



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف



صفحه ۱ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲

عنوان طرح پژوهشی

مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف

عنوان گزارش

مدلسازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

مجری طرح:

عمار صفائی

همکاران:

عطیه علیزاده

معصومه نیک فر

فاطمه چمن مطلق

امیرمعز جماعت

علیرضا زارعی بیدختی

دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی شریف

مرداد ۱۳۹۹

پیش‌گفتار

قرارگیری دریاچه ارومیه در آستانه بحرانی زیست‌محیطی در مقیاس بین‌المللی در سال‌های منتهی به سال ۱۳۹۲ شمسی و مطالبات مردم شریف منطقه، هیأت محترم وزیران را بر آن داشت که در اولین جلسه خود در دولت یازدهم، طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۱۱۱۴۶ مورخ ۱۳۹۲/۰۵/۲۸، تشکیل کارگروه نجات دریاچه ارومیه را به تصویب رسانند که پس از بررسی‌های گروه‌های کارشناسی، ۱۹ طرح اولویت‌دار جهت نجات دریاچه ارومیه در جلسه ۱۳۹۲/۰۷/۱۶ کارگروه نجات دریاچه ارومیه تصویب گردید.

به منظور تمرکز و تسریع در روند اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد تشکیل «کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه» در جلسه مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ هیأت محترم وزیران مطرح و به موجب اختیارات اصل ۱۳۸ قانون اساسی، طبق مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۱۷۰۰۹۲ مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، مقرر گردید که ریاست کارگروه بر عهده معاون اول محترم رئیس‌جمهور باشد و جناب آقای دکتر عیسی کلانتری به عنوان دبیر کارگروه و مدیر اجرایی احیای دریاچه ارومیه تعیین گردیدند. ۷ وزیر، ۲ معاون رئیس‌جمهور و ۳ استاندار حوضه آبریز نیز به عنوان اعضای این کارگروه معرفی شدند.

در گام بعدی، ستاد احیای دریاچه ارومیه ضمن ایجاد کمیته‌های تخصصی شش‌گانه، ۲۰ کارگروه تخصصی، انجام مطالعات تطبیقی و ایجاد شوراهای منطقه‌ای، ضمن برگزاری ۹۸ جلسه متنوع کارشناسی و مدیریتی و بهره‌گیری از نظرات بیش از ۷۵۰ نفر از متخصصان داخلی و بین‌المللی در بازه زمانی ۱۳۶ روزه (از ۱۳۹۲/۱۱/۰۲ تا ۱۳۹۳/۰۳/۱۷)، اقدام به تدوین و اجرای یک نقشه راه جامع در راستای احیای دریاچه ارومیه نمود که نقشه راه مذکور در جلسه مورخ ۱۳۹۳/۰۴/۰۸ به ریاست رئیس‌جمهور محترم جناب آقای دکتر روحانی، ارائه و مورد تصویب قرار گرفت و دستور شروع عملیات اجرایی راه‌کارهای مصوب توسط ایشان صادر گردید. کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیز طی مصوبه شماره ۴۹۵۰۳/۵۷۵۴۲ مورخ ۱۳۹۳/۰۵/۲۵ به طور رسمی مسئولیت مطالعه و طراحی طرح نجات دریاچه ارومیه را به دانشگاه صنعتی شریف سپرد.

در کنار دستاوردهای میدانی متعدد حاصل از طرح ملی نجات دریاچه ارومیه از جمله قرار گرفتن دریاچه در مسیر احیای پایدار و رفع مخاطرات بهداشتی و سلامتی، نقش محوری دانشگاه‌های ملی و استانی در کلیه امور مطالعه و پایش، شاخصه‌ای کم‌نظیر در پروژه بوده که توانسته است ضمن خلق تعاملی پویا و چندسویه با دستگاه‌های اجرایی، روح اقدامات علمی-پژوهشی را در کالبد همه پروژه‌های ذیل طرح، جاری نمایند.

لذا با هدف شفاف‌سازی اقدامات مطالعاتی و پژوهشی انجام شده و نیز به منظور فراهم شدن امکان استفاده مجامع علمی در رشته‌های مختلف دانشگاهی از آب (هیدرولوژی، آب زیرزمینی، هیدرولیک و هیدرودینامیک)، محیط‌زیست، اکولوژی و لیمنولوژی گرفته تا اقتصاد و جامعه‌شناسی از دانش بومی تولید شده در این طرح ملی، کلیه مطالعات انجام شده توسط دبیرخانه کارگروه در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف در دسترس پژوهشگران محترم قرار گرفته است. یقیناً تدارک مطالعه و پژوهش در این منابع بومی ارزشمند که حاصل سال‌ها تلاش مجدانه محققان تراز اول داخلی و بین‌المللی بوده، سرآغازی خواهد بود برای تداوم نهضت علمی شکل گرفته و به زودی با بروز جهشی علمی در بستر استثنایی پدید آمده، شاهد شکوفایی برکات این گردش آزاد اطلاعات در اقصی نقاط کشور خواهیم بود.

کلیه تعبیر، نتایج و تفاسیری که در این اثر ذکر شده‌اند، محصول تلاش‌های نویسندگان (یا نویسندگان) آن بوده و لزوماً منعکس‌کننده دیدگاه‌های دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه نیست. لذا مسئولیت صحت کلیه اطلاعات و نتایجی که توسط این اثر در دسترس عموم قرار می‌گیرد، به عهده نویسندگان (یا نویسندگان) آن می‌باشد.



چکیده

تا کنون راهکارهای متعددی به منظور احیای دریاچه ارومیه پیشنهاد شده است. از جمله این راهکارهای می توان پیشنهاد تغییر در بازشدگی پل میانگذر شهید کلانتری و همچنین طرح های انتقال آب درون حوضه ای و بین حوضه ای را نام برد. به منظور بررسی راهکارهای پیشنهادی و همچنین بررسی وضعیت فعلی دریاچه ارومیه توسعه مدل هیدرودینامیکی-شیمیایی-کیفی دریاچه ارومیه حیاتی می باشد. در این گزارش اولین گام از توسعه این مدل یعنی ساخت مدل هیدرودینامیکی دریاچه با استفاده از FVCOM ارائه شده است. برای محاسبه میدان باد و شار حرارتی بر روی سطح دریاچه مورد استفاده در هر گام زمانی از داده های باز تحلیل شده ساعتی استفاده شده است. از داده های روزانه دبی رودخانه و بارش به عنوان ورودی مدل استفاده شده است. سری زمانی ساعتی تبخیر نیز با استفاده از الگوریتم COARE که در مدل FVCOM پیاده سازی شده است محاسبه گردید. مقایسه نتایج شبیه سازی شده تراز آب و دمای دریاچه با داده های اندازه گیری شده و سنجش از دور نشان می دهد بیلان آب و انرژی دریاچه ارومیه با دقت خوبی مدلسازی شده است و مدل از توانایی خوبی در پیش بینی نوسانات تراز آب ساعتی و ساختار دما برخوردار است. نتایج شوری با در نظر گرفتن آورد نمک از طریق رودخانه های ورودی و با صرف نظر کردن از نقش فرآیند ترسیب و انحلال در بیلان شوری دریاچه نشان می دهد بدون در نظر گرفتن نقش مهم نمک بستر، مدل قابلیت پیش بینی درست غلظت نمک را نداشته و مقادیر غلظت نمک کمتر از مقادیر اندازه گیری خواهند شد. در حالیکه با افزودن فرآیند ترسیب و انحلال نتایج شوری در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده بهبود یافت و این امر سبب بهبود عملکرد مدل در پیش بینی تغییرات زمانی و مکانی دمای دریاچه نیز گشت. در مرحله بعدی از این پروژه مدل هیدرودینامیک با مدل کیفی دریاچه کوپل شده تا بتوان خصوصیات هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه را مدلسازی نمود. در نهایت این مدل برای مطالعه و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف



صفحه ۳ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲

فهرست مطالب

۱- مقدمه و مرور ادبیات فنی	۷
۲- روش انجام کار	۱۴
۲-۱- داده های هواشناسی دریاچه ارومیه	۱۴
۲-۲- هیدرولوژی حوضه ارومیه	۲۱
۲-۲-۱- رودخانه های حوضه	۲۱
۲-۲-۲- اعمال رودخانه های ورودی دریاچه بر مدل هیدرودینامیکی	۲۲
۲-۳- داده های میدانی	۲۹
۲-۴- بارش و تبخیر سطحی دریاچه ارومیه	۳۳
۲-۵- مدلسازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه	۳۵
۳- نتایج مدل سازی هیدرودینامیکی	۴۲
۴- نتیجه گیری	۵۵
۵- مراجع	۵۸



فهرست اشکال

- شکل ۱. سرعت متوسط باد روی دریاچه ارومیه در جهت X در سال میلادی ۲۰۱۶..... ۱۶
- شکل ۲. سرعت متوسط روی دریاچه در جهت Y در سال میلادی ۲۰۱۶..... ۱۶
- شکل ۳. متوسط دمای هوا دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی..... ۱۷
- شکل ۴. متوسط رطوبت نسبی هوای دریاچه در سال میلادی ۲۰۱۶..... ۱۷
- شکل ۵. متوسط تابش خورشید با طول موج بلند روی دریاچه در سال میلادی ۲۰۱۶..... ۱۸
- شکل ۶. متوسط تابش خورشید با طول موج کوتاه روی دریاچه در سال میلادی ۲۰۱۶..... ۱۸
- شکل ۷. مقایسه سری زمانی (a) سرعت باد و (b) دمای هوای اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی SWP با داده های بازکاوی شده (Reanalysis) از ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017)..... ۱۹
- شکل ۸. نمودار (a) دمای هوا و (b) سرعت باد برای مقایسه مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی SWP و داده های بازکاوی شده (Reanalysis) از ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۵ (12-16-2016)..... ۲۰
- شکل ۹. مقایسه گلباد داده های ۱۰ دقیقه ای ایستگاه هواشناسی SWP با داده های ساعتی بازکاوی شده (Reanalysis) از تاریخ ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017)..... ۲۰
- شکل ۱۰: نقشه رودخانه های منتهی به دریاچه ارومیه..... ۲۱
- شکل ۱۱- سری زمانی دبی روزانه رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۳
- شکل ۱۲- سری زمانی دبی روزانه رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۴
- شکل ۱۳- مقایسه دبی تجمعی رودخانه های ورودی به دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۴
- شکل ۱۴- سری زمانی تغییرات دمای آب در رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۶
- شکل ۱۵- سری زمانی دمای آب رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۶
- شکل ۱۶- مقایسه متوسط دمای آب رودخانه های ورودی به مدل دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۷
- شکل ۱۷- سری زمانی شوری رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۸
- شکل ۱۸- سری زمانی شوری رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۸
- شکل ۱۹- مقایسه شوری متوسط رودخانه های ورودی به مدل دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۲۹



- شکل ۲۰: نقشه موقعیت رودخانه‌های حوضه دریاچه ارومیه و جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری..... ۳۰
- شکل ۲۱- شوری اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۳۱
- شکل ۲۲- دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۳۲
- شکل ۲۳- عمق آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۳۲
- شکل ۲۴- جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش در اطراف دریاچه ارومیه..... ۳۳
- شکل ۲۵- سری زمانی ساعتی تبخیر سطحی در دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۳۴
- شکل ۲۶- (a) سری زمانی متوسط بارش در شمال و جنوب دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵) و (b) مقایسه مقادیر بارش در شمال و جنوب..... ۳۴
- شکل ۲۷-فلوچارت ساختار مدل..... ۳۷
- شکل ۲۸- مش بندی دریاچه به همراه نقشه بسیمتری..... ۳۹
- شکل ۲۹- سلول های خشک و تر در قسمت شمالی دریاچه ارومیه در شرایط اولیه مدل سازی..... ۴۰
- شکل ۳۰- سلول های خشک و تر در قسمت جنوبی دریاچه ارومیه در شرایط اولیه مدل سازی..... ۴۱
- شکل ۳۱- مقایسه نتایج دمای مدل سازی در ۶ ایستگاه اندازه گیری با مقادیر اندازه گیری شده..... ۴۳
- شکل ۳۲- مقایسه سری زمانی دمای شبیه سازی شده با مدل FVCOM با نتایج سنجش از دور و اندازه گیری های میدانی در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۴۴
- شکل ۳۳- الگوی توزیع دما در دریاچه ارومیه در روزهای مختلف در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۴۵
- شکل ۳۴- بردارهای سرعت جریان در روزهای مختلف در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)..... ۴۷
- شکل ۳۵: مقایسه شوری مدل با ایستگاه u2 در سال ۲۰۱۶ بدون در نظر گرفتن فرآیند ترسیب و انحلال..... ۴۹
- شکل ۳۶: مقایسه شوری مدل با ایستگاه u5 در سال ۲۰۱۶ بدون در نظر گرفتن فرآیند ترسیب و انحلال..... ۵۰
- شکل ۳۷-نتایج مدل سازی شوری دریاچه در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده در ۶ ایستگاه..... ۵۱
- شکل ۳۸- مقایسه تراز سطح آب شبیه سازی شده با داده های اندازه گیری در سال ۲۰۱۶..... ۵۳
- شکل ۳۹- مقایسه ترازهای مدل سازی شده با مقادیر اندازه گیری شده..... ۵۴



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف



صفحه ۶ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲

فهرست جداول

جدول ۱- مشخصات دوره زمانی داده های گردآوری شده..... ۱۵



۱- مقدمه و مرور ادبیات فنی

دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران، در حد فاصل میان دو استان آذربایجان شرقی و غربی قرار دارد. بزرگترین و شورترین دریاچه داخل ایران است که بین طول های جغرافیایی $37^{\circ} 03'$ تا $45^{\circ} 50'$ و عرض های جغرافیایی $37^{\circ} 06'$ تا $38^{\circ} 15'$ قرار دارد. حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین حوضه دریاچه وان ترکیه و دریای خزر قرار دارد. اکثر آب ورودی به دریاچه ارومیه از بخش جنوبی آن تامین می شود به طوریکه دو رودخانه زرینه رود و سیمینه رود که از قسمت جنوبی دریاچه وارد می شوند بیش از ۵۰ درصد حجم آبدی رودخانه ها به دریاچه را تامین می کنند.

کاهش مستمر حجم آب دریاچه در اثر تبخیر و کاهش منابع آب ورودی به دریاچه منجر به کاهش تراز سطح آب دریاچه شده است. سطح آب دریاچه ارومیه در دهه اخیر با شیب نسبتاً تندی کاهش یافته است. به طوری که در طی ۲۰ سال حدود ۸ متر تراز سطح آب کاهش یافته است که منجر به از دست رفتن ۷۰ درصد حجم دریاچه شده است. این امر سبب افزایش شوری دریاچه در طول زمان شده و شوری آن به حد فوق اشباع رسیده است. در سال های اخیر شوری دریاچه به حدود ۴۰۰ گرم در لیتر رسیده است.

در سال های گذشته حدود ۷۰ درصد از منابع آب تجدید پذیر حوضه توسط بخش های مختلف برداشت شده است. از سوی دیگر برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی به واسطه حفر چاه های متعدد در سطح حوضه به طور غیر مستقیم بر کاهش تراز آب دریاچه تاثیر گذاشته است. ساخت و بهره برداری از سدهای متعدد در سطح حوضه آبریز بر کاهش رواناب ورودی به دریاچه تاثیرگذار بوده و توسعه نامتوازن کشاورزی با برداشت بیش از حد از منابع آب تجدیدپذیر مرتبط می باشد. 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 موثر می باشد.



عامل انسانی دیگری که در بررسی خشک شدن دریاچه مطرح می شود احداث میگذر شهید کلانتری می باشد. که با تغییر شرایط جریان احتمالاً کیفیت آب در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه را تغییر خواهد داد. به منظور احیای دریاچه ارومیه تا کنون راهکارهای متعددی از جمله تغییر در بازشدگی پل میانگذر شهید کلانتری و همچنین طرح های انتقال آب درون حوضه ای و بین حوضه ای 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 پروژه پژوهشی یک مدل هیدرودینامیکی-شیمیایی-کیفی برای دریاچه ارومیه توسعه داده شده است. اولین قدم برای توسعه این مدل ساخت یک مدل هیدرودینامیکی می باشد. مطالعات گذشته نشان می دهد شرایط اقلیمی، آورد رودخانه ها، بارش و تبخیر از جمله عواملی تاثیر گذار بر روی دریاچه ارومیه می باشد. اما به دلیل در دسترس نبودن اندازه گیری های میدانی کافی برای صحت سنجی و واسنجی مدل تا کنون مدل مناسبی برای دریاچه ارومیه توسعه پیدا نکرده است.

بختیاری و همکاران [۱] مطالعه ای تحت عنوان «مدلسازی تغییرات الگوی جریان و شوری در دریاچه ارومیه با استفاده از یک مدل سه بعدی» انجام دادند. در این مطالعه برای شبیه سازی رفتار هیدرودینامیک دریاچه و نحوه توزیع شوری در آن از یک مدل سه بعدی به نام MIKE3 استفاده شد. این مدل برای مدلسازی محیط های آبی نظیر سواحل و دریاها مورد استفاده قرار می گیرد و به دلیل سادگی و سهولت در اجرای آن در ایران محبوبیت بیشتری نسبت به سایر مدل های بین المللی دارد. در این مطالعه از شبکه بندی بدون ساختار برای مدلسازی آن استفاده شد. در محیط هایی که مرز آن پیچیده و نامنظم می باشد، استفاده از شبکه بندی بدون ساختار باعث می شود تا مدل در مرزها دقت بیشتری داشته و نتایج مدل به واقعیت نزدیک تر باشد. در مطالعه مذکور پارامترهایی نظیر باد، تبخیر، بارش و دبی رودخانه های ورودی به دریاچه ارومیه به عنوان عوامل اصلی و تاثیرگذار در الگوی جریان دریاچه و توزیع شوری آن مطرح شدند. از ویژگی های این مطالعه نسبت به



مطالعات پیشین می توان به این مورد اشاره کرد که بر خلاف مطالعات قبلی که از متوسط سالیانه پارامترها استفاده می شد، در این مطالعه پارامترهایی نظیر بارش، تبخیر و دبی ورودی رودخانه ها به صورت سری های زمانی ماهیانه استفاده شده است. این در حالی است که امروزه برای مدلسازی دقیق هیدرودینامیک محیط های آبی از سری زمانی ساعتی استفاده می شود. برای انجام این مطالعات از داده های سال ۶۶-۱۳۶۵ به عنوان سال مبنای مدلسازی استفاده شده است؛ چراکه طبق بررسی های انجام شده در این سال بیشترین هماهنگی بین بارش، تبخیر و ورودی های رودخانه ها با تغییرات تراز سطح رودخانه ها وجود دارد. اما با توجه به این که شرایط سال ۶۶-۱۳۶۵ با شرایط کنونی دریاچه متفاوت است، نتایج حاصل از این تحقیق نمی تواند چندان قابل استفاده برای تصمیم گیری در خصوص شرایط فعلی دریاچه باشد. هم چنین در این گزارش علی رغم اهمیت بالای دما و چگالی رودخانه های ورودی به دریاچه در مدلسازی جریان آن، اشاره ای به این مورد نیز نشده است. این مطالعه نشان می دهد با افزایش دبی رودخانه های ورودی به دریاچه که منبع اصلی آب شیرین دریاچه می باشند و ۹۵ درصد آن ها به قسمت جنوبی دریاچه وارد می شوند، اختلاف تراز قسمت جنوبی و شمالی دریاچه و هم چنین اختلاف شوری این دو قسمت افزایش می یابد. همین امر نشان می دهد که دما و چگالی این رودخانه ها نیز می تواند در توزیع شوری دریاچه تاثیرگذار باشد، اما در این گزارش به آن اشاره ای نشده است. هم چنین این مطالعه نشان می دهد که بعد از احداث میان گذر، اختلاف شوری قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ۵۰ درصد افزایش می یابد. بنابراین این مطالعات حاکی از تاثیر مستقیم میان گذر بر اکوسیستم دریاچه ارومیه و نحوه توزیع شوری در آن می باشد [۱].

هم چنین دامن افشان و همکاران [۲] مطالعه ای تحت عنوان « شبیه سازی هیدرولیک تغییرات دانسیته و شوری دریاچه ارومیه » انجام دادند. در این مدل پارامترهایی نظیر مومنوم موجود و وارد شده به محیط، نیروی کوریولیس، تنش اصطکاکی کف، تنش اصطکاکی باد در کف، جریان های ایجاد شده توسط موج، گرادیان های



فشار جو، لزجت، چشمه ها و چاه ها، تر و خشک شدن مرزها و تبخیر و بارش به عنوان پارامترهای ورودی به مدل در نظر گرفته شدند. معادلات پایه و به کار گرفته شده در این مدل، معادلات رینولدز، ناویراستوکس و پیوستگی بودند. پس از اجرای این مدل مشخص شد که جریان غالب در دریاچه از جنوب به سمت شمال می باشد، درحالی که مطالعه بختیاری و همکاران [۱] چیزی خلاف این مورد را نشان داده بود و وجود جریان از جنوب به سمت شمال دریاچه را تایید نکرده بود [۲]. مطالعه دامن افشان و همکاران [۲] همچنین نشان داده است که وجود میانگذر بر ارتباط هیدرولیکی دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه تاثیرگذار بوده و الگوی جریان در دریاچه را تغییر داده است. در این مدل چون محدوده دما و شوری از محدوده چگالی قابل اعمال به مدل بیشتر بوده است، لذا معرفی و اعمال چگالی به مدل امکان پذیر نبوده و تنها، امکان اعمال چگالی دریاچه در چندین ماه از سال وجود داشته است. همین امر باعث شده است تا از صحت نتایج این مدل و این مطالعه کاسته شود.

در سال ۱۳۹۶ دانشگاه تبریز پروژه ای را تحت عنوان «بررسی اثرات جاده میانگذر بر اکوسیستم دریاچه ارومیه و ارائه طرح اجرایی برای راهکارهای اصلاحی موردنظر» انجام داده است. برای انجام این پروژه نیز از مدل سه بعدی MIKE3 استفاده شده است [۳]. در این مطالعه فرض شده است که دمای رودخانه های ورودی به دریاچه برابر با دمای آب دریاچه می باشد. در حالیکه اندازه گیری های میدانی نشان می دهد بین دمای رودخانه ها و دمای دریاچه ارومیه می تواند تفاوت زیادی وجود داشته باشد و این فرض می تواند در شبیه سازی هیدرودینامیک دریاچه خطا ایجاد کند. از طرفی در این مدل چگالی فقط به عنوان تابعی از دما در نظر گرفته شده و اثر شوری نادیده گرفته شده است. همچنین مدلسازی شوری به صورت جداگانه و بعد از مدل هیدرودینامیک اجرا شده است، این در حالی است که دانسیته تابعی از دما و شوری بوده و مدل هیدرودینامیک و شوری بایستی همزمان با هم اجرا شوند. نتایج این مطالعه نشان می دهد در حالت کم آبی، بخش قابل



توجهی از ناحیه جنوبی دریاچه خشک می شود و وجود یا عدم وجود آبگذر تاثیری بر گردش آب دریاچه ندارد [۳]. از طرفی نتایج بدست آمده بیانگر این مطلب بود که وقتی دریاچه در حالت تراز اکولوژیک قرار دارد و بخش جنوبی دریاچه نیز دارای آب است، وجود میانگذر گردش آب و الگوی جریان آب را در بخش شمالی و جنوبی دریاچه، به خصوص در شرایط طوفانی، دستخوش تغییر کرده است. در این مطالعه پیشنهاد شده است ایجاد بازشدگی جدید اگرچه بر اکوسیستم دریاچه تاثیر مستقیم دارد و در جهت کاهش بحران کم آبی آن عمل خواهد کرد، اما به تنهایی نمی تواند سبب حل بحران دریاچه شود. در نهایت در این گزارش پس از بررسی چندین راهکار، سناریوی دو بازشدگی به طول ۵۰۰ متر در شانه غربی جاده میانگذر به فواصل ۲/۵ کیلومتر و ۵ کیلومتر از محل پل موجود، به عنوان راه حل نهایی انتخاب گردید [۴]. لازم به ذکر است مدل ساخته شده در این مطالعه تنها برای یک دوره چند روزه طوفان اجرا شده، بنابراین نتایج بدست آمده از این تحلیل بیانگر شرایط دریاچه در دراز مدت نبوده و برای تصمیم گیری های کلان لازم است شبیه سازی حداقل برای یک دوره یک ساله مورد بررسی قرار گیرد.

مرجانی و جمالی [۵] مطالعه ای تحت عنوان «نقش تبادل جریان در توازن آب شور دریاچه ارومیه» انجام دادند. این مطالعه بررسی می کند که تبادل جریان در دریاچه ارومیه بعد از احداث میانگذر چگونه بوده و به چه شکل بر هیدرودینامیک دریاچه ارومیه تأثیر می گذارد. این نتایج نشان می دهد در نظر نگرفتن لایه بندی در دریاچه ارومیه علت اصلی تفاوت نتایج مطالعه شفیع فر و همکاران [۶] با داده های میدانی می باشد. همچنین در این مطالعه نشان داده شده است توجه نکردن به متفاوت بودن چگالی در نقاط مختلف دریاچه باعث بدست آوردن نتایج غیرقابل استنادی می شود که با داده های میدانی موجود متفاوت است؛ لذا در نظر گرفتن چگالی برای نقاط مختلف دریاچه را به عنوان یک اصل اساسی برای مدلسازی آن معرفی می کند [۵]. به عنوان مثال



در مطالعه بختیاری و همکاران [۷] تفاوت چگالی در نقاط مختلف دریاچه در نظر گرفته نشده است که همین عامل سبب شده تا از اعتبار نتایج حاصل از این پژوهش کاسته شود.

یکی دیگر از مواردی که در مطالعات مرجانی و جمالی [۵] مورد بررسی قرار گرفته است، تاثیر اختلاف چگالی و اختلاف تراز آب قسمت شمالی و جنوبی دریاچه در شکل گیری جریان های شمالی - جنوبی و جنوبی - شمالی می باشد. در این پژوهش یک مدل یک بعدی ترکیبی از آب شور ارائه شده است تا وضعیت تعادل در دریاچه ارومیه بعد از احداث میانگذر مورد بررسی قرار گیرد. در این مدل چگالی، بارش، تبخیر و دبی ورودی رودخانه ها به عنوان عوامل اصلی تاثیر گذاری، در نظر گرفته شده اند. هم چنین جریان در محل بازشدگی به صورت دو لایه در نظر گرفته شده است تا مشکلات مطالعات پیشین رفع شود. در حقیقت این مدل یک بعدی اهمیت جریان - های شمال به جنوب و جنوب به شمال را که تحت تاثیر اختلاف تراز آب و اختلاف چگالی دو قسمت شمالی و جنوبی دریاچه می باشد، نشان می دهد.

مرجانی [۸] با مدل سه بعدی COHERENCE به مدل سازی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه و پخش شوری در آن پس از احداث جاده میانگذر پرداختند. این مطالعه چگالی قسمت های مختلف دریاچه را متفاوت در نظر می گیرد. در این مطالعه شرایط دریاچه در سطح و عمق، ورودی های مختلف به دریاچه، باد، توزیع شوری، تبخیر، جریان دو لایه در محل بازشدگی به مدل اعمال شده است. در این مدل سه بعدی جریانات چند لایه به صورت حرکت آب شور بر روی آب شیرین و بالعکس مدل سازی شده است. پس از اجرای این مدل مشخص شد که احداث میانگذر تاثیر زیادی بر نوسان تراز آب دو بخش شمالی و جنوبی دریاچه ندارد و شرایط توزیع شوری و چگالی آب دو قسمت شمالی و جنوبی دریاچه را نیز به صورت محسوسی تغییر نمی دهد.

توفیقی و همکاران [۹] به شبیه سازی دوبعدی میدان جریان دریاچه ارومیه پرداختند و برای مدل سازی از مدل عددی MIKE21 استفاده کردند. با در نظر گرفتن اطلاعات ایستگاههای سینوپتیک، رودخانه ها و بارش



و تبخیر نشان دادند که وزش باد مهم ترین عامل ایجاد جریان در دریاچه می باشد. محمدی و غیرتی [۱۰] به بررسی تاثیر میانگذر بر جریان و الگوی پراکنش رسوبات دریاچه ارومیه پرداختند. با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat به این نتیجه رسیدند که احداث میانگذر باعث برهم خوردن الگوی پراکنش طبیعی رسوبات شده است. بختیاری و همکاران [۱۱] از مدل سه بعدی MIKE3 استفاده کردند و شوری و جریان را در دریاچه شبیه سازی نمودند. ایشان نشان دادند که وجود میانگذر باعث اختلاف شوری بین ناحیه شمالی و جنوبی شده است. زین الدینی و همکاران [۱۲] به شبیه سازی دوبعدی و سه بعدی دریاچه با استفاده از مدل MIKE پرداختند. با تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف به این نتیجه رسیدند که مهم ترین عامل بر روی الگوی جریان وزش باد است. درحالیکه وزش باد تاثیری بر شوری آب ندارد. لذا عوامل موثر بر شوری آب را رودخانه های ورودی، بارش و تبخیر دانستند. در پژوهش دیگری نیز قابلیت مدل MIKE 3 FM در مدلسازی هیدرودینامیک و توزیع شوری دریاچه بررسی شده است و با مقایسه مقادیر شوری آب مدلسازی و اندازه گیری شده، قابلیت مناسب مدل در شبیه سازی را نشان داده شده است [۱۳].

در این گزارش نتایج مدل هیدرودینامیکی توسعه یافته برای دریاچه ارومیه ارائه شده است. این مدل الگوی دما، شوری و جریان را به صورت سه بعدی و همزمان شبیه سازی می کند. برای توسعه مدل از داده های دبی، دما و شوری رودخانه های ورودی به صورت روزانه استفاده شده است. داده های هواشناسی نیز برای دقت بهتر مدل به صورت سری زمانی ساعتی مورد استفاده قرار گرفته اند که در بخش بعد توضیح داده شده اند. در ادامه مشخصات آورد رودخانه های ورودی در طول بازه مدلسازی توضیح داده خواهد شد. پس از معرفی مدل هیدرودینامیک استفاده شده، نتایج شبیه سازی با استفاده از داده های میدانی صحت سنجی و ارائه شده اند.



۲- روش انجام کار

۱-۲ داده های هواشناسی دریاچه ارومیه

در این پژوهش برای توسعه مدل هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه ارومیه نیاز به داده های ساعتی هواشناسی می باشد. در اطراف دریاچه ارومیه ۸ ایستگاه هواشناسی وجود دارد. این ایستگاه ها واقع در شهرهای مجاور دریاچه یعنی، سلماس، ارومیه، نقده، میاندوآب، عجب شیر، اسکو، شبستر و شرفخانه هستند. در صورت استفاده از داده های ثبت شده در این ایستگاه ها که در خشکی نصب شده اند می بایست فاصله زیاد آن ها از دریاچه، تفاوت رقوم ارتفاعی آن ها در نظر گرفته شود. به علاوه پارامترهایی مثل باد و دمای هوا بر روی خشکی تفاوت زیادی با مقادیر واقعی روی سطح دریاچه دارند. از تاریخ 27-8-2016 دو ایستگاه دیگر توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران (آب نیرو) در شمال و جنوب دریاچه احداث شده است که داده های آن ها می توانند نماینده مناسبی از پارامترهای اقلیمی حاکم بر دریاچه ارومیه باشند. این دو ایستگاه به طور آنلاین و مستمر اطلاعات هواشناسی از قبیل دمای هوا، نقطه شبنم، سرعت و جهت باد، فشار هوا، رطوبت نسبی، پارامترهای مربوط به تابش خورشید را می سنجند. این ۲ ایستگاه بانام های SWP و DWP به ترتیب در کنار میان گذر و در شمال دریاچه نصب شده اند.

مشخصات دوره زمانی داده های گردآوری شده برای توسعه مدل دریاچه ارومیه در جدول ۱ ارائه شده اند. مطابق با این جدول، با توجه به اینکه داده های کمی و کیفی در ۸ رودخانه منتهی به دریاچه ارومیه و همچنین در ۶ ایستگاه درون دریاچه در طول سال ۲۰۱۶ اندازه گیری شده اند، توسعه مدل هیدرودینامیک، شیمیایی و کیفی دریاچه نیز می بایست در طول این زمان توسعه یابد. متأسفانه به دلیل عدم همپوشانی این داده ها با داده های هواشناسی ثبت شده در ایستگاه های آنلاین نمی توان از این داده ها استفاده نمود. داده های هواشناسی در ایستگاه های سازمان هواشناسی نیز تنها سه بار در یک شبانه روز اندازه گیری شده اند، در حالی که برای



مدل سازی با دقت مناسب وجود داده های ساعتی ضروری می باشد. لذا در این مطالعه برای پارامترهای هواشناسی از داده های بازتحلیل شده^۱ ERA5 استفاده شده است. این داده ها به صورت ساعتی بوده و در یک مش بندی منظم مربعی با دقت ۹ کیلومتر در ۹ کیلومتر بر روی دریاچه ارومیه استخراج شده اند.

جدول ۱: مشخصات دوره زمانی داده های گردآوری شده

نام داده	منبع	فاصله زمانی داده ها	تاریخ شروع	تاریخ پایان
داده های هواشناسی خشکی	سازمان هواشناسی	سه بار در شبانه روز	2016-1-1	2017-8-31
داده های هواشناسی دریاچه	ایستگاه آنالین آب نیرو	هر یک دقیقه	2016-8-27	2018-10-1
بازتحلیل داده هواشناسی ERA5	ECMWF	ساعتی	2016-1-1	2020-1-1
داده های کمی و کیفی رودخانه ها	آب نیرو	ماهانه	2016-2-16	2017-1-15
داده های کمی و کیفی دریاچه	آب نیرو	ماهانه	2016-2-14	2017-1-17
دبی رودخانه های شرقی	آب منطقه ای	روزانه	-	-
دبی رودخانه های غربی	آب منطقه ای	روزانه	2016-1-1	2020-1-1
بارش	آب منطقه ای	روزانه	2016-1-1	2017-3-20

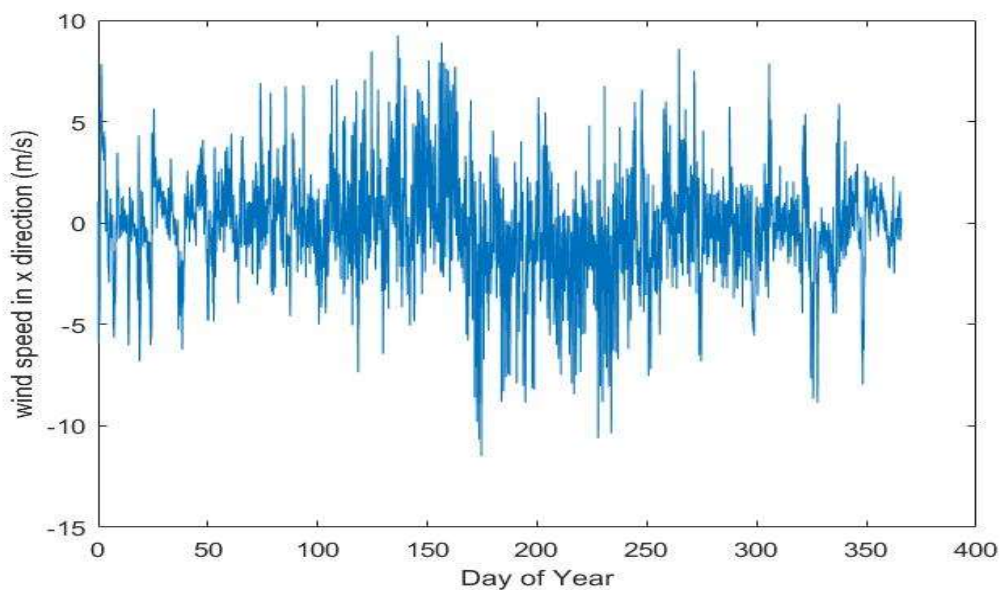
پس از جمع آوری و آماده سازی داده های هواشناسی، مقادیر هر پارامتر بر روی مش محاسباتی دریاچه با استفاده از الگوریتم Natural Neighbor درون یابی شده اند. اولین داده کمی و کیفی در رودخانه ها و دریاچه در تاریخ ۱۷ و ۱۸ هم ماه دوم میلادی سال ۲۰۱۶ اندازه گیری شده اند. بعلاوه کمترین دمای آب سال نیز در تاریخ ۲۰۱۶/۲/۱۸ رخ می دهد. با توجه به اینکه در این بازه دریاچه در حالت اختلاط کامل^۲ است، لذا این زمان، بهترین زمان برای شروع مدل سازی به صورت هموژن می باشد. مدل سازی تا انتهای سال ۲۰۱۶ و برای

¹ Reanalysis Data² Well-mixed

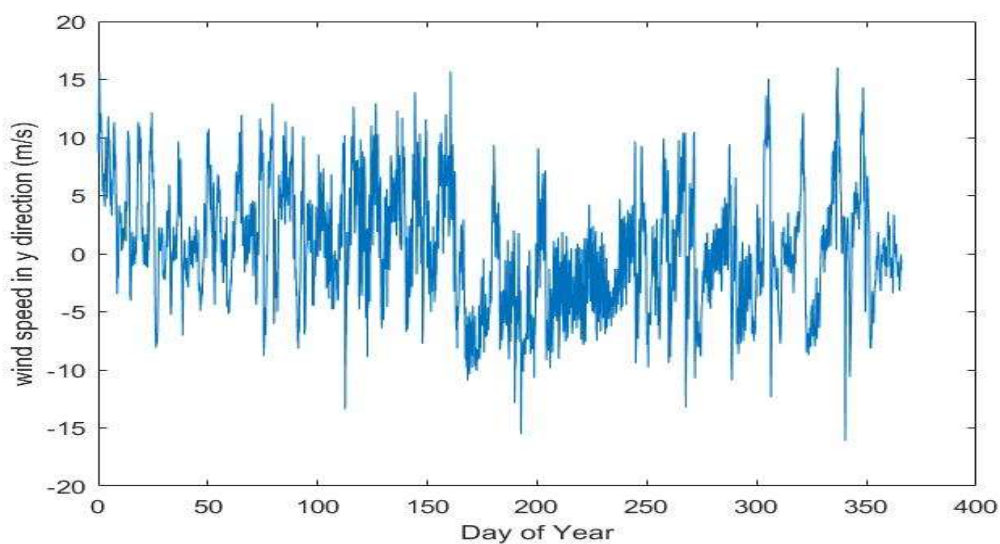


۱۱ ماه در نظر گرفته شده است. در شکل های زیر سری زمانی میانگین سرعت باد در جهت x و y ، دمای هوا،

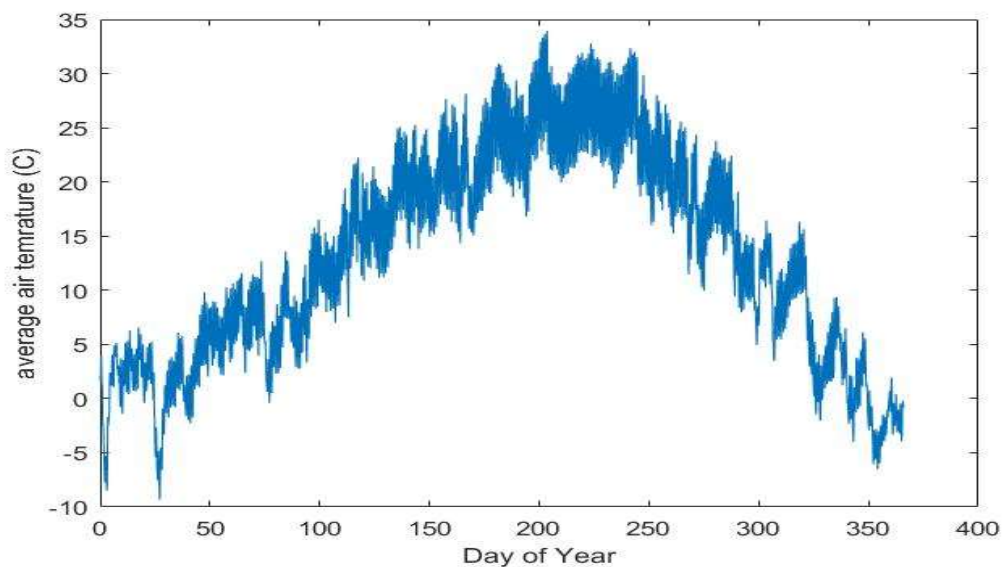
رطوبت نسبی، موج کوتاه و بلند تابش خورشید مشاهده می شود.



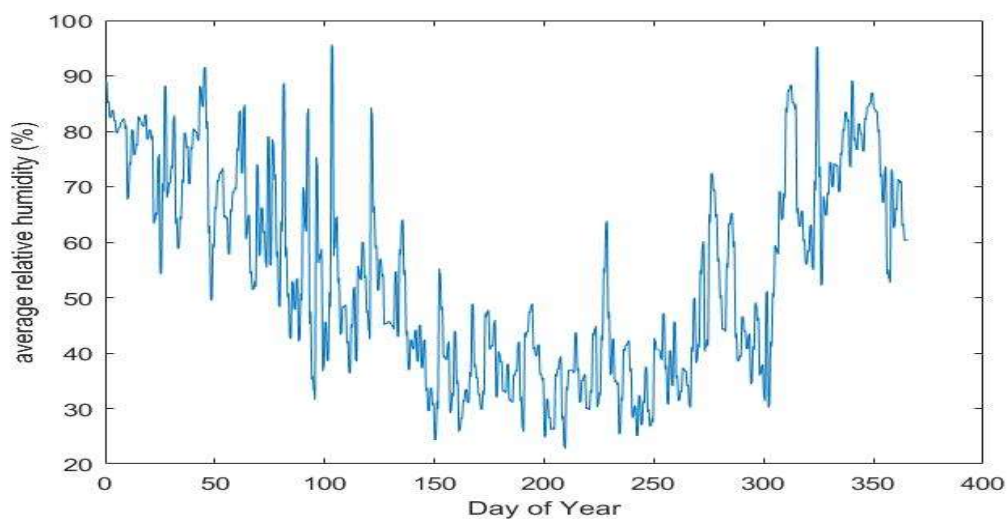
شکل ۱. سرعت متوسط باد روی دریاچه ارومیه در جهت x در سال میلادی ۲۰۱۶



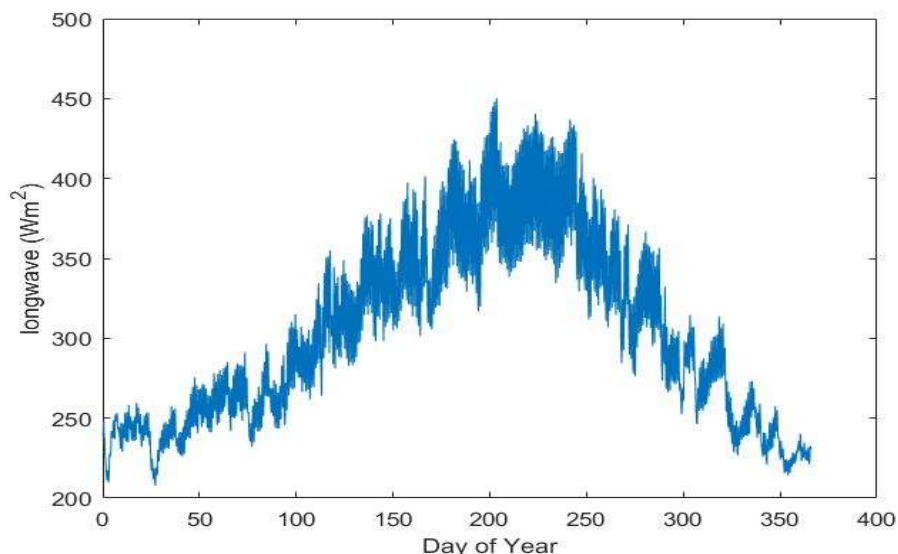
شکل ۲. سرعت متوسط روی دریاچه در جهت y در سال میلادی ۲۰۱۶



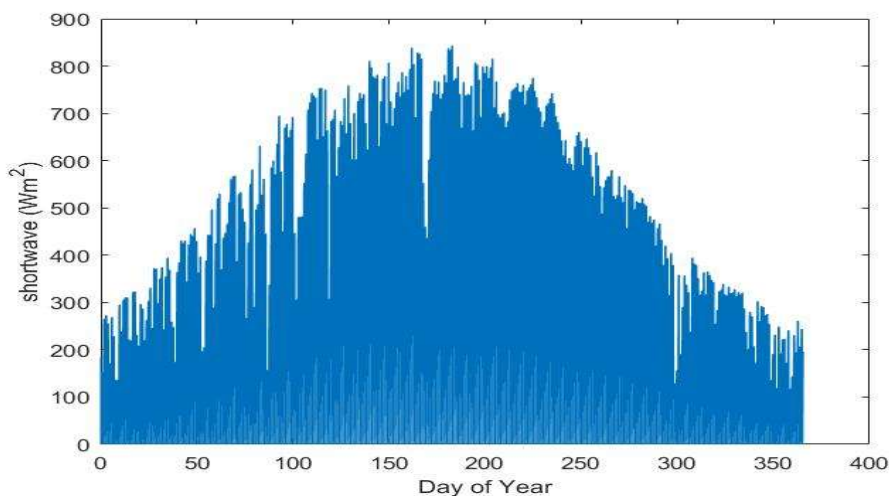
شکل ۳. متوسط دمای هوا دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی



شکل ۴. متوسط رطوبت نسبی هوای دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی



شکل ۵. متوسط تابش خورشید با طول موج بلند روی دریاچه در سال میلادی ۲۰۱۶

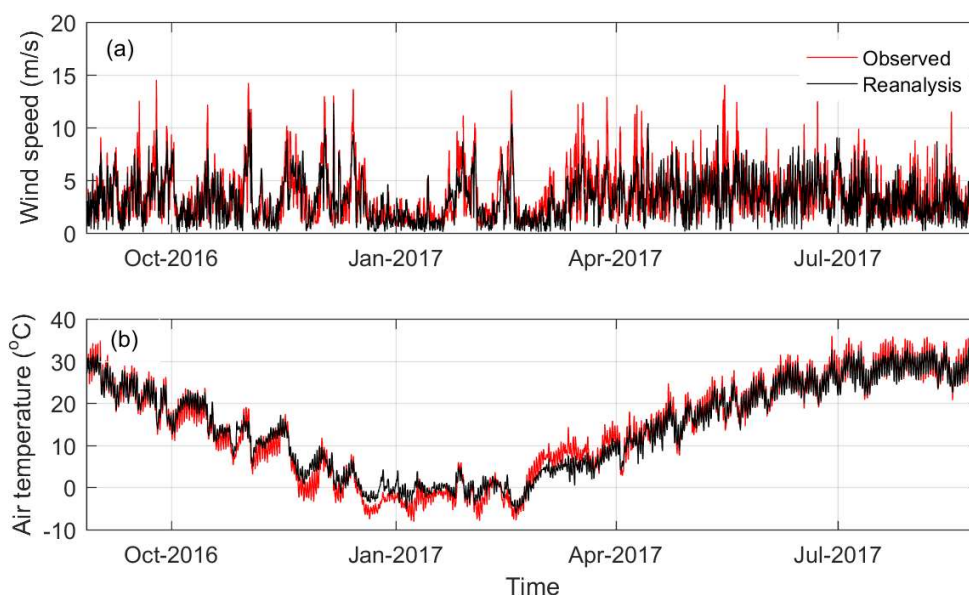


شکل ۶. متوسط تابش خورشید با طول موج کوتاه روی دریاچه در سال میلادی ۲۰۱۶

برای اطمینان از صحت داده‌های بازکاوی شده ERA5 در شکل ۷ سری زمانی داده‌های ساعتی سرعت باد و دمای هوای که در ایستگاه هواشناسی SWP اندازه‌گیری شده‌اند با داده‌های بازکاوی شده مقایسه شده‌اند. ایستگاه SWP از تاریخ ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) شروع به کار کرده است و داده‌های آن از تاریخ تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017) موجود می‌باشند. مقدار $RMSE$ و R^2 برای داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده در



این ایستگاه در مقایسه با داده‌های بازکاوی شده از تاریخ ۶ شهریور ۱۳۹۵ تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ به ترتیب $1/89 \text{ m/s}$ و $0/64$ می‌باشد. مقدار $RMSE$ و R^2 برای داده‌های دمای هوا نیز در طول این یک سال به ترتیب $2/1^\circ\text{C}$ و $0/98$ بدست آمدند.

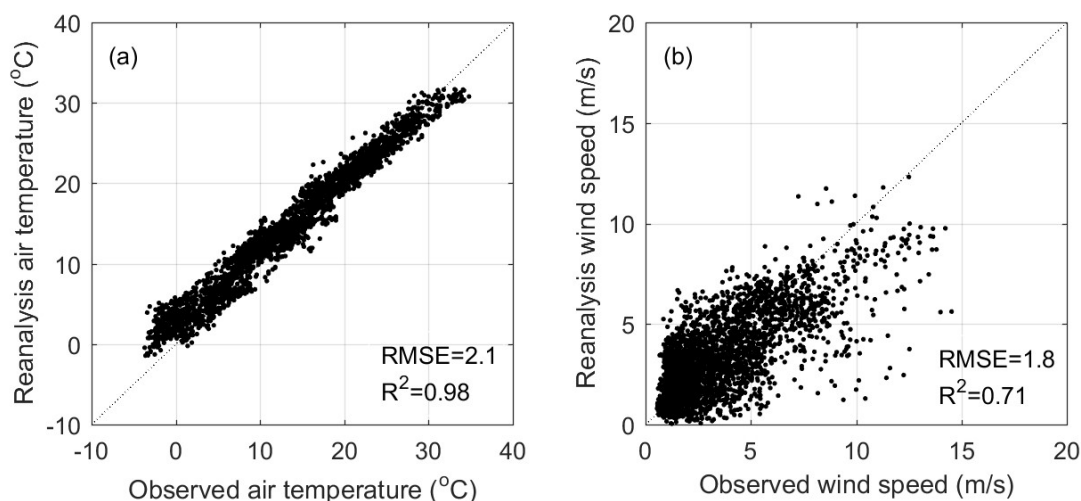


شکل ۷. مقایسه سری زمانی (a) سرعت باد و (b) دمای هوای اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی SWP با داده‌های بازکاوی شده (Reanalysis) از ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017).

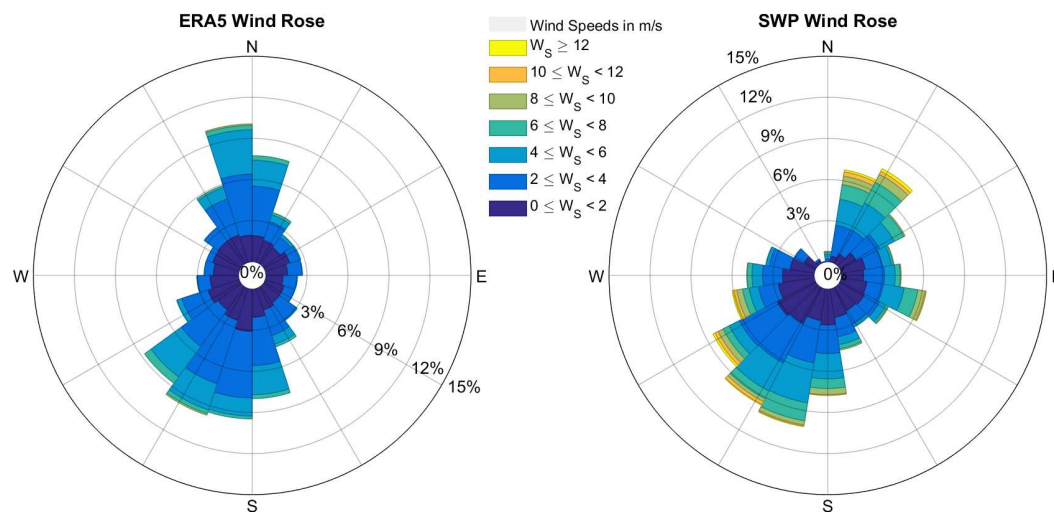
با توجه به اینکه مدلسازی در این پروژه پژوهشی تا تاریخ ۲۶ آذرماه ۱۳۹۵ (12-16-2016) انجام شده است، در شکل ۸ نمودارهای دمای هوا و سرعت باد به منظور صحت‌سنجی داده‌های بازکاوی شده در طول بازه زمانی ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۵ (12-16-2016) رسم شده‌اند. در این بازه داده‌های بازکاوی شده سرعت باد از دقت بهتر و قابل قبولی برخوردار هستند. در این بازه مقدار $RMSE$ و R^2 برای سرعت باد به ترتیب $1/89 \text{ m/s}$ و $0/71$ و برای دمای هوا نیز به ترتیب $2/1 \text{ m/s}$ و $0/98$ می‌باشد. در شکل ۹ نیز گلباد داده‌های ایستگاه SWP با داده‌های بازکاوی شده برای تاریخ ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017) مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد داده‌های ERA5 نسبتاً قابل قبول



هستند. البته بعضی از جهت های باد غالب را نتوانسته است به درستی پیش بینی کند. اما باید در نظر داشت گلباد داده های ایستگاه SWP برای داده های ۱۰ دقیقه ای باد رسم شده است و گلباد ERA5 برای داده های ساعتی باد می باشد. بنابراین بخشی از این تفاوت به دلیل تفاوت بازه اندازه گیری داده ها می باشد.



شکل ۸. نمودار (a) دمای هوا و (b) سرعت باد برای مقایسه مقادیر اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی SWP و داده های بازکاوی شده (Reanalysis) از ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۵ (12-16-2016).



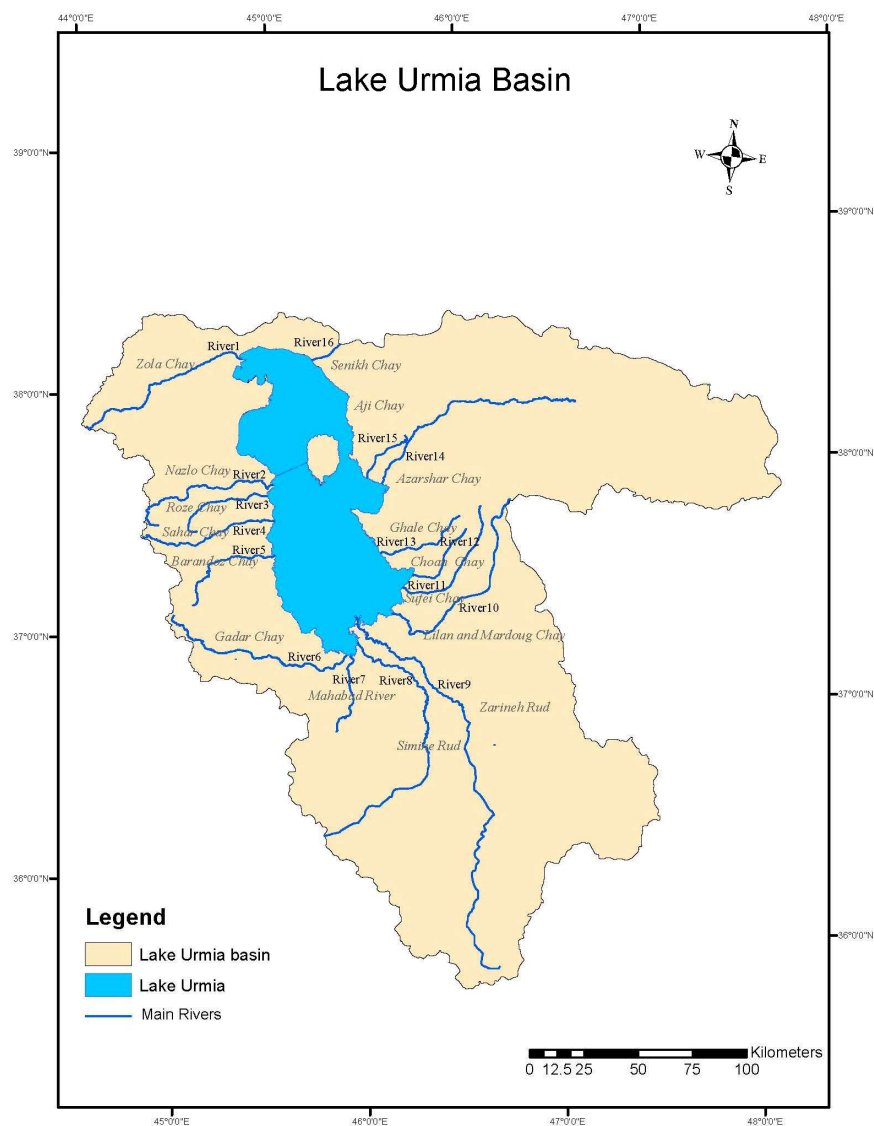
شکل ۹. مقایسه گلباد داده های ۱۰ دقیقه ای ایستگاه هواشناسی SWP با داده های ساعتی بازکاوی شده (Reanalysis) از تاریخ ۶ شهریور ۱۳۹۵ (8-27-2016) تا ۶ شهریور ۱۳۹۶ (8-28-2017).



۲-۲ هیدرولوژی حوضه ارومیه

۱-۲-۲ رودخانه های حوضه

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود ۱۶ رودخانه به دریاچه ارومیه می ریزند که از این تعداد اطلاعات ۱۳ رودخانه در دسترس می باشد.



شکل ۱۰: نقشه رودخانه های منتهی به دریاچه ارومیه



دو رودخانه‌ی صوفی چای و آذرشهر چای به دلیل خشک شدن و نبود اطلاعات در سال‌های موردنظر برای مدل سازی، از مدل حذف شده‌اند. در ادامه رودخانه‌های موردنظر به اختصار معرفی می‌شوند.

۲-۲-۲ اعمال رودخانه‌های ورودی دریاچه بر مدل هیدرودینامیکی

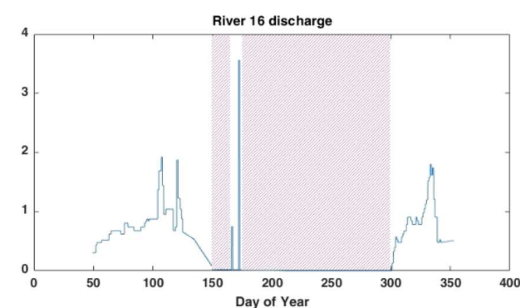
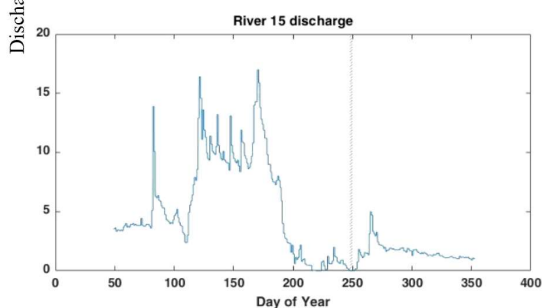
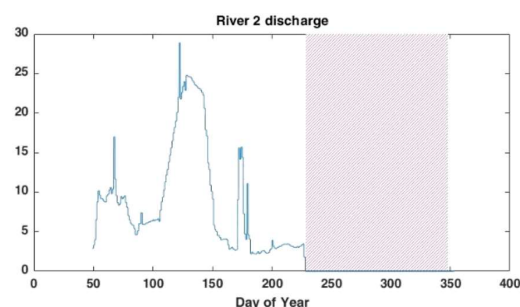
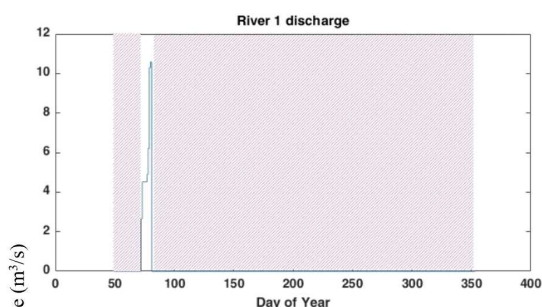
۲-۲-۲-۱ دبی رودخانه‌های ورودی به دریاچه

۱۴ رودخانه اصلی معرفی شده در بخش قبل جهت مدل سازی به عنوان ورودی مدل هیدرودینامیکی در نظر گرفته شده‌اند. دبی این رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت روزانه ثبت شده‌اند و با توجه به اینکه ورودی مدل به صورت ساعتی هستند دبی رودخانه‌ها در طول یک روز به صورت ثابت فرض شده‌اند. در ادامه نمودارهای سری زمانی دبی روزانه برای طول مدلسازی در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵) ارائه شده‌اند. زمانهایی که رودخانه‌ها خشک شده‌اند به صورت هاشور در نمودارها مشخص شده‌اند این رودخانه‌ها بر اساس نقشه شکل ۱۰ شماره گذاری شده‌اند. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود:

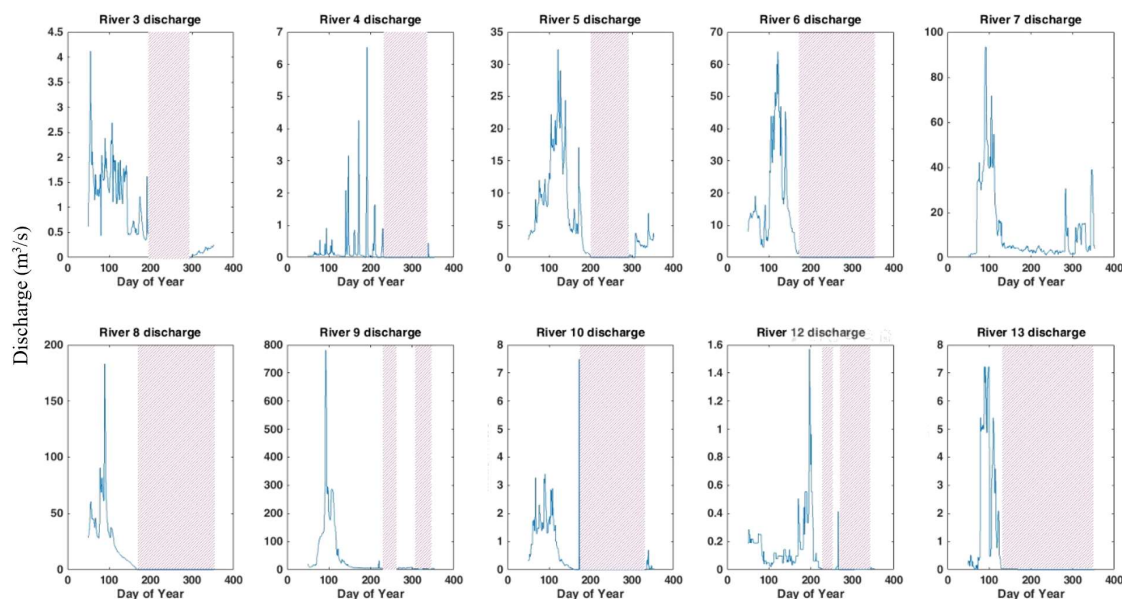
- در رودخانه زولاچای بیشترین دبی بین روزهای ۱۳۰ تا ۱۴۰ یعنی در ماه تیر اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه آجی چای بیشترین دبی در روزهای ۶۰ تا ۱۵۰ یعنی در ماه‌های اردیبهشت و خرداد و تیر اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه نازلوچای بیشترین دبی بین روزهای ۱۳۰ تا ۱۴۰ یعنی در ماه تیر اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه روضه چای بیشترین دبی در روزهای ۳۴۰ تا ۳۵۰ یعنی در ماه دی اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه شهرچای بیشترین دبی در روزهای ۲۵۰ تا ۲۶۰ یعنی در ماه آبان اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه باراندوز چای بیشترین دبی در روزهای ۱۲۰ تا ۱۳۰ یعنی در ماه خرداد اتفاق می‌افتد.
- در رودخانه گذارچای بیشترین دبی در روزهای ۴۹ تا ۵۵ یعنی در ماه اردیبهشت ثبت شده است.



- در رودخانه مهاباد بیشترین دبی در روزهای ۹۰ تا ۱۱۰ یعنی در ماه تیر ثبت شده است.
- در رودخانه سیمینه رود بیشترین دبی در روز ۱۷۰ یعنی در ماه مرداد ثبت شده است. این امر احتمالاً به علت آزادسازی آب سد می باشد.
- در رودخانه زرینه رود بیشترین دبی در روزهای ۱۰۰ تا ۱۲۰ یعنی در ماه تیر اتفاق می افتد.
- در رودخانه لیلان چای بیشترین دبی در روزهای ۷۵ تا ۸۰ یعنی در ماه خرداد اتفاق می افتد.
- در رودخانه جوان چای بیشترین دبی در روزهای ۴۹ تا ۵۵ یعنی در ماه خرداد اتفاق می افتد.
- در رودخانه قلعه چای بیشترین دبی در روزهای ۹۰ تا ۱۰۰ یعنی در ماه تیر اتفاق می افتد.

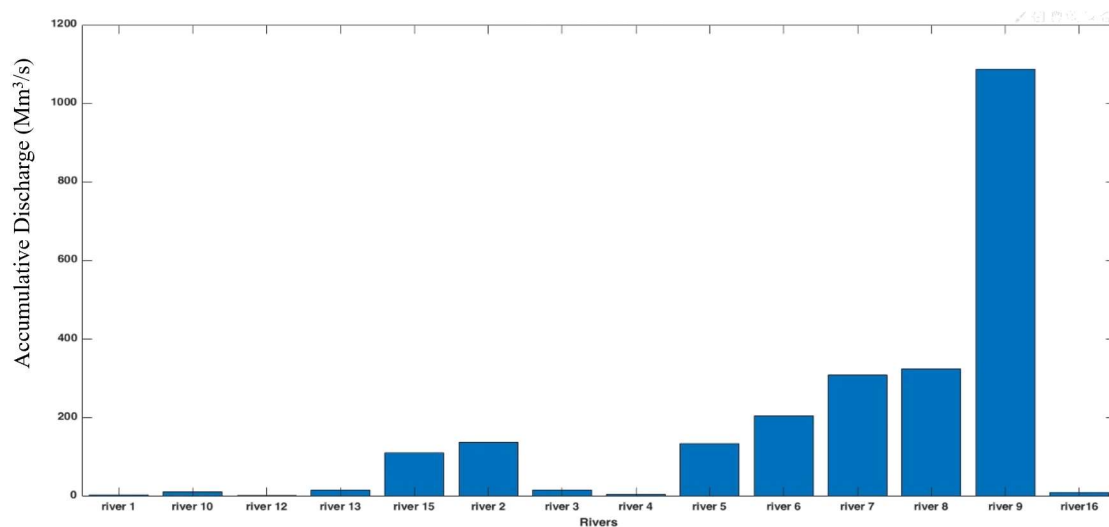


شکل ۱۱- سری زمانی دبی روزانه رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



شکل ۱۲- سری زمانی دبی روزانه رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

دبی تجمعی رودخانه ها در بازه زمانی مدل سازی در سال ۲۰۱۶ میلادی نیز برای مقایسه سهم هر یک از رودخانه های ورودی در بیلان آبی دریاچه در شکل زیر رسم شده اند.



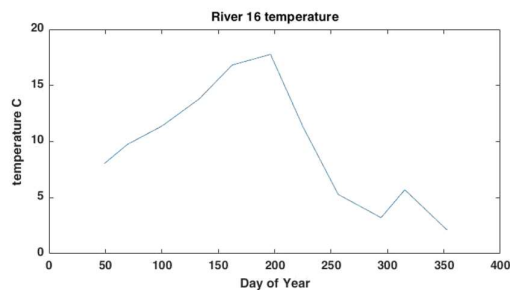
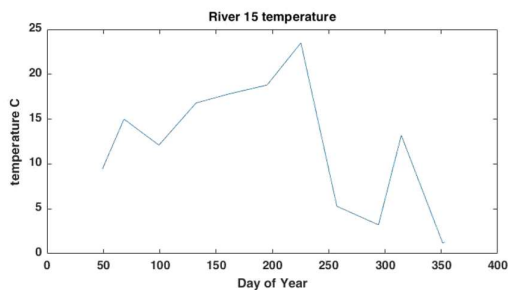
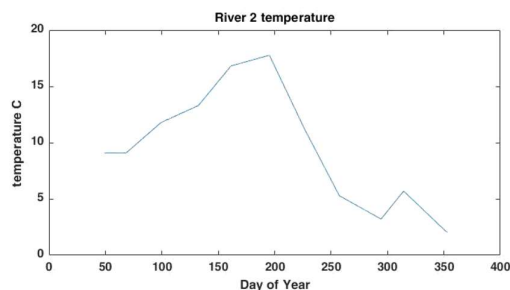
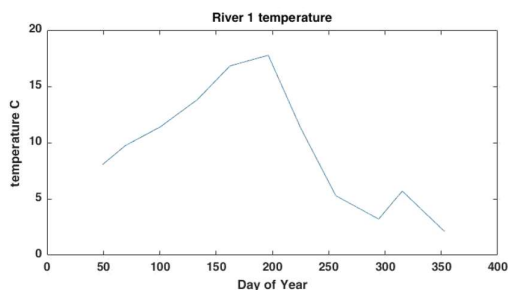
شکل ۱۳- مقایسه دبی تجمعی رودخانه های ورودی به دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



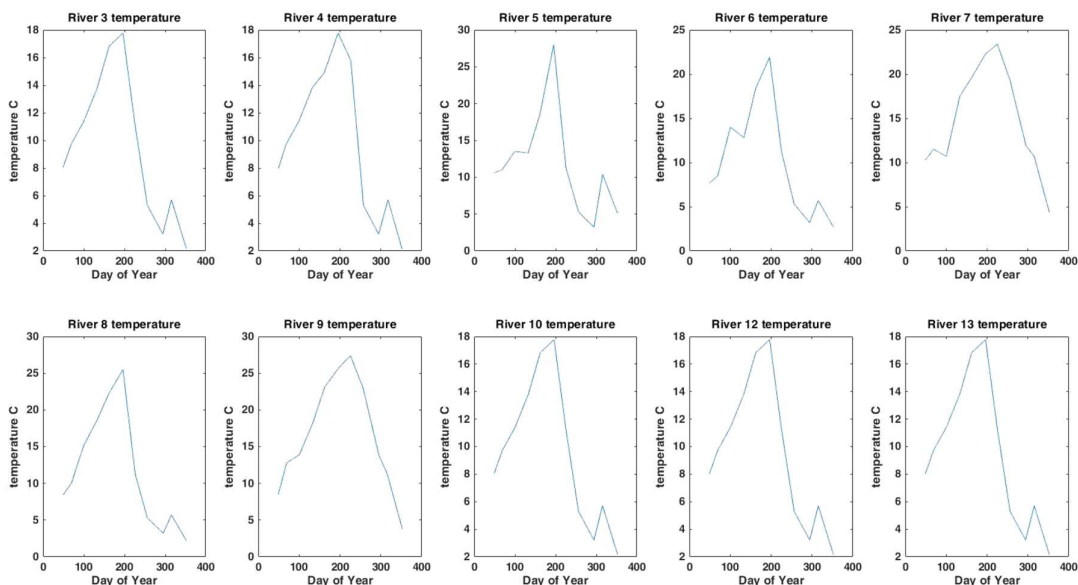
با توجه به شکل فوق رودخانه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود که در جنوب دریاچه قرار دارند بیشترین آورد دبی به دریاچه را دارند. همان‌طور که پیش از این هم بررسی شده بود بیشترین آورد رودخانه‌ها به‌ویژه رودخانه‌های جنوبی که دبی زیادی دارند مربوط به نیمه اول سال است که انتظار می‌رود در نیمه اول سال افزایش تراز رخ دهد و بعدازآن با یک کاهش همراه باشد.

۲-۲-۲-۲ دمای رودخانه‌های ورودی به دریاچه

دمای آب در رودخانه‌های فوق مطابق با نمودارهای ذیل در طول زمان تغییر می‌نمایند. این مقادیر به صورت ماهیانه همزمان با نمونه‌برداری پارامترهای کیفی رودخانه‌ها و دریاچه در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری شده‌اند. تغییرات دمای رودخانه‌ها به طور کلی شبیه روند تغییرات دمای هوا می‌باشد. در داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۱۶ کمترین دمای رودخانه‌ها نزدیک به صفر است. بیشترین دما در رودخانه‌ها ۲۸ درجه سانتی‌گراد بوده است که در ۲۳ تیرماه در رودخانه باراندوزچای به ثبت رسیده است. دمای متوسط اندازه‌گیری شده در سطح دریاچه نیز در این تاریخ در ایستگاه‌های مختلف حدود ۲۸ درجه است اما در قسمت شمال دریاچه (ایستگاه U1) به ۳۲/۵ درجه نیز می‌رسد. در ادامه تغییرات دمایی مربوط به رودخانه‌های شمالی و جنوبی به تفکیک نمایش داده می‌شوند.



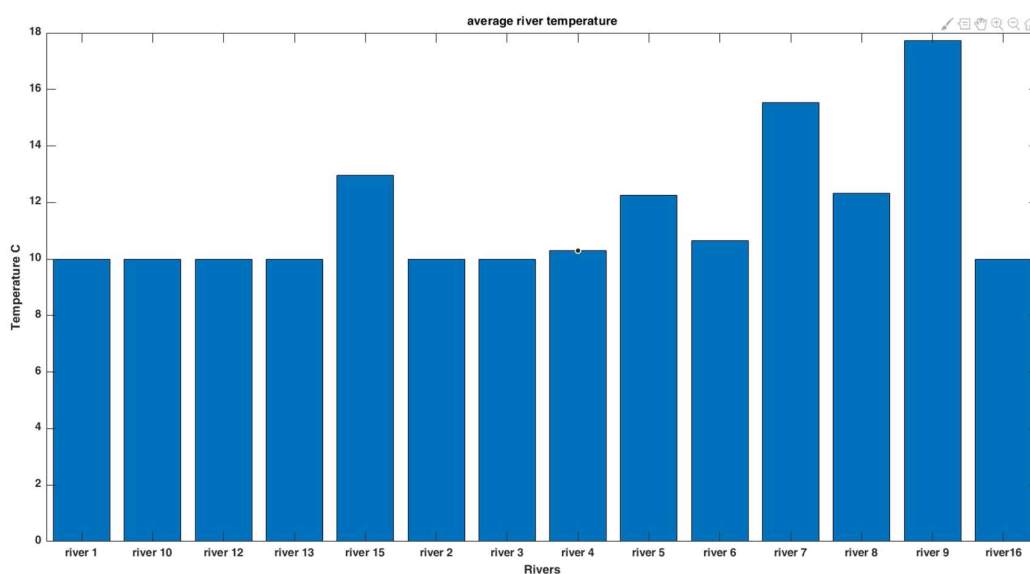
شکل ۱۴- سری زمانی تغییرات دمای آب در رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



شکل ۱۵- سری زمانی دمای آب رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



در شکل ذیل میانگین دمای سالانه این رودخانه باهم مقایسه شده است. در رودخانه‌هایی که داده دما اندازه‌گیری نشده‌اند از متوسط دمای آب اندازه‌گیری شده در سایر رودخانه‌ها برای بازسازی استفاده شده است.



شکل ۱۶- مقایسه متوسط دمای آب رودخانه‌های ورودی به مدل دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

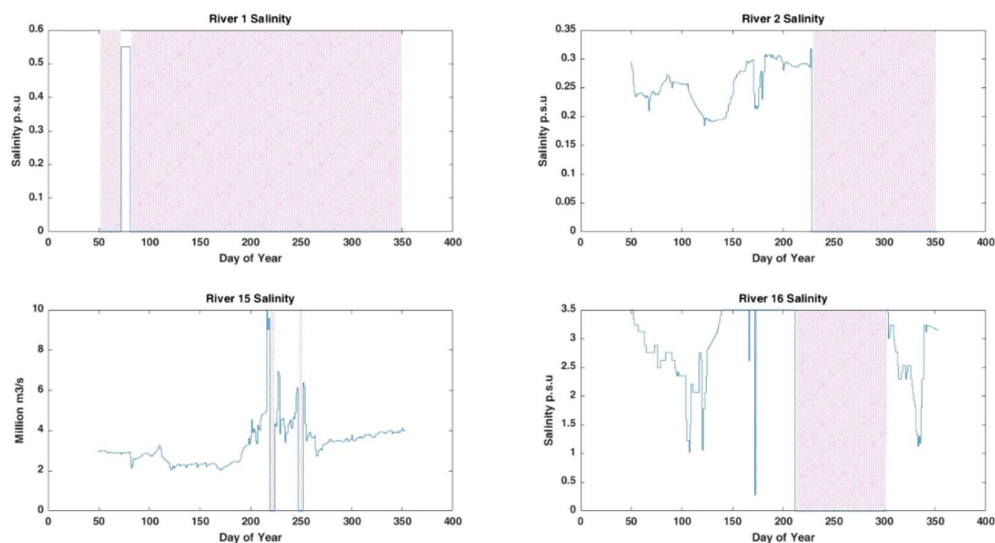
واضح است که رودخانه زرينه‌رود میانگین دمایی بالاتری دارد که با توجه به آورد بالای آن، انتظار می‌رود تأثیر زیادی در دمای جنوب دریاچه داشته باشد. در کل رودخانه‌های قسمت جنوبی دریاچه دمای میانگین بالاتری نسبت به رودخانه‌های شمالی دارند.

۳-۲-۲- شوری رودخانه‌های ورودی به دریاچه

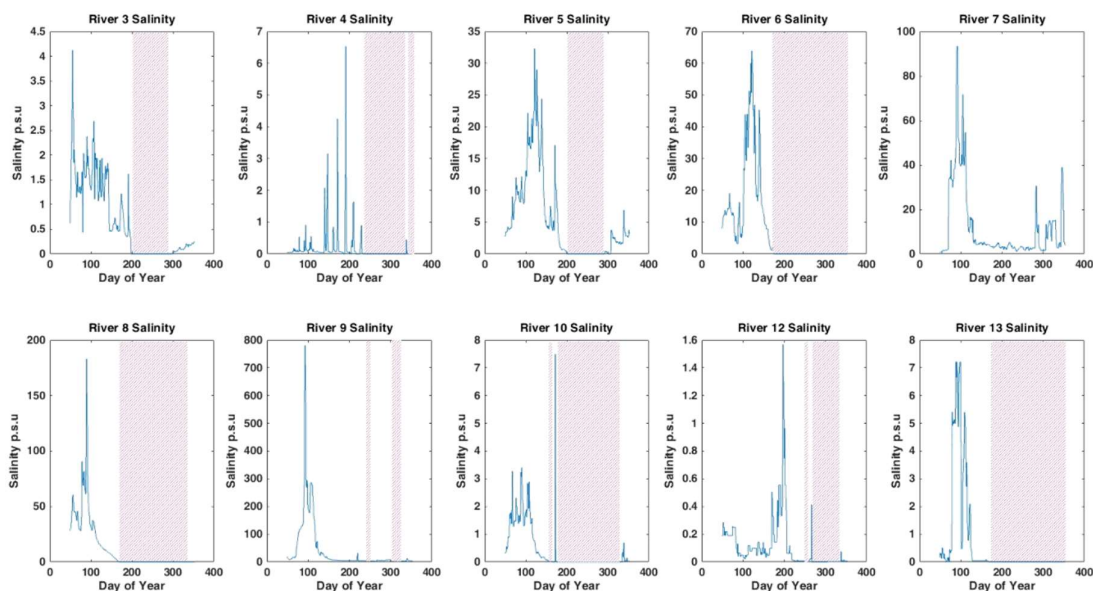
مقادیر شوری در رودخانه‌های شمالی و جنوبی دریاچه مطابق با شکل‌های ۱۷ و ۱۸ در طول زمان تغییر می‌نمایند. این مقادیر نیز به صورت ماهیانه همزمان با نمونه‌برداری پارامترهای کیفی رودخانه‌ها و دریاچه در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری شده‌اند. در این مطالعه برای تدقیق شوری رودخانه‌ها ابتدا رابطه بین دبی



و شوری مقادیر ماهانه بدست آمده، سپس با استفاده از داده های روزانه دبی مقادیر شوری به صورت روزانه تخمین زده شده اند. زمان خشک شدن رودخانه ها در نمودارها به صورت هاشور مشخص شده است.



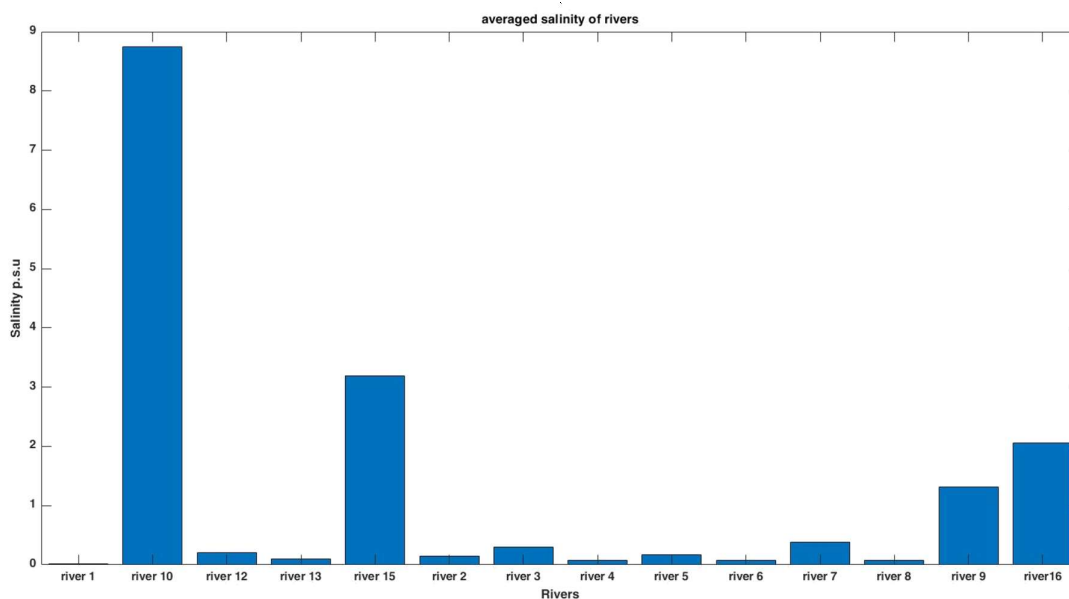
شکل ۱۷ - سری زمانی شوری رودخانه های منتهی به شمال دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



شکل ۱۸ - سری زمانی شوری رودخانه های منتهی به جنوب دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



در شکل ۱۹ میانگین شوری سالانه این رودخانه باهم مقایسه شده است. برای رودخانه‌های که شوری آب اندازه‌گیری نشده‌اند، مقادیر شوری از روی مقایسه شوری نزدیک ترین رودخانه و همچنین با توجه به میانگین شوری اندازه‌گیری شده در سالهای قبل تخمین زده شده است.

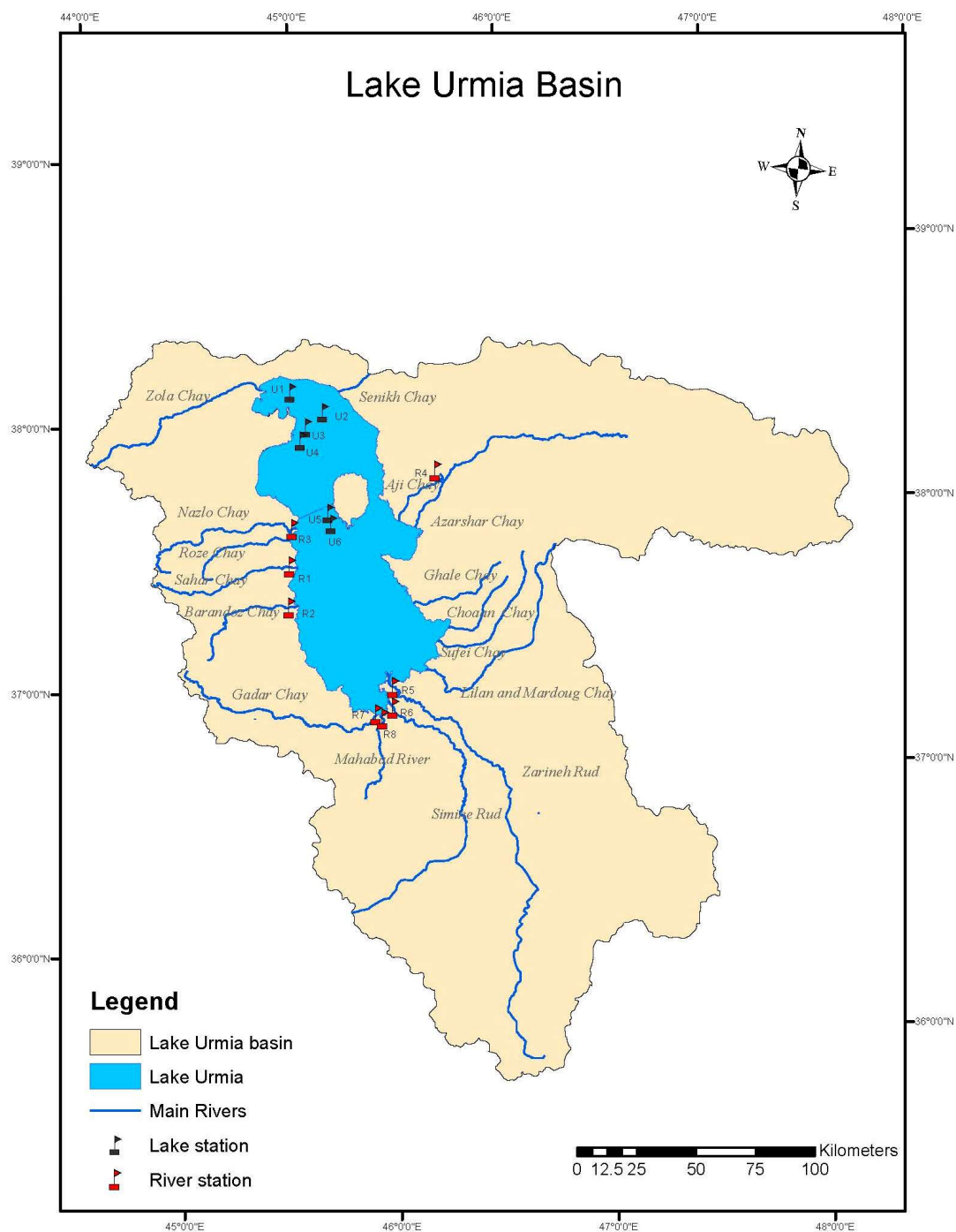


شکل ۱۹- مقایسه شوری متوسط رودخانه های ورودی به مدل دریاچه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

با توجه به شکل فوق بیشترین شوری مربوط به آجی چای در شمال دریاچه و بعداز آن بیشترین شوری در جنوب دریاچه مربوط به رودخانه زرینه‌رود است. که با توجه به دبی بالای زرینه‌رود، این رودخانه حجم شوری زیادی را به دریاچه منتقل می‌کند.

۲-۳ داده‌های میدانی

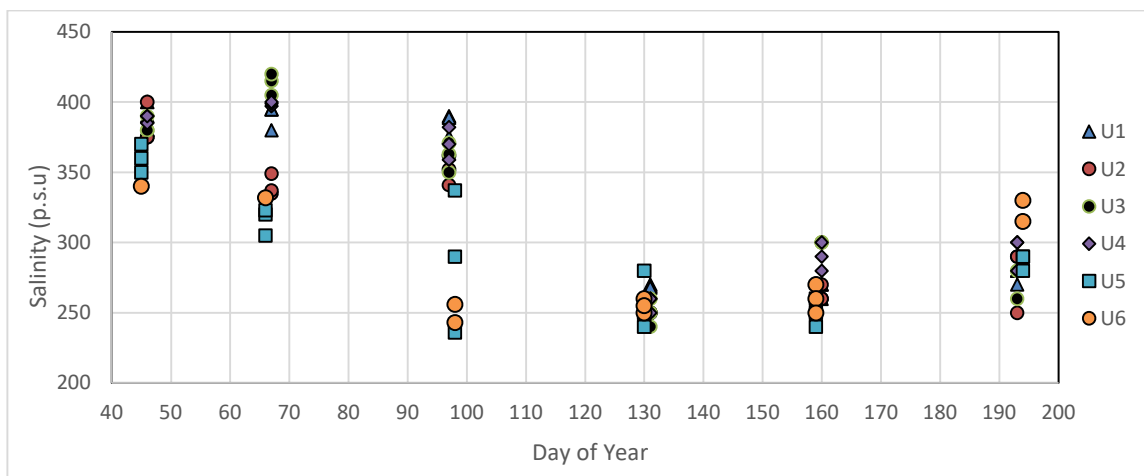
در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ توسط شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، از ۶ ایستگاه با نام‌های U1 تا U6 داده‌های شوری، دما و تراز سطح آب و پارامترهای کیفی برداشت شده‌اند. برداشت‌ها از بهمن‌ماه سال ۱۳۹۴ تا تیرماه سال ۱۳۹۵ به‌صورت ماهانه صورت گرفته است. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۲۰: نقشه موقعیت رودخانه‌های حوزه دریاچه ارومیه و جانمایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری

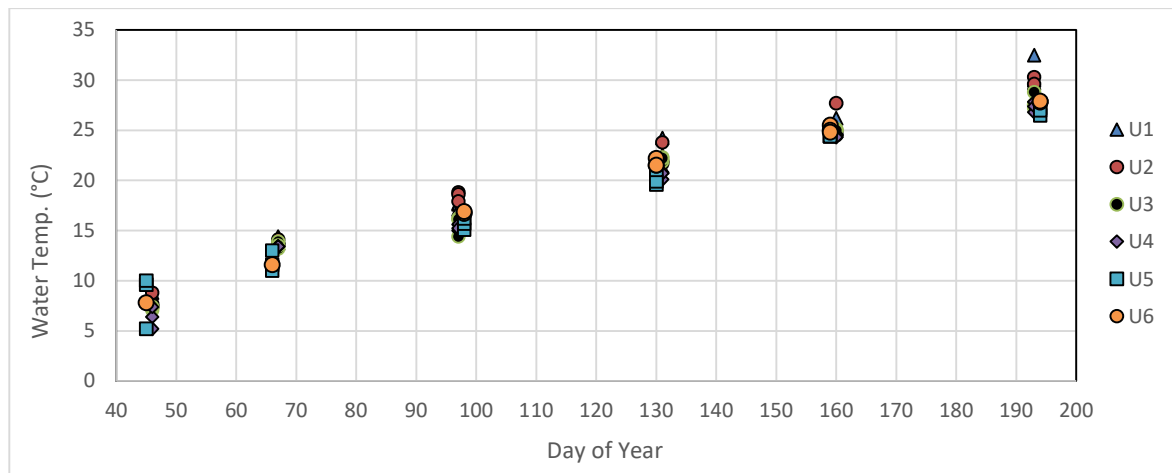


شوری برداشت شده در ایستگاه‌های مذکور در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در ابتدای دوره اندازه‌گیری شوری در ایستگاه‌های مختلف بین ۳۴۰ تا ۴۰۰ psu و به طور میانگین ۳۷۸ psu بوده است. با گذشت زمان و اضافه شدن ورودی رودخانه‌ها و افزایش تراز آب (شکل ۶۷) شوری نیز در دریاچه به حدود ۲۵۰ psu کاهش می‌یابد



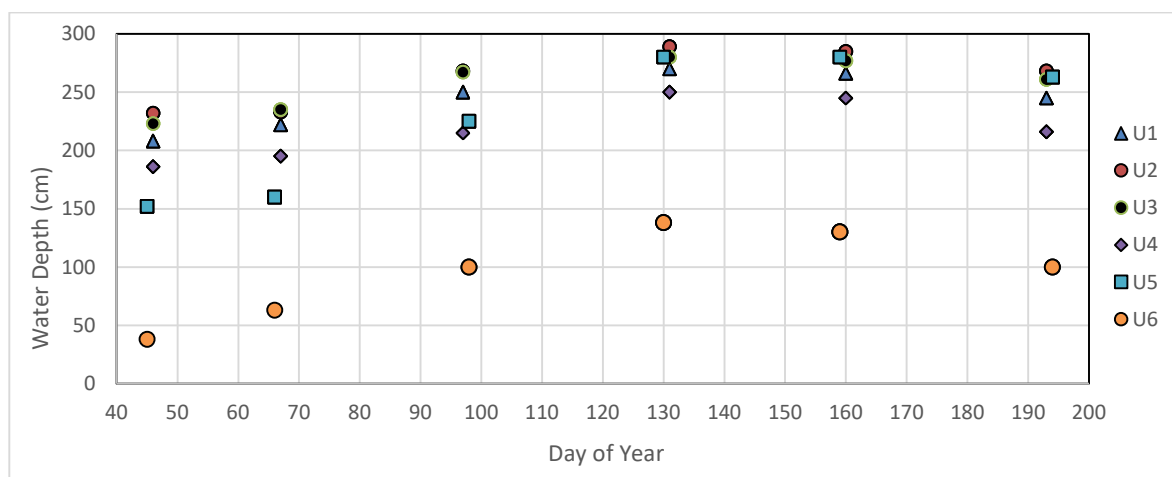
شکل ۲۱- شوری اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

روند تغییرات دما در ایستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری در شکل ۲۲ نشان داده شده‌اند. این روند نیز مشابه تغییرات دمای رودخانه‌های ورودی می‌باشد. البته در بعضی ایستگاه‌ها بخصوص ایستگاه‌های شمال دریاچه گاه دما تا ۴ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای روخانه‌ها و متوسط دمای دریاچه بوده است.



شکل ۲۲- دمای اندازه گیری شده در ایستگاه های اندازه گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

داده های عمق آب در ایستگاه های اندازه گیری نیز در شکل ۲۳ ارائه شده اند. همان طور که مشاهده می شود عمق آب در بین ایستگاه ها متفاوت بوده و در مقایسه پارامترهای کیفی و کمی ایستگاه ها می بایست این موضوع را مد نظر قرار داد.

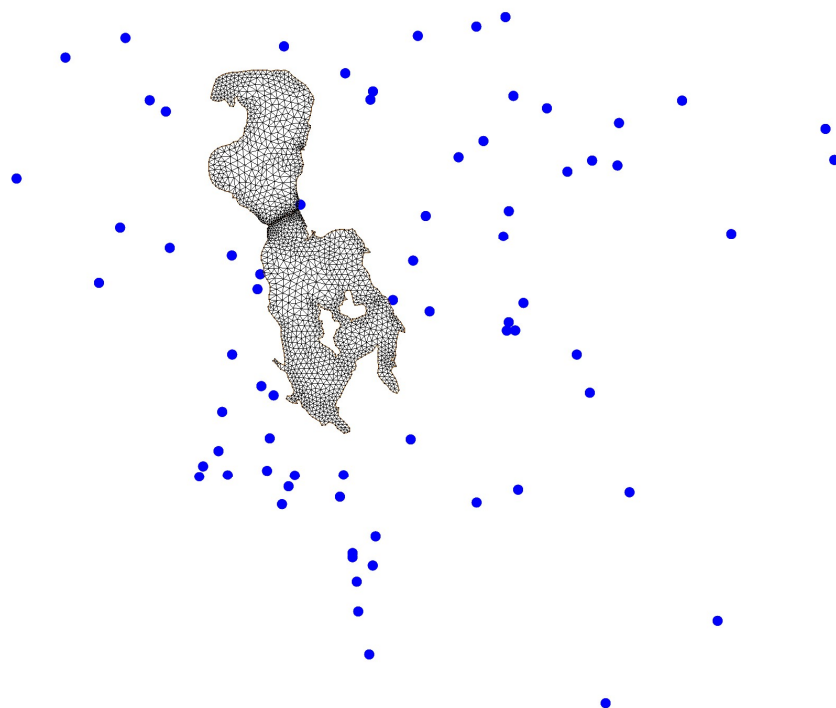


شکل ۲۳- عمق آب اندازه گیری شده در ایستگاه های اندازه گیری در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



۴-۲ بارش و تبخیر سطحی دریاچه ارومیه

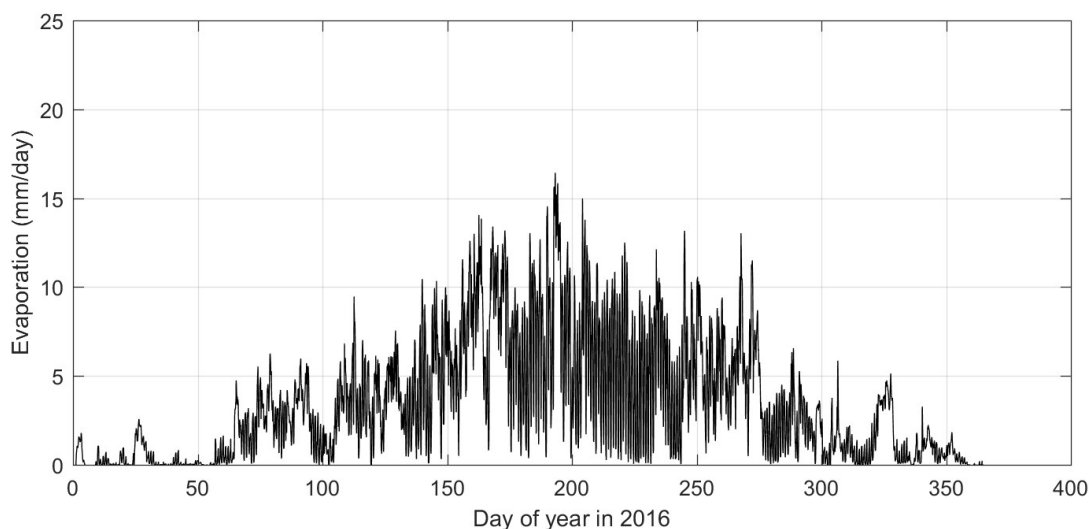
مقادیر بارش با استفاده از داده های ثبت شده در ۷۱ ایستگاه در اطراف دریاچه ارومیه به دست آمده (شکل ۲۴) و بر روی مش محاسباتی دریاچه با استفاده از روش Natural Neighbor درونیابی شده اند. مقادیر تبخیر نیز با استفاده از الگوریتم Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE) به دست آمده اند [۱۴-۱۶]. برای محاسبه سری زمانی تبخیر داده های ساعتی دمای هوا، دمای دریاچه، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش نور خورشید مورد استفاده قرار گرفتند. در نظر گرفتن پدیده بارش و تبخیر در مدل سازی صحیح نوسانات تراز آب و به تبع در محاسبه صحیح شوری و سایر پارامترهای کیفی بسیار تأثیرگذار می باشد. به خصوص با در نظر گرفتن اینکه تبخیر سطحی تنها مولفه خروجی در ییلان آب دریاچه ارومیه می باشد تخمین دقیق آن از اهمیت زیادی برخوردار است.



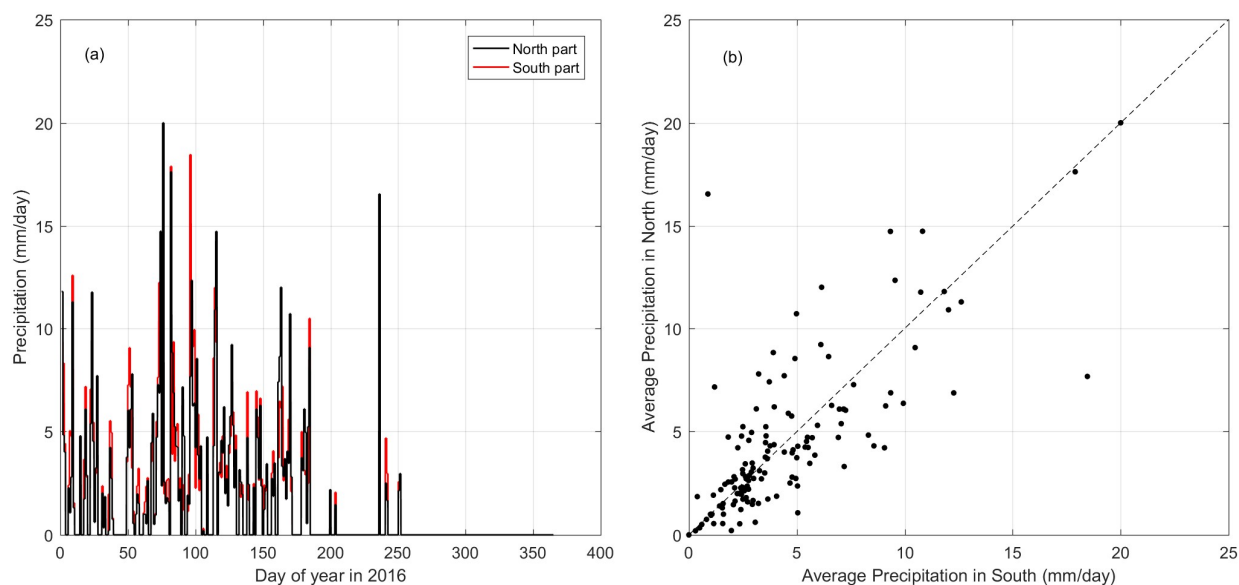
شکل ۲۴- جانمایی ایستگاه های اندازه گیری بارش در اطراف دریاچه ارومیه



نمودار سری زمانی تبخیر سطحی و بارش بر روی دریاچه ارومیه که به عنوان ورودی مدل در طول دوره مدلسازی استفاده می شود در شکل های ۲۵ و ۲۶ مشاهده می شود.



شکل ۲۵- سری زمانی ساعتی تبخیر سطحی در دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۵-۱۳۹۴)



شکل ۲۶- (a) سری زمانی متوسط بارش در شمال و جنوب دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۵-۱۳۹۴) و (b) مقایسه مقادیر بارش در شمال و جنوب دریاچه



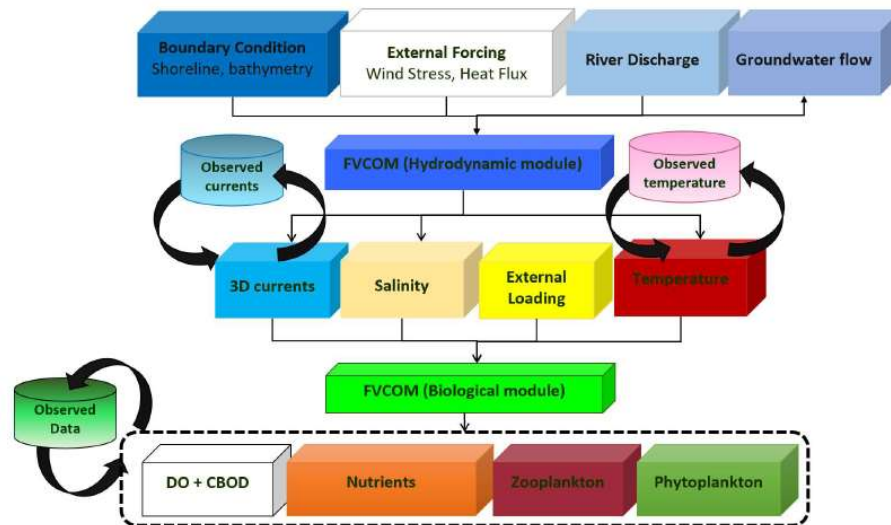
در طول دوره مدل سازی متوسط تبخیر سطحی دریاچه ارومیه ۱۲۳۸ میلی متر در سال و متوسط بارش نیز حدود ۵۸۱ میلی متر برآورد شده است. بنابراین تبخیر خالص کل دریاچه (تفاضل تبخیر و بارش متوسط) در طول مدل سازی حدود ۶۵۷ میلی متر بوده است. لازم به ذکر است در نقشه راه طرح ملی نجات دریاچه ارومیه برای سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ مقدار تبخیر خالص برای دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن مساحتی معادل ۲۰۵۷ کیلومتر مربع، ۱۳۴۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است که این مقدار معادل ۶۵۳ میلی متر می باشد.

۵-۲ مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

در این پروژه مدل سه بعدی هیدرودینامیکی-شیمیایی-کیفی دریاچه ارومیه توسعه داده شد. بدین منظور مدل انتخابی می بایست قابلیت شبیه سازی پدیده های موجود در دریاچه ارومیه را داشته باشد. در این پروژه از مدل سه بعدی Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) با مش نامنظم استفاده شده است [۱۷و ۱۸]. این مدل در محیط های آبی مختلفی نظیر رودخانه، دریاچه، تالاب، دریا و اقیانوس در سراسر دنیا با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹-۲۴]. این مدل به صورت منبع باز بوده و با توجه به مطالعه موردی و در صورت نیاز می توان کد آن را بهبود بخشید. مش بندی این مدل به صورت شبکه نامنظم مثلثی بوده که می تواند ویژگی های پیچیده سواحل را با دقت بیشتری نسبت به شبکه های منظم مدل سازی کند. در این مدل معادلات ناویر-استوکس، پیوستگی، دما و شوری به صورت هم زمان در هر گره از شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن خشک شدگ/ترشدگی حل خواهد. صفائی و همکاران [۱۴] در مطالعات خود با توسعه مدل FVCOM نشان داد نتایج این مدل در پیش بینی گردش آب، ساختار دما و شوری آب قابل اعتماد بوده و قادر خواهد بود با محاسبه تبخیر و در نظر گرفتن سایر ترم های بیلان آبی دریاچه از جمله آب زیرزمینی نوسانات ساعتی تراز سطح آب دریاچه را با دقت بسیار خوبی پیش بینی نماید.



به منظور مدل سازی شرایط اعمالی بر روی دریاچه عواملی مانند میدان باد، شار حرارتی، بارش، تبخیر و رودخانه های ورودی باید در نظر گرفته شوند. برای آماده سازی مدل هیدرودینامیکی داده های هواشناسی مانند سرعت و جهت باد، دمای هوا، میزان پوشش ابر، نقطه شبنم، رطوبت نسبی، تابش موج کوتاه و موج بلند خورشید مطابق با آنچه در بخش ۲ توضیح داده شده بازیابی شدند. این داده های هواشناسی به منظور محاسبه تنش باد و شار حرارتی بر روی شبکه محاسباتی در هر گام زمانی در مدلسازی استفاده خواهند شد. از دیگر ورودی های مورد نیاز برای مدل سازی دریاچه ارومیه، دبی، دما و شوری رودخانه های ورودی و همچنین میزان بارش و رواناب ورودی به دریاچه می باشد که توضیحات مربوطه در بخش های قبل ارائه شد. خروجی های مدل با توجه به نیاز و سؤالات مورد مطالعه سرعت جریان در سه بعد، امواج سطحی، دما و فشار آب، شوری، چگالی آب، هدایت الکتریکی، میزان تبخیر سطحی و نوسانات سطح آب می باشد. نتایج مدل با مقایسه با داده های میدانی صحت سنجی خواهند شد. فلوچارت ساختار مدل در شکل زیر ارائه شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است با کوپل کردن مدل هیدرودینامیکی و مدل کیفی می توان رفتار کیفی را نیز شبیه سازی کرد.



شکل ۲۷-فلوچارت ساختار مدل

معادلات حاکم بر مدل هیدرودینامیکی دریاچه معادلات ناویر - استوکس (معادلات مومنوم به همراه

معادله پیوستگی) و معادلات انتقال حرارت و شوری می باشند [۱۸]:

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

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (K_m \frac{\partial w}{\partial z}) + F_w \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (2-5)$$



$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (2-6)$$

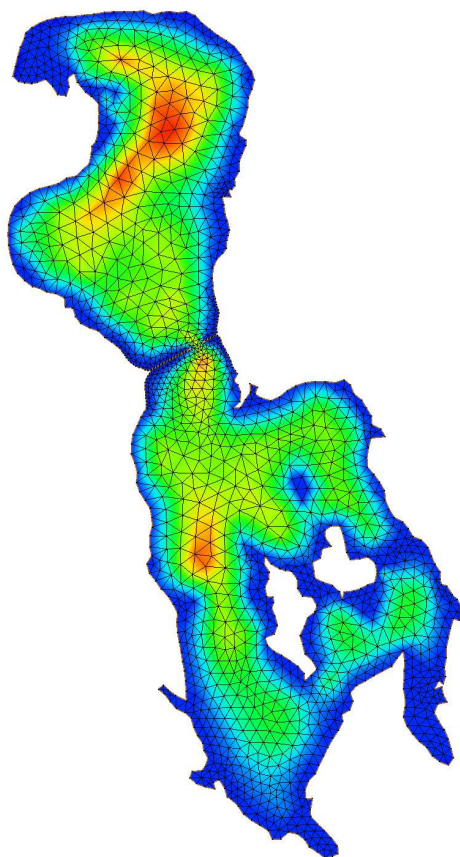
$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (2-7)$$

در این مدل چگالی تابعی از دما و شوری در نظر گرفته شده است. u ، v و w به ترتیب سرعت در جهت های x ، y و z می باشند. T دما و S شوری می باشند. K_m ضریب ویسکوزیته eddy در راستای عمودی، K_h ضریب پخش حرارت eddy در راستای عمودی و F_u ، F_v ، F_θ و F_s به ترتیب روابط مربوط به پخش افقی مومنتوم، حرارت و شوری هستند.

در مش محاسباتی طراحی شده تعداد ۱۷۰۹ گره محاسباتی و ۲۹۵۱ المان برای مدل سازی دریاچه در نظر گرفته شده است (شکل ۲۸). برای دقت بیشتر، کمترین مقدار طول اضلاع المان های مش در محدوده پل میان گذر حدود ۳۰۰ متر و حداکثر آن در وسط دریاچه حدود ۳ کیلومتر می باشد. نمای کلی مش بندی به همراه نقشه بسیمتری دریاچه مطابق شکل ۲۸ می باشد. بسیمتری دریاچه نیز با استفاده از آخرین داده برداری جامع صورت گرفته قبل از سال ۱۳۹۴ یعنی در سال ۱۳۹۲ بدست آمده است. برای تعیین مقدار عمق دریاچه در هر گره از درون یابی به روش Natural Neighbor استفاده شده است و به عنوان شرایط مرزی در مدل استفاده شده است.



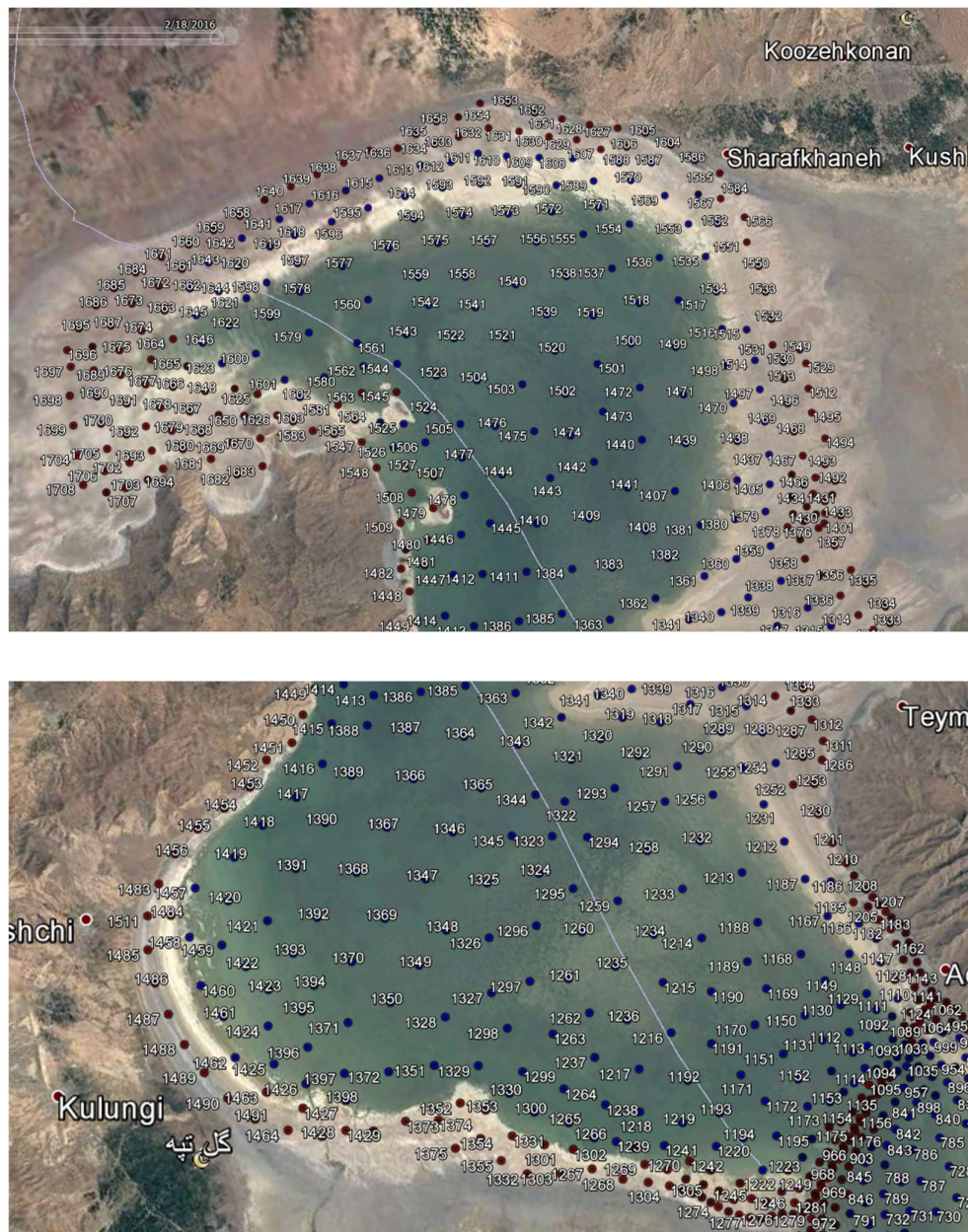
Bathymetry (m)
2.16
1.62
1.08
0.54
0.0



شکل ۲۸- مش بندی دریاچه به همراه نقشه بسیمتری

با توجه به عکس‌های ماهواره‌ای و با تطبیق آن با مش دریاچه، المانهایی که در زمان اولیه مدلسازی آب در آنها بوده است به صورت سلول‌های تر^۳ به عنوان شرایط اولیه مدل تعریف شده اند. سلولهای خشک و تر در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه در شرایط اولیه مدلسازی در شکل ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده‌اند.

³ wet



شکل ۲۹- سلول های خشک و تر در قسمت شمالی دریاچه ارومیه در شرایط اولیه مدل سازی



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه



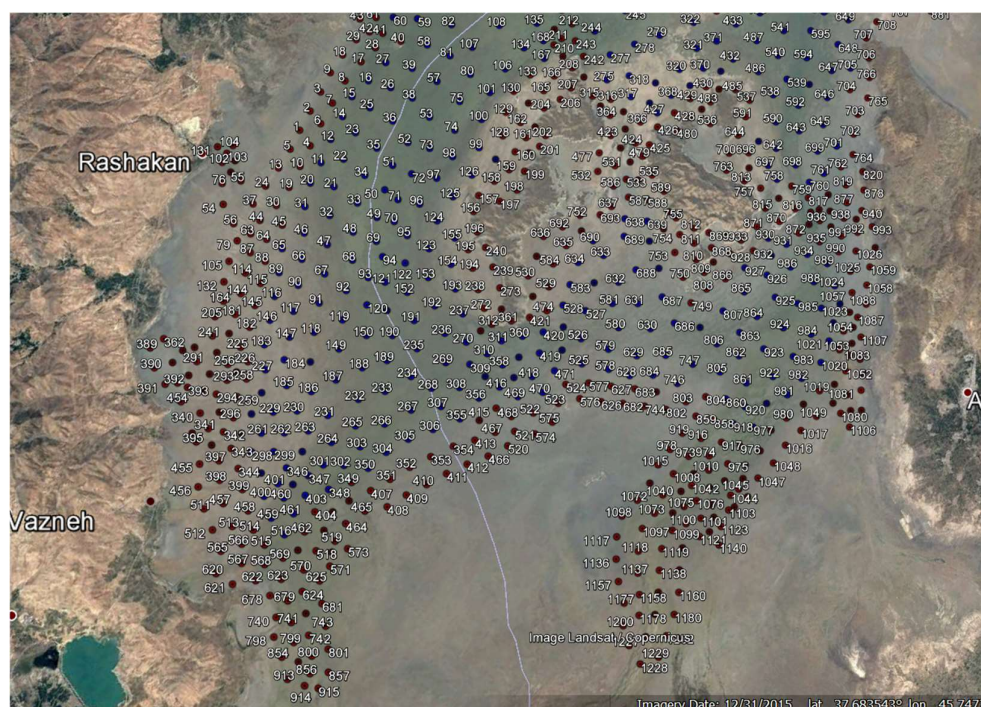
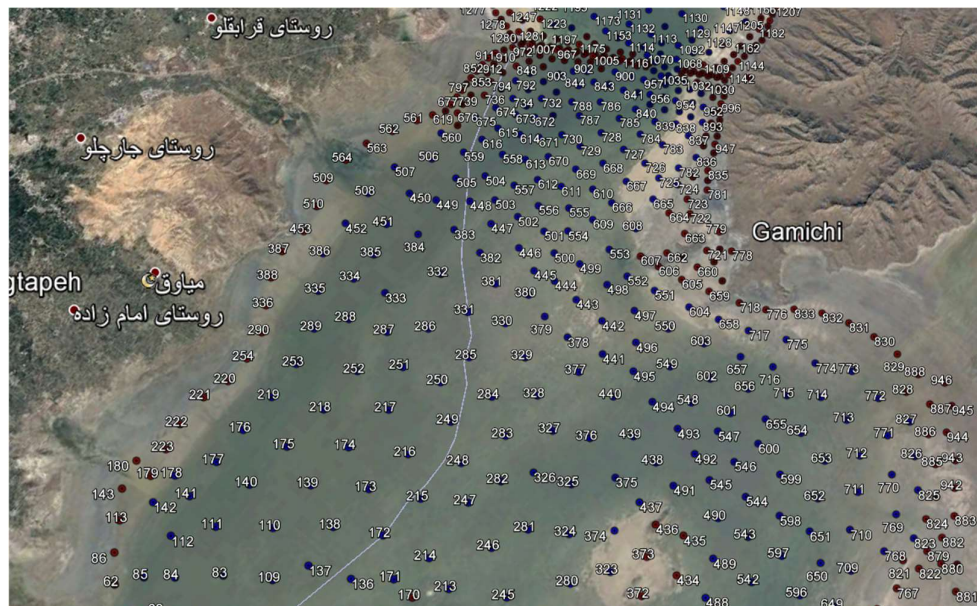
ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف

صفحه ۴۱ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲



شکل ۳۰- سلول های خشک و تر در قسمت جنوبی دریاچه ارومیه در شرایط اولیه مدل سازی



با توجه به عکس ها سلول های قرمز به عنوان سلول های خشک و سلول های آبی به عنوان تر در نظر گرفته شده اند. شرایط اولیه توزیع دما و شوری در عمق به صورت همگن^۴ در نظر گرفته می شود، با توجه به داده های اندازه گیری شده شوری و دما، مقادیر اولیه در مدل به ترتیب برابر با 420 p.s.u و 8 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده اند. سرعت های اولیه در دریاچه برای تمام گره های محاسباتی صفر در نظر گرفته می شوند. ترسیب و انحلال به منظور مدلسازی دقیق تر شوری به صورت توزیع گسترده در شرایط مرزی بستر دریاچه در نظر گرفته شده و بر اساس استدلال بخش های گذشته در مورد بازه زمانی مطالعاتی، مدل سازی از تاریخ $2016/02/18$ الی $2016/12/16$ انجام شده است. گام زمانی این مدل سازی 1 ثانیه است و خروجی ها هر یک ساعت چاپ می شوند.

۳- نتایج مدل سازی هیدرودینامیکی

مدلسازی هیدرودینامیکی در سامانه پردازش سریع دانشگاه صنعتی شریف^۵ با استفاده از 20 تا 80 هسته به صورت موازی صورت گرفت. به طور تقریبی برای پردازش مدل دریاچه ارومیه و گرفتن نتایج در دوره مدلسازی سه روز زمان لازم است. در نمودارهای ذیل مشاهده می گردد که دمای متوسط آب در ابتدای مدلسازی 5 درجه سانتیگراد بوده و در تابستان به حدود حداکثر 34 درجه سانتیگراد می رسد.

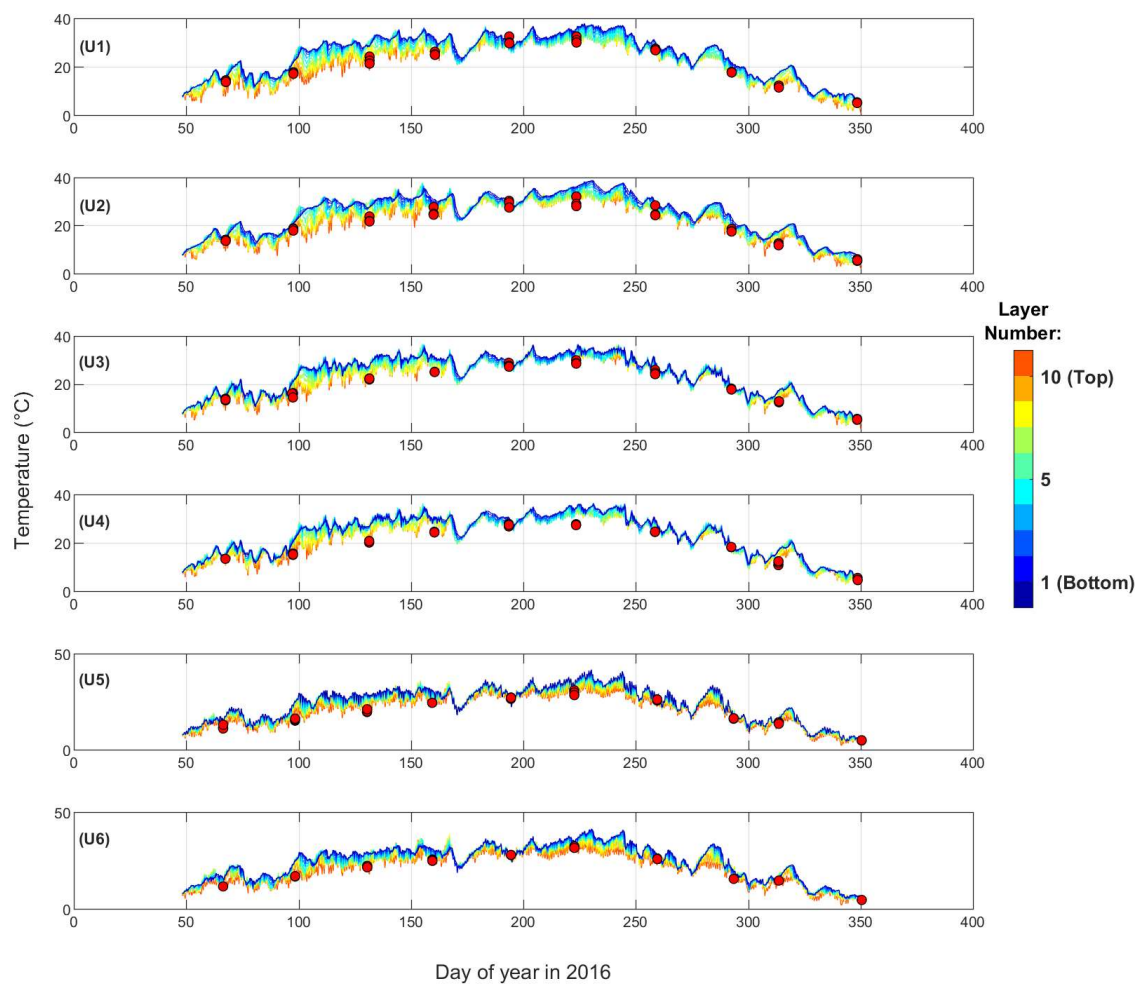
به منظور صحت سنجی عملکرد مدل در پیش بینی ساختار دما، نتایج مدلسازی با مقادیر دمای اندازه گیری شده در ایستگاه های $u1$ تا $u6$ مقایسه شده است. در شکل زیر سری زمانی دمای آب با مقادیر میدانی (دایره های قرمز رنگ) مقایسه شده است. در این شکل ها دما در لایه های مختلف آب (10 لایه) با یک طیف رنگی نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با در نظر گرفتن تغییرات دمای آب در ستون آب

⁴ Homogen

⁵ Sharif High Performance Computing Center



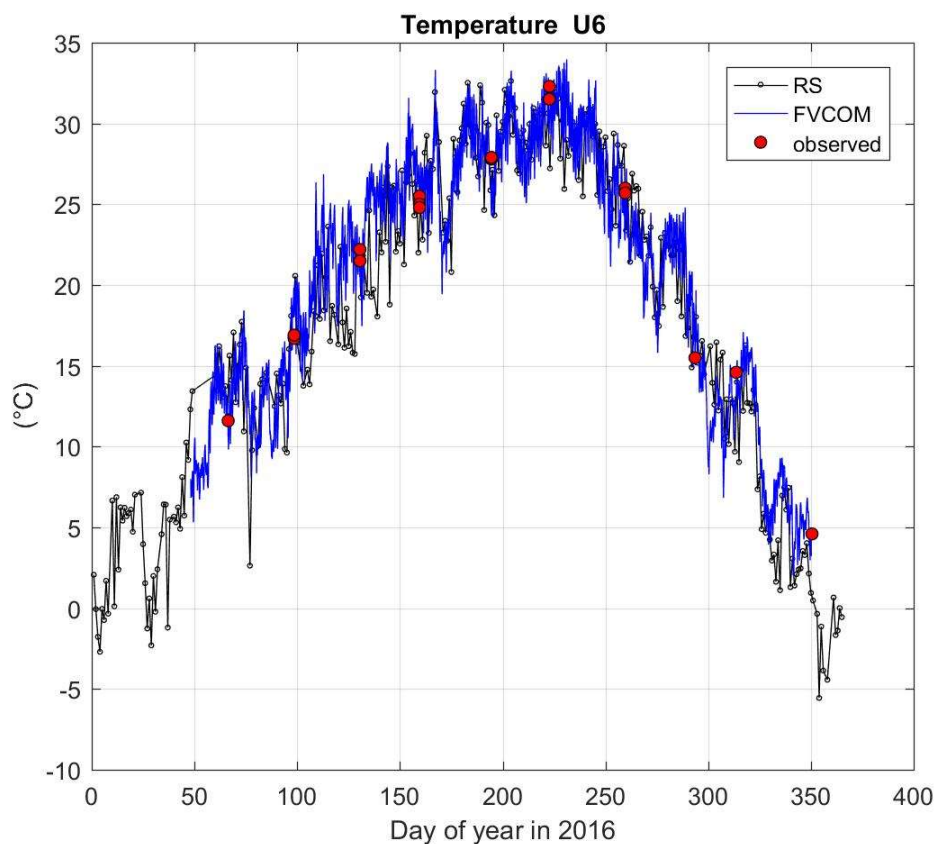
مدل هیدرودینامیکی عملکرد خوبی در پیش بینی نتایج اندازه گیری شده دارد. نتایج نشان می دهد از روز ۹۵ تا روز ۱۶۵ از سال ۲۰۱۶ لایه بندی حرارتی در دریاچه ارومیه بخصوص نزدیک میانگذر (ایستگاه u5 و u6) شدت گرفته و بعد از آن در حدود روز ۱۶۷ تا روز ۲۰۰ دمای لایه های مختلف به اختلاط کامل می رسد. هر چند در روزهایی مثل روز ۲۳۵ نیز مجدد لایه بندی حرارتی در دریاچه بوجود می آید ولی شدت آن کمتر از لایه بندی بوجود آمده در روزهای ۹۵ تا ۱۳۵ است.



شکل ۳۱- مقایسه نتایج دمای مدل سازی در ۶ ایستگاه اندازه گیری با مقادیر اندازه گیری شده



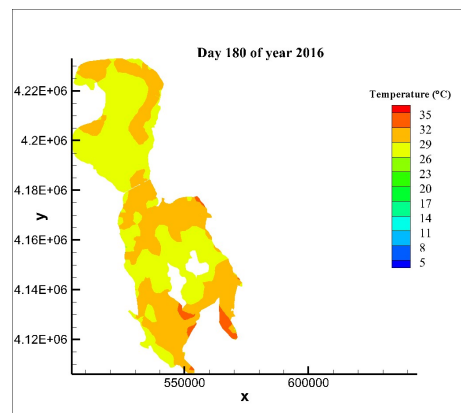
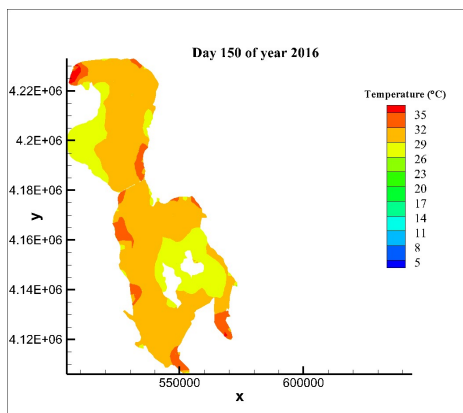
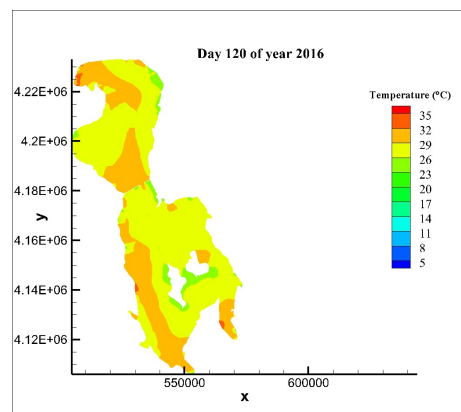
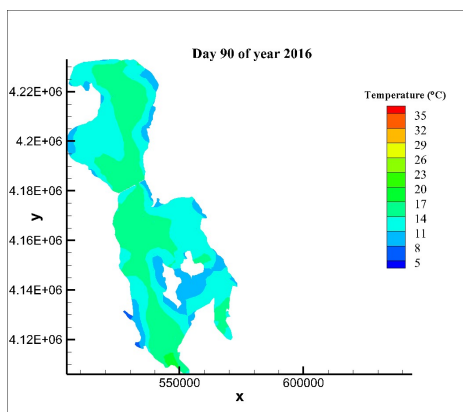
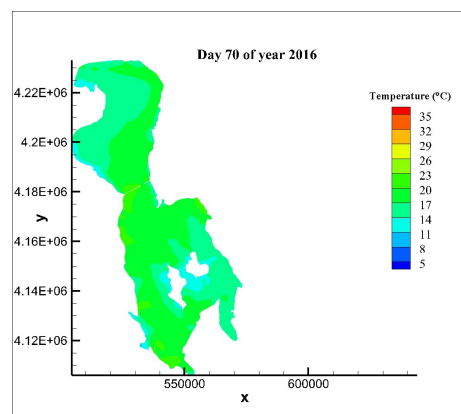
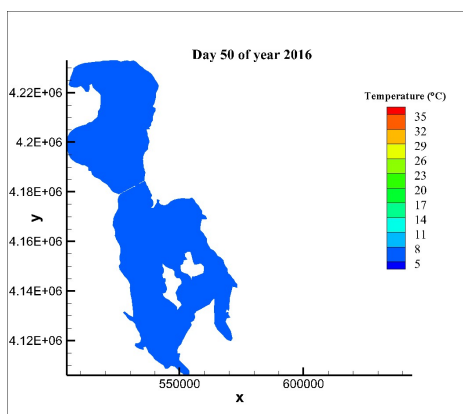
برای اطمینان بیشتر از توانایی مدل در شبیه سازی دما با استفاده از سنجش از دور، دمای پهنه آبی دریاچه ارومیه در طول مدلسازی محاسبه شده است. بدین منظور با استفاده از سنجنده ای با سنسور حرارتی و صحت سنجی الگوریتم با استفاده از داده های میدانی دمای سطح آب دریاچه ارومیه به دست آورده شد. در شکل زیر سری زمانی دمای شبیه سازی شده با مدل FVCOM با نتایج سنجش از دور و اندازه گیری های میدانی مقایسه شده است.



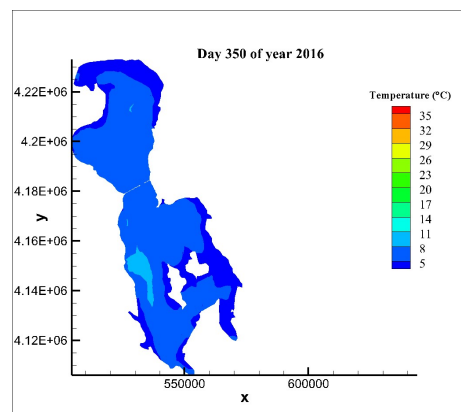
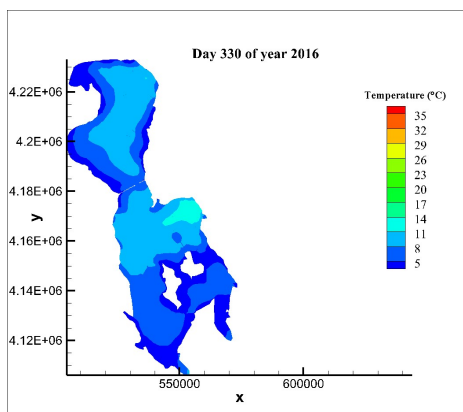
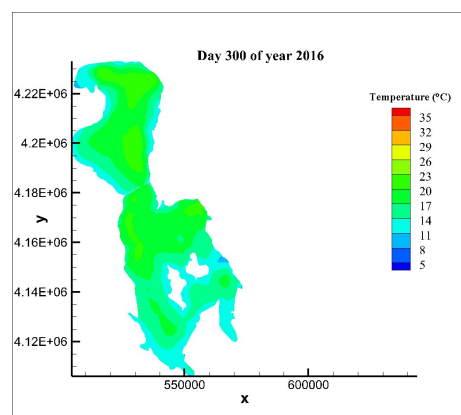
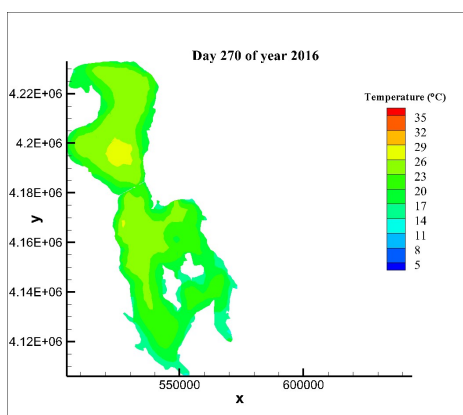
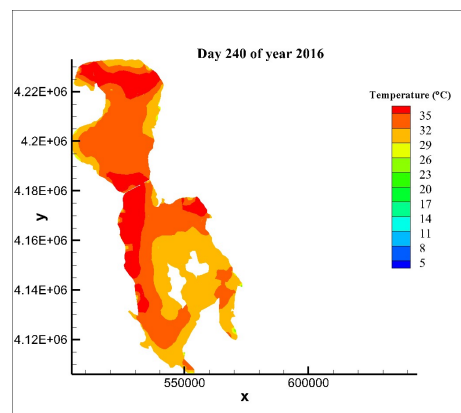
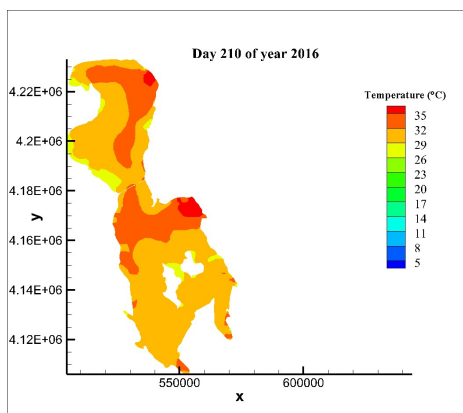
شکل ۳۲- مقایسه سری زمانی دمای شبیه سازی شده با مدل FVCOM با نتایج سنجش از دور و اندازه گیری های میدانی در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



کانتور تغییرات دمایی دریاچه در اشکال زیر مشاهده می شود.



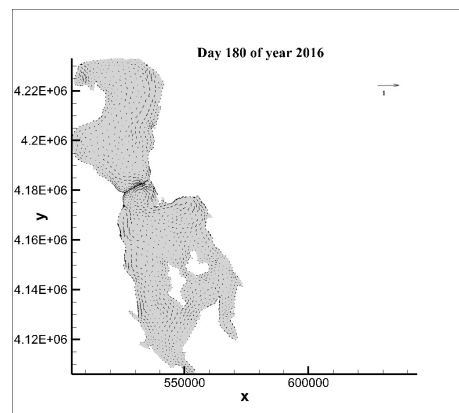
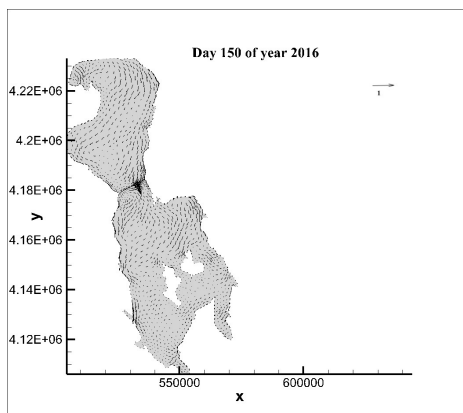
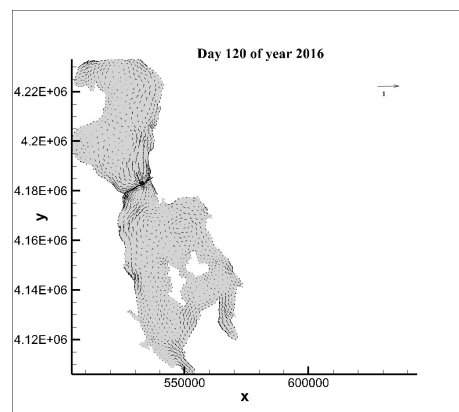
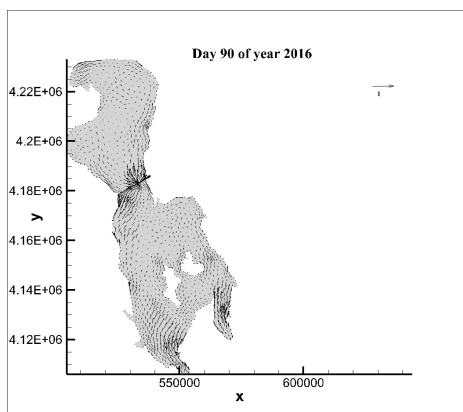
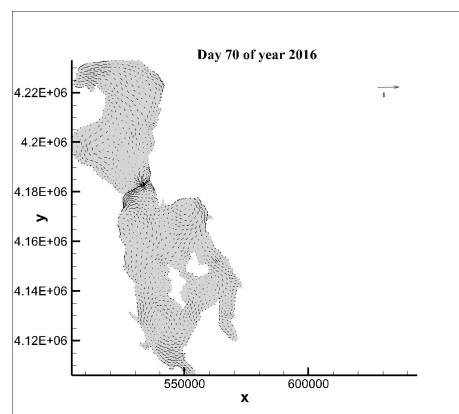
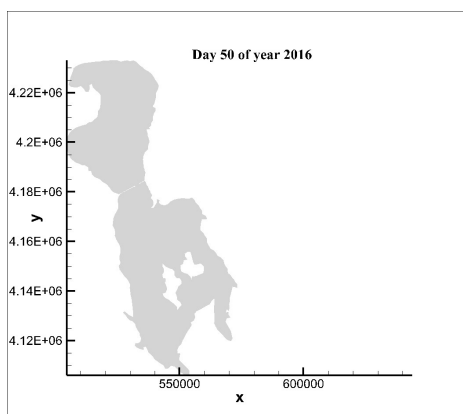
شکل ۳۳ - الگوی توزیع دما در دریاچه ارومیه در روزهای مختلف در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



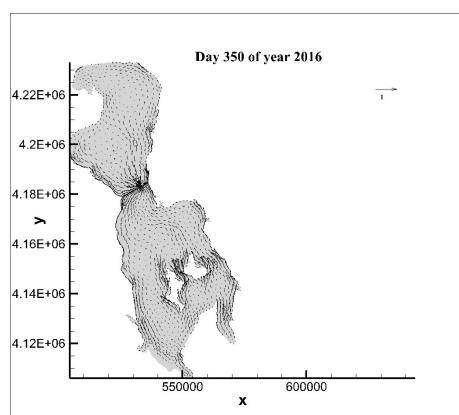
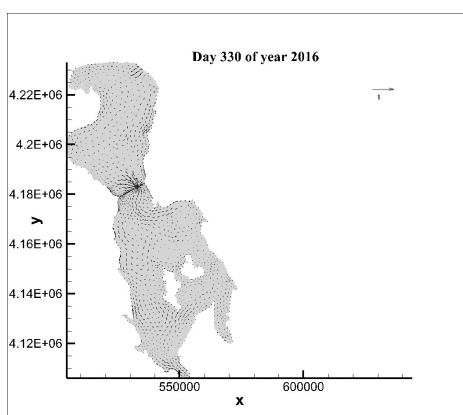
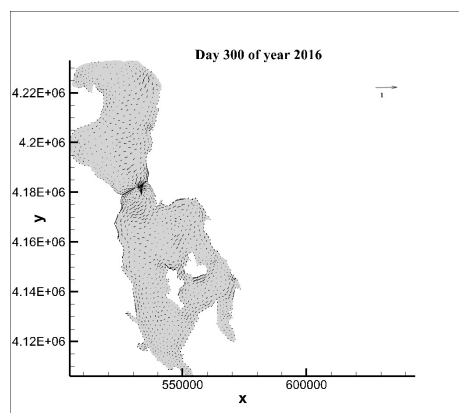
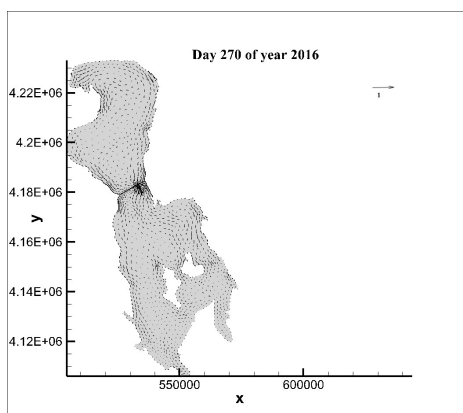
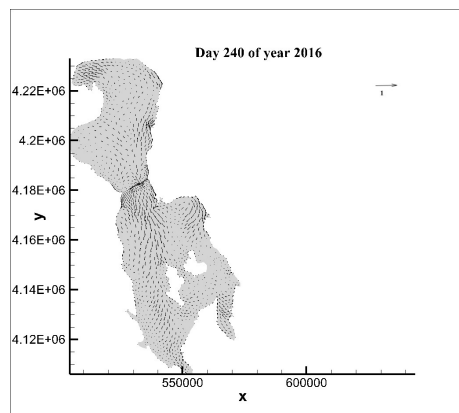
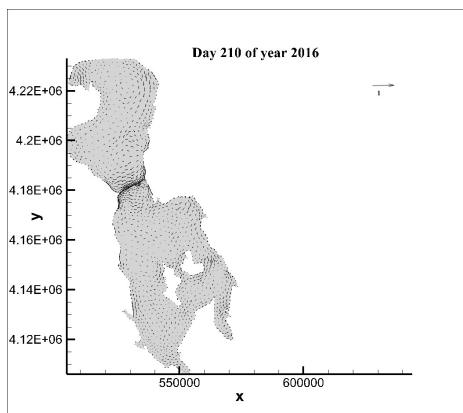
شکل ۳۲ (ادامه...) - کانتور دمای دریاچه در روزهای مختلف در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)



بردارهای سرعت جریان آب در دریاچه در عمق میانگین گیری شده و در تصاویر زیر نشان داده شده است.



شکل ۳۴- بردارهای سرعت جریان در روزهای مختلف در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۴-۱۳۹۵)

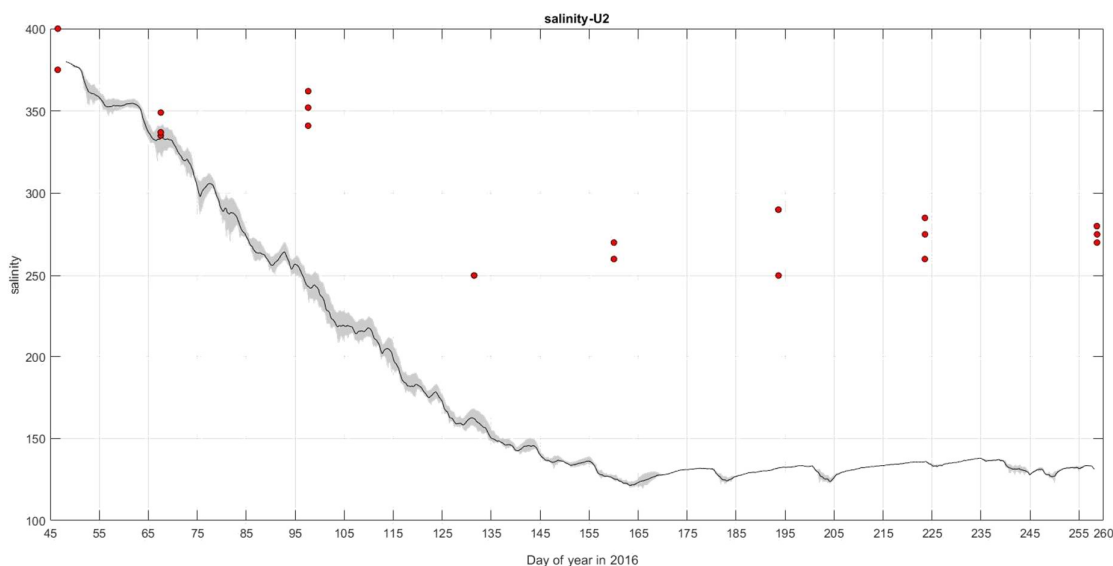


شکل ۳۴ (ادامه...) بردارهای سرعت در روزهای مختلف سال ۲۰۱۶

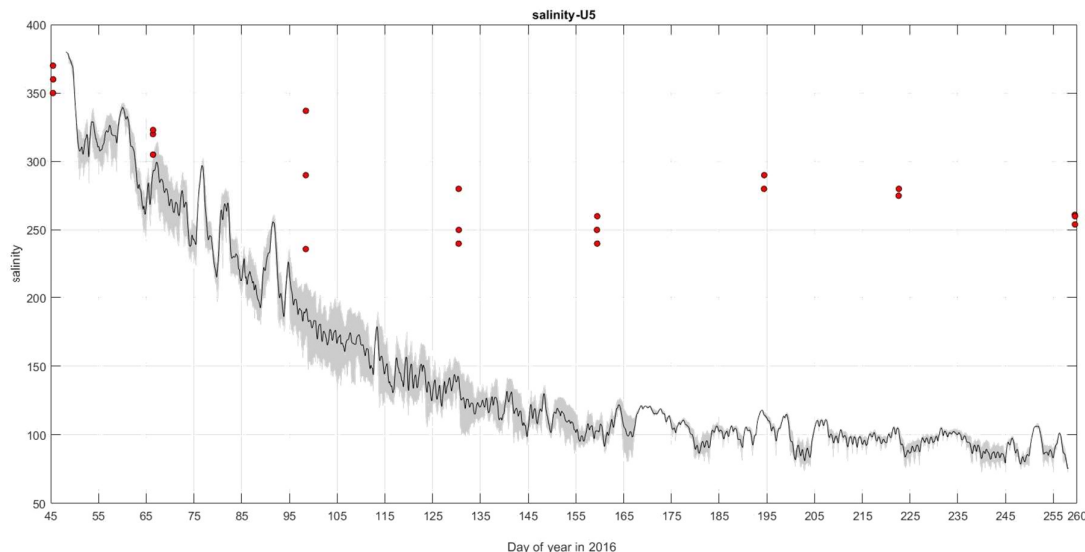


همانطور که در الگوی شبیه سازی شده دما و میدانهای بردارهای سرعت مشاهده می شود تبادل جریان در محل بازشدگی میانگذر کمک می کند آب قسمت جنوبی دریاچه با قسمت شمالی آن به صورت محدودی تبادل جریان و تبادل حرارتی داشته باشد. نتایج مدلسازی نشان می دهد در روزهای مختلف سال هم جریان از سمت شمال به جنوب وجود دارد و هم از سمت جنوب به شمال. البته لازم به ذکر است برای صحت سنجی نتایج سرعت نیاز به مقایسه آن با نتایج میدانی می باشد که متأسفانه در این مطالعه هیچ داده سرعتی در طول دوره مدلسازی در دسترس نبود.

در ادامه نتایج شوری با در نظر گرفتن آورد رودخانه ها و بدون در نظر گرفتن فرایند ترسیب و انحلال در دو ایستگاه u2 تا u5 به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل های ۳۵ و ۳۶). در این شکل ها مقادیر میدانی با دایره های قرمز رنگ، دمای شبیه سازی شده در لایه های مختلف آب (۱۰ لایه) به رنگ خاکستری و متوسط دمای آب شبیه سازی شده نیز در عمق نیز به رنگ مشکی نمایش داده شده است.



شکل ۳۵: مقایسه شوری مدل با ایستگاه u2 در سال ۲۰۱۶ بدون در نظر گرفتن فرایند ترسیب و انحلال



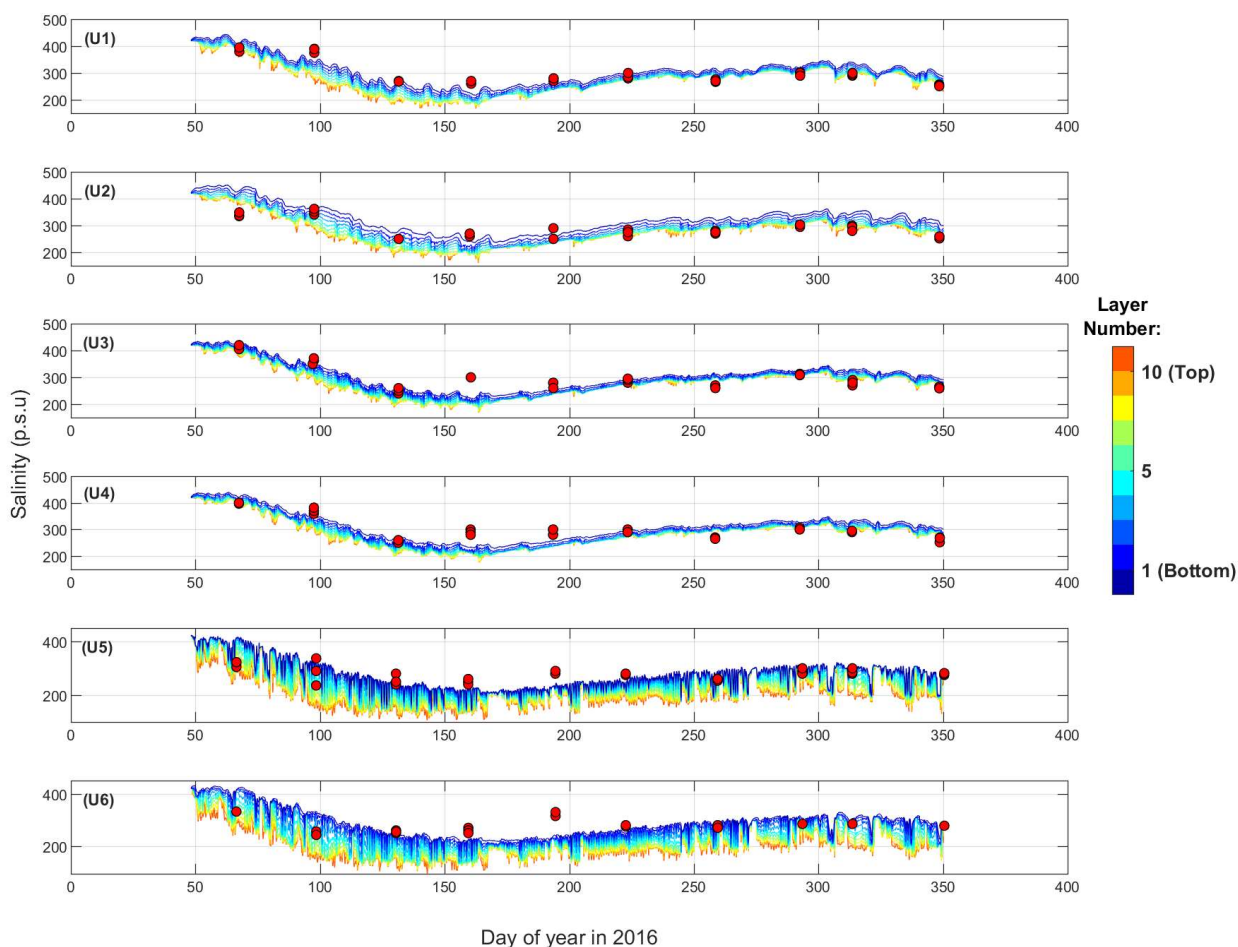
شکل ۳۶: مقایسه شوری مدل با ایستگاه U5 در سال ۲۰۱۶ بدون در نظر گرفتن فرآیند ترسیب و انحلال

همانطور که مشاهده می شود شوری اندازه گیری شده و مدلسازی شده در طول مدلسازی روندی کاهشی داشته است. این کاهش به دلیل ورود آب با شوری کمتر از رودخانه های منتهی به دریاچه می باشد. نتایج اندازه گیری نشان می دهد شوری با کاهش بیش از ۱۰۰ psu نسبت به اولین روز مدلسازی در محدوده ای بین ۲۵۰ تا ۲۸۰ psu نوسان می کند. این در حالی است که در نتایج مدل سازی نرخ کاهشی شوری بیشتر بوده و از روز ۱۴۵ از سال در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ psu نوسان می کند که خیلی کمتر از مقادیر اندازه گیری است. اختلاف موجود در نتایج شبیه سازی شده و مقادیر اندازه گیری اهمیت نقش فرآیندهای ترسیب و انحلال در دریاچه ارومیه را نشان می دهد. با افزایش تراز آب در اثر ورود رودخانه ها نمک ترسیب شده در بستر در آب دریاچه حل شده و موجب افزایش شوری آب در دریاچه می شود. بنابراین در نظر گرفتن فرآیند ترسیب و انحلال و نقش نمک بستر در مدلسازی ضروری می باشد.

در شکل ۳۷ نتایج مدلسازی با در نظر گرفتن فرآیند ترسیب و انحلال نیز برای ایستگاه های اندازه گیری ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود با نظر گرفتن پدیده ترسیب و انحلال تطبیق خوبی بین نتایج مدلسازی



شوری و مقادیر اندازه‌گیری شده در ۶ ایستگاه اندازه‌گیری دریاچه وجود دارد. در این مدل‌سازی برآیند ترسیب و انحلال با نرخ ثابتی از بستر دریاچه به صورت توزیع گسترده در شرایط مرزی معادلات شوری در نظر گرفته شده است. نمودارهای ذیل نشان دهنده دقت مناسب مدل‌سازی شوری هستند. البته با تدقیق داده‌های دبی و شوری رودخانه با استفاده از اندازه‌گیری آنها در بازه‌های ساعتی یا حداقل روزانه نتایج دقیق‌تر نیز خواهند شد.



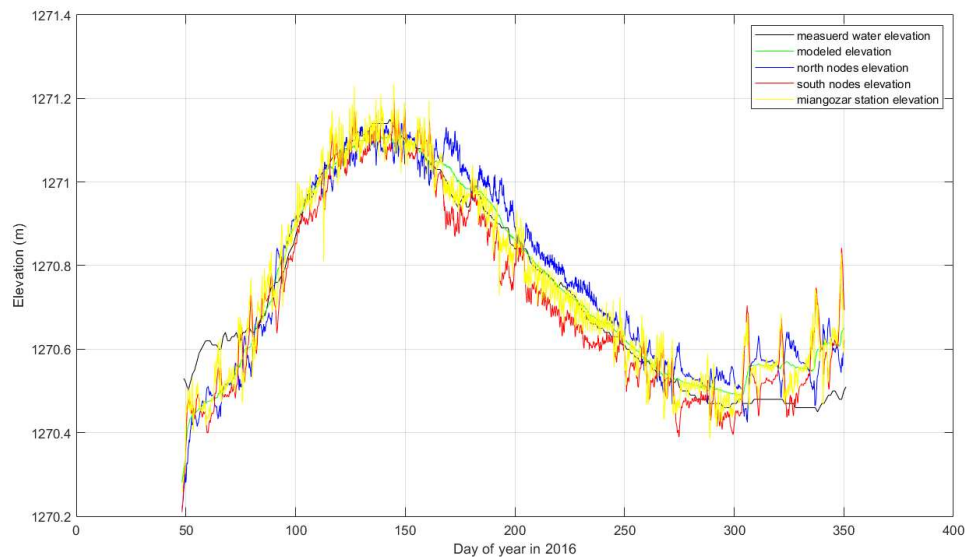
شکل ۳۷-نتایج مدل‌سازی شوری دریاچه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در ۶ ایستگاه

یکی دیگر از پارامترهای مهم هیدرودینامیکی نوسانات تراز آب می‌باشد. تغییرات تراز آب در طول زمان مدل‌سازی مطابق شکل ۳۵ بوده است. در این شکل نوسانات تراز آب مدل‌سازی شده با مقادیر ثبت شده در



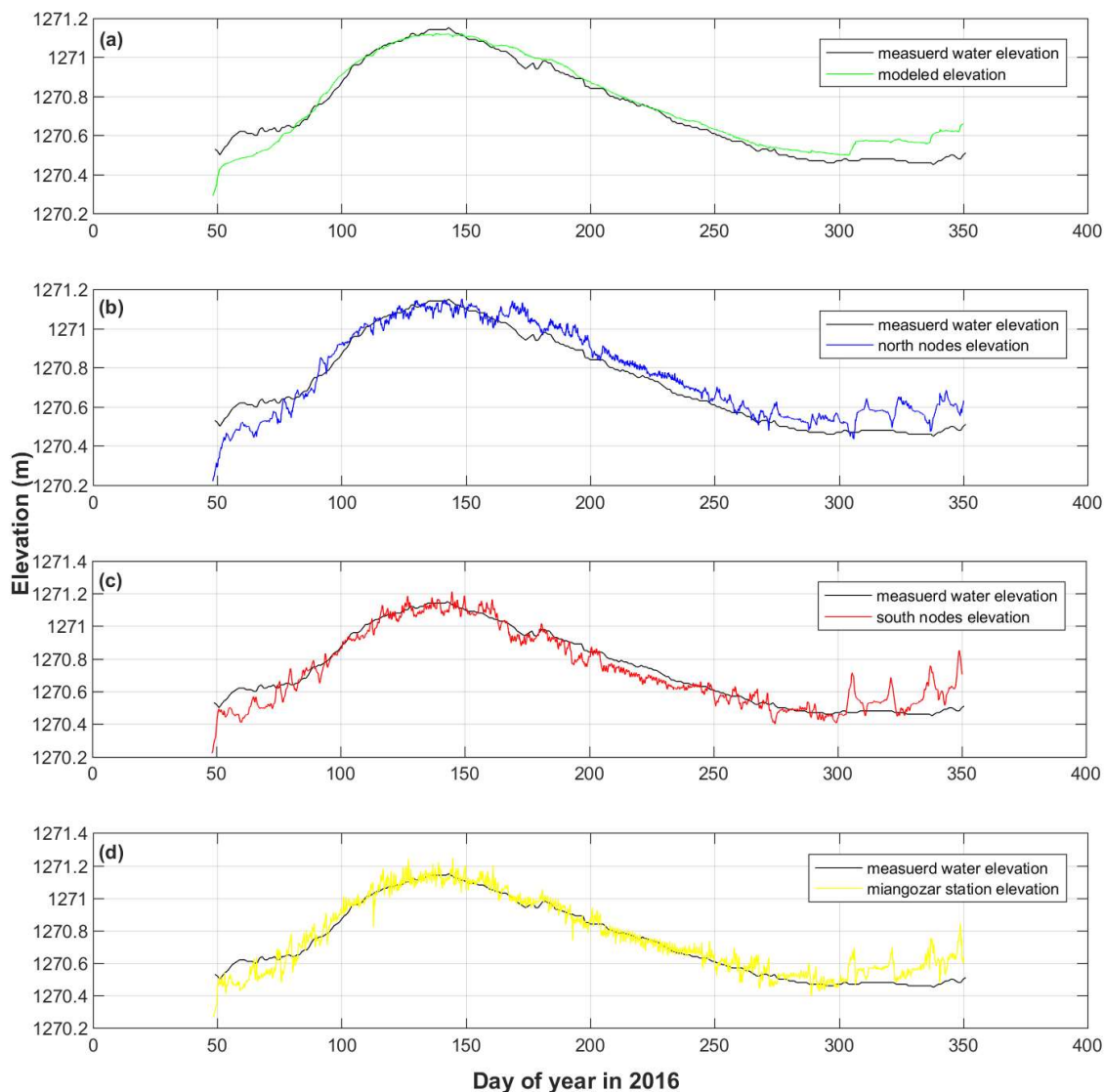
ایستگاه نزدیک میانگذر مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد نتایج مدل سازی با نتایج اندازه گیری شده تطابق خوبی دارد و نشان دهند این است که بیلان آب دریاچه با تقریب خوبی محاسبه شده است. لازم به ذکر است در مدل سازی عددی مدل می بایست بین ۱ تا ۲ ماه اجرا شود تا نتایج نسبت شرایط اولیه تغییر کرده و نتایج شبیه سازی به واقعیت نزدیک شوند. در این دوره که زمان spin-up نام دارد همانطور که در شکل ۳۸ و ۳۹ مشاهده می شود نتایج تراز آب تطابق خوبی با مقادیر اندازه گیری ندارند. بعد از روز ۳۰۰ نیز نتایج مدل سازی نوسانات بیشتری را نسبت به مقادیر اندازه گیری پیش بینی کرده است. به طور کلی با توجه به اینکه مقادیر تراز آب به صورت روزانه ثبت شده اند و مقادیر مدل سازی به صورت ساعتی می باشد انتظار می رود نوسانات مدل بیشتر از مقادیر اندازه گیری می باشد. اما از روز ۳۰۰ دبی رودخانه ها که در طول تابستان خشک شده بودند در اثر بارندگی نوسانات زیادی داشته است که در مدل سازی مستقیماً در تراز آب دریاچه تأثیر گذشته است. در حالیکه در واقعیت دبی رودخانه ها در ایستگاه های هیدرومتری ثبت شده اند و فاصله این ایستگاه ها تا بدنه دریاچه سبب بروز خطا در تخمین دقیق دبی ورودی به دریاچه می شود. به خصوص اینکه جریان رودخانه ها ابتدا وارد قسمتهای خشک شده دریاچه شده یا به اصلاح ناحیه حائل^۶ شده و در اثر تبخیر و یا نفوذ آب مقدار آب کمتری به بدنه اصلی دریاچه می رسد. بعلاوه مطالعات گذشته در خصوص بیلان آب دریاچه ارومیه نشان می دهد تفات آب ورودی به دریاچه در ناحیه حائل حدود ۱ میلیارد مترمکعب بوده و علت این موضوع وجود زمین های کشاورزی و شیب کم در این ناحیه، مسدود بودن مسیر رودخانه ها از آخرین ایستگاه آبرسانی تا پیکره ی آبی دریاچه و تبخیر زیاد در این ناحیه عنوان شده اند [۲۵].

^۶ Buffer zone



شکل ۳۸- مقایسه تراز سطح آب شبیه سازی شده با داده های اندازه گیری در سال ۲۰۱۶

در شکل ۳۹ نیز نتایج مدل سازی به تفکیک بخشهای مختلف دریاچه در محل میانگذر و در شمال و جنوب دریاچه را با مقادیر اندازه گیری مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود تراز آب در ناحیه شمالی با ناحیه جنوبی تفاوت داشته که این امر می تواند ناشی از اختلاف عمق آب در ناحیه شمالی و جنوبی و وجود میانگذر احداث شده در دریاچه باشد. بعلاوه همان گونه که در مرحله بررسی آورد رودخانه های ورودی پیش بینی شده بود تراز دریاچه ابتدا یک روند افزایش و بعد از آن روند کاهشی دارد. در فصل گرما به علت افزایش دما و بیشتر شدن تبخیر، عمق آب کاهش یافته است که این امر باعث کاهش سطح تر در دریاچه و افزایش میزان خشک شدگی آن می شود.



شکل ۳۹- مقایسه ترازهای مدل‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده



۴- نتیجه گیری

در این بخش از پروژه پژوهشی مدل هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه با استفاده از مدل سه بعدی FVCOM توسعه داده شد. برای انتخاب داده‌های هواشناسی به عنوان یکی از مهمترین ورودی‌های مدل، با توجه به مناسب نبودن گام‌های زمانی ایستگاه‌های هواشناسی و فاصله زیاد آنها از دریاچه ارومیه از داده‌های باز تحلیل شده ساعتی استفاده شد. این داده‌های هواشناسی برای محاسبه میدان باد و شار حرارتی بر روی سطح دریاچه مورد استفاده در هر گام زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای توسعه دقیق مدلسازی کیفی نیز حائز اهمیت می‌باشد. در بیلان آب دریاچه ارومیه می‌بایست ورودی رودخانه‌ها، میزان بارش و همچنین تبخیر در نظر گرفته شود. در این مطالعه از داده‌های اندازه‌گیری روزانه دبی رودخانه و بارش استفاده شد. سری زمانی ساعتی تبخیر نیز با استفاده از الگوریتم COARE که در مدل FVCOM پیاده سازی شده است محاسبه گردید. مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده تراز آب با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد بیلان آب دریاچه ارومیه با دقت خوبی مدلسازی شده است و مدل از توانایی خوبی در پیش بینی نوسانات تراز آب ساعتی برخوردار است. بعلاوه نتایج نشان می‌دهد مدل توسعه یافته عملکرد نسبتاً خوبی در شبیه سازی دمای آب داشته است. بعلاوه نتایج مدلسازی نشان می‌دهد نمک ترسیب شده در بستر دریاچه و انحلال آن در ستون آب نقش مهمی در شوری آب دریاچه ارومیه داشته و با در نظر گرفتن این فرآیند مدل هیدرودینامیکی قادر خواهد بود مقادیر شوری را نیز در ایستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری پیش بینی کند. این در حالی است که در صورت صرف نظر کردن این فرآیند ترسیب و انحلال مقادیر شوری در دریاچه بسیار کمتر از مقادیر میدانی خواهند بود. در مدل توسعه داده شده با پیش‌بینی دقیق‌تر شوری نتایج شبیه‌سازی دما نیز بهبود یافته و مقایسه نتایج مدلسازی با داده‌های میدانی و سنجش از دور در حد خوب و قابل قبولی بدست آمده‌اند.



هر چند تا کنون تلاشهای زیادی در مطالعات گذشته نیز برای شناخت مکانیزم تبادل جریان و اثر احداث میانگذر بر روی هیدرودینامیک دریاچه با استفاده از مدلسازی عددی صورت گرفته است، اما به دلیل عدم وجود داده‌های میدانی مناسب امکان صحت سنجی این مدلها وجود نداشته و بعضاً به نتایج متناقضی منجر شده اند. لذا لازم است جریان تبدلی بین قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه اندازه گیری شده و با در نظر گرفتن تفاوت شوری و دمای قسمت شمالی و جنوبی و همچنین تاثیر رودخانه‌های ورودی شناخت بهتری نسبت به هیدرودینامیک دریاچه و اثر احداث میانگذر پیدا کرد. در این مطالعه نیز با وجود اینکه مدل سه بعدی عددی توسعه داده شده برای دریاچه ارومیه برای دما، شوری و تراز آب صحت سنجی شده است، اما به دلیل عدم وجود اندازه گیری میدانی صحت سنجی سرعت جریان امکان پذیر نبوده است. بنابراین نمی توان به طور متقن در خصوص الگوی گردش جریان در دریاچه نتیجه گیری نمود. اما با توجه به اینکه پارامترهای هیدرودینامیکی مدل نظیر ضرایب پخش و اختلاط آب برای شوری، دما و همچنین تراز آب صحت سنجی شده اند و نتایج در طول دوره یکساله و در ۶ ایستگاه مختلف صحت سنجی شده اند، می توان به طور کلی از نتایج گردش جریان نیز استفاده نمود. به عنوان مثال به طور کلی نتایج مدل هیدرودینامیک نشان می دهد در محل میان گذر و ورودی رودخانه ها جریان آب قوی تر بوده و اختلاط آب اتفاق می افتد. به همین دلیل مطالعات میدانی نیز نشان می دهد انحلال نمک در بستر دریاچه در محل میانگذر نیز بیشتر بوده و عمق آب در این ناحیه افزایش یافته است. یکی دیگر از نتایج مهم اختلاف تراز آب، شوری، دمای آب و الگوی گردش جریان در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه است که در نتایج مدلسازی به خوبی مشخص است. با توجه به متفاوت بودن آورد رودخانه ها و بسیمتری دریاچه ارومیه در ناحیه شمالی و جنوبی، پل میانگذر احداث شده در دریاچه مانع از گردش جریان در کل دریاچه شده و سبب تشدید اختلاف خصوصیات فیزیکی و هیدرودینامیکی ناحیه شمالی و جنوبی می شود. در مرحله بعدی از این پروژه مدل هیدرودینامیک با مدل کیفی دریاچه کوپل شده تا بتوان خصوصیات هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه را نیز به صورت همزمان



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه
ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف



صفحه ۵۷ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲

مدلسازی نمود. نتایج این مطالعات در گزارش جلد سوم ارائه شده‌اند. از این مدل توسعه داده شده در ادامه پروژه برای مطالعه خصوصیات دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریان‌های ورودی متعارف و نامتعارف مورد استفاده قرار خواهد گرفت. نتایج این بررسی در گزارش جلد چهارم ارائه شده‌اند.



۵- مراجع

- [۱] بختیاری، آرش؛ مصطفی زین الدینی و مجید احتشامی، مدلسازی تغییرات الگوی جریان و شوری در دریاچه ارومیه با استفاده از یک مدل سه بعدی، دومین سمپوزیوم بین المللی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [۲] دامن افشان، امیر؛ میر علی محمدی و محمد مناف پور، شبیه سازی یدرولیک تغییرات دانسیته و شوری دریاچه ارومیه، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۰.
- [۳] سازمان حفاظت از محیط زیست، معاونت محیط طبیعی و تنوع زیستی، بررسی اثرات جاده میانگذر بر اکوسیستم دریاچه ارومیه و ارائه طرح اجرایی برای راهکارهای اصلاحی موردنظر. گزارش مرحله دوم، جلد سوم. گزارش شبیه سازی جریان و تراز سطح آب، ۱۳۹۶.
- [۴] انجمن هیدرولیک ایران، بررسی اثرات جاده میانگذر بر اکوسیستم دریاچه ارومیه و ارائه طرح اجرایی برای راهکارهای اصلاحی موردنظر، ۱۳۹۶.
- [5] A. Marjani, M. Jamali. Role of exchange flow in saltwater balance of Urmia Lake. Dynamics of Atmospheres and Oceans (65), 1-16, 2014.
- [6] Shafieefar, M., Hydrodynamic, Hydraulics and Environmental study of Shahid Kalantari Project in the Urmia Lake. Sadra Company, Teheran, Iran (in Persian), 2004.
- [7] Bakhtiari, A., Zeinoddini, M., Tofighi, M.A., Effects of inflow reduction on water level, morphology and salinity pattern of the Urmia Lake. Journal of Hydraulics 5 (6), 83-93, 2011.
- [8] Marjani, A., Three-Dimensional Numerical Modeling of Water Balance and Salt Water Transport in Urmia Lake [Master's Thesis]. Sharif University of Technology, 2007.
- [۹] توفیقی، م.ع. زین الدینی، م. گلشنی، ع.ا. شبیه سازی دو بعدی هیدرودینامیک دریاچه ارومیه برای تعیین الگوی جریا، نشریه مهندسی دریا (۴)، ۱۳۸۵.
- [۱۰] محمدی، ع. و غیرتی، ا. تأثیر میانگذر شهید کلانتری بر جریانهای دریاچه ای و الگوی پراکنش رسوبات در دریاچه ارومیه، هفتمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، ۱۳۸۵.
- [۱۱] بختیاری، آ. زین الدینی، م. و احتشامی، م. مدلسازی تغییرات الگوی جریان و شوری در دریاچه ارومیه با استفاده از یک مدل سه بعدی، دومین سمپوزیوم بین المللی مهندسی محیط زیست، ۱۳۸۸.
- [12] Zeinoddini, M., Bakhtiari, A., and Ehteshami, M., "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, 2015.
- [13] Soudi, M., Ahmadi, H., Yasi, M., Sibilla, S., Fenocchi, A., Hamidi, S.A., "Investigation over the capability of MIKE 3 flow model FM to simulate the hydrodynamics and salinity distribution of hypersaline lakes: Lake Urmia (Iran) as case study", *Coastal Engineering Journal*, 2019.
- [14] A. Safaie, E. Litchman, and M. S. Phanikumar, "Evaluating the role of groundwater in circulation and thermal structure within a deep inland lake," *Adv. Water Resour.*, vol. 108, pp. 310–327, 2017.
- [15] J. B. Edson *et al.*, "On the exchange of momentum over the open ocean," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 43, no. 8, pp. 1589–1610, 2013.
- [16] C. W. Fairall, E. F. Bradley, J. S. Godfrey, G. A. Wick, J. B. Edson, and G. S. Young, "Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 101, no. C1, pp. 1295–1308, 1996.
- [17] Chen, C., Liu, H., Beardsley, R.C., An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *J. Atmospheric Ocean. Technol.* 20, 159–186, 2003
- [18] Chen, C.; Beardsley, R.; Cowles, G., An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) System. *Oceanography*, 19 (1), 78–89, 2006.
- [19] R. C. Beardsley, C. Chen, and Q. Xu, "Coastal flooding in Scituate (MA): A FVCOM study of the 27 December 2010 nor'easter," *J. Geophys. Res.-Oceans*, vol. 118, no. 11, pp. 6030–6045, 2013.
- [20] C. Chen *et al.*, "A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): An application for tidal studies," *J. Geophys. Res.-Oceans*, vol. 114, p. C08017, Aug. 2009.
- [21] J. A. Shore, "Modelling the circulation and exchange of Kingston Basin and Lake Ontario with FVCOM," *Ocean Model.*, vol. 30, no. 2–3, pp. 106–114, 2009.
- [22] C. Li, W. Huang, C. Chen, and H. Lin, "Flow Regimes and Adjustment to Wind-Driven Motions in Lake Pontchartrain Estuary: A Modeling Experiment Using FVCOM," *J. Geophys. Res.-Oceans*, vol. 123, no. 11, pp. 8460–8488, Nov. 2018.
- [23] Safaie, A., Wendzel, A., Ge, Z., Nevers, M.B., Whitman, R.L., Corsi, S.R., Phanikumar, M.S., Comparative evaluation of statistical and mechanistic models of escherichia coli at beaches in southern Lake Michigan. *Env. Sci. Technol.* 50 (5), 2442–2449, 2016.
- [24] Safaie, A., Dang, C., Qiu, H., Radha, H., & Phanikumar, M. S., Manifold methods for assimilating geophysical and meteorological data in Earth system models and their components. *Journal of Hydrology*, 544, 383–396, 2017.



مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه
ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف



صفحه ۶۰ از ۶۰

ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1

مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

جلد ۲

[۲۵] رضایی، حسین، گزارش نقش بافرزون و هیدروگرافی در تعیین عوامل بیلان آب دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۴.

عنوان طرح پژوهشی

مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف

مجموعه داوری گزارش

مدلسازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

	مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف	
صفحه ۱ از ۶۰	ULRP-SUT-BMAS-RPT002-REV1	مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه
جلد ۳		

عنوان طرح پژوهشی

مطالعات مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف

عنوان گزارش

مدلسازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه

مجری طرح:

عمار صفائی

همکاران:

علیه علیزاده

محموده نیک فر

فاطمه چمن مطلق

امیرمیر جماعت

علیرضا زارعی بیدختی

دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی شریف

مرداد ۱۳۹۹

عنوان قرارداد: مطالعات مدل‌سازی و تحلیل هیدرودینامیکی، شیمیایی و کیفی دریاچه ارومیه با در نظر گرفتن جریانات ورودی متعارف و نامتعارف		
عنوان گزارش: مدل‌سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه		
کارفرما: ستاد احیای دریاچه ارومیه	مجری: دکتر عمار صفایی	
تاریخ تهیه گزارش: مرداد ۱۳۹۹	تاریخ ارسال نظرات: مهر ۱۳۹۹	
ناظر/داور:	درصد پیشرفت: پس از اصلاحات و پاسخ به نظرات قابل بیان می باشد.	

ردیف	صفحه / بخش	ارائه نظر فنی
۱		نظرات فنی در فایل ارائه شده است.
۲		
۳		
۴		
۵		
۶		
۷		

ارائه نظر جمع بندی با توجه به شرح خدمات
مطالب تکراری از فصل قبل در این فصل زیاد دیده می شود. نحوه ارائه مطالب فرعی بایستی به صورت خلاصه تر باشد. مدل هیدرودینامیکی آماده شده در شبیه سازی ساختار شوری ناموفق بوده است و هیچ تلاشی در این خصوص صورت نگرفته است. در شرح خدمات بیان شده است که در طی این پروژه به سئوالاتی پاسخ داده میشود. پیشنهاد می شود در بخش نتیجه گیری پاسخ این سئوالات و نحوه رسیدن به آن در این پروژه به صورت شفاف بیان گردد.

پاسخ مجری به داور اول

ردیف	شماره جلد	عنوان گزارش	شماره مدرک	شماره ویرایش
۲	دوم	مدل سازی هیدرودینامیکی دریاچه ارومیه	ULRP-SUT-BMAS-RPT002	۰

اصلاحات انجام شده با توجه به نظر داور				
ردیف	صفحه	نظر داور	توضیحات	
۱	۱۶	آیا مقایسه داده های ERA5 با داده های اندازه گیری شده می تواند صحت انتخاب داده های ERA5 را تایید کند؟	ضمن تشکر از این سوال، با توجه به اهمیت موضوع در صفحه ۱۸ تا ۲۰ ویرایش اول این گزارش مقایسه داده های ERA5 با داده های اندازه گیری اضافه شده است. طبق مقایسه- های انجام شده داده های باد و دمای هوای استخراج شده از ERA5 از دقت قبل قبولی برخوردار است.	
۲	۱۷	ارائه گلباد ها در قسمت های مختلف دریاچه دید بهتری را به خواننده منتقل می کند	برای مقایسه داده های سرعت باد ERA5 و همچنین دید بهتر خوانند گلباد در ایستگاه اندازه گیری دریاچه در صفحه ۲۰ در گزارش ویرایش اول رسم شده است.	
۳	۴۱	از صفحه ۲۰ تا ۴۰ در رابطه با رودخانه های حوضه مطلب ارائه شده است که در جلد اول نیز در خصوص آن ها مطالبی ارائه شده است.	با توجه به نظر داور محترم و به منظور حفظ یکپارچگی مطالب این بخش به گزارش جلد اول منتقل شد.	
۴	۴۸	به طور کلی برخی افزایش ها و یا کاهش ناگهانی دبی های روزانه غیرطبیعی به نظر می رسد در صورت امکان با بارش های حوضه چک گردد.	داده های دبی رودخانه توسط شرکت سهامی آب منطقه ای کنترل کیفی شده اند. لازم به ذکر است این داده ها به صورت روزانه بوده و به همین دلیل با تغییرات ساعتی دبی متفاوت هستند. مطابق با پیشنهاد داور محترم این نوسانات با سری زمانی بارش نیز کنترل شد و نوسانات دبی رودخانه ها با بارش نیز مطابقت دارد. همانطور که در گزارش نیز ذکر شده است برخی از نوسانات نیز مربوط به رهاسازی آب در بالادست رودخانه ها می- باشد.	
۵	۵۵	پیشنهاد می شود گراف های دما در یک یا دو شکل مربوط به بخش شمالی و جنوبی دریاچه ارائه گردد.	با توجه به نظر داور این اشکال برای دو بخش شمالی و جنوبی ترسیم شده و در صفحه ۲۶ ویرایش اول گزارش ارائه شده است.	
۶	۶۳	پیشنهاد می شود گراف های شوری در یک یا دو شکل مربوط به بخش شمالی و جنوبی دریاچه ارائه گردد.	با توجه به نظر داور این اشکال برای دو بخش شمالی و جنوبی ترسیم شده و در صفحه ۲۸ ویرایش اول گزارش ارائه شده است.	
۷	۶۶	ظاهراً در ترازهای مختلف (سه تراز) اندازه گیری شده است. در اینصورت بهتر است در سه گراف نمایش داده شود.	این شکل صرفاً برای نشان دادن نوسانات و بازه تغییرات شوری در ایستگاه های اندازه- گیری می باشد. همانطور که داور محترم نیز اشاره کرده اند داده ها در هر بار نمونه برداری از سه عمق مختلف اندازه گیری شده اند. اما با توجه به تفاوت عمق آب در ایستگاه های مختلف و همچنین تغییر عمق اندازه گیری در هر بار نمونه برداری امکان تفکیک آنها برای سه تراز مشخص وجود ندارد.	

اصلاحات انجام شده با توجه به نظر داور			
ردیف	صفحه	نظر داور	توضیحات
۸	۶۷	ظاهراً منظور عمق آب است اگر اینگونه است اصلاح گردد	با تشکر، اصلاح شد.
۹	۶۹	ارائه نتایج در بخش شمالی و جنوبی دریاچه به صورت جداگانه و بر حسب میلی متر در روز برای خواننده استفاده بیشتری دارد.	ضمن تشکر از این پیشنهاد خوب، مقایسه بارش به تفکیک بخش شمالی و جنوبی دریاچه در صفحه ۳۴ ویرایش جدید گزارش ارائه شده است.
۱۰	۷۷	نحوه نمایش نتایج مطلوب نیست. پیشنهاد می شود برای هر ایستگاه مقادیر خروجی ماهیانه استخراج شده و به صورت پروفیل عمقی با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه گردد.	با توجه به اینکه معمولاً عمق های نمونه برداری دستی دقیق نبوده و عمق ستون آب نیز در هر ایستگاه با عدم قطعیت همراه است، برای نشان دادن این عدم قطعیت علاوه بر سری زمانی میانگین مقادیر شبیه سازی شده، مقادیر شبیه سازی شده در لایه های عمودی آب نیز به عنوان عدم قطعیت با رنگ خاکستری نشان داده می شود. البته به دلیل استفاده از رنگ خاکستری روشن و کیفیت کم تصاویر در نسخه Pdf قبلی نمایش نتایج مطلوب نبودند. در ویرایش اول گزارش برای مشخص کردن نتایج شبیه سازی شده در هر عمق از colormap استفاده شده است که روش بهتری برای نمایش نتایج می باشد. از هر دو روش تا کنون برای ارائه نتایج مدلسازی در مجلات معتبری نظیر Water Research و Environmental Science and Technology استفاده کرده ایم. اما مسلماً در صورتی که مقادیر اندازه گیری در عمق های بیشتری توسط یک profiler و یا Hydrolab اندازه گیری می شد مقایسه پروفایل داده های اندازه گیری شده با نتایج مدل خیلی می توانست مفید باشد.
۱۱	۸۹	برچه اساسی این نتیجه گرفته شده است؟	این توضیحات به گزارش اضافه شده است: "هر چند تا کنون تلاش های زیادی در مطالعات گذشته نیز برای شناخت مکانیزم تبادل جریان و اثر احداث میانگذر بر روی هیدرودینامیک دریاچه با استفاده از مدلسازی عددی صورت گرفته است، اما به دلیل عدم وجود داده های میدانی مناسب امکان صحت سنجی این مدل ها وجود نداشته و بعضاً به نتایج متناقضی منجر شده اند. لذا لازم است جریان تبدالی بین قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه اندازه گیری شده و با در نظر گرفتن تفاوت شوری و دمای قسمت شمالی و جنوبی و همچنین تاثیر رودخانه های ورودی شناخت بهتری نسبت به هیدرودینامیک دریاچه و اثر احداث میانگذر پیدا کرد. در این مطالعه نیز با وجود اینکه مدل سه بعدی عددی توسعه داده شده برای دریاچه ارومیه برای دما، شوری و تراز آب صحت سنجی شده است، اما به دلیل عدم وجود اندازه گیری میدانی صحت سنجی سرعت جریان امکان پذیر نبوده است. بنابراین نمی توان به طور متقن در خصوص الگوی گردش جریان در دریاچه نتیجه گیری نمود. اما با توجه به اینکه پارامترهای هیدرودینامیکی مدل نظیر ضرایب پخش و اختلاط آب برای شوری، دما و همچنین تراز آب صحت سنجی شده اند و نتایج در طول دوره یکساله و در ۶ ایستگاه مختلف صحت سنجی شده اند، می توان به طور کلی از نتایج گردش جریان نیز استفاده نمود. به عنوان مثال به طور کلی نتایج مدل هیدرودینامیک نشان می دهد در محل میان گذر و ورودی رودخانه ها جریان آب قوی تر بوده و اختلاط آب اتفاق می افتد. به همین دلیل مطالعات میدانی نیز نشان می دهد انحلال نمک در بستر دریاچه در محل میانگذر نیز بیشتر بوده و عمق آب در این ناحیه افزایش یافته است. یکی دیگر از نتایج مهم اختلاف تراز آب، شوری، دمای آب و الگوی گردش

اصلاحات انجام شده با توجه به نظر داور			
ردیف	صفحه	نظر داور	توضیحات
			جریان در قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه است که در نتایج مدلسازی به خوبی مشخص است. با توجه به متفاوت بودن آورد رودخانه ها و بسیمتری دریاچه ارومیه در ناحیه شمالی و جنوبی، پل میانگذر احداث شده در دریاچه مانع از گردش جریان در کل دریاچه شده و سبب تشدید اختلاف خصوصیات فیزیکی و هیدرودینامیکی ناحیه شمالی و جنوبی می شود. " نتایج مدلسازی هیدرودینامیکی و کیفی دریاچه برای حالت بدون در نظر گرفتن میانگذر نیز در این پروژه انجام شده است که تأیید کنند این مطالب است. در گزارش جلد ۵ که در حال تهیه آن هستیم این نتایج نیز ارائه خواهند شد.

داوری نهایی

با سلام و احترام

ضمن تشکر و قدردانی از مجری محترم پروژه جهت انجام اصلاحات پیشنهادی و ارتقاء قابل توجه کیفیت گزارش نسبت به مرحله قبل، از نظر اینجانب گزارش های تهیه شده به صورت کامل قابل تایید می باشد اگرچه همچنان جهت ارتقاء مراحل آتی پیشنهاداتی در گزارشها به مجری محترم ارائه شده است که در لینک پیوست قابل مشاهده خواهد بود . با توجه به اینکه همچنان گزارش های دیگر این پروژه در دست تهیه می باشد جهت تعیین درصد پیشرفت گزارش ها نیاز است ساختار شکست در نظر گرفته شده برای پروژه برای اینجانب ارسال گردد

با تشکر