷-۳۹
لیلان چای	شیرین‌کند	۳۳-۰۰۵	۱۳۸۰	۴۶-۱۶	۲۷-۰۱	دریان چای	دریان	۳۸-۰۰۱			
سیمینه رود	تازه‌کند	۳۳-۰۳۹	۱۲۹۰	۴۶-۰۲	۳۶-۵۹	زولا چای	یالقوز آغاج	۳۶-۰۱۱	۱۳۰۰	۴۴-۵۶	۳۸-۱۴
زرینه رود	نظام‌آباد	۳۳-۹۱۷	۱۲۸۳	۴۵-۵۶	۳۷-۰۳	چشمه دول	اسلام‌آباد	۳۴-۹۱۵	۱۲۸۰	۴۵-۱۸	۳۷-۰۵

جدول ۳- دبی حداقل، متوسط و حداکثر اندازه‌گیری برای رودخانه‌ها در ایستگاه‌های آب‌سنجی مربوطه (شرکت مدیریت منابع آب ایران)

رودخانه	Q_{max} (m^3/s)	$Q_{average}$ (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)	رودخانه	Q_{max} (m^3/s)	$Q_{average}$ (m^3/s)	Q_{min} (m^3/s)
آذرشهر چای	۵/۸	۰/۳	۰	زرینه رود	۹۹۴/۸	۲۶/۹۶۹	۰
چشمه دول	۱	۰/۰۹۶	۰	گادار چای	۱۴۵	۶/۵۵۷	۰
آجی چای	۲۵۰	۵/۲۵۵	۰	باراندوز چای	۹۹/۸	۵/۳	۰
صوفی چای	۳۵/۹	۲/۹۳۴	۰/۳۲	شهر چای	۳۶/۰۲	۱/۳۶۲	۰
چکان	۲۰/۸	۰/۱۶۵	۰	نازلو چای	۹۳/۳	۴/۲۶۳	۰
قلعه چای	۳۵/۶	۰/۸۷۶	۰	روضه چای	۱۶/۲	۰/۷	۰
مردوق چای	۳۸	۱/۸۶	۰/۰۰۲	دریان چای	۱۱/۷	۰/۴۵۳	۰/۰۰۶
لیلان چای	۲۷	۱/۴۵۵	۰	زولا چای	۵۴/۴	۱/۳۳۴	۰
سیمینه رود	۴۸	۱/۴۳۴	۰	مهاباد چای	۸۴/۹	۳/۵۱۹	۰

۲-۵- معرفی مدل

مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل هیدرودینامیک MOHID 2D، نسخه ۲۰۱۵ دارای لایسنس MARTEC می باشد که توسط 0964T60G*FPTDkMGPF;9AF (مرکز تحقیقات تکنولوژی محیط زیست و دریا) در مؤسسه IST^۳ متعلق به دانشگاه صنعتی لیسبون توسعه پیدا کرده است (<http://www.mohid.com>). در این تحقیق از مدول آبی MOHID 2D نرم افزار استفاده شده است که برای شبیه سازی محیط های آبی کم عمق نظیر دریاچه ارومیه (که عمق آب در این دوره حداکثر ۴/۵ متر می باشد) به کار گرفته می شود. مدل مذکور با استفاده از مش های مربع- مستطیلی و حل معادلات دوبعدی مربوط به جریان، به محاسبه متغیرهای مربوطه در پهنه مورد نظر می پردازد. این مدل هیدروینامیکی، معادلات ناویر- استوکس را با در نظر گرفتن تقریب های هیدرواستاتیکی و بوزینسک حل می کند. MOHID 2D معادلات حرکت را با استفاده از یک شبکه Arakawa-C اورتوگونال حل می کند. این معادلات به صورت عددی با استفاده از رویکرد حجم محدود حل می شوند و گسسته سازی زمانی با استفاده از یک الگوریتم نیمه ضمنی ADI^۴ انجام می شود (Vaz و همکاران، ۲۰۰۹). معادلاتی که در این مدل حل می شوند به صورت زیر می باشند:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + u_j \frac{\partial P}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{\theta} \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) + (Sources - Sinks) \quad (1)$$

رابطه (۱) مربوط به معادله جابه جایی- پراکندگی می باشد که در آن P غلظت بر حسب ML^{-3} ، z شاخص برای محور کارترین متناظر (x_1, x_2, x_3) یا (x, y, z) ضریب پراکندگی توربلانت توده (افقی/عمودی)، سورس ها و سینک ها (چاه و چشمه) مربوط به واکنش هایی می باشند که در داخل حجم کنترل در نظر گرفته می شوند که در وارد کردن الگوی جریان و شوری به کار گرفته می شود.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v \\ & = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = \\ & -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (5)$$

در روابط بالا، u, v, w به ترتیب عناصر سرعت در جهات x, y, z ، پارامتر کورولیس، f ضریب ویسکوزیته توربلانت در جهت افقی، A_h ضریب ویسکوزیته توربلانت در جهت قائم، P فشار، ρ_r دانسیته مرجع و ρ چگالی آب می باشد که به صورت تابعی از دما و شوری بر اساس معادله UNESCO محاسبه می شود (Franz و همکاران، ۲۰۱۴).

۲-۶- برپایی مدل MOHID 2D برای دریاچه ارومیه

در این قسمت موارد و مراحل مربوط به اجرای مدول آبی MOHID 2D برای دریاچه ارومیه توضیح داده می شود. تمام اجراها در مدل سازی حاضر روی یک کامپیوتر رومیزی با مشخصات پردازنده Intel Corei7-4820K Ivy Bridge 3.7GHz و با ۱۶ گیگابایت رم و گام زمانی ۳۰۰ ثانیه انجام شد. شکل (۴) شماتیک مفهومی مراحل برپایی مدل را برای دریاچه ارومیه نشان می دهد.

۲-۷- واسنجی مدل

در این تحقیق، به منظور واسنجی و صحت سنجی مدل برای دریاچه ارومیه دو پارامتر مربوط به مناطق بافری، ضریب زبری مانینگ و ضریب باد مورد واسنجی قرار گرفتند که در ادامه توضیح داده می شوند.

۲-۷-۱- مناطق بافری

منظور از مناطق بافری در این تحقیق اصطلاحاً مناطقی هستند که در آنها به نحوی از حجم آب ورودی به پیکره آبی کاسته می شود. در مدل سازی حاضر، دو نوع منطقه بافری اول و دوم، با توجه به شکل (۶) در نظر گرفته شدند که در ادامه هر یک از این دو منطقه تشریح می گردند:

3. Instituto Superior Técnico

4. Alternating Direction Implicit

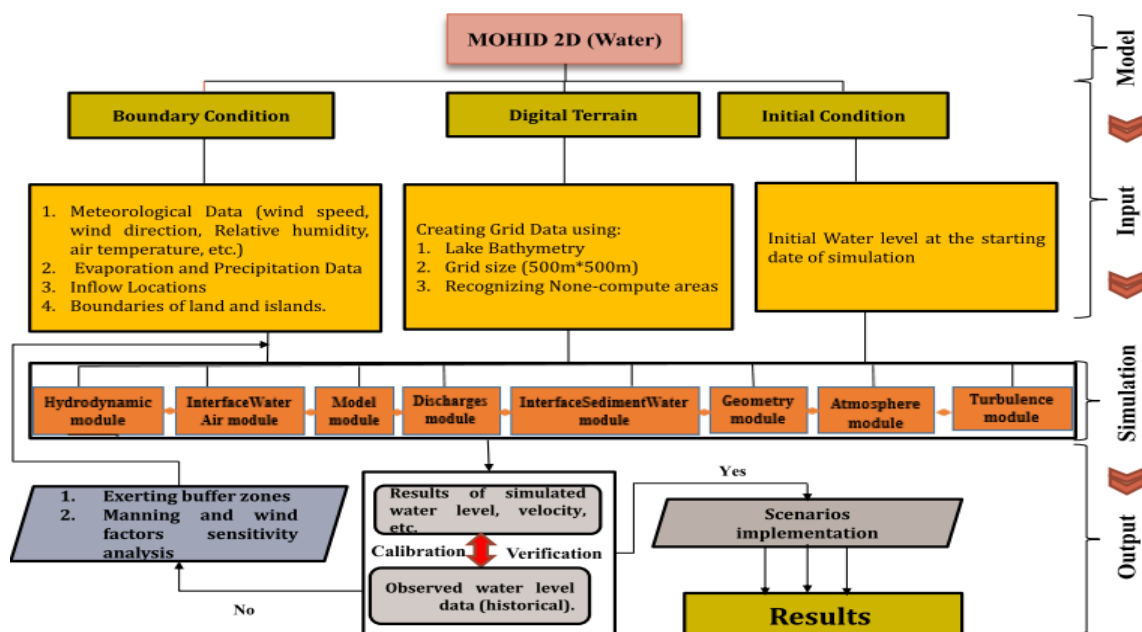
شده است.

۲-۷-۱- منطقه بافری اول



شکل ۴- مرز تقریبی بافرزون‌های یک و دو دریاچه ارومیه (مدل‌سازی و ارزیابی گزینه‌های مدیریت سطح دریاچه ارومیه، تابستان ۱۳۹۴)

همانطور که قبلاً بحث شد، دبی رودخانه‌های منتهی به دریاچه در محل ایستگاه آب‌سنجی مربوطه اندازه‌گیری می‌شوند. ولی باید توجه داشت که از محل اندازه‌گیری دبی در ایستگاه آب-سنجی مربوطه ($Q_{station}$) تا محل ورود آن به دریاچه (Q_{input})، به دلیل برداشتهایی که عمدتاً برای مقاصد کشاورزی انجام می‌گیرد، مقدار قابل توجهی از دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی کاسته می‌شود (مرید و همکاران، ۱۳۹۳). این امر بدان معنی است که باید دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های آب-سنجی را در یک عدد کوچک‌تر از یک (β) ضرب کرد. در این تحقیق به دلیل این که هیچ‌گونه اطلاع دقیقی از مقدار β در دسترس نیست، این مقدار در رابطه $Q_{input} = \beta * Q_{station}$ با استفاده از واسنجی برابر ۰/۳۲ به دست آمد. در جدول (۴) فاصله هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی مربوط به روخانه‌ها تا محل دریاچه آورده

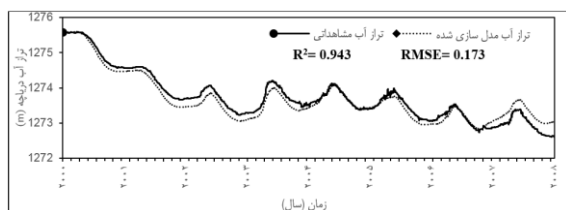


شکل ۵- شماتیک برپایی مدول آبی مدل MOHID-2D (منبع: انجام شده توسط محقق)

جدول ۴- فاصله رودخانه‌ها از ایستگاه آب‌سنجی تا محل ورود به دریاچه ارومیه (با استفاده از نرم‌افزار GIS)

رودخانه	ایستگاه آب‌سنجی	فاصله تا دریاچه (کیلومتر)	رودخانه	ایستگاه آب‌سنجی	فاصله تا دریاچه (کیلومتر)
آذرشهر چای	آذرشهر	۱۵/۵	زربنه‌رود	نظام‌آباد	۱۸
چشمه‌دول	اسلام‌آباد	۱۳/۵	گادار چای	پل بهراملو	۲۰
آجی چای	آخولا	۳۳	باراندوز چای	بابارود	۸
صوفی چای	تازه‌کند	۳۲	شهر چای	کشتیبان	۲/۵
چکان	چکان	۲۶	نازلو چای	آباجالو چای	۱۱
قلعه چای	شیشوان	۲	روضه‌چای	گویجعلی اصلان	۵
مردوق چای	قشلاق‌امیر	۳۰	دریان چای	دریان	۱۱
لیلان چای	شیرین‌کند	۳۷	زولا چای	یالقوز آغاج	۱۰
سیمینه‌رود	تازه‌کند	۳۰	مه‌آباد چای	گرد یعقوب	۸

قبل می‌باشد.



شکل ۷- تراز آب مشاهداتی و مدل سازی شده پس از انجام واسنجی و صحت‌سنجی

۱-۳- نتیجه واسنجی

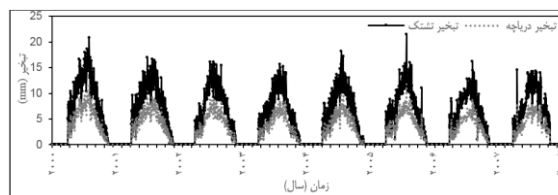
شکل (۷) بهترین نمودار برازش داده شده برای واسنجی تراز آب مدل‌سازی شده و مشاهداتی دریاچه ارومیه با ضریب همبستگی ۰/۹۴۳ و میزان خطای RMSE برابر با ۰/۱۷۳ را برای دوره آماری مورد نظر نشان می‌دهد.

۲-۳- مقایسه سناریوهای S1 و S2

در این بخش نتایج و گراف‌های مربوط به سناریوهای ادامه وضع موجود (S1) و بستن گذرگاه شهید کلانتری (S2) به ترتیب با در نظر گرفتن پارامترهای تراز آب دریاچه، حجم آب دریاچه و میزان تلفات تبخیر با هم مقایسه شده‌اند، که رفتار پیکره آبی دریاچه در هر دو سناریو مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲-۳- تراز آب دریاچه

شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب مقایسه روند تغییرات بدنه آبی مدل‌سازی شده و تراز آب دریاچه ارومیه را با توجه به ماهیت دو سناریوی S1 در شکل (۸-ب) و S2 در شکل (۸-الف) نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۹)، در صورت ادامه وضع موجود (سناریوی S1) تراز آب دریاچه به کم‌ترین مقدار ۱۲۷۰/۹۴ متر می‌رسد و در انتهای دوره مدل‌سازی نیز به مقدار ۱۲۷۰/۹۶ متر می‌رسد. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که دریاچه ارومیه با ادامه روند وضع موجود، با وجود قرار گرفتن در شرایط بحرانی و داشتن تراز آب کمتر از تراز اکولوژیکی ۱۲۷۴/۱ متر، به طور کامل خشک نخواهد شد. در مورد سناریوی S2، دو حالت برای دریاچه اتفاق می‌افتد، بخش شمالی دریاچه (آبی رنگ) به در اکثر مواقع کم‌ترین میزان تراز آب نزدیک به ۱۲۶۸ متر را تجربه می‌کند. می‌توان گفت که این بخش از دریاچه شرایط بسیار بحرانی را تجربه می‌کند. در مقابل، بخش جنوبی با تراز آب ۱۲۷۱/۸۶ متر در انتهای دوره و در مواقعی با داشتن تراز آب ۱۲۷۴/۵ متر، ضمن حفظ شرایط زیستی و تراز اکولوژیکی دریاچه ۱۲۷۴/۱ متر، در کل شرایط بهبود یافته‌ای را نسبت به سناریوی S1 و بخش شمالی تجربه می‌کند.



شکل ۶- میزان تبخیر از دریاچه ارومیه و تشنگ تبخیر با اعمال ضریب منطقه بافری

۲-۱-۷-۲- منطقه بافری دوم

منطقه بافری دوم در حقیقت مربوط به تلفات ناشی از تبخیر از سطح آب دریاچه می‌شود. محاسبه تلفات این منطقه یکی از نقاط قوت مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی است که با استفاده از تعیین پهنه آب روی بسیمتری دریاچه صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است به دلیل کاهش تبخیر از سطح آب شور (Harbeck, 1995)، داده‌های مربوط به تبخیر از تشنگ تبخیر (Epan) باید با یک ضریب کم‌تر از یک (α) به داده‌های مربوط به تبخیر از سطح دریاچه (Elake) تبدیل شوند. در این تحقیق ضریب α در یک رابطه $E_{lake} = \alpha * E_{pan}$ با استفاده از واسنجی برابر ۰/۵۵ تعیین گردید. این مقدار در تحقیقات گذشته برابر ۰/۶ به دست آمده است (محمدی، ۱۳۸۳). شکل (۶) میزان تبخیر از دریاچه را بعد از اعمال ضریب بافری تبخیر نشان می‌دهد.

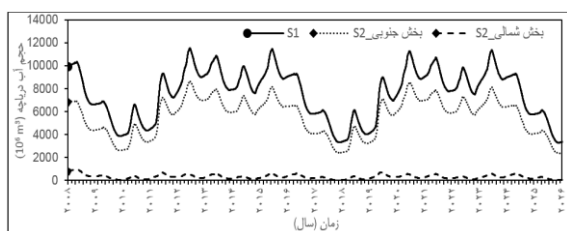
۲-۷-۲- ضریب باد، ضریب مانینگ و سایر ورودی‌های مدل

مقدار ضریب مانینگ با توجه به توصیه‌های ویلیام (۱۹۹۸) و حساسیت‌سنجی مدل برای دریاچه ارومیه برابر با ۰/۰۲۵ انتخاب شد (Coon, 1998). همچنین ضریب باد که یک ضریب آیرودینامیکی برای آشفتنگی‌های سطح پیکره‌های آبی تحت تأثیر باد است، بر طبق اظهارات ملر (۱۹۹۶) مقدار ۰/۰۱۵ در نظر گرفته شد (Mellor, 1996). با توجه به پایین بودن محدوده سرعت حرکت آب در داخل دریاچه و ساکن بودن آب در بسیاری از مناطق آن، این محدوده سرعت تلاطمی را ایجاد نمی‌کند و در بررسی تراز آب دریاچه در بلند مدت توربولانس اثر قابل توجهی ندارد. این مورد با اعمال توربولانس‌های مختلف به مدل تأیید شد.

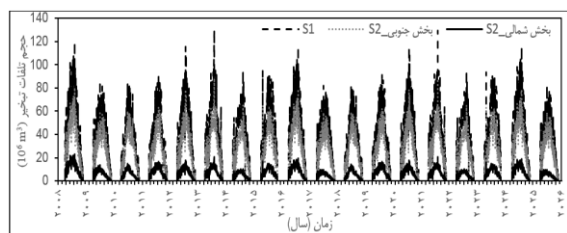
۳- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج واسنجی مدل و مقایسه نتایج سناریوهای ذکر شده از لحاظ تراز آب دریاچه، حجم آب دریاچه و میزان تلفات تبخیر پرداخته شده است. قبل از هرگونه تحلیل باید توجه داشت که تمام پیش‌بینی‌های انجام شده در این تحقیق بر اساس دوره آماری ۸ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ می‌باشد. بنابر این تمامی تحلیل‌ها با این فرض است که دوره ۱۸ سال آینده، مشابه ۸ سال

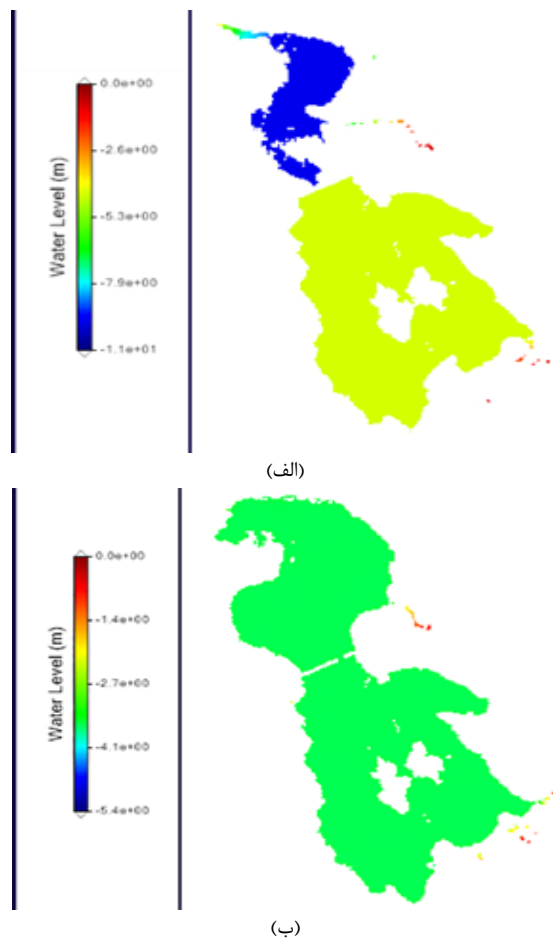
تلفات تبخیر دریاچه ارومیه را در سناریوهای S1 با S2 نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰)، با اعمال سناریوی S2 بخش شمالی گذرگاه حجم آب ناچیزی را در خود ذخیره می‌کند و حتی در سال ۲۰۲۶ تا مرز خشکی کامل نیز پیش می‌رود. در مقابل بخش جنوبی دریاچه در سال ۲۰۲۶ (انتهای دوره مدل‌سازی) با داشتن مساحت کم‌تر نسبت به سناریوی S1، حجم آبی معادل ۷۲ درصد حجم آب در سناریوی S1 در این قسمت ذخیره خواهد شد. با توجه به شکل (۱۱)، نکات مهمی که می‌توان فهمید این است که بخش شمالی دریاچه در سناریوی S2 به علت داشتن مساحت پیکره آبی کم‌تر، دارای تلفات تبخیر بسیار کم‌تری نسبت به بخش جنوبی و سناریوی S1 می‌باشد. همچنین، بخش جنوبی سناریوی S2 نیز به دلیل داشتن مساحت کم‌تری نسبت به سناریوی S1 تلفات تبخیر پایین‌تری را از خود نشان خواهد داد. در جدول (۵) میزان حداکثر و حداقل تراز آب، مساحت، حجم آب و میزان تلفات تبخیر برای سناریوهای S1 و S2 در طول دوره مدل‌سازی به منظور درک بهتر شرایط دریاچه ارائه شده است.



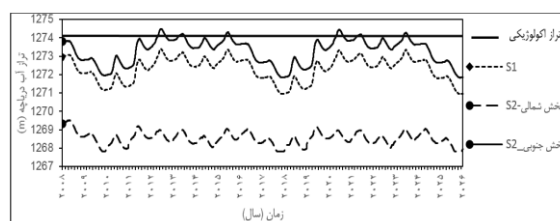
شکل ۱۰- مقایسه حجم آب دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S2



شکل ۱۱- مقایسه میزان تلفات تبخیر دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S2



شکل ۸- تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه در طول شبیه‌سازی برای سناریوهای: الف) S2، ب) S1



شکل ۹- مقایسه تراز آب دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S2

۳-۲-۲- حجم آب و میزان تلفات تبخیر دریاچه
 شکل (۱۰) و شکل (۱۱) به ترتیب مقایسه حجم آب و میزان

جدول ۵- مقایسه وضعیت دریاچه ارومیه با اعمال سناریوهای S1 و S2 از لحاظ تراز آب، مساحت، حجم و میزان تلفات تبخیر در طول دوره مدل‌سازی

سناریو	حداکثر تراز آب (m)	حداقل تراز آب (m)	حداکثر مساحت (km ²)	حداقل مساحت (km ²)	حداکثر حجم آب (10 ⁶ m ³)	حداقل حجم آب (10 ⁶ m ³)	حداکثر حجم تلفات تبخیر (10 ⁶ m ³)
S1	۱۲۷۳/۳۸	۱۲۷۰/۹۴	۴۱۳۹	۲۵۰۰	۱۱۵۳۹	۳۲۹۹	۱۳۰
S2-بخش جنوبی	۱۲۷۴/۵	۱۲۷۱/۸۳	۲۸۰۲	۱۸۵۵	۸۶۸۴	۲۳۸۸	۸۸
S2-بخش شمالی	۱۲۶۹/۵۲	۱۲۶۷/۶۷	۹۱۰	۱۹۴	۹۸۴	۲۴	۲۳

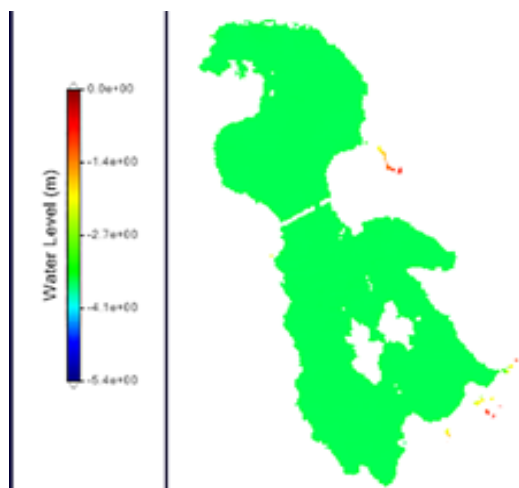
۳-۳- مقایسه سناریوهای S1 و S3

در این بخش نتایج و گراف‌های مربوط به سناریوهای ادامه وضع موجود (S1) و سناریوی عدم یکپارچه‌سازی دریاچه و تقسیم آن به دو بخش از محل جزیره‌ها (S3) به ترتیب با در نظر گرفتن پارامترهای تراز آب دریاچه، حجم آب دریاچه و میزان تلفات تبخیر با هم مقایسه شده و رفتار پیکره آبی دریاچه در هر دو سناریو مورد مطالعه قرار گرفته است.

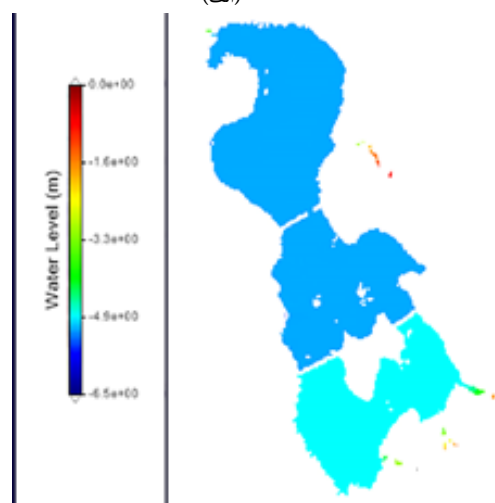
قطع شده است. با توجه به مقایسه تراز آب دریاچه در شکل (۱۳)، برای سناریوهای S1 و S3، تراز آب دریاچه با بیشترین مقدار ۱۲۷۳/۷ متر در بخش جنوبی سناریوی S3، علی‌رغم داشتن تراز آب بالا در کل دوره نسبت به تراز آب دریاچه در بخش شمالی سناریوی S3 و سناریوی S1، در این حالت نیز شرایط زیستی و اکولوژیک دریاچه ۱۲۷۴/۱ متر حفظ نمی‌شود و دریاچه همچنان در شرایط بحرانی قرار خواهد گرفت.

۳-۳-۲- حجم آب و میزان تلفات تبخیر دریاچه

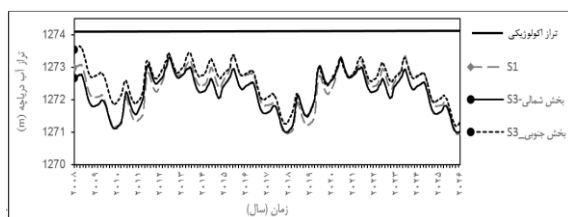
شکل (۱۴) و شکل (۱۵) به ترتیب مقایسه حجم آب و میزان تلفات تبخیر دریاچه ارومیه را برای سناریوهای S1 با S3 نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۱۴) نشان می‌دهد، با اعمال سناریوی S3 در بخش جنوبی دریاچه حجم آب کمی نسبت به بخش شمالی دریاچه ذخیره خواهد شد و حجم آب این قسمت در انتهای مدل-سازی در سال ۲۰۲۶ به میزان ۴۹۲ میلیون متر مکعب خواهد رسید. در مقابل بخش جنوبی دریاچه در سال ۲۰۲۶ با داشتن مساحت کم‌تر نسبت به سناریوی S1، تقریباً حجم آب ذخیره شده برابر با حجم آب ذخیره شده در سناریوی S1 خواهد شد. با توجه به شکل (۱۵) میزان تلفات تبخیر در بخش جنوبی دریاچه در سناریوی S3 به علت داشتن مساحت کم‌تر نسبت به بخش شمالی و سناریوی S1 پایین می‌باشد. به همین ترتیب، بخش شمالی دریاچه در سناریوی S3 به دلیل داشتن مساحت کم‌تری نسبت به سناریوی S1 دارای تلفات تبخیر پایین‌تری خواهد بود. در جدول (۶) میزان حداکثر و حداقل تراز آب، مساحت، حجم آب و میزان تلفات تبخیر برای سناریوها به منظور درک بهتر شرایط دریاچه ارائه شده است.



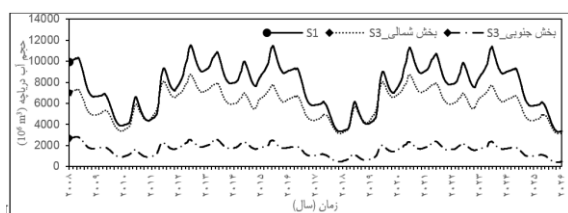
(الف)



(ب)



شکل ۱۳- مقایسه تراز آب دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S3



شکل ۱۴- مقایسه حجم آب دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S3

شکل ۱۲- تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه در طول شبیه‌سازی برای سناریوهای: (الف) S1، (ب) S3

۳-۳-۱- تراز آب دریاچه

شکل (۱۲) و شکل (۱۳) به ترتیب مقایسه روند تغییرات بدنه آبی مدل‌سازی شده و تراز آب دریاچه ارومیه را برای سناریوهای S1 (۱۲-الف) و S3 (۱۲-ب) نشان می‌دهند. با توجه به خروجی مدل، در سناریوی S3 ارتباط جریان آب بین دو طرف دریاچه از محل جزیره‌ها با اعمال رفتاری به صورت یک دایک به طور کلی

جدول ۶- مقایسه وضعیت دریاچه ارومیه با اعمال سناریوهای S1 و S3 از لحاظ تراز آب، مساحت، حجم و میزان تلفات تبخیر در طول دوره مدل سازی

سناریو	حداکثر تراز آب (m)	حداقل تراز آب (m)	حداکثر مساحت (km ²)	حداقل مساحت (km ²)	حداکثر حجم آب (10 ⁶ m ³)	حداقل حجم آب (10 ⁶ m ³)	حداکثر حجم تلفات تبخیر (10 ⁶ m ³)
S1	۱۲۷۳/۳۸	۱۲۷۰/۹۴	۴۱۳۹	۲۵۰۰	۱۱۵۳۹	۳۲۹۹	۱۳۰
S3- بخش جنوبی	۱۲۷۳/۶۴	۱۲۷۱/۱۸	۱۳۱۸	۶۲۴	۲۸۳۷	۴۰۴	۴۰/۸۴
S3- بخش شمالی	۱۲۷۲/۳	۱۲۷۰/۹۸	۲۸۰۴	۲۰۰۹	۸۷۵۱	۳۱۲۱/۵	۸۸/۸

اکولوژیکی دریاچه را برقرار نمی‌شود.

بنابر این، در جهت بالا بردن اثر بخشی راندمان آب ورودی به دریاچه و به تبع آن افزایش میزان پارامترهای تعیین کننده شرایط پایدار دریاچه نظیر تراز آب اکولوژیکی، سطح و احجام آب و تلفات تبخیر، پیشنهادهای زیر که برگرفته از نتایج تحقیق حاضر می‌باشد می‌توانند مؤثر واقع شوند:

۱) با توجه به این که آب رودخانه‌ها قبل از رسیدن به پیکره آبی دریاچه در بافرزون دوم پخش می‌شود و به علت داشتن عمق کم مستعد تبخیر بیشتر هستند، پیشنهاد می‌شود کانال‌هایی در مسیر رودخانه‌ها احداث گردد تا آب رودخانه‌ها با میزان تلفات تبخیر کمتری وارد بدنه آبی دریاچه شود.

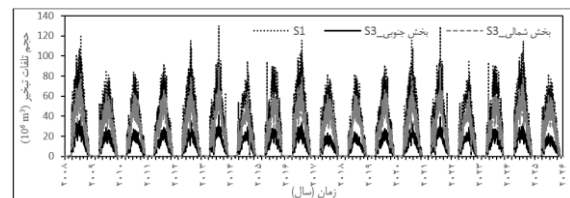
۲) از آنجایی که بخش قابل توجهی از آب رودخانه‌ها در فاصله ایستگاه‌های آب‌سنجی تا محل ورود به دریاچه (بافرزون اول) از دست می‌رود، پیشنهاد می‌شود کنترل و نظارت بیشتری در ارتباط با برداشتهای غیر قانونی، جلوگیری از انحراف آب رودخانه‌ها برای مصارف کشاورزی و ایجاد آب‌بند در مسیر رودخانه‌ها به منظور ذخیره آب انجام گیرد.

۳) با توجه به این که فاصله ایستگاه‌های آب‌سنجی رودخانه‌ها تا دریاچه بسیار زیاد است، پیشنهاد می‌شود ایستگاه‌های آب‌سنجی در محل اتصال رودخانه‌ها به دریاچه در مرز بافرزون دوم نیز نصب شود تا حجم دقیق آب ورودی رودخانه‌ها به دریاچه اندازه‌گیری شود.

۴) با توجه به وسعت دریاچه و نواحی بافرزون آن، تغییرات مکانی متغیرهای اقلیمی می‌توانند قابل توجه باشند. از این رو انتخاب یک یا تعداد محدودی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و تبخیر ممکن است الزاماً نماینده شرایط اقلیمی روی دریاچه و بافرزون نباشند. بنابر این انتخاب تعداد و الگوی مناسب ایستگاه‌های بارش و تبخیرسنجی در محاسبه حجم تلفات تبخیر و دیگر پارامترهای تأثیرگذار دریاچه حائز اهمیت است.

۵- مراجع

دانشگاه صنعتی شریف، "سایت کمیته احیای دریاچه ارومیه"، <http://ulrp.sharif.ir>. ۱۳۹۳.
محمدی م ع، "رابطه بین تبخیر آب‌های شور و شیرین و تأثیر آن روی تبخیر آب دریاچه ارومیه"، شرکت سهامی آب منطقه‌ای



شکل ۱۵- مقایسه میزان تلفات تبخیر دریاچه ارومیه برای سناریوهای S1 و S3

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق اثربخشی سناریوهای مطرح در ارتباط با احیای دریاچه ارومیه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در ارتباط با سناریوی ادامه وضع موجود (S1)، اگر بدون هیچ اقدامی دریاچه ارومیه به حال گذاشته شود تا وضعیت موجود ادامه پیدا کند، تراز آب دریاچه در انتهای دوره مدل‌سازی (سال ۲۰۲۶) به مقدار ۱۲۷۰/۹۶ متر می‌رسد. با در نظر گرفتن این نکته که تلفات تبخیر نیز در سناریوی ادامه وضع موجود بیشترین مقدار را خواهد داشت.

با توجه به نتایج، بخش جنوبی سناریوی بستن گذرگاه شهید کلانتری (S2) شرایط بهینه و بهبود یافته‌ای از نظر تراز آب، سطح دریاچه، حجم آب و حجم تلفات تبخیر در تأمین نیاز زیستی دریاچه مشاهده گردید. همچنین نیازهای زیست‌محیطی و اکولوژیکی جزایر موجود در بخش جنوبی دریاچه که دارای اهمیت بالایی می‌باشند، در مواقعی در این سناریو تأمین خواهند شد. بخش شمالی دریاچه نیز در این سناریو در اکثر مواقع کم‌ترین میزان تراز آب را خواهد داشت و در دوره‌هایی از مدل‌سازی به دلیل جریان ورودی پایین و تلفات تبخیر تا حد خشکی کامل پیش می‌رود.

در سناریوی عدم یکپارچه‌سازی دریاچه از محل جزیره‌ها (S3) و تقسیم دریاچه به دو بخش شمالی و جنوبی از این محل، در بخش جنوبی دریاچه با وجود کم شدن پهنه دریاچه و ورود تعدادی از روخانه‌های پر آب به بخش جنوبی شرایط زیستی و اکولوژیکی دریاچه (۱/۱۲۷۴ متر) حفظ نمی‌شود و دریاچه همچنان در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد. در بخش شمالی سناریوی (S3) همچنین به دلیل تلفات زیاد تبخیر شرایط

- Falls, UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS), 2012.
- Ramsar Convention, Available at: <https://rsis.ramsar.org/>
- Reveshty M, Maruyama Y, "Study of Uremia Lake Level Fluctuations and Predict Probable Changes Using Multi-Temporal Satellite Images and Ground Truth Data Period (1976-2010)", Map Asia, 2010, 179-194.
- Sima S, Tajrishy M, "Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake Iran", Journal of Great Lakes Research, 2013, 39 (1), 90-99.
- Stevens L, "Hydroclimatic variations over the last two glacial/interglacial cycles at Lake Urmia, Iran", Journal of Paleolimnology, 2012, 47 (4), 645-660.
- Technical University of Lisbon, Webpage: <http://www.mohid.com>.
- UNESCO Biosphere Reserves. Available at: <http://www.unesco.org/new/en/naturalsciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/asia-and-the-pacific/>.
- Vaz N, Dias JM, Leitão PC, "Three-dimensional modelling of a tidal channel: the Espinheiro Channel (Portugal)", Continental Shelf Research, 2009, 29 (1), 29-41.
- Zarghami M, "Effective watershed management; case study of Urmia Lake Iran Lake and Reservoir Management", 2011, 27 (1), 87-94.
- Zeinoddini M, Tofighi MA, Vafae F, "Evaluation of dike-type causeway impacts on the flow and salinity regimes in Urmia Lake, Iran", Journal of Great Lakes Research, 2009, 35 (1) 13-22.
- استان آذربایجان غربی، ۱۳۸۳.
- مرید س، سیما س، رضایی ح، "گزارش جمع‌بندی تلفات / آورد در ناحیه بافرزون دریاچه ارومیه"، مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف، <http://ulrpdb.sharif.ir>، خرداد ۱۳۹۳.
- مقدسی م، مرید س، دلاور م، عرب‌پور ف، "رویکرد مدیریت مصرف آب بخش کشاورزی در راستای احیای دریاچه ارومیه"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۴، ۱۱ (۱).
- وزارت نیرو، "گزارش مدل‌سازی هیدرودینامیک دو بعدی دریاچه ارومیه"، کارگروه احیای دریاچه ارومیه، ۱۳۹۳.
- Abbaspour M, Nazaridoust A, "Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: an ecological approach. International Journal of Environmental Studies, 2007, 64 (2), 161-169.
- Coon William F, "Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks", US Geological Survey, 2441, 1998.
- Djamali M, "A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia", NW Iran, Quaternary Research, 2008, 69 (3), 413-420.
- Eimanifar A, "Mohebbi F, Urmia Lake (Northwest Iran)", A brief review. Saline Systems, 2007, 3.
- Franz G, "Implementation of the Tagus Estuary Hydrodynamic Model", 2014.
- Garousi V, "Environmental crisis in Lake Urmia, Iran: a systematic review of causes", negative consequences and possible solutions. Proceedings of the 6th International Perspective on Water Resources & the Environment (IPWE) Izmir, Turkey, 2013.
- Harbeck GE, "The effect of salinity on evaporation", Washington, U.S. Govt. Print. Off., 1955.
- Heidari N, Roudgar M, Ebrahimpour N, "Thermodynamic quantities and Urmia Sea water evaporation", Saline systems, 2010, 6 (1), 1.
- Janeiro J, Fernandes E, Martins F, Fernandes R, "Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil", Marine pollution bulletin, 2008, 56 (4), 650-665.
- Karbassi A, "Environmental impacts of desalination on the ecology of Lake Urmia", Journal of Great Lakes Research, 2010, 36 (3), 419-424.
- Mellor G, "Introduction to physical oceanography. Springer. New York. ISBN: 1996, 1-56396-210-1.
- Micklin P, "The Aral sea disaster", Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2007, 35, 47-72.
- Pengra B, "The drying of Iran's Lake Urmia and its environmental consequences", UNEP-GRID, Sioux

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Effectiveness of Urmia Lake Different Restoration Scenarios Using a 2D Hydrodynamic Model

Hassan Hamidi Razi ^a, Mehdi Mazaheri ^{a,*}, Jamal Mohammad Vali Samani ^a, Marcos Carvajalino Fernandez^b

^a Faculty of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran

^b Oceanography and climate research group, Institute of Marine Research, P.O. Box 1870 Nordnes

Received: 21 January 2017; **Accepted:** 09 October 2017

Keywords:

Urmia Lake, Partial Restoration, Ecological Water Level, MOHID Water, Hydrodynamic Model.

1. Introduction

Urmia lake is located in a closed basin between 37° 04' N and 38° 17' N latitude and 45° E and 46° E longitude in the northwest of Iran and the second extremely-largest saline lake in the world (Sima and Tajrishy, 2013). It has been recently much regarded due mainly to its dramatic area shrinkage and desiccation. The lake, because of its unique natural and ecological importance, has been considering as a National Park (Abbaspour and Nazaridoust, 2007), Ramsar Site (<https://rsis.ramsar.org>) and UNESCO Biosphere Reserve (<http://www.unesco.org>). Following the continuous drying process of Urmia Lake as well as considering its geographical and political location, livelihood, identity and historical dependency of the regional people to it, its restoration and prevention from drying up have become highlighted so far. According to several universal experiences connected with partial restoration approach and rehabilitation of the lakes coping with dryness (e.g. Micklin, 2007), Urmia Lake partial restoration is also discussed among Urmia Lake Restoration Program (<http://ulrp.sharif.ir>) experts. To this end, this study aims at investigating the partial restoration-related scenarios arisen through ULRP specialists using a 2D MOHID Water hydrodynamic system.

2. Methodology

2.1. Scenarios

In this study, tested scenarios, proposed by Urmia Lake Restoration Program Committee, include: Preservation of current lake status (no intervention), complete closing of Shahid Kalantari causeway, dyke construction in the southern part of Lake Urmia,

2.2. Data requirement and acquisition

To assess numerically any water body's condition and parameters, having a highly accurate bathymetry is very helpful and recommended. In this study, Urmia Lake bathymetry taken in 2013 was provided from Iran Water Research Organization which had an acceptable accuracy. Daily discharges of 18 rivers inflowing Urmia Lake were provided and daily pan evaporation and precipitation data of Bonab station, as well as monthly meteorological data of Bonab synoptic station (wind speed, wind direction, sun hours, and air temperature) were inputted to model. Additionally, daily recorded water level data of the Urmia Lake were used as initial condition and model calibration.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.hamidi@modares.ac.ir (Hassan Hamidi Razi), m.mazaheri@modares.ac.ir (Mehdi Mazaheri), www.SID.ir samani_j@modares.ac.ir (Jamal Mohammad Vali Samani), marcos.carvajalino@gmail.com (Marcos Carvajalino Fernandez).

2.3. Model

MOHID-2D is a water modelling system developed at the Marine Technology Research Centre (MARETEC) at Instituto Superior Técnico (IST), which belongs to Technical University of Lisbon (UTL) in Portugal (www.mohid.com). Its temporal discretization is based on the semi-implicit scheme and the spatial discretization on the finite volume approach, which ensures the conservation of mass of the simulated properties and flexibility on grid definition (Janeiro et al., 2008). The model solves the three-dimensional incompressible primitive equations. Hydrostatic equilibrium is assumed as well as the Boussinesq approximation.

2.3.1. MOHID-2D water set up for Urmia Lake and calibration

The model's grid size and time step of 500m*500m and 300s were respectively selected by optimizing the model execution time. All the required data were inputted to the model and observed water level was used to calibrate the model. To do this, 4 variables involving two factors relating to the buffer zones, manning and wind coefficients were calibrated. Regarding the buffer zones, the first one related to the reduction of rivers discharge as they flow the distance between hydrometric stations until reaching into the lake using shoreline by $Q_{input} = \beta * Q_{station}$ which β was obtained 0.32 by calibrating the model. The second one covered the loss of water undergone by evaporating from lake saline water body. Since evaporating from saline water is less than pan evaporation (not saline water) (Harbeck, 1955), therefore in the relation of $E_{lake} = \alpha * E_{pan}$, α was acquired 0.55 by the calibration. Additionally, manning and wind coefficients were achieved respectively 0.025 and 0.0015 by model sensitivity analysis for Urmia Lake. Because the turbulence and flow velocity within Urmia Lake is very slow, eddy viscosity amount was assumed zero.

3. Results and discussion

3.1. Calibration result

Fig. 1 shows the best fitted graph between observed versus modeled water level for the Urmia Lake. As illustrated, the resulting graph has been obtained with correlation coefficient and RMSE of 0.943 and 0.173, in order.

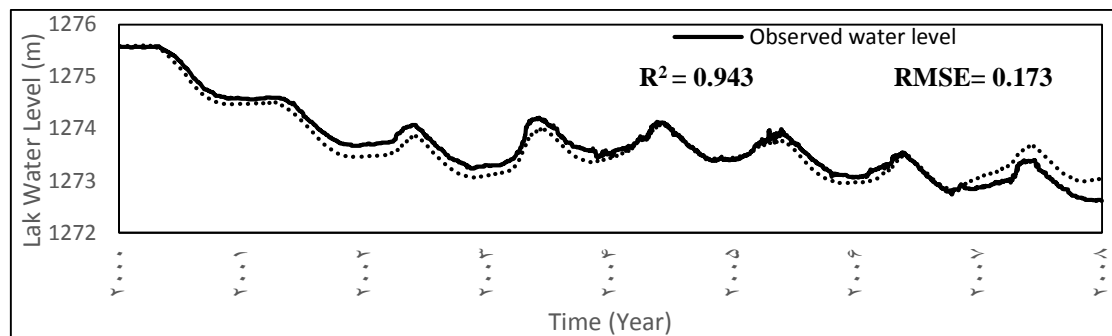


Fig. 1. Observed versus modelled water level data

3.2. Result of S1, S2 and S3 scenarios

It worth mentioning that all analyses and predictions in this paper are being performed based on the 8-year statistical data from 2000 to 2008 and it is assumed that all conditions in the future years will be the same with the current conditions. As previously mentioned, scenarios S1 and S2 and S3 relate to the continuation of lake current status, completely closing Shahid Kalantari Causeway and intersecting the lake from the location of islands.

Fig. 2 shows the comparison of Urmia lake water level for S1, S2 and S3 scenarios. As illustrated, the response of the lake water level is altering according to the essence of each scenario. By looking at the status of water level graphs, water level of the lake's southern part in S2 experiences the highest level than others. So that, it hits sometimes the ecological level (1274.1m) of the lake and maintains lake's biodiversity and ecological condition. In contrast, the northern part of the lake experiences the most critical condition as the amount of water in this part is limited by implementing S2. By conducting scenario S3, the southern part of the lake becomes much confined, while its water level gets higher value than northern part and S1. In either S1 or S3, the lake never reaches its ecological level (1274.1m) and always copes with the critical condition.

Table 1 presents the summarized results of simulations for each of the scenarios. According to this table, the most notable properties of the lake including water level, area, water volume and the loss undergone by evaporation have been computed by model and given. As you can see, lake's southern part in closing Shahid Kalantari causeway scenario has much more improved condition than other scenarios.

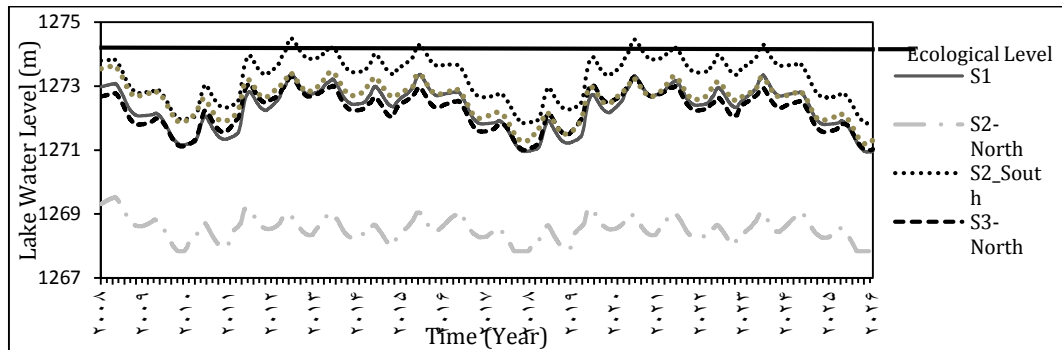


Fig. 2. Urmia Lake water level comparison for S1, S2 and S3 scenarios

Table 1. Results of scenarios in terms of water level, area, water volume and evaporation loss

Scenario	Max. Water level (m)	Min. Water level (m)	Max. Area (km ²)	Min. Area (km ²)	Max. Volume (10 ⁶ m ³)	Min. Volume (10 ⁶ m ³)	Max. Evp. Loss (10 ⁶ m ³)
S1	1273.38	1270.94	4139	2500	11539	3299	130
S2_South part	1274.5	1271.83	2802	1855	8684	2388	88
S2_North part	1269.52	1267.67	910	194	984	24	23
S3_South part	1273.64	1271.18	1318	624	2837	404	40.84
S3_North part	1273.3	1270.98	2804	2009	8751	3121.5	88.8

4. Conclusions

The goal of this research was to investigate the effectiveness of restoration scenarios arisen through the URLP. By conducting the research we concluded that in the state of closing Shahid Kalantari Causeway, the southern part of the lake experiences somewhat the most improved and rehabilitated condition, whereas other scenarios gives the lake rise to no desired condition and the lake always remains at the critical condition. There are a few suggestions derived from the results of the research to increase the efficiency of inflows flowing into the lake in order to prevent the Urmia Lake condition from getting dried up:

1. Given that the rivers' flows scatter before reaching to the lake water body in the second buffer zone susceptible to the evaporation due to small depths, it is proposed to construct canals along the flowing path of the rivers to let flows enter into lake water body with less evaporation losses.

2. Due to high distance between rivers' hydrometric stations, and lake, it is suggested to install hydrometric station at the junction of the rivers around the lake on the border of second buffer zone to measure the exact volume of water entering to the lake.

3. Since a significant portion of the rivers' flows are being lost at a distance of hydrometric stations to the lake entrance (first buffer zone), It is recommended to monitor and control more associated with illegal withdrawals, preventing the diversion of river flow for agricultural purposes and constructing water supply dam.

5. References

- Harbeck GE, "The effect of salinity on evaporation", 1955.
- Janeiro J, Fernandes E, Martins F, Fernandes R, "Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil", Marine pollution bulletin, 2008, 56 (4), 650-665.
- Micklin P, "The Aral sea disaster", Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2007, 35, 47-72.
- Ramsar Convention, Available at: <https://rsis Ramsar.org>.
- Sima S, Tajrishy M, "Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran", Journal of Great Lakes Research, 2013, 39 (1), 90-99.
- Technical University of Lisbon, Available at: <http://www.mohid.com>, 1985.
- Technical University of Sharif, "Urmia Lake Restoration Program", <http://ulrp.sharif.ir>, 2014.
- UNESCO Biosphere Reserves, Available at: <http://www.unesco.org>.