

بسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش مهندسی محیط زیست

عنوان

برآورد میزان تبخیر، شوری، ترسیب و انحلال نمک بر روی دریاچه ارومیه

نگارنده

احمد حسین زاده

استاد راهنما

دکتر مسعود تجریشی

اسفند ۱۴۰۱

تقدیم

تقدیم به پدر، مادر و دو خواهر مهربانم که همواره حامی و پشتیبان من بوده‌اند و بدون لطف و حمایت ایشان عبور از مشکلات زندگی دشوار می‌گشت.

تقدیم به تمام اساتید و معلمانی که در تعلیم بنده تلاش نموده و تشویق‌های ایشان سبب انرژی مضاعف در وجود من گردیده‌است.

تقدیر و تشکر

در ابتدا جای دارد که از استاد گرانقدر خویش دکتر مسعود تجریشی به پاس تمام راهنمایی‌ها و زحماتی که در قبال بنده کشیده‌اند قدردانی نمایم. از اولین و مهربان‌ترین آموزگاران پدر و مادر هستند؛ از ایشان سپاس گزارم که همیشه برای بنده تکیه‌گاه امن و مطمئنی بوده‌اند و در سایه رحمتشان طی مسیر کرده‌ام. بنابر قول شاعر بزرگ سعدی شیرازی، دوستان نقش مهمی در تعیین شخصیت و آینده انسان‌ها دارند؛ از این رو، از تمام دوستانی که در زندگی بنده نقش داشته‌اند و با حضور و مشورت‌هایشان سبب پیشرفت من گردیده‌اند سپاس گزارم. همچنین در پایان، از طرح ملی دریاچه ارومیه که حامی این پژوهش بوده کمال تشکر به عمل می‌آید.

چکیده

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه داخلی و فوق‌اشباع نمکی ایران و همچنین یک اکوسیستم ارزشمند آبی می‌باشد. در دهه‌های اخیر، افزایش بی‌رویه طرح‌های توسعه و بهره‌برداری از منابع آب این حوضه، سبب کاهش جریانات ورودی به دریاچه، کاهش سطح تراز آب دریاچه و به‌وجود آمدن مشکلات زیست محیطی و اقتصادی متعددی شده‌است. این تنش‌ها باعث گردیده‌است که شوری دریاچه در سال‌های اخیر از ۴۰۰ گرم بر لیتر عبور کرده و رسوبات نمکی در کف و حاشیه دریاچه آشکار شوند. شوری، تبخیر، ترسیب و انحلال نمک با یک‌دیگر در ارتباط می‌باشند و بررسی این عوامل و ارتباط آن‌ها اطلاعات سودمندی درباره‌ی این اکوسیستم و نحوه‌ی مدیریت آن ارائه خواهد نمود. این پژوهش به برآورد میزان تبخیر و اثر آن بر تغییرات مکانی شوری (چگالی)، ترسیب و انحلال نمک دریاچه ارومیه با استفاده از فناوری سنجش از دور و داده‌های میدانی، پرداخته‌است. بدین منظور، ابتدا به برآورد میزان چگالی و شوری سطح آب با استفاده از فناوری سنجش از دور پرداخته شده‌است. پس از بدست آمدن نحوه توزیع چگالی، میزان تبخیر با استفاده از معادله پنمن اصلاح شده با دو فرض مهم بودن میزان انرژی گرمایی ذخیره شده و ناچیز بودن اثر آن برآورد گردیده‌است. نتایج حاکی از عدم اهمیت میزان انرژی گرمایی ذخیره شده در تخمین میزان تبخیر بر روی دریاچه ارومیه بود. همچنین، طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی میزان حداکثر نرخ تبخیر روزانه در حدود ۶/۵ میلی‌متر و میزان تبخیر سالانه بین مقادیر ۹۰۹ تا ۹۷۹ میلی‌متر برآورد گردیده‌است. در گام آخر از پژوهش به شبیه‌سازی میزان ترسیب و انحلال نمک با استفاده از تئوری هیدرولیک دولایه و معادلات ژئوشیمی پرداخته شده‌است. نتایج بیان‌گر ارتباط قوی میان ترسیب و انحلال نمک با میزان تبخیر و آب سطحی ورودی بود. در زمان‌هایی که میزان حجم آب سطحی ورودی از میزان حجم تبخیر فزونی می‌یابد، کانی‌هالیت در حالت تحت اشباع قرار گرفته و انحلال نمک صورت می‌گیرد و در زمان‌هایی که عامل تبخیر غالب می‌گردد، کانی‌هالیت در حالت فوق اشباع قرار گرفته و ترسیب نمک رخ می‌دهد. شبیه‌سازی نشان داد که از تاریخ ۲۰۱۳/۰۵/۰۱ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ در قسمت شمالی دریاچه ۹۴ سانتی‌متر نمک ترسیب و در قسمت جنوبی دریاچه ۵۳ سانتی‌متر نمک انحلال یافته‌است.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، تبخیر، شوری، چگالی، سنجش از دور، ترسیب و انحلال نمک

فهرست مطالب

چکیده	۵
فهرست مطالب	و
فهرست شکل ها	ل
فهرست جدول ها	ف
۱ فصل اول: مقدمه و بیان مساله	۱
۱-۱ تبخیر	۲
۱-۲ شوری و چگالی	۲
۱-۳ ترسیب نمک	۳
۱-۴ ضرورت انجام تحقیق	۴
۱-۵ اهداف تحقیق	۵
۱-۶ سوالات تحقیق	۵
۱-۷ روند انجام پژوهش	۶
۱-۸ فرضیات تحقیق	۷
۱-۸-۱ فرضیات بخش برآورد میزان شوری و چگالی سطح آب	۷
۱-۸-۲ فرضیات بخش برآورد میزان تبخیر	۷
۱-۸-۳ فرضیات بخش برآورد میزان ترسیب و انحلال نمک	۸
۲ فصل دوم: مرور ادبیات فنی	۹
۲-۱ تبخیر	۹
۲-۲ شوری	۱۲
۲-۳ چگالی	۱۴
۲-۴ ترسیب نمک	۱۶
۲-۵ جمع بندی	۱۷
۳ فصل سوم: منطقه مورد مطالعه	۱۸
۳-۱ نگاهی به سیر تکاملی تیپ آب دریاچه ارومیه	۱۹
۳-۲ داده های مورد نیاز جهت انجام پژوهش	۲۱

۴	فصل چهارم: شیوهی انجام پژوهش و نتایج	۲۳
۴-۱	قسمت اول: برآورد شوری و چگالی	۲۳
۴-۱-۱	داده‌های میدانی و ماهواره‌ای	۲۳
۴-۱-۱-۱	ماهواره‌ی سنتینل-۲	۲۵
۴-۱-۱-۲	سنجنده مادیس	۲۶
۴-۱-۲	الگوریتم‌های برآورد شوری و چگالی	۲۷
۴-۱-۲-۱	رگرسیون خطی چندگانه	۲۷
۴-۱-۲-۲	شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)	۲۷
۴-۱-۲-۳	مدل کیوبیست (Cubist model)	۳۰
۴-۱-۲-۴	مدل XGBoost	۳۳
۴-۱-۲-۴-۱	گروه‌های درخت تصمیم	۳۴
۴-۱-۲-۴-۲	تقویت درخت	۳۵
۴-۱-۲-۴-۳	پیچیدگی مدل	۳۶
۴-۱-۲-۵	الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)	۳۶
۴-۱-۳	شیوه انجام پژوهش	۳۹
۴-۱-۳-۱	استخراج مرز آبی دریاچه ارومیه	۳۹
۴-۱-۳-۱-۱	شاخص NDWI	۴۰
۴-۱-۳-۱-۲	شاخص MNDWI	۴۰
۴-۱-۳-۱-۳	شاخص SAVI	۴۱
۴-۱-۳-۱-۴	شاخص SWI	۴۱
۴-۱-۳-۱-۵	شاخص BSI	۴۲
۴-۱-۳-۲	اعتبارسنجی نتایج استخراج پهنه‌ی آبی	۴۲
۴-۱-۳-۳	برآورد میزان شوری و چگالی با استفاده از روش‌های آموزش ماشین	۴۲
۴-۱-۳-۴	معیارهای ارزیابی:	۴۳

۴۴	۴-۱-۴ نتایج
۴۴	۴-۱-۴-۱ بررسی عملکرد الگوریتم‌ها در تخمین شوری
۴۵	۴-۱-۴-۲ چگالی
۴۵	۴-۱-۴-۲-۱ بررسی عملکرد الگوریتم‌ها
۴۶	۴-۱-۴-۲-۲ نقشه‌های توزیع مکانی چگالی سنجنده سنتینل-۲
۴۷	۴-۱-۴-۲-۳ نقشه‌های توزیع مکانی چگالی مادیس ۵۰۰ متر
۴۹	۴-۱-۴-۲-۴ نقشه‌های توزیع مکانی چگالی مادیس ۱۰۰۰ متر
۵۱	۴-۱-۴-۲-۵ مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی چگالی مادیس ۵۰۰ متر و ۱۰۰۰
۵۵	۴-۱-۴-۲-۶ جمع بندی
۵۵	۴-۲ قسمت دوم: برآورد تبخیر
۵۵	۴-۲-۱ داده‌های مورد استفاده
۵۵	۴-۲-۱-۱ داده‌های کیفی آب دریاچه
۵۶	۴-۲-۱-۲ داده‌های هواشناسی
۵۷	۴-۲-۱-۲-۱ اعتبار سنجی داده‌های هواشناسی ERA5
۶۱	۴-۲-۲ برآورد تبخیر
۶۱	۴-۲-۲-۱ الگوریتم‌های مورد استفاده در تولید سری‌های زمانی مساحت دریاچه
۶۱	۴-۲-۲-۱-۱ روش آستانه گذاری Otsu
۶۳	۴-۲-۲-۱-۲ روش k-means
۶۵	۴-۲-۲-۲ تولید سری‌های زمانی مساحت دریاچه
۶۸	۴-۲-۲-۳ تولید سری‌های زمانی دمای سطح آب
۶۸	۴-۲-۲-۴ محاسبه سری‌های زمانی سرعت تبخیر با استفاده از LTEM
۷۲	۴-۲-۲-۵ ترم بیلان انرژی دریاچه
۷۵	۴-۲-۲-۶ مدل Hostetler
۷۷	۴-۲-۲-۷ شبیه سازی پروفایل دمای دریاچه و تبخیر

- ۷۹..... ۴-۲-۲-۸ محاسبه تبخیر حجمی
- ۷۹..... ۴-۲-۲-۹ گسسته‌سازی معادله Hostetler
- ۸۰..... ۴-۲-۳ نتایج
- ۸۰..... ۴-۲-۳-۱ بررسی استخراج سری زمانی مساحت و دمای سطح آب دریاچه
- ۸۲..... ۴-۲-۳-۲ نتایج شبیه‌سازی پروفیل دمایی آب
- ۸۵..... ۴-۲-۳-۳ نتایج تخمین میزان تبخیر
- ۸۵..... ۴-۲-۳-۳-۱ برآورد ضرایب فعالیت آب
- ۸۶..... ۴-۲-۳-۳-۲ برآورد تبخیر از تاریخ ۲۰۱۶/۹/۵ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ با فرض $G=0$ و $G \neq 0$
- ۸۸..... ۴-۲-۳-۳-۳ برآورد میزان تبخیر از ۲۰۱۳/۵/۱ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ با فرض $G=0$
- ۹۰..... ۴-۲-۳-۴ عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های الگوریتم
- ۹۱..... ۴-۲-۴ جمع بندی
- ۹۲..... ۴-۳ قسمت سوم: برآورد میزان رسوب و انحلال نمک
- ۹۲..... ۴-۳-۱ داده‌های مورد استفاده
- ۹۳..... ۴-۳-۲ شوری
- ۹۴..... ۴-۳-۳ مروری بر کانی‌های تبخیری
- ۹۵..... ۴-۳-۴ حالت تعادل
- ۹۷..... ۴-۳-۴-۱ توصیف ترمودینامیکی تعادل
- ۹۷..... ۴-۳-۴-۱-۱ فازها و گونه‌ها
- ۹۷..... ۴-۳-۴-۱-۲ اجزاء و اساس (Components and the Basis)
- ۹۸..... ۴-۳-۴-۱-۳ پتانسیل‌های شیمیایی، فعالیت‌ها و فوگاسیته‌ها
- ۱۰۲..... ۴-۳-۴-۲ ثابت تعادل
- ۱۰۲..... ۴-۳-۵ انتخاب اساس
- ۱۰۳..... ۴-۳-۶ معادلات حاکم بر تعادل سیستم ژئوشیمیایی
- ۱۰۳..... ۴-۳-۶-۱ واکنش‌های مستقل
- ۱۰۴..... ۴-۳-۶-۲ معادلات کنش جرمی

- ۳-۶-۳-۴ معادلات موازنه جرم ۱۰۵
- ۴-۶-۳-۴ تعادل شارژ ۱۰۵
- ۵-۶-۳-۴ حالت‌های اشباع مواد معدنی ۱۰۶
- ۶-۶-۳-۴ فوگاسیته‌های گازی ۱۰۷
- ۷-۶-۳-۴ فشار جزئی ۱۰۷
- ۷-۳-۴ ضرایب فعالیت ۱۰۷
- ۱-۷-۳-۴ معادلات پیتزر ۱۱۰
- ۸-۳-۴ سینتیک انحلال و ترسیب ۱۱۰
- ۱-۸-۳-۴ مقادیر ضریب پیش‌نمایی (A) و انرژی فعال‌سازی (E) برای نمک‌های منتخب ۱۱۴
- ۲-۸-۳-۴ چالش‌های استفاده از سینتیک انحلال و ترسیب ۱۱۵
- ۹-۳-۴ مدل هیدرودینامیکی ۱۱۶
- ۱-۹-۳-۴ برآورد میزان دبی انتقالی بین قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ۱۱۷
- ۲-۹-۳-۴ تبادل جریان دو طرفه از طریق دهانه ۱۱۸
- ۱۰-۳-۴ نحوه پیاده‌سازی معادلات حاکم بر مساله ۱۲۰
- ۱۱-۳-۴ نتایج ۱۲۲
- ۱۲-۳-۴ جمع‌بندی ۱۳۷
- ۵ فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۳۸
- ۱-۵ جمع‌بندی ۱۳۸
- ۲-۵ پیشنهادات ۱۳۹
- مراجع ۱۴۱
- پیوست ۱: سیر تکاملی آب‌نمک دریاچه ارومیه ۱۵۸
- پیوست ۲: نتایج اعتبارسنجی شوری و چگالی ۱۶۰
- پیوست ۳: معادلات پیتزر ۱۶۲
- پیوست ۴: مقایسه داده‌های کیفی دریاچه ارومیه ۱۶۶

پیوست ۵: نمایش سه بعدی تغییرات بستر دریاچه ارومیه ۱۶۸

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- برآورد ۲۰۰ نمونه چگالی بر حسب معادله ۱۰ پیشنهاد شده توسط مطالعه [۶۶] و مقایسه آن با مقادیر مشاهداتی. داده‌های میدانی با گام زمانی ماهانه به مدت یک سال (۲۰۱۶/۰۲ تا ۲۰۱۷/۰۱) در ۶ نقطه از دریاچه و در اعماق مختلف برداشت گردیده‌اند. ۵
- شکل ۱-۲- فلوچارت فصل چهارم شیوه انجام پژوهش و نتایج. ۷
- شکل ۱-۳- تصویر چگالی سطح دریا تولید شده توسط Aquarius (V5) در ژوئن ۲۰۱۵ [۱۳۰]. ۱۵
- شکل ۱-۴- دریاچه ارومیه. ۱۹
- شکل ۲-۱- نقشه ساده شده زمین شناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. سنین چینه شناسی بر اساس نقشه‌های زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تبریز - پلدشت و ارومیه [۱۴۸], [۱۴۷], [۱۴۳]. ۲۰
- شکل ۱-۲- مقادیر چگالی برداشت شده از تاریخ ۲۰۱۹/۰۴/۸ تا ۲۰۱۹/۰۴/۱۳، شکل (b) نقاط برداشت داده‌های چگالی و شوری در ماه می و جولای ۲۰۲۱، شکل (c) مقادیر داده‌های شوری برداشت شده در تاریخ ۲۰۱۹/۰۷/۱۶، شکل (d) نقاط برداشت داده‌های شوری و چگالی از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۱/۳۱ به صورت ماهانه. (نقاط به شکل پرچم نشان دهنده‌ی برداشت هر دو نوع داده شوری و چگالی می‌باشد). ۲۴
- شکل ۲-۳- معماری شبکه عصبی. ۲۸
- شکل ۳-۴- واحدهای پنهان ترکیبی خطی از متغیرها هستند که توسط یک تابع سیگموئیدی تغییر یافته‌اند. خروجی با ترکیب خطی واحدهای پنهان مدل‌سازی می‌شود [۱۶۴]. ۲۹
- شکل ۴-۴- باقیمانده‌های SVM در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده. نمادهای نمودار، بردارهای پشتیبان (به صورت دایره‌های خاکستری رنگی نشان داده شده‌اند) و سایر نمونه‌ها (صلیب‌های قرمز) را نشان می‌دهند. خطوط افقی $\pm 0.1\%$ هستند [۱۶۴]. ۳۸
- شکل ۵-۴- (a) منحنی‌های طیفی انواع مختلف پوشش زمین و (b) منحنی‌های طیفی انواع مختلف آب [۱۸۷]. ۴۲
- شکل ۶-۴- نتایج اعتبارسنجی شوری مدل‌های اعمال شده بر روی سنجنده‌های MODIS با رزولوشن ۵۰۰ متر (پسوند ۵۰۰)، MODIS با رزولوشن ۱۰۰۰ متر (پسوند ۱۰۰۰) و سنتینل-۲ (پسوند Sen2)، شکل (a) نمودار معیار R^2 ، شکل (b) نمودار معیار RMSE و شکل (c) نمودار معیار MAE. ۴۵
- شکل ۷-۴- نتایج اعتبارسنجی چگالی و مدل‌های اعمال شده بر روی سنجنده‌های MODIS با رزولوشن ۵۰۰ متر (پسوند ۵۰۰)، MODIS با رزولوشن ۱۰۰۰ متر (پسوند ۱۰۰۰) و سنتینل-۲ (پسوند Sen2). ۴۶
- شکل ۸-۴- نقشه توزیع چگالی دریاچه ارومیه با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی و ماهواره سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۹/۰۳/۲۳، ۲۰۱۹/۰۴/۱۲ و ۲۰۱۹/۰۵/۱۲. ۴۷
- شکل ۹-۴- نقشه‌های توزیع چگالی بدست آمده از مادیس ۵۰۰ متر برای دو الگوریتم کیوبیست (CUB) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۳۱. ۴۸

- شکل ۴-۱۰- نقشه‌های توزیع چگالی ماهانه بدست آمده از مادیس ۱۰۰۰ متر برای دو الگوریتم شبکه عصبی (NNET) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۳۱. ۵۰
- شکل ۴-۱۱- مقایسه نقشه‌های برتر توزیع چگالی دریاچه ارومیه بدست آمده از مادیس ۵۰۰ متر (با پسوند m ۵۰۰) و مادیس ۱۰۰۰ متر (با پسوند m ۱۰۰۰) از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۳۱. ۵۲
- شکل ۴-۱۲- مقایسه نتایج بدست آمده از تخمین چگالی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و نتایج اندازه‌گیری شده از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۳۱ (نمودارهای ستون سمت راست) و نمودارهای هیستریزس چگالی دریاچه، (نمودارهای ستون سمت چپ؛ حجم دریاچه براساس سطح آب و بسیمتری سال ۱۳۹۲ بدست آمده‌است). ۵۳
- شکل ۴-۱۳- مقایسه میانگین چگالی بدست آمده از ماهواره مادیس ۱۰۰۰ متری (شکل a) و مقدار جریانات سطحی ورودی به دریاچه (شکل b) از تاریخ ۲۰۱۶/۲/۱ تا ۲۰۱۷/۱/۳۱. ۵۴
- شکل ۴-۱۴- نقاط برداشت داده‌های کیفی دریاچه ارومیه. دایره‌های سبز رنگ توسط شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، مثلث صورتی توسط شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و پرچم‌های مشکی توسط شرکت آب و نیرو برداشت شده‌اند. ۵۶
- شکل ۴-۱۵- مشخصات مکانی دو ایستگاه هواشناسی SWP و DWP واقع بر روی دریاچه ارومیه (شکل سمت راست). مشخصات فیزیکی دو ایستگاه هواشناسی (شکل سمت چپ). ۵۷
- شکل ۴-۱۶- نتایج اعتبارسنجی داده‌های دمای هوای بدست آمده به‌وسیله‌ی سنجش از دور (ERA5) و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی DWP (شکل a و b) و ایستگاه هواشناسی SWP (شکل c و d). ۵۸
- شکل ۴-۱۷- نتایج اعتبارسنجی داده‌های دمای نقطه‌ی شبنم بدست آمده به‌وسیله‌ی سنجش از دور (ERA5) و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی DWP (شکل a و b) و ایستگاه هواشناسی SWP (شکل c و d). فضاهاى خالی در نمودار سری زمانی بیانگر عدم ثبت داده در ایستگاه‌های زم ۵۹
- شکل ۴-۱۸- نتایج اعتبارسنجی داده‌های تابش طول موج کوتاه بدست آمده به‌وسیله‌ی سنجش از دور (ERA5) و CFSV2 و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی DWP (شکل a و b) و ایستگاه هواشناسی SWP (شکل c و d). ۶۰
- شکل ۴-۱۹- نتایج اعتبارسنجی داده‌های سرعت باد بدست آمده به‌وسیله‌ی سنجش از دور (ERA5) و مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی DWP (شکل a و b) و ایستگاه هواشناسی SWP (شکل c و d). ۶۱
- شکل ۴-۲۰- مکان نمونه در انتخاب آستانه Otsu: (الف) هستوگرام دو قله و (ب) هستوگرام تک قله [۱۹۲]. ۶۳
- شکل ۴-۲۱- فلو چارت الگوریتم k-means. ۶۴

- شکل ۴-۲۲- فلوچارت برای تولید منطقه آب از محصول بازتاب سطحی MODIS. "کنار گذاشتن" به این معنی است که تصویر رد شده و مساحت از طریق درون یابی محاسبه می شود. اعداد گام های پردازش را نشان می دهند. رنگ های سبز و آبی به ترتیب ورودی و خروجی را نشان می دهند. ۶۶
- شکل ۴-۲۳- فرآیند بهبود تصویر منطقه آب برای تصاویر آلوده MODIS ماهواره Terra جمع آوری شده در ۱ ژانویه ۲۰۰۵ برای دریاچه مید واقع ایالات متحده آمریکا [۱۹]. ۶۷
- شکل ۴-۲۴- محاسبه طول موج گاه مخزن برای یک جهت باد معین [۳۹]. ۷۱
- شکل ۴-۲۵- شماتیک مدل دمای دریاچه و تبخیر (LTEM) که شامل شار انرژی در سطح آب و انتقال انرژی در بدنه آبی است. PAR و NIR به ترتیب تابش فعال فتوسنتزی و تابش مادون قرمز نزدیک را نشان می دهند. ۷۲
- شکل ۴-۲۶- مسیر روزانه ظاهری خورشید در سراسر آسمان از طلوع تا غروب خورشید [۲۰۸]. ۷۳
- شکل ۴-۲۷- فلوچارت برای محاسبه مشخصات دمای آب از $t-1$ تا t و میزان ذخیره گرما و نرخ تبخیر. رنگ های سبز و آبی به ترتیب ورودی و خروجی را نشان می دهند. ۷۸
- شکل ۴-۲۸- (تصویر a) سری زمانی مساحت و حجم دریاچه (بسیمتری ثابت است؛ بسیمتری مورد استفاده برداشت گردیده در سال ۱۳۹۲)، (تصویر b) دمای سطح آب دریاچه (WST) به صورت ماهانه از تاریخ ۲۰۱۳/۳/۴ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱. ۸۱
- شکل ۴-۲۹- تصاویر بهبود یافته دریاچه ارومیه در تاریخ های ۲۰۱۴/۲/۱۰ (تصویر a) و ۲۰۱۶/۱۱/۰۸ (تصویر c) با درصد آلودگی به ترتیب ۴۶٪ و ۵۲٪. تصاویر b و d نشان دهنده تصاویر بهبود یافته به ترتیب در تاریخ های ذکر شده می باشد. ۸۲
- شکل ۴-۳۰- (تصویر a) پروفیل شبیه سازی شده پروفیل دمای آب، (تصویر b) مقایسه دمای سطح آب شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در ایستگاه DWP، (تصویر c) پروفیل دمای آب اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی DWP، (تصویر d) مقایسه نتایج پروفیل دمای شبیه سازی شده در برابر داده های میدانی. ۸۴
- شکل ۴-۳۱- دمای سطح آب بدست آمده از سنجنده ی لندست ۸ در تاریخ ۲۰۱۶/۱۲/۱۶. ۸۵
- شکل ۴-۳۲- (شکل a) مقادیر ضریب فعالیت آب بدست آمده توسط نرم افزار PHREEQC به صورت ماهانه از تاریخ ۲۰۱۳/۵/۱ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱، (شکل b) مقادیر ضریب فعالیت بدست آمده در مقابل چگالی آب اندازه گیری شده. ۸۶
- شکل ۴-۳۳- برآورد میزان تبخیر با در نظر گرفتن میزان انرژی ذخیره شده ($G!=0$) و با فرض ناچیز بودن میزان انرژی ذخیره شده ($G=0$). (در شکل a) مقادیر تبخیر روزانه از سطح دریاچه ارومیه از تاریخ ۲۰۱۶/۹/۵ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ و در شکل b) مقادیر میزان تبخیر به صورت ماهانه با در نظر گرفتن دو حالت ($G!=0$) و ($G=0$). ۸۷

- شکل ۴-۳۴- مقادیر میزان تبخیر از سطح دریاچه ارومیه به صورت سالانه در سال ۲۰۱۷ با در نظر گرفتن ذخیره گرمایی ($G \neq 0$) و با فرض ناچیز بودن میزان ذخیره گرمایی ($G = 0$) ۸۸
- شکل ۴-۳۵- نتایج برآورد میزان تبخیر از سطح دریاچه ارومیه با فرض ذخیره گرمایی ناچیز از تاریخ ۲۰۱۳/۵/۱ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ (در شکل a) مقادیر تبخیر به صورت روزانه و شکل b) مقادیر تبخیر به صورت ماهانه نمایش داده شده است ۸۹
- شکل ۴-۳۶- مقادیر میزان تبخیر از سطح دریاچه ارومیه به صورت سالانه (سال ۲۰۱۳ از ماه پنجم شروع شده و ۴ ماه اول برآورد نشده است) ۹۰
- شکل ۴-۳۷- نمایش موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، هواشناسی سازمان آب منطقه‌ای (مثلث صورتی رنگ)، سازمان هواشناسی (ستاره سبز رنگ) و رودخانه‌های مهم ورودی به دریاچه ارومیه ۹۳
- شکل ۴-۳۸- قدرت یونی آب دریا در حال تبخیر کارائیب، بر اساس داده‌های [۲۳۲] اخذ شده از [۲۳۰] ۹۵
- شکل ۴-۳۹- تغییر در انرژی آزاد G با پیشرفت واکنش برای واکنش معادله (۴-۱۰۸). نقطه تعادل واکنش مقدار حداقل در امتداد منحنی انرژی آزاد است ۹۹
- شکل ۴-۴۰- انواع روش‌های معمول در تخمین ضرایب فعالیت و محدوده عملکرد آن‌ها ۱۰۹
- شکل ۴-۴۱- دو مینیمم واکنش دهنده‌ها و محصولات هستند و به طور کلی نسبتاً به راحتی تعیین می‌شوند. حداکثر به عنوان کمپلکس فعال یا کمپلکس حالت گذار شناخته می‌شود و به طور کلی نمی‌توان آن را تا حد زیادی با اطمینان تعیین کرد. در چنین نمودارهایی ΔG_a نشان دهنده انرژی لازم برای انجام واکنش و ΔG_r مقدار انرژی آزاد شده یا گرفته شده (گرماده یا گرماگیر بودن) است ۱۱۲
- شکل ۴-۴۲- محورهای در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی ۱۱۶
- شکل ۴-۴۳- تغییر ارتفاع سطح آب بوسیله باد در دریاچه ۱۱۸
- شکل ۴-۴۴- جریان دو لایه در دهانه ۱۱۹
- شکل ۴-۴۵- فلوچارت نحوه پیاده‌سازی روابط حاکم بر مساله و محاسبه‌ی میزان ترسیب و انحلال نمک (شماره‌های درون دایره‌های آبی رنگ مرتبط با توضیحات ارائه شده می‌باشد) ۱۲۲
- شکل ۴-۴۶- تراز سطح آب شبیه‌سازی شده و مقادیر میدانی ثبت شده (شکل a)، حجم آب دریاچه طی دوره شبیه‌سازی از ۲۰۱۳/۵/۰۱ تا ۲۰۱۷/۱۲/۳۱ (شکل b) ۱۲۳
- شکل ۴-۴۷- مقادیر شاخص اشباع کانی‌های منتخب برای قسمت شمالی دریاچه (ستون سمت چپ) و قسمت جنوبی دریاچه (ستون سمت راست) طی مدت شبیه‌سازی ۱۲۴
- شکل ۴-۴۸- نتایج شبیه‌سازی خصوصیات کیفی قسمت شمالی دریاچه و ارزیابی آن در برابر داده‌های میدانی شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی ۱۲۶

- شکل ۴-۴۹- نتایج شبیه‌سازی خصوصیات کیفی قسمت جنوبی دریاچه و ارزیابی آن در برابر داده‌های میدانی شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی..... ۱۲۷
- شکل ۴-۵۰- مقدار نمک ته‌نشین شده در کف بستر قسمت شمالی دریاچه (مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی انحلال می‌باشد). مقادیر شاخص اشباع کانی‌هالیت و مقدار خالص جریان‌ات ورودی سطحی به قسمت شمالی دریاچه و میزان تبخیر (مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی میزان تبخیر بیش‌تر از جریان‌ات ورودی می‌باشد و بلعکس). ۱۲۸..
- شکل ۴-۵۱- مقدار نمک ته‌نشین شده در کف بستر قسمت شمالی دریاچه (مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی انحلال می‌باشد). مقادیر شاخص اشباع کانی‌هالیت و مقدار خالص جریان‌ات ورودی سطحی به قسمت جنوبی دریاچه و میزان تبخیر (مقادیر منفی نشان‌دهنده‌ی میزان تبخیر بیش‌تر از جریان‌ات ورودی می‌باشد و بلعکس). ۱۲۹..
- شکل ۴-۵۲- بسیمتری بدست آمده توسط داده‌های میدانی و سنجش از دور در ۲۰۱۳/۰۵ (شکل a)، بسیمتری بدست آمده از خروجی مدل در تاریخ ۲۰۱۵/۰۸/۲۶ (شکل b)، بسیمتری بدست آمده توسط داده‌های میدانی و سنجش از دور در ۲۰۱۵/۰۸/۲۶ (شکل c)، تفاوت بسیمتری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۱۵ (شکل d)..... ۱۳۱
- شکل ۴-۵۳- بسیمتری برداشت شده در تاریخ ۲۰۱۳/۰۵ در شمال و جنوب دریاچه (ستون سمت چپ) و بسیمتری بدست آمده توسط شبیه‌سازی در شمال و جنوب دریاچه (ستون سمت راست). ۱۳۲.....
- شکل ۴-۵۴- (تصویر a) خطوط برش طولی دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. جهت شروع خطوط برش با مثلث جامد نشان داده شده‌است. نمودارهای دیگر تغییرات بستر دریاچه را در ابتدای مدل‌سازی (Elevatoin13) و انتهای مدل‌سازی (Elevatoin17) در امتداد خطوط مقطع نشان می‌دهد..... ۱۳۳
- شکل ۴-۵۵- مقادیر سری زمانی چگالی دریاچه ارومیه از تاریخ ۲۰۱۶/۰۲/۰۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۳۱ به‌ترتیب از بالا، مقادیر شبیه‌سازی‌شده، مادیس ۱۰۰۰ متری، اندازه‌گیری شده، نمودار آخر مقدار جریان سطحی ورودی به دریاچه می‌باشد..... ۱۳۴
- شکل ۴-۵۶- نمودار هیتزریس بدست آمده از شبیه‌سازی، ماهواره مادیس و داده‌های میدانی، نمودار مقدار شاخص اشباع‌هالیت و مقدار خالص جریان‌ات ورودی (بارش، تبخیر و جریان‌ات سطحی) در قسمت جنوبی و شمالی دریاچه..... ۱۳۶

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در مورد برآورد میزان تبخیر دریاچه ارومیه. ۱۱
- جدول ۱-۳- داده‌های مورد استفاده در روند مطالعاتی. ۲۲
- جدول ۱-۴- مشخصات داده‌های شوری و چگالی برداشت شده توسط سازمان زمین شناسی، مرکز تحقیقات
سنجش از دور، آب نیرو و ستاد احیا. ۲۵
- جدول ۲-۴- مشخصات طیفی و رزولوشن مکانی ماهواره‌ی سنتینل-۲. ۲۵
- جدول ۳-۴- مشخصات طیفی و رزولوشن مکانی سنجنده مادیس. ۲۶
- جدول ۴-۴- تعداد داده‌های معتبر استفاده شده جهت آموزش و اعتبار سنجی مدل‌ها و درصد تقسیم داده‌ها جهت
آموزش و آزمایش. ۴۳
- جدول ۵-۴- مشخصات برداشت داده‌های کیفی توسط سازمان‌های مختلف. ۵۵
- جدول ۶-۴- محدوده زمانی برداشت داده‌های کیفی دریاچه ارومیه توسط سازمان‌های مربوطه. ۸۵
- جدول ۷-۴- خواص کانی‌های تبخیری [۲۳۲], [۲۳۱], [۲۲۹]. ۹۴
- جدول ۸-۴- اجزای یک مدل ژئوشیمیایی. ۱۰۳
- جدول ۹-۴- متغیرها در معادلات حاکم. ۱۰۴
- جدول ۱۰-۴- مقادیر ضریب پیش‌نمایی (A) و انرژی فعال‌سازی (E) برای ۵ کانی منتخب در نظر گرفته شده
جهت مدل‌سازی. ۱۱۵
- جدول ۱۱-۴- ضرایب کالیراسیون کانی‌های منتخب برای قسمت‌های شمالی و جنوبی. ۱۲۲

۱ فصل اول: مقدمه و بیان مساله

هدف از این پژوهش برآورد میزان تبخیر، شوری، چگالی و ترسیب و انحلال نمک بر روی دریاچه ارومیه با استفاده از سنجش از دور و داده‌های میدانی می‌باشد. دریاچه‌های شور، دریاچه‌هایی بسته می‌باشند که تکامل هیدرولوژیکی و ژئوشیمیایی آن‌ها به شدت به تبخیر آب، شوری و رسوب نمک‌های معدنی در این مناطق بستگی دارد [۱]. شوری این دریاچه‌ها به دلایل ورود آب شور یا بیش‌تر بودن تبخیر از میزان جریانات ورودی و یا ترکیب هر دو عامل ذکر شده می‌باشد [۲]. بسیاری از دریاچه‌های شور جهان در حال کوچک شدن هستند، در نتیجه اثرات نامطلوبی بر زیستگاه پرندگان [۳]، کیفیت آب [۴]، سلامت انسان‌ها [۳]، تنوع زیستی [۵] داشته و خسارت‌های اقتصادی [۳] ایجاد می‌نماید. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که تبخیر در مناطق خشک و نیمه خشک باعث از دست رفتن بخش قابل توجهی از آب دریاچه‌ها می‌گردد [۶].

تبخیر در محیط‌های آبی شور از محاسبات رایج تبخیر پیروی نمی‌نماید و در این محیط‌ها میزان تبخیر کمتر از آب‌های شیرین می‌باشد؛ چرا که با افزایش غلظت شوری مطابق با قانون دوم ترمودینامیک فعالیت یونی در حلال افزایش و نرخ تبدیل مولکول‌های حلال از فاز مایع به فاز گاز کاهش می‌یابد [۸]، [۷]. از طرفی دیگر، افزایش شوری آب باعث کاهش انرژی آزاد مولکول‌های آب و فشار بخار اشباع بالای آب شور در یک دمای معین شده و همچنین، منجر به افزایش چگالی آب می‌گردد که این عوامل در نهایت سبب کاهش تبخیر از این آب‌ها خواهد شد [۹]، [۷]. علاوه بر این، تبخیر در برخی شرایط با شوری بسیار بالا متوقف می‌شود، زیرا بیش از یک غلظت معین، آب نمک به جای خشک شدن، رطوبت هوا را جذب می‌کند [۱۰]. عامل مهم دیگر بر تبخیر، کاهش شار گرمای نهان تبخیر از آب شور می‌باشد که باعث افزایش دمای سطح آب و در نتیجه افزایش تبخیر می‌گردد، اما اثر شوری بر اثر افزایش دما غلبه می‌کند و تبخیر در نهایت کاهش می‌یابد [۹]. از این رو برآورد شوری در محاسبات تخمین تبخیر در محیط‌های آب شور یک گام مهم می‌باشد.

شوری، چگالی، تبخیر و ترسیب و انحلال دوباره نمک در محیط‌های آبی شور و فوق شور با یک‌دیگر رابطه دارند و هر یک به نوبه خود اطلاعات مهمی را ارائه می‌دهند؛ به عنوان مثال توزیع مکانی-زمانی شوری و چگالی یکی از عوامل مهم بر شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی محیط‌های آبی می‌باشد [۱۴]–[۱۱]، [۴]. عوامل ذکر شده اثرات قابل توجهی بر موجودات آبی ساکن در آب‌های شور دارند؛ به عنوان مثال ترسیب نمک ممکن است باعث تغییر تیپ آب گردد و تنش‌هایی را به موجودات و میکروارگانیسم‌های آبی وارد نماید [۱۵]، یا آسیب‌پذیری گونه‌های آب شور در برابر آلاینده‌ها و مواد شیمیایی افزایش پیدا می‌کند [۱۶]. از این رو، مطالعات متنوعی درباره‌ی اثرات میزان شوری بر حیات آبیان [۱۶]، پویایی بسیمتری [۱۸]، [۱۷]، ترسیب و انحلال نمک [۲] و نرخ تبخیر [۷] صورت پذیرفته‌است. در ادامه به ترتیب به مباحث تبخیر، شوری، چگالی و ترسیب و انحلال نمک پرداخته شده‌است.

۱-۱ تبخیر

تعیین دقیق دینامیک تبخیر دریاچه به منظور درک بیلان انرژی دریاچه، فعل و انفعالات بین زمین و جو و همچنین، میزان در دسترس بودن آب از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۹]. علی‌رغم این واقعیت که فرآیند تبخیر فقط در لایه‌ی پوستی (حدوداً ۱۰ میکرومتر) از ستون آب اتفاق می‌افتد، میزان آن نه تنها تحت تأثیر متقابل بین جو و لایه پوستی، بلکه متأثر از ارتباط لایه پوستی و ستون آب نیز می‌باشد [۲۰]. تعامل ذکر شده توسط چهار متغیر اصلی هواشناسی کنترل می‌شود: تابش خورشید، رطوبت هوا، دمای هوا و سرعت باد [۲۱]. در حالی که آخرین متغیر توسط انرژی ذخیره شده در ستون آب کنترل می‌شود [۲۲].

روش‌های مختلفی به منظور برآورد تبخیر از منابع آب به صورت اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیرمستقیم در سراسر جهان توسعه یافته و انجام شده‌است. برای برآورد تبخیر در آب‌های سطحی روش‌های غیرمستقیمی مانند بیلان آب [۲۶]–[۲۳]، معادلات دیفرانسیلی و مدل‌های هیدرودینامیکی [۲۷] و روش‌های مبتنی بر تعادل انرژی [۳۱]–[۲۸] وجود دارند. استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم به دلیل هزینه بالای نصب و نگهداری و همچنین، نیاز به ابزار دقیق با تکنولوژی بالا محدود است [۳۲]. اندازه‌گیری تشتک تبخیر [۳۳]، اندازه‌گیری نسبت بوئن [۳۴] [۳۵]، و ادی کوواریانس [۳۶] از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های اندازه‌گیری مستقیم هستند. این روش‌ها به عنوان مبنایی برای ارزیابی روش‌های غیرمستقیم به شمار می‌روند.

برآورد غیرمستقیم و حتی اندازه‌گیری مستقیم تبخیر از آب‌های سطحی با عدم قطعیت‌های زیادی روبرو می‌باشد [۳۷]. مهم‌ترین منابع عدم قطعیت عبارتند از: ۱) عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری در سطح دریاچه‌ها و مخازن بزرگ، ۲) اندازه‌گیری در فواصل زمانی کوتاه و ناپیوسته، ۳) توزیع متفاوت مقادیر تبخیر در سطح منابع آب به دلیل جریانات و شرایط محیطی مختلف، به‌ویژه در آب‌های شور و فوق شور و ۴) سایر محدودیت‌ها شامل افزایش مقیاس، کوچک‌سازی و تعمیم می‌باشد [۳۹]، [۳۸]، [۳۱]، [۳۰]. با این حال، فناوری‌های سنجش از دور و توسعه مدل‌های جدید باعث شده تا حدودی مشکلات ناشی از عدم قطعیت‌های ذکر شده حل گردد [۴۰].

۱-۲ شوری و چگالی

مطالعات شوری و چگالی عمدتاً بر اساس اندازه‌گیری‌های کشتی‌ها و شناورها می‌باشند و به همین علت پوشش مکانی و زمانی پایین این نوع اندازه‌گیری‌ها برای پی‌بردن به فرآیندهای پیچیده در محیط‌های آبی کافی نیست [۱۱]. مأموریت‌های مختلف ماهواره‌ای طی دهه‌های گذشته به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های اقیانوس‌شناسی تعریف شده‌اند تا بر مشکلات موجود در تکنیک‌های اندازه‌گیری درجا غلبه کنند. ماهواره‌ها توانایی پوشش پدیده‌های اقیانوس و خشکی را در سراسر جهان دارند، که این امر برای استخراج سری‌های زمانی، روندهای کلی و همچنین برای مطالعه رویدادهای محلی بسیار مهم می‌باشد [۴۱]. از این رو در سال‌های اخیر، از داده‌های

ماهواره‌ای نوری^۱ و داده‌های ماهواره‌های مایکروویو^۲ به منظور تخمین شوری سطح دریا در مناطق ساحلی و دور از ساحل استفاده شده است [۴۶]–[۴۲]. برخلاف شوری، برآورد چگالی به وسیله سنسور از دور تنها با ماهواره‌های مایکروویو و با استفاده از رابطه چگالی و شوری صورت گرفته است. به همین دلیل، توضیحات بیش تر در زمینه مطالعات نحوه برآورد چگالی در بخش ۳–۲ ارائه شده است.

به منظور بازیابی شوری سطح به وسیله سنسور از دور سه رویکرد وجود دارد و هر سه بر اساس رابطه‌ی معکوس بین مواد آلی محلول رنگی (CDOM^۳) و شوری عمل می‌نماید. اولین رویکرد در مناطق ساحلی و مصب‌ها بیشترین کاربرد را دارد و از همبستگی CDOM و شوری سطح استفاده می‌نماید [۴۷]. مطالعات مرتبط با این روش ابتدا میزان جذب CDOM و میزان بازتاب سطح آب را اندازه‌گیری، سپس با کالیبره کردن رابطه بین آن دو، اقدام به یافتن رابطه‌ای دیگر بین CDOM و شوری می‌نماید و در نهایت رابطه ایجاد شده را به وسیله اندازه‌گیری‌های درجا شوری کالیبره می‌کنند [۴]. این رویکرد نسبت به دو رویکرد دیگر پیچیده‌تر و میزان عدم قطعیت بیشتری دارد [۴]. از طرفی دیگر، رابطه بین بازتاب سطح آب و ضریب جذب CDOM در میزان شوری ppt ۵ تا ppt ۳۵ معتبر می‌باشد که محدود به دهانه رودخانه و مناطق ساحلی می‌گردد [۳۶]، [۳۷]. همچنین نکته‌ی مهم در استفاده از این روش وجود همبستگی معکوس معنا دار بین میزان جذب CDOM و شوری می‌باشد، که در صورت برقرار نبودن این همبستگی نمی‌توان از این روش استفاده نمود [۴۵].

رویکرد دوم و سوم مشابه یک‌دیگر می‌باشند و در آن دو، بازتاب سنسور از دور (Rrs^۴) را به صورت مستقیم به شوری سطح متصل می‌کنند، زیرا مقدار شوری سطح می‌تواند به عنوان تابعی از باندهای نوری بیان شود [۴۸]، [۴۴]، [۱۱]. رویکرد دوم اقدام به ایجاد یک رابطه ریاضی بین بازتاب و شوری سطح آب با استفاده از انواع مدل‌های مختلف پیش‌بینی کننده مانند شبکه‌های عصبی [۴۹]، [۴۸]، [۴۶]، [۴۵]، [۴۱]، مدل‌های رگرسیونی [۵۲]–[۵۰]، [۴۴] و الگوریتم باکس-جنکینز [۵۳] می‌نماید. رویکرد سوم نیز از بازتاب سنسور از دور به منظور تخمین شوری سطح استفاده می‌کند اما این رویکرد به دنبال ایجاد مدلی است که توانایی در نظر گرفتن تغییرات مکانی را در خواص طیفی آب را داشته باشد (مانند مدل کیویست^۵). از این رو، این مدل‌ها به جای تنظیم یک مدل برای کل منطقه، پارامترهای آموزشی را برای هر زیر منطقه از منطقه مورد مطالعه تنظیم می‌کنند [۵۵]، [۵۴].

۳-۱ ترسیب نمک

مقدار حلالیت ماده حل‌شونده در یک محلول به مقدار بیشینه غلظت آن ماده در محلول بستگی دارد که تحت تاثیر عوامل گوناگونی مانند pH، واکنش‌های جانبی تشکیل کمپلکس، اثر یون مشترک و غیر مشترک، دما و نوع حلال قرار دارد [۲]. اگر مقدار غلظت ماده حل‌شونده درون حلال در شرایطی از مقدار بیشینه آن درون محلول

^۱ optical satellite

^۲ microwave satellite

^۳ Colored dissolved organic matter

^۴ Remote Sensing Reflectance

^۵ Cubist Model

بیشتر گردد، حلال از ماده حل شوند فوق اشباع شده و آن ماده شروع به ترسیب می نماید. فعل و انفعالات بین یون ها در آب های طبیعی تأثیر زیادی بر میزان حلالیت مواد معدنی دارد. مدل هایی که تغییرات ضرایب فعالیت را به وسیله ی پارامترهای قدرت یونی، دما و ترکیب محلول توصیف می کنند، برای تعیین این اثرات مورد نیاز است و می توان از آن ها برای انجام بسیاری از محاسبات ترمودینامیکی مانند گونه زایی عناصر آبی^۱، توالی تبلور مواد معدنی و مخلوط شدن محلول های آبی استفاده کرد [۵۶].

در چند دهه گذشته، پیشرفت مدل سازی ژئوشیمیایی در برخورد با محلول های الکترولیت غلیظ اجازه استفاده از رویکردهای به روز برای درک جنبه های ژئوشیمیایی پدیده های طبیعی را داده است. مدل تعامل یونی، که توسط پیتزر در سال ۱۹۷۳ توسعه یافت، نه تنها نظریه محلول های الکترولیت غلیظ^۲ را توسعه داد، بلکه ابزاری ارزشمند برای توصیف دقیق تر از توالی های تبلور در آب های شور مشاهده شده است [۵۷].

۴-۱ ضرورت انجام تحقیق

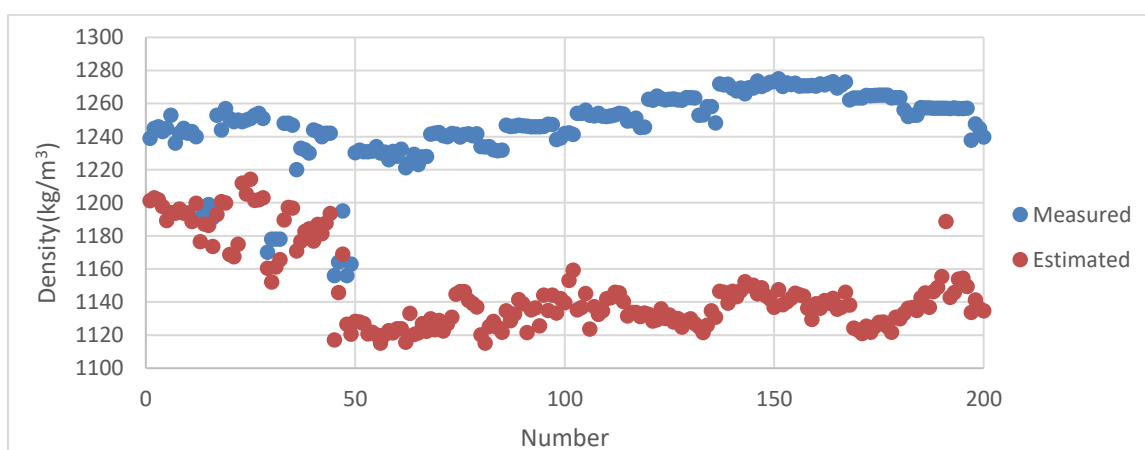
دریاچه ارومیه یکی از اکوسیستم های ارزشمند آبی و بزرگ ترین دریاچه داخلی و فوق اشباع نمکی ایران می باشد. این دریاچه در سال ۱۹۷۱ به عنوان تالاب با اهمیت بین المللی و زیستگاه پرندگان و گونه های کمیابی مانند آرتمیا ارومیا و در سال ۱۹۷۶ به عنوان ذخیره گاه بیوسفر ثبت گردید [۵۸]. افزایش طرح های توسعه و بهره برداری بی رویه از منابع آب حوضه در دو دهه گذشته، منجر به کاهش جریانات ورودی به دریاچه و افت تراز آب آن شده است [۵۹]. این کاهش سطح و به تبع آن حجم دریاچه باعث شد تا در سال ۲۰۱۵ دریاچه به کمترین حجم آب خود (۱/۲۵ میلیارد متر مکعب) برسد و این میزان ۹۶٪ کمتر از مقدار حجم آن در سال ۱۹۹۵ بوده است [۴]. از این رو، تنش های متعدد وارد شده به دریاچه، باعث ایجاد مشکلات جدی زیست محیطی و اقتصادی در منطقه دریاچه شده است [۶۰].

عوامل ذکر شده در بالا سبب شده است که دریاچه رو به خشک شدن بنماید، حتی در سال های اخیر شوری دریاچه به بیش از ۴۰۰ گرم بر لیتر رسیده و رسوبات شیمیایی مانند رسوبات کلروره، کربناته و سولفات در حاشیه و بستر دریاچه نمایان گردیده و همچنین، نمک کلراید سدیم به دلیل شوری بالای دریاچه از حد اشباع عبور کرده و در کف دریاچه رسوب نماید [۲]. این افزایش نمک در آب دریاچه می تواند بر اکوسیستم، پارامترهای اقلیمی و منابع آب آثار مخربی را داشته باشد [۶۱]. از طرفی دیگر، غلظت بالای نمک، در سال های اخیر به طرز نگران کننده ای گونه ای کمیاب آرتمیا را تهدید کرده و در نتیجه تعداد پرندگان مهاجر را کاهش داده و بر فعالیت های اقتصادی مربوط به استفاده از آرتمیا تأثیر منفی گذاشته است [۶۲]. علاوه بر این، اگرچه میگوی آرتمیا می تواند دامنه های شوری بالا را تحمل کند، اما جمعیت و تولید مثل آن در شوری های زیر ۱۰۰ گرم در لیتر و بالاتر از ۳۰۰ گرم در لیتر کاهش می یابد [۶۴]، [۶۳].

¹ aqueous speciation of elements

² concentrated electrolyte solutions

از طرفی دیگر، مطالعات پیشین حساسیت میزان چگالی آب را نسبت به تغییرات کوچک در غلظت شوری نشان داده‌اند که این امر سبب توسعه معادلات مختلف جهت تخمین میزان چگالی شده‌است [۶۶]، [۶۵]. به عنوان مثال، مرجانی و جمالی گرادیان چگالی را عامل جریان بین قسمت شمالی و جنوبی دریاچه ارومیه دانسته و ذکر کرده‌اند که نادیده گرفتن این عامل سبب برآورد نادرست مبادلات آب در این دریاچه می‌شود [۱۲]. از طرفی دیگر، با بررسی رابطه حالت پیشنهاد شده بر روی دریاچه فوق شور ارومیه توسط سیادت موسوی و همکاران [۶۶] ($\rho = 1001.707 - 0.03643 \cdot T + 0.44394 \cdot S + 0.00012547 \cdot S^2$) با بعضی داده‌های میدانی برداشت شده (شکل ۱-۱)، نشان داد که در اغلب ماه‌ها این رابطه توانایی برآورد میزان چگالی آب دریاچه را به‌وسیله‌ی شوری و دما، به‌صورت مناسب نداشته‌است. با توجه به موارد ذکر شده، بررسی میزان تبخیر، شوری، چگالی و ترسیب و انحلال نمک‌های موجود در آب دریاچه می‌تواند اطلاعات مفیدی را در نحوه مدیریت این اکوسیستم ارائه دهد.



شکل ۱-۱- برآورد ۲۰۰ نمونه چگالی بر حسب معادله ۱۰ پیشنهاد شده توسط مطالعه [۶۶] و مقایسه آن با مقادیر مشاهداتی. داده‌های میدانی با گام زمانی ماهانه به مدت یک سال (۲۰۱۶/۰۲ تا ۲۰۱۷/۰۱) در ۶ نقطه از دریاچه و در اعماق مختلف برداشت گردیده‌اند.

۵-۱ اهداف تحقیق

به صورت کلی اهداف این پژوهش عبارتند از:

- ۱- برآورد میزان تبخیر از سطح دریاچه ارومیه.
- ۲- بازیابی شوری و چگالی سطح دریاچه ارومیه به وسیله‌ی فناوری سنجش از دور.
- ۳- مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های بازیابی میزان شوری سطح دریاچه ارومیه.
- ۴- به‌دست آوردن میزان ترسیب و انحلال نمک در دریاچه.

۶-۱ سوالات تحقیق

سوالات مطرح شده برای انجام این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- چه رابطه‌ای بین میزان شوری، چگالی تبخیر، انحلال نمک وجود دارد و تابع هستریزیس چگالی چگونه است؟

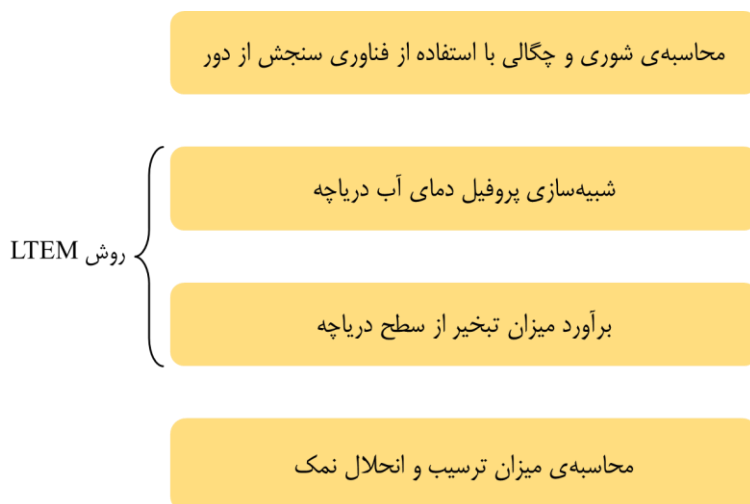
۲- روند تغییرات چگالی دریاچه در بازه مطالعاتی مورد نظر چگونه بوده است؟

۳- در زمان‌هایی که بیشترین تبخیر صورت گرفته، میزان شوری با ترسیب و انحلال نمک چگونه بوده است، و بالعکس؟

۴- در زمان‌هایی که آب دریاچه بیشترین و کمترین دمای خود را داشته، تبخیر، شوری و ترسیب و انحلال نمک چگونه بوده است؟

۷-۱ روند انجام پژوهش

در ادامه این پژوهش، در فصل دوم به مرور ادبیات فنی مرتبط با مباحث شوری، چگالی، تبخیر و ترسیب و انحلال نمک پرداخته خواهد شد. سپس، در فصل سوم منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد نیاز جهت انجام پژوهش شرح داده می‌شوند. شیوه انجام پژوهش و نتایج در فصل چهارم ذکر گردیده است. فصل چهارم دارای سه زیربخش اساسی است که هر یک به ترتیب به مباحث محاسبه‌ی شوری و چگالی، تبخیر و ترسیب و انحلال نمک پرداخته‌اند (شکل ۱-۲). بخش اول از فصل چهارم به بازیابی شوری و چگالی سطح آب با استفاده از الگوریتم‌های رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی، کیویست و XGboost و فناوری سنجش از دور (ماهواره‌های ستینل-۲ و مادیس) خواهد پرداخت، هر کدام از این الگوریتم‌ها به حوزه‌های مختلفی از آموزش ماشین تعلق دارند. همچنین، در این بخش نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی چگالی و روند هستریزیس نمودار چگالی و حجم دریاچه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در بخش دوم، مدل تخمین تبخیر با استفاده از روش پیشنهادی LTEM ارائه شده در مطالعه [۱۹] و اصلاح آن به منظور برآورد تبخیر ماهانه و روزانه بر روی دریاچه‌ی شور ارومیه استفاده خواهد شد. به علاوه تاثیر میزان انرژی گرمایی ذخیره شده (شبیه‌سازی پروفیل دمای آب دریاچه) بر میزان تبخیر نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش آخر از فصل چهارم، با بهره‌گیری از تئوری هیدرولیک دولایه و سینتیک ژئوشیمیایی به برآورد میزان ترسیب و انحلال نمک پرداخته خواهد شد. دریاچه به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم می‌گردد و ارتباط این دو با استفاده از تئوری هیدرولیک دولایه برقرار می‌گردد. در این بخش، میزان نمک ترسیب یا حل شده در بستر دریاچه، سطح آب دریاچه و مقادیر غلظت‌های یون‌های اصلی آب دریاچه شبیه‌سازی و اعتبارسنجی خواهند گردید. همچنین، نمودار هستریزیس چگالی و حجم دریاچه با توجه به نتایج مدل مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در فصل پنجم، به جمع‌بندی مطالب ارائه شده پرداخته و پیشنهاداتی در راستا و ادامه‌ی این مطالعه ارائه خواهد شد.



شکل ۱-۲- فلوچارت فصل چهارم شیوه انجام پژوهش و نتایج.

۱-۸ فرضیات تحقیق

۱-۸-۱ فرضیات بخش برآورد میزان شوری و چگالی سطح آب

فرضیات مورد استفاده جهت برآورد شوری دریاچه ارومیه به شرح زیر می‌باشند:

- تغییرات طیفی در سال‌های مورد مطالعه بر روی دریاچه ارومیه محدود و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
- رابطه‌ی بدست آمده میان بازتاب امواج الکترومغناطیسی و شوری آب دریاچه از الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش در زمان‌های متناظر با داده برداری‌های میدانی، معتبر و قابل استفاده برای همه‌ی سال‌های مورد مطالعه است.
- تفاوت زمانی میان داده برداری‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای قابل صرف نظر می‌باشد و فرض می‌گردد که در این فاصله زمانی شوری سطح آب دریاچه نسبت به داده‌های میدانی برداشت شده تغییری نداشته‌است.

۱-۸-۲ فرضیات بخش برآورد میزان تبخیر

فرضیات مورد استفاده به‌منظور برآورد میزان تبخیر دریاچه ارومیه به شرح زیر می‌باشند:

- تغییرات طیفی در سال‌های مورد مطالعه بر روی دریاچه ارومیه محدود و قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
- به‌دلیل برداشت داده‌های کیفی دریاچه به صورت ماهانه، فرض شده‌است که تغییرات ضریب فعالیت آب در طول یک ماه ناچیز و قابل صرف نظر است.
- در یک مرحله از پژوهش از میزان تغییرات ذخیره گرمایی در دریاچه به علت کم عمق بودن صرف نظر گردیده و در مرحله بعد اثر ذخیره گرمایی ملاحظه خواهد گردید. این عملیات با استفاده از شبیه‌سازی پروفیل دمای آب صورت خواهد گرفت.

۳-۸-۱ فرضیات بخش برآورد میزان ترسیب و انحلال نمک

در این بخش دریاچه به دو بخش جنوبی و شمالی تقسیم می‌گردد و فرضیات مورد استفاده در جهت برآورد میزان رسوب و انحلال نمک عبارت‌اند از:

- هر یک از قسمت‌های جنوبی و شمالی دریاچه به صورت کاملاً مخلوط هستند [۱۲].
- از تبادل آب زیرزمینی با دریاچه صرف نظر شده است [۶۷].
- سیال غیرلزج است (در مدل‌سازی دریاچه با استفاده از تئوری هیدرولیک دو لایه) [۱۲].
- از آن‌جا که داده‌های کیفی رودخانه‌های ورودی به دریاچه به صورت ماهانه پایش می‌گردند، فرض شده است که در طول هر ماه تغییرات کیفی آب ورودی به دریاچه ناچیز است و می‌توان آن را ثابت فرض نمود.
- با توجه به این موضوع که نقاط برداشت کیفیت دریاچه در نزدیکی میان‌گذر و در بخش جنوبی و شمالی صورت گرفته‌اند، فرض شده که هر کدام بیان‌کننده‌ی شرایط قسمت جنوبی و شمالی می‌باشند و تفاوت کیفی قابل صرف نظر می‌باشد.
- دمای ستون آب به دلیل کم عمق بودن دریاچه برابر با دمای سطح آب می‌باشد. بنابراین، از داده‌های سری زمانی دمای سطح دریاچه به دست آمده با فناوری سنجش از دور ذکر شده در بخش ۳-۲-۲-۴ به عنوان دمای آب دریاچه در نظر گرفته شده است. به عبارتی دیگر، از شبیه‌سازی پروفیل دمای دریاچه در این بخش صرف نظر گردیده است (پروفیل دما فقط در بخش تبخیر به منظور بررسی اثر میزان انرژی گرمایی ذخیره شده استفاده شده است).