

تحلیل دینامیکی - مکانی تغییرات تبخیر و نمک در دریاچه‌های شور (مطالعه موردی دریاچه ارومیه)

پژوهشگر: مسعود تجربی^۱
کد پروژه: WRE1-88005

چکیده

تبخیر به عنوان مهمترین عامل خروج آب از دریاچه‌های بسته، سهم به سزایی در معادلات بیلان آب دریاچه‌ها ایفا می‌کند و می‌تواند منجر به تغییر در ترکیب شیمیایی دریاچه‌ها شود. هدف از این مطالعه ارائه الگویی برای برآورد صحیح نرخ تبخیر از سطح آب دریاچه ارومیه می‌باشد. بدین منظور مدل روزانه تبخیر با لحاظ کردن اثر شوری (SDDE^۲) بر مبنای معادله بیلان انرژی و با استفاده تلفیقی از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی توسعه داده شده و با اندازه‌گیری‌های زمینی اعتبارسنجی شد. با اجرای این مدل نقشه‌های تبخیر از سطح دریاچه برای سال ۲۰۱۰ به دست آمد. سپس به منظور در نظر گرفتن برهم کنش عوامل مؤثر بر نرخ تبخیر و شوری دریاچه، مدل بیلان آب، انرژی و نمک (WESB^۳) بر پایه مفاهیم نگرش تحلیل دینامیکی - مکانی سیستم (SSD^۴) توسعه داده شد. مدل WESB شامل معادلات بیلان آب و نمک، معادلات ترمودینامیکی ترسیب / انحلال و معادله بیلان انرژی است. با اجرای مدل برای شرایط دریاچه ارومیه طی سال آبی ۲۰۱۰-۲۰۰۹، متغیرهای حجم، چگالی و غلظت املاح محلول دریاچه شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از سازگاری قابل قبول با اندازه‌گیری‌های میدانی است.

کلید واژه‌ها: دریاچه ارومیه، تبخیر، شوری، سنجش از دور، توزیع مکانی، نگرش پویایی سیستم.

مقدمه

در خصوص تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در گزارش‌های مهندسی مشاور که در مورد این دریاچه مطالعاتی را انجام داده‌اند مقادیر مختلفی ارائه شده است. به عنوان مثال مهندسان مشاور آب نیرو در مطالعات مرحله دوم مقدماتی طرح بزرگراه شهید کلاتری مقدار متوسط تبخیر از سطح دریاچه را برابر ۱۳۵۹ میلی‌متر در سال گزارش کردند (مهندسان مشاور آب نیرو، ۱۳۷۱). در گزارش طرح مدیریت زیست محیطی دریاچه ارومیه نرخ تبخیر سالانه از سطح دریاچه در محدوده

^۱ - دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، tajrishy@sharif.edu

^۲ - Salinity-Dependant Daily Evaporation

^۳ - Water, Energy and Salt Balance

^۴ - Spatial System Dynamics

۸۹۴ تا ۱۱۷۲ میلی متر تخمین زده شده است (Yekom Consulting Engineers, 2002). همچنین در گزارش بیان آب مطالعه پیامدهای زیست محیطی طرح‌های توسعه منابع آب حوضه ارومیه بر دریاچه، میزان تبخیر از سطح دریاچه برای دوره آماری ۳۵ ساله (۸۰-۱۳۴۵) برابر ۹۶۰ میلی متر در سال برآورد شده است (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۳). در حالی که در گزارش طرح مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه - طرح بزرگراه شهید کلاتری (۱۳۸۳)، مهندسین مشاور طرح نوآندیشان متوسط نرخ تبخیر سالانه را برابر ۱۲۲۳ میلی متر برآورد کردند (مهندسین مشاور طرح نوآندیشان، ۱۳۸۳). همچنین در گزارش مطالعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی طراحی بزرگراه شهید کلاتری، تبخیر از سطح دریاچه با اعمال ضریب تصحیح ۱۲۲۲ میلی متر در سال ذکر شده است (مهندسین مشاور صدرا، ۱۳۸۳). در کلیه این مطالعات نرخ تبخیر دریاچه با استفاده از میانگین گیری ارتفاع تبخیر از تعدادی از ایستگاه‌های مجاور دریاچه و اعمال ضرایب اصلاحی برای تشک تبخیر و اثر شوری برآورد شده است.

اخیراً در یک بررسی آزمایشگاهی با استفاده از مدل انتقال جرم دالتونی، اثر شوری بر میزان تبخیر از تشک آب مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نرخ تبخیر روزانه در طول ۸ روز تابستان (شرایط حداکثر تبخیر) از ۵ تشک به ترتیب با شوری‌های معادل ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۶ و ۳/۵ گرم بر لیتر، در شرایط هواشناسی مجاور دریاچه ارومیه اندازه‌گیری شد. سپس با اعمال اصلاح فشار بخار اشباع بر حسب نسبت مولی آب در محلول آب شور در رابطه تجربی برآورد تبخیر به روش دالتونی، نتایج برآوردها با اندازه‌گیری‌ها مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه مستقیمی بین دما و غلظت نمک از تشک برقرار است؛ به طوری که با کاهش نسبت مولی آب، دما نیز کاهش می‌یابد. در مقابل، رابطه معکوسی بین نرخ تبخیر از تشک و میزان غلظت نمک برقرار است. همچنین نرخ تبخیر از منابع آب شور با غلظت شوری بیشتر از ۴۰۰ گرم بر لیتر به صفر میل می‌کند (Ahmadzadeh Kokya and Ahmadzadeh Kokya (2008)). همچنین در مطالعه دیگری، نرخ تبخیر تعرق از حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از روش SEBAL برآورد شده است. در این مطالعه از ۸۴ تصویر MODIS بر مبنای یک تصویر بدون ابر در هر ماه، استفاده شد. بر این اساس، نرخ تبخیر سالانه از دریاچه در دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ در محدوده ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی متر گزارش شده است (باقری هارونی، ۱۳۹۰). جهانبانی (۱۳۹۱)، نتایج حاصل از ۲۳ روش برآورد نرخ تبخیر ماهانه از دریاچه را با روش بیان انرژی مقایسه نمود. در این مطالعه متغیرهای هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک ارومیه معرف متغیرهای هوای مجاور دریاچه در نظر گرفته شده‌اند. بر اساس نتایج این مطالعه، روش‌های Priestly-Taylor و DeBruin-Keijman به ترتیب کمترین اختلاف را با روش بیان انرژی دارند. همچنین نرخ تبخیر سالانه دریاچه در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ به ترتیب ۱۳۰۷، ۱۱۷۸، ۹۷۵، ۱۰۱۵ و ۹۴۹ میلی متر برآورد شده است. همچنین نتایج برآورد نرخ تبخیر با اعمال اثر شوری طی این دوره به ترتیب عبارتند از: ۱۱۱۸، ۱۰۹۴، ۹۳۳، ۹۲۵ و ۸۸۷ میلی متر در سال (جهانبانی، ۱۳۹۱).

نرخ تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در مجموعه این مطالعات در محدوده وسیعی (۱۳۶۰-۸۹۰ میلی متر در سال) تخمین زده شده است. این امر لزوم برآورد صحیح نرخ تبخیر از سطح دریاچه ارومیه را با استفاده از روش‌های پایه فیزیکی و داده‌های صحیح نشان می‌دهد.

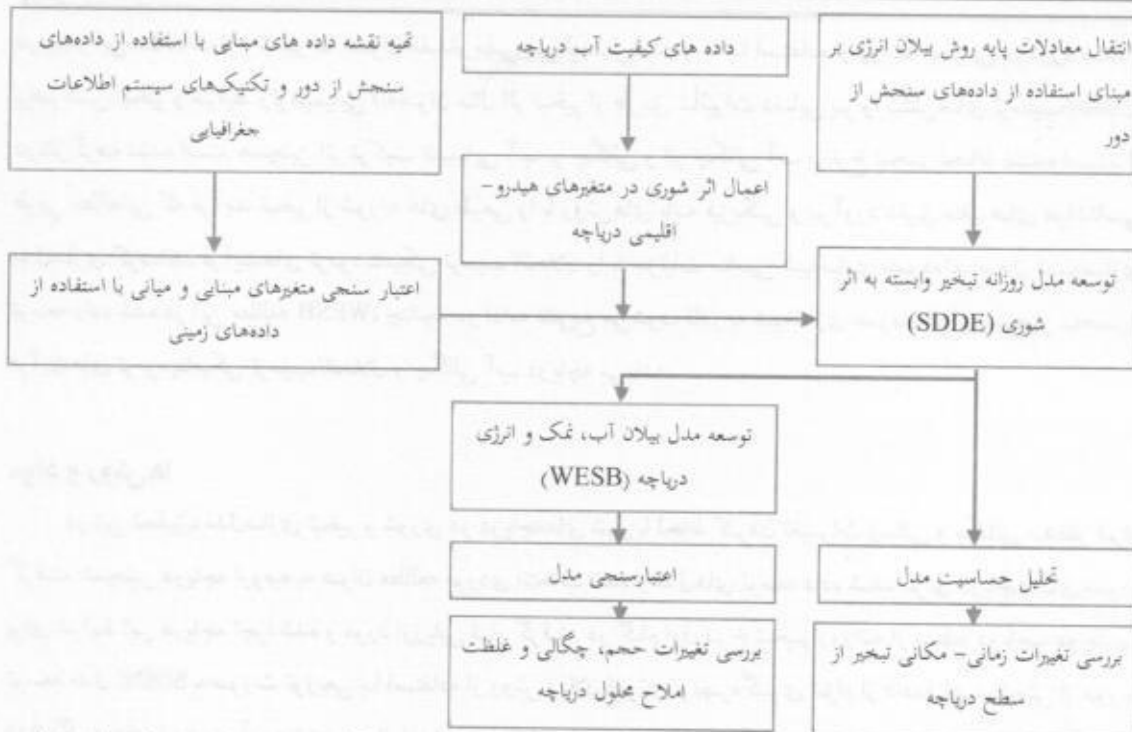
همچنین محققان مختلفی بر اهمیت لحاظ نمودن فرآیند ترسیب در مطالعات بیان آب و نیز مدل‌سازی شوری دریاچه‌های شور تأکید کرده‌اند (Dvorkin et al. (2006). در همین راستا تلاش‌های گسترده‌ای برای ارائه مدل‌های جامع در دریاچه‌های شور با قابلیت مدل‌سازی توأم فرآیندهای تبخیر و ترسیب ترکیبات معدنی صورت گرفته است به عنوان نمونه:

(Loving(2000)؛ (Krumgalz(2001)؛ (Benduhn and Renard(2004)؛ (Hacini et al.(2009)؛ (Gamazo et al. (2011).

در بیشتر این مطالعات ترم تبخیر به عنوان مقدار مفروض لحاظ شده و یا با استفاده از روابط تجربی برآورد شده و برهم کنش تبخیر و شرایط ژئوشیمیایی (به عنوان مثال اثر تبخیر از طریق تأثیرات دمایی بر واکنش های ترسیب/انحلال) در نظر گرفته نشده است. همچنین اثر ترکیب شیمیایی آب بر چگالی و اثر چگالی آب بر نرخ تبخیر لحاظ نشده است. از طرفی مطالعاتی که فرآیند تبخیر از شورابه های طبیعی را با روش های پایه فیزیکی و برآورد دقیق متغیرهای هواشناسی مدل سازی کرده اند، فرآیندهای ترمودینامیکی ترسیب/انحلال را با جزئیات مناسبی شبیه سازی نموده اند. مدل شبیه سازی توسعه داده شده در این مطالعه WESB، چنانچه در ادامه تشریح می شود، قادر به شبیه سازی همزمان فرآیند تبخیر به همراه فرآیندهای ترمودینامیکی ترسیب/انحلال و چگالی آب دریاچه می باشد.

مواد و روش ها

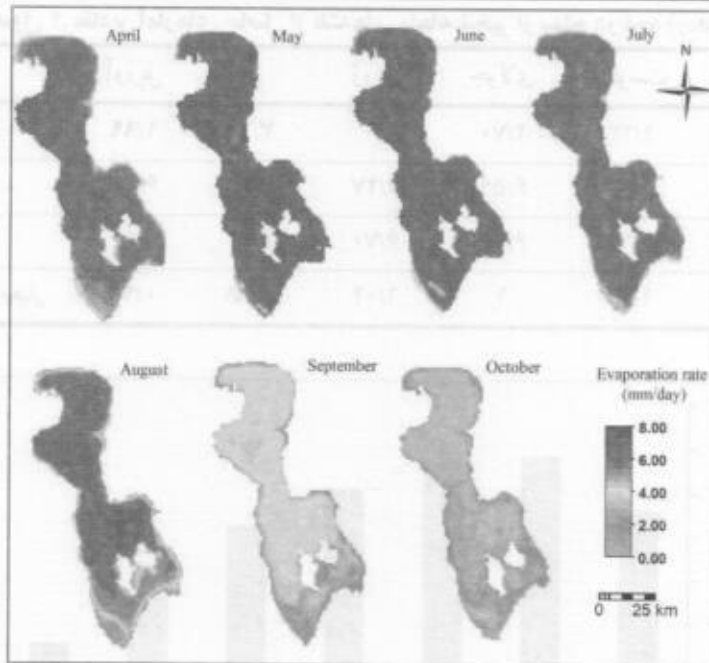
در این تحقیق، مدل سازی تبخیر و شوری در دریاچه های شور با لحاظ کردن تغییرات زمانی و مکانی مدنظر قرار گرفت. همچنین دریاچه ارومیه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مدل های توسعه داده شده برای دریاچه های شور، برای شرایط این دریاچه اجرا شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام اول نرخ تبخیر روزانه از سطح دریاچه در قالب توسعه مدل SDDE به صورت توزیعی با استفاده از روش بیلان انرژی و بهره گیری توأم از داده های سنجش از دور و اندازه گیری های زمینی برآورد شد. پس از اعتبارسنجی نتایج، تغییرات زمانی- مکانی نرخ تبخیر دریاچه ارومیه مورد بحث قرار گرفت. در مرحله بعد مدل دینامیکی - مکانی برای شبیه سازی سیستم بیلان آب، انرژی و نمک (WESB) در یک دریاچه شور با در نظر گرفتن برهم کنش متغیرهای هواشناسی و ویژگی های کمی- کیفی و ژئوشیمیایی دریاچه و لحاظ نمودن توزیع مکانی متغیرها توسعه داده می شود. این مرحله با استفاده از روش تحلیل مکانی- دینامیکی سیستم (SSD) (Simonovic (2004) و Ahmad and) استفاده از GIS در تحلیل تغییرات مکانی متغیرهای کیفیت آب و هواشناسی و تعیین نواحی همگن دریاچه از نظر شوری و نرخ تبخیر انجام گرفت. سپس مدل برای شبیه سازی شرایط دریاچه ارومیه طی یک دوره ۱۴ ماهه (آگوست ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰) به کار رفته و نتایج شبیه سازی کمیت و کیفیت آب با استفاده از داده ها و اندازه گیری های صورت گرفته از پارمترهای کیفیت آب دریاچه، اعتبارسنجی شد. مراحل اصلی توسعه مدل در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. مراحل اصلی مدل روزانه تبخیر وابسته به اثر شوری (SDDE) و مدل بیلان آب، انرژی و نمک دریاچه (WESB)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پس از استخراج لایه‌های مبنایی مورد استفاده در معادله بیلان انرژی و تولید نقشه‌های کیفیت آب دریاچه با اجرای مدل تحلیل دینامیکی-مکانی سیستم، نقشه‌های تبخیر از سطح آب دریاچه برای ۵۵ روز بدون ابر در سال ۲۰۱۰ میلادی به‌دست آمد. سپس با میانگین‌گیری از نقشه‌های روزهای بدون ابر هر ماه نقشه‌های متوسط نرخ روزانه تبخیر در آن ماه به‌دست آمد (شکل ۲).



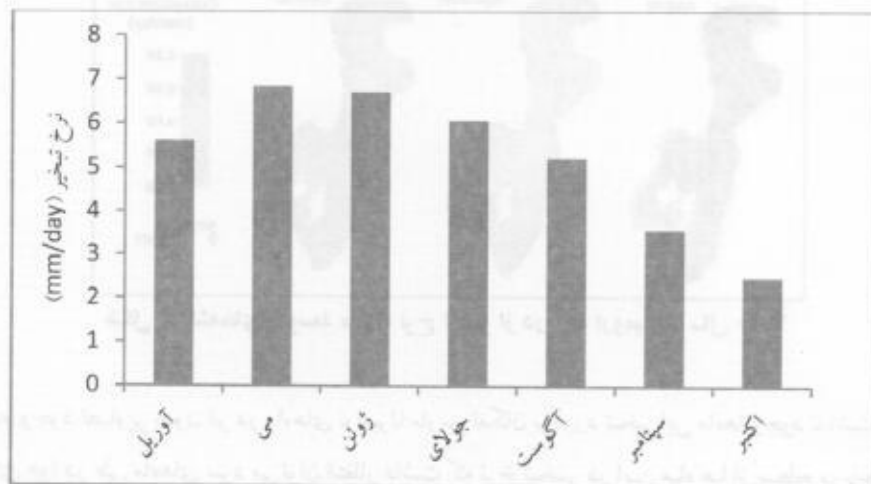
شکل ۲. نقشه‌های متوسط ماهانه نرخ تبخیر از دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰

با توجه به عدم وجود تصاویر بدون ابر در ماه‌های نوامبر تا مارس امکان برآورد تبخیر این ماه‌ها وجود نداشت. البته با توجه به کاهش دمای هوا در طی ماه‌های سرد می‌توان انتظار داشت که نرخ تبخیر در این ماه‌ها از سطح دریاچه در قیاس با ماه‌های گرم سال کم باشد. همانطور که در نقشه‌های ماهانه تبخیر مشخص شده است، نرخ تبخیر از سواحل به سمت نواحی داخلی دریاچه افزایش می‌یابد. محدوده تغییرات نرخ تبخیر از سطح دریاچه در حدود ۳ میلی‌متر در روز است. این روند بر روند تغییرات خالص انرژی تابشی دریافتی توسط دریاچه منطبق است. سواحل، مناطق اطراف میانگذر و جزایر نرخ تبخیر کمتری در قیاس با مناطق داخلی دریاچه دارند.

مقادیر آمارهای حاصل از نقشه‌های متوسط ماهانه در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین شکل (۳) نمودار تغییرات زمانی ارتفاع تبخیر از سطح دریاچه را در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ارتفاع متوسط تبخیر از سطح دریاچه از ماه آوریل تا می‌روند افزایش کمی دارد و تا ماه جولای تقریباً ثابت می‌ماند. از ماه جولای تا اکتبر طی یک روند کاهشی، بیش از ۵۰ درصد نرخ تبخیر کاهش می‌یابد. حداکثر نرخ تبخیر متوسط از سطح، در ماه می و در حدود ۶/۸ میلی‌متر در روز می‌باشد. بیشترین و کمترین میزان تغییرات مکانی نرخ تبخیر از سطح دریاچه به ترتیب در ماه‌های می و آگوست رخ می‌دهد. همچنین مجموع ارتفاع تبخیر طی ۷ ماه آوریل تا اکتبر در سال ۲۰۱۰ معادل ۱۰۹۳ میلی‌متر می‌باشد که در قیاس با برآوردهای قبلی نرخ تبخیر سالانه از سطح دریاچه (۱۳۵۹-۸۹۴) در حد وسط قرار دارد.

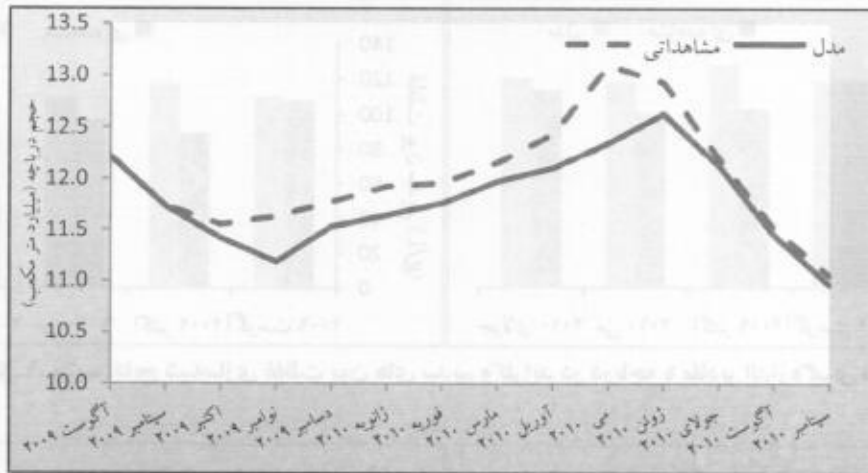
جدول ۱. مقادیر آمارهای حاصل از نقشه‌های ماهانه تبخیر از سطح دریاچه (mm/day)

سال	آماره	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر
۲۰۱۰	حداقل	۱/۹۹	۳/۷۰	۰	۲/۷۰	۱/۲۳	۰/۴۲	۰
	حداکثر	۶/۳۵	۷/۴۵	۷/۲۷	۶/۵۹	۵/۹۳	۴/۲۴	۳/۳
	میانگین	۵/۶۰	۶/۸۳	۶/۷۰	۶/۰۶	۵/۲۰	۳/۵۶	۲/۴۸
	انحراف معیار	۰/۹۹	۰/۸۸	۱/۰۴	۱	۱/۱۷	۰/۹۴	۰/۸۵



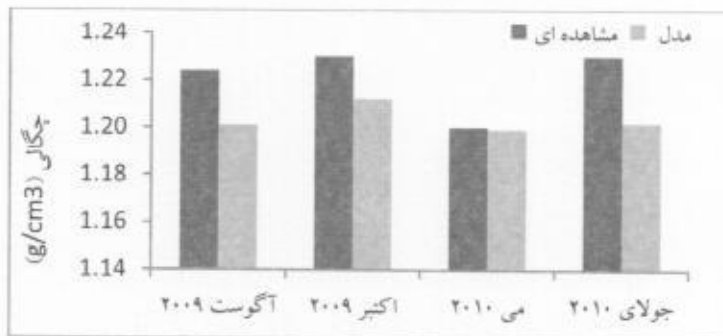
شکل ۳. تغییرات ماهانه ارتفاع تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در سال ۲۰۱۰

پس از استخراج نقشه‌های نرخ تبخیر ماهانه از سطح آب دریاچه، در ادامه به منظور شبیه‌سازی دینامیک اثرات متقابل متغیرهای هواشناسی و کمیت و کیفی آب و نمک دریاچه، مدل جامع بیلان آب، انرژی و نمک دریاچه توسعه داده شده و برای شرایط دریاچه ارومیه طی سال آبی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی حجم دریاچه با رفتار مرجع متغیر حجم آب، که بر اساس داده‌های تراز سطح آب و رابطه تراز-حجم دریاچه (Sima and Tajrishy (2013) در دوره مورد مطالعه به دست آمده است در شکل (۴) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دوره زمانی اکتبر ۲۰۰۹ تا ژوئن ۲۰۱۰ حجم آب دریاچه کمتر از میزان واقعی برآورد شده است. در حالیکه در سایر ماه‌ها حجم دریاچه با اختلاف کمی از مقادیر واقعی شبیه‌سازی شده است. دست کم برآورد کردن حجم دریاچه در ماه‌های سرد و مرطوب می‌تواند به دو علت باشد: یکی دست کم برآورد کردن جریان‌ات ورودی دریاچه (مثلاً در اثر صرف‌نظر از جریان‌ات آب زیرزمینی) و یا بیش برآورد تبخیر به علت افزایش عدم قطعیت در برآورد متغیرهای اقلیمی دریاچه ناشی از کمبود تصاویر بدون ابر. بیشترین خطا در برآورد حجم دریاچه به ترتیب در می ۲۰۱۰ و نوامبر ۲۰۰۹ رخ می‌دهد که به ترتیب منطبق بر بیک بارش‌های بهاره و پاییزه می‌باشند. در مجموع حداکثر خطای مدل شبیه‌سازی در برآورد حجم دریاچه معادل ۷۴۵ میلیون مترمکعب (۶ درصد) است.

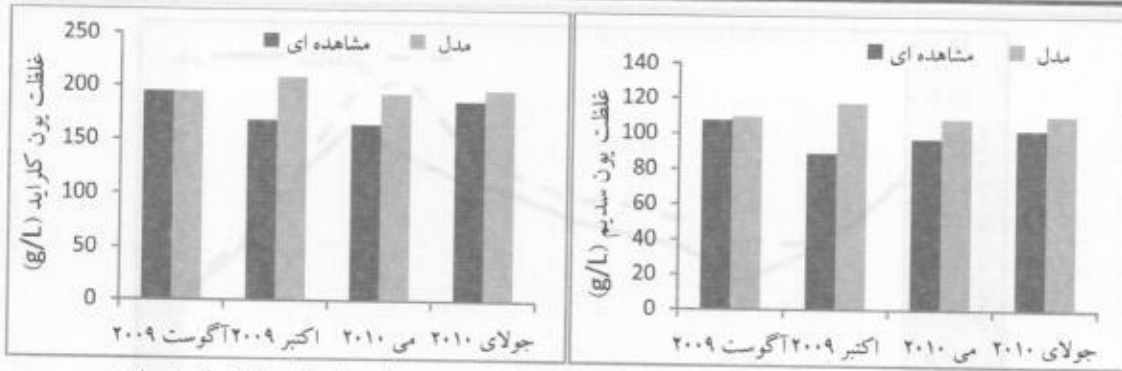


شکل ۴. مقایسه تغییرات حجم دریاچه ارومیه در دوره زمانی شبیه‌سازی

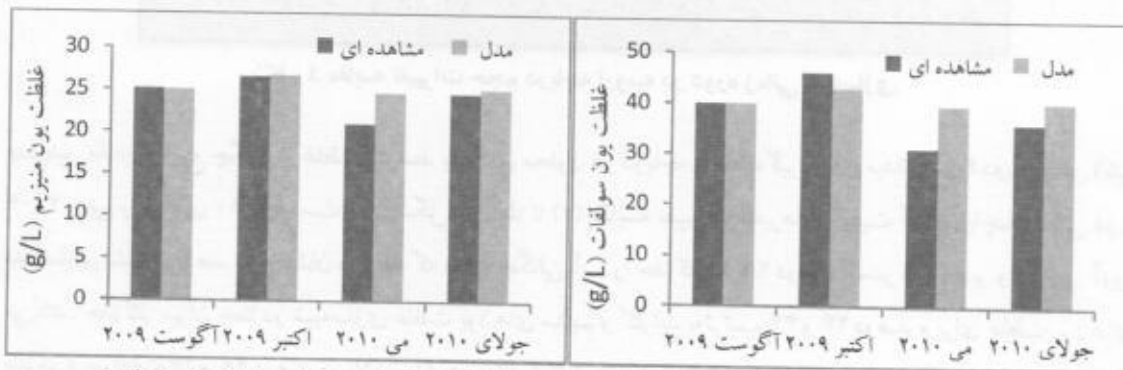
همچنین مقادیر مرجع چگالی و غلظت متوسط یون‌های محلول در دریاچه با اندازه‌گیری‌های میدانی در ۴ دوره زمانی اکتبر ۲۰۰۹ و می و جولای ۲۰۱۰ به دست آمد. شکل‌های (۵) تا (۷) مقایسه تغییرات متغیرهای کیفیت آب دریاچه را طی دوره مدل‌سازی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مدل، چگالی آب را حداکثر تا ۲/۴ درصد کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند. حداکثر میزان خطا در شبیه‌سازی غلظت یون‌های سدیم و کلراید به ترتیب ۳۲ و ۲۴ درصد و برای غلظت یون‌های منیزیم و سولفات ۱۷ و ۲۸ درصد می‌باشد. مدل در بیشتر اوقات غلظت یون‌ها را با تقریب مناسبی برآورد می‌کند. اما در اکتبر و می ۲۰۰۹ غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، بیش از مقادیر غلظت متوسط اندازه‌گیری شده در سطح دریاچه برآورد شده است که این امر می‌تواند ناشی از دست کم برآورد کردن حجم دریاچه در این زمان‌ها باشد. در مجموع نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی حجم، چگالی و غلظت املاح محلول می‌باشد.



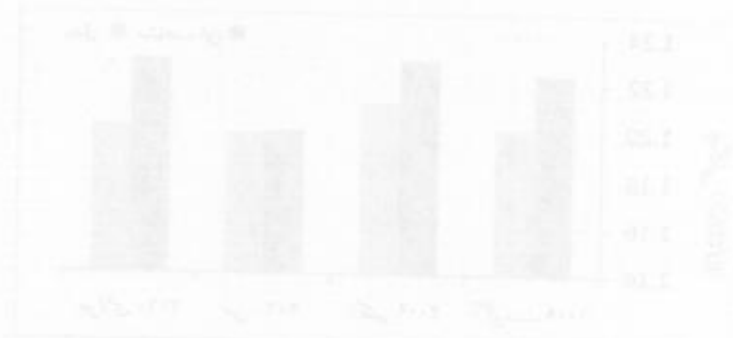
شکل ۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی چگالی آب دریاچه با مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۶. مقایسه نتایج شبیه‌سازی غلظت یون‌های سدیم و کلراید در دریاچه با مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی غلظت یون‌های منیزیم و سولفات در دریاچه با مقادیر اندازه‌گیری شده



مراجع

- [۱] مهندسان مشاور آب نیرو. (۱۳۷۱). مطالعات مرحله دوم مقدماتی - بزرگراه شهید کلاتری واقع در دریاچه ارومیه.
- [۲] مهندسین مشاور یکم. (۱۳۸۳). مطالعه پیامدهای زیست محیطی، اثرات کمی و کیفی طرح‌های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه. جلد ۲، بیلان آبی دریاچه. شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی.
- [۳] مهندسین مشاور طرح نواندیشان. (۱۳۸۳). مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه، طرح آزادراه شهید کلاتری، گزارش مرحله دوم، جلد دوم اطلاعات محیطی پایه، بازنگری صفر.
- [۴] مهندسین مشاور صدرا. (۱۳۸۳). مطالعات هیدرولیک، هیدرودینامیک و زیست محیطی طرح آزادراه شهید کلاتری در دریاچه ارومیه، جلد اول و دوم، بازنگری صفر.
- [۵] باقری هارونی، م. ح. (۱۳۹۰). ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس حوضه‌ای، با تأکید بر میزان برداشت خالص آب زیر زمینی (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۶] جهانبانی، س. (۱۳۹۱). مقایسه روش‌های برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌های شور با استفاده از معادله بیلان انرژی (مطالعه موردی دریاچه ارومیه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [7] Yekom Consulting Engineers. (2002). Management Plan for the Lake Uromiyeh Ecosystem. In M. Moser (Ed.), EC-IIP Environmental Management Project for Lake Uromiyeh. Iran.
- [8] Ahmadzadeh Kokya, B., Ahmadzadeh Kokya, T. (2008). Proposing a formula for evaporation measurement from salt water resources, *Hydrological Processes*, 22, 2005-2012.
- [9] Dvorkin, Y., Lensky, N., Lyahovsky, V., Gertman, I., and Gavrieli, I. (2006). The Necessity of Salt Precipitation for the Dead Sea Modeling. Paper presented at the American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, California, USA.
- [10] Loving, B. L., Waddell, K. M., and Miller, C. W. (2000). Water and salt balance of Great Salt Lake, Utah, and simulation of water and salt movement through the causeway, 1987-1998. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4221 (pp. 14): USGS.
- [11] Krumgalz, B. S. (2001). Application of the Pitzer ion interaction model to natural hypersaline brines *Journal of Molecular Liquids*, 91, 3-19.
- [12] Benduhn, F., and Renard, P. (2004). A dynamic model of the Aral Sea water and salt balance. *Journal of Marine Systems*, 47(1-4), 35-50.
- [13] Hacini, M., Kherici, N., and Oelkers, E. H. (2009). Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6), 1583-1597.
- [14] Gamazo, P., Bea, S. A., Saaltink, M. W., Carrera, J., and Ayora, C. (2011). Modeling the interaction between evaporation and chemical composition in a natural saline system. *Journal of Hydrology*, 401(3-4), 154-164.
- [15] Ahmad, S., and Simonovic, S. (2004). Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), 331-340.
- [16] Sima, S., and Tajrishy, M. (2013). Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*, 39(1), 90-99.

Abstract

Evaporation which is the most important water output from terminal lakes, plays a significant role in the lakes water balance. It can also vary chemical compositions of lakes. This study aims at providing an accurate estimate of the evaporation rate from Urmia Lake. To accomplish this task, the SDDE (Salinity Dependent Daily Evaporation) model was developed based on the energy balance model and conjunctive use of remote sensing data and GIS techniques. Evaporation maps of Urmia Lake were calculated using the SDDE model during ۲۰۱۰. Then to model the interactions between the evaporation rate and salinity of the lake, the WESB (Water Energy and Salt Balance) model was developed based on the Spatial System Dynamic (SSD) approach. WESB consists of the water and salt balance equations, thermodynamic equations and the energy balance model. By applying the WESB model for Urmia Lake during the 2009-2010 water year, the volume, density and ionic concentrations of the lake were simulated. Results revealed that the simulated values of water quantity and quality variables are in acceptable agreement with the insitu data.

Key Words: Urmia Lake, Evaporation, Salinity, Remote Sensing, Spatial distribution, System Dynamics