

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش مهندسی محیط زیست

عنوان

**تحلیل بلندمدت مؤلفه‌های بیلان آب و تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده
از ترکیب داده‌های میدانی و سنجش از دور**

نگارنده

سیده نازنین راحمی قلعه جوقی

استاد راهنما

دکتر عمار صفایی

تاریخ دفاع: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸



اظهارنامه

(اصالت متن و محتوای پایان نامه کارشناسی ارشد)

عنوان پایان نامه: تحلیل بلندمدت مؤلفه های بیلان آب و تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیب داده های میدانی و

سنجش از دور

نام استاد راهنما: دکتر عمار صفایی
نام استاد راهنمای همکار: نام استاد مشاور:

این جانب نازنین راحمی اظهار می دارم:

۱- متن و نتایج علمی ارائه شده در این پایان نامه اصیل بوده و منحصراً توسط این جانب و زیر نظر استادان (راهنما، همکار و مشاور) نام برده شده در بالا تهیه شده است.

۲- متن پایان نامه به این صورت در هیچ جای دیگری منتشر نشده است.

۳- متن و نتایج مندرج در این پایان نامه، حاصل تحقیقات این جانب به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف است.

۴- کلیه مطالبی که از منابع دیگر در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته، با ذکر مرجع مشخص شده است.

نام دانشجو: نازنین راحمی

تاریخ ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

امضا


نتایج تحقیقات مندرج در این پایان نامه و دستاوردهای مادی و معنوی ناشی از آن (شامل فرمولها، توابع کتابخانه‌ای، نرم افزارها، سخت افزارها و مواردی که قابلیت ثبت اختراع دارد) متعلق به دانشگاه صنعتی شریف است. هیچ شخصیت حقیقی یا حقوقی بدون کسب اجازه از دانشگاه صنعتی شریف حق فروش و ادعای مالکیت مادی یا معنوی بر آن یا ثبت اختراع از آن را ندارد. همچنین کلیه حقوق مربوط به چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و نظائر آن در محیطهای مختلف اعم از الکترونیکی، مجازی یا فیزیکی برای دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است. نقل مطالب با ذکر ماخذ بلامانع است.

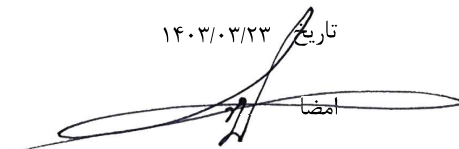
نام دانشجو: نازنین راحمی

تاریخ ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

امضا


نام استادان راهنما: دکتر عمار صفایی

تاریخ ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

امضا


تصویب‌نامه

به نام خدا

دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

این پایان‌نامه به عنوان تحقق بخشی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد است.

عنوان: تحلیل بلندمدت مؤلفه های بیلان آب و تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیب داده های میدانی و سنجش از دور

نگارش: نازنین راحمی

کمیته ممتحنین:

امضاء

استاد راهنما

1- آقای دکتر / خانم دکتر عمار صفایی

امضاء

استاد راهنمای همکار

2- آقای دکتر / خانم دکتر ----

امضاء

استاد مشاور

3- آقای دکتر / خانم دکتر ----

امضاء

ممتحن داخل دانشکده

4- آقای دکتر / خانم دکتر تجربیشی

امضاء

ممتحن خارج دانشکده

5- آقای دکتر / خانم دکتر کراچیان

در وهله اول، از استاد راهنمای خودم، دکتر عمار صفایی، بابت تمامی زحمات ایشان در پیشبرد بهتر این مسیر تشکر می‌نمایم. بی‌شک، بدون حمایت و راهنمایی‌های بسیار ایشان در جنبه‌های علمی و اخلاقی، به پایان رساندن این پژوهش میسر نبود. از خانواده خودم که همواره کنار بنده بودند و در هر شرایطی حمایت‌های خود را از من دریغ نکردند، کمال قدردانی را دارم. همچنین از دوستان خودم، برای همکاری و حمایت از بنده در گذراندن این مقطع، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. در انتها، از ستاد احیای دریاچه ارومیه برای فراهم آوردن داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش تشکر می‌کنم.

چکیده

در سال‌های اخیر دریاچه‌های شور جهان با چالش‌های زیست‌محیطی شدیدی روبرو شده‌اند، از جمله دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران به‌عنوان دومین دریاچه شور جهان، با افت شدید ارتفاع سطح آب و کاهش مساحت پهنه آبی روبرو شده است. دریاچه ارومیه دریاچه بسته‌ای است که تنها خروجی آن از طریق تبخیر است و ورودی‌های دریاچه بارش و دبی رودخانه‌ها است که بررسی روند تغییرات بلندمدت این پارامترها از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷) با استفاده از آزمون **Mann-Kendall** نشان می‌دهد که تغییرات بارش بدون روند معنادار، تبخیر روند صعودی و دبی روند نزولی دارند؛ البته بررسی بارش در سال ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ (معادل سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۸) یعنی هم‌زمان با شروع افزایش سرعت خشک شدن دریاچه روند نزولی را نشان می‌دهد. همچنین بررسی همبستگی مؤلفه‌های بیلان آب دریاچه، بیشترین همبستگی بین ارتفاع سطح آب دریاچه و دبی در مقیاس روزانه با ضریب همبستگی مثبت ۰/۲ در روش‌های مختلف مشاهده می‌شود، که نشان از تأثیر عوامل انسانی و ابعاد مدیریتی بر وضعیت دریاچه دارد. هدف اصلی این مطالعه بررسی مؤلفه‌های بیلان آب در تعامل با هم و مقایسه با ارتفاع سطح آب مشاهداتی در ایستگاه گلخانه بوده است و همچنین رفتار آب ورودی به دریاچه بعد از تبخیر بررسی شود که آیا همه‌ی این آب باعث بالا رفتن ارتفاع سطح آب می‌شود. برای به‌دست آوردن ارتفاع سطح آب برای سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸، مساحت دریاچه با استفاده از شاخص **NDWI** محاسبه شده از روی تصاویر لندست ۷ و ۸ به‌صورت میانگین برای هر سال، با دو رویکرد به‌دست آمده است. در رویکرد اول، آستانه تعیین شده برای تشخیص پهنه آبی به صورتی بوده است که فقط پهنه کاملاً پوشیده از آب به‌عنوان مساحت مؤثر در نظر گرفته شود و در رویکرد دوم با پایین آوردن آستانه شاخص **NDWI**، مساحت بیشتری در نظر گرفته شده است و علاوه بر بخش کاملاً پوشیده از آب، نواحی که قبلاً آب بوده است و در حال حاضر هنوز کاملاً خشک نشده‌اند نیز در مساحت دریاچه محاسبه شده است. محاسبه ارتفاع سطح آب با معادله بیلان آب نشان می‌دهد که در رویکرد دوم ارتفاع سطح آب با R^2 برابر ۰/۹۸ و **RMSE** برابر با ۰/۲۹ متر با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد که این موضوع نشان می‌دهد که تمام آب ورودی به دریاچه بعد از تبخیر باعث بالا رفتن ارتفاع سطح آب دریاچه نمی‌شود و یعنی دریاچه مانند ظرفی نیست که نسبت به آب ورودی صلب عمل کند و به‌طور میانگین از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۸، ۹ درصد از آب دریاچه توسط پهنه تر اطراف دریاچه جذب شده است و باعث افزایش ارتفاع سطح آب در دریاچه نشده است.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، بیلان آب، اتلاف، همبستگی و روند تغییرات، سنجش از دور

فهرست مطالب

چکیده.....	أ
فهرست مطالب.....	ب
فهرست شکل ها.....	د
فهرست جدول ها.....	ز
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ بیان مسئله.....	۱
۲-۱ نوآوری و سؤالات پاسخ داده شده در پایان نامه.....	۶
۳-۱ فرضیات پژوهش.....	۶
۴-۱ ساختار پایان نامه.....	۷
فصل ۲ مرور ادبیات فنی.....	۸
۱-۲ مروری بر مؤلفه‌های بیلان آب.....	۸
۱-۱-۲ بارش، تبخیر و جریان ورودی از رودخانه‌ها.....	۸
۲-۱-۲ آب زیرزمینی.....	۱۰
۲-۲ مروری بر بیلان آب دریاچه.....	۱۵
۳-۲ مروری بر بسیمتری دریاچه ارومیه.....	۲۱
۴-۲ مروری بر روش‌های محاسبه مساحت دریاچه و شاخص‌های اندازه‌گیری.....	۲۷
۵-۲ مروری بر عوامل مؤثر بر خشک شدن دریاچه.....	۳۱
فصل ۳ روش‌شناسی.....	۳۶
۱-۳ منطقه مطالعاتی.....	۳۶
۲-۳ داده‌های مورد نیاز منطقه مطالعاتی.....	۳۷
۳-۳ روش Mann-Kendall برای ارزیابی روند تغییرات متغیرها.....	۴۲
۴-۳ همبستگی پارامترها.....	۴۴
۵-۳ بیلان آب دریاچه.....	۴۵
فصل ۴ نتایج.....	۵۳
۱-۴ بررسی روند تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب.....	۵۳
۲-۴ همبستگی متغیرهای اقلیمی.....	۶۲

۶۴	.....	رهاسازی سدها	۳-۴
۶۷	.....	بیان آب دریاچه	۴-۴
۶۷	.....	تبخیر و تعرق	۴-۴-۱
۶۸	.....	مساحت محاسبه شده توسط مطالعات موجود	۴-۴-۲
۷۱	.....	رویکرد اول: محاسبه مساحت پهنه پر آب	۴-۴-۳
۷۳	.....	رویکرد دوم: در نظر گرفتن بخش های تر و گل ولای در مساحت	۴-۴-۴
۷۶	.....	عوامل مؤثر بر خشک شدن دریاچه	۵-۴
۸۰	.....	عوامل ایجاد خطا	۶-۴
۸۱	.....	فصل ۵ جمع بندی و پیشنهادها	
۸۱	.....	جمع بندی	۱-۵
۸۲	.....	پیشنهادها	۲-۵
۸۴	.....	مراجع	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: استان‌های تحت پوشش حوضه آبریز درجه دو دریاچه ارومیه ۲
- شکل ۱-۲: نوسانات سطح آب دریاچه ۲
- شکل ۱-۳: نقشه راه برنامه احیای دریاچه ارومیه ۴
- شکل ۱-۴: ارتفاع سطح آب دریاچه ارومیه و دریای خزر بعد از تشکیل ستاد احیا ۵
- شکل ۲-۱: تغییرات سطح آب ماهانه دریاچه ارومیه و میانگین تراز آب مربوط به آن در ۱۷ سفره زیرزمینی مجاور ۱۱
- شکل ۲-۲: ارتفاع سطح آب حاصل از بیلان آب و شوری در مقابل ارتفاع سطح آب مشاهداتی ۱۷
- شکل ۲-۳: تغییرات ارتفاع سطح آب نسبت به سال ۱۹۹۳ (معادل سال ۷۲-۱۳۷۱) ۲۰
- شکل ۲-۴: بسیمتری دریاچه ارومیه بر اساس تصاویر لندست ۸ در سال ۲۰۱۵ ۲۲
- شکل ۲-۵: تغییرات مساحت و حجم دریاچه در برابر ارتفاع سطح آب ۲۳
- شکل ۲-۶: تغییرات مساحت دریاچه بر اساس رابطه مساحت و ارتفاع سطح آب ۲۴
- شکل ۲-۷: تغییرات مساحت در برابر ارتفاع سطح آب ۲۵
- شکل ۲-۸: مقایسه دو رویکرد در محاسبه مساحت در مقابل ارتفاع آب ۲۵
- شکل ۲-۹: تغییرات عمق آب دریاچه به دست آمده از مدل ANN (a تا f)، تغییرات مکانی شوری در نزدیکی پل (g) و میزان آب‌شستگی محلی در مجاورت پل (h) ۲۶
- شکل ۲-۱۰: مساحت دریاچه ارومیه از سال ۱۹۹۸ (معادل سال ۷۷-۱۳۷۶) تا ۲۰۱۱ (معادل سال ۹۰-۱۳۸۹) ۲۸
- شکل ۲-۱۱: مساحت و حجم آب دریاچه از سال ۱۹۶۵ (معادل سال ۴۴-۱۳۴۳) تا ۲۰۱۷ (معادل سال ۹۶-۱۳۹۵) ۲۹
- شکل ۲-۱۲: تغییرات مساحت دریاچه در بازه زمانی ۱۹۷۰ (معادل سال ۴۹-۱۳۴۸) تا ۲۰۲۰ (معادل سال ۹۹-۱۳۹۸) ۲۹
- شکل ۲-۱۳: تغییرات حجم کل دریاچه و مصرف آب کشاورزی در بازه زمانی ۱۹۷۰-۲۰۲۰ ۳۲
- شکل ۳-۱: نمای کلی روش استفاده شده در مطالعه ۳۶
- شکل ۳-۲: حوضه آبریز دریاچه ارومیه شامل رودهای اصلی و ایستگاه‌های زمینی ۳۷
- شکل ۳-۳: محل ایستگاه‌های سینوپتیک در نظر گرفته شده برای درون‌یابی داده بارش ۳۸
- شکل ۳-۴: محل ایستگاه‌های هیدرومتری در نظر گرفته شده در اطراف دریاچه ارومیه ۴۰
- شکل ۳-۵: تغییرات مساحت پهنه آبی در تابستان ۱۳۹۴ به دست آمده با شاخص NDWI ۴۶
- شکل ۳-۶: مساحت پهنه تماماً آبی دریاچه در سال ۲۰۱۶ (معادل سال ۹۵-۱۳۹۴) ۴۸

- شکل ۳-۷: مساحت پهنه آبی و قسمت تر در اطراف دریاچه در سال ۲۰۱۶ (معادل سال ۹۵-۱۳۹۴). ۴۸
- شکل ۳-۸: حذف قسمت‌های اضافی در نظر گرفته شده به علت کاهش آستانه NDWI. ۴۸
- شکل ۳-۹: ناحیه در نظر گرفته برای به دست آوردن تبخیر و تعرق. ۴۹
- شکل ۳-۱۰: بافرزون بین دو رویکرد مساحت. ۵۰
- شکل ۳-۱۱: بسیمتری دریاچه در سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ (برداشت شده توسط ستاد احیا). ۵۱
- شکل ۳-۱۲: مقایسه بارش ERA 5 و درونبایی ایستگاه‌های سینوپتیک. ۵۳
- شکل ۳-۱۳: بارش مشاهداتی سالانه در ایستگاه ارومیه و به دست آمده از GEE. ۵۴
- شکل ۳-۱۴: مقایسه تبخیر GEE و ایستگاه گل‌مانخانه. ۵۴
- شکل ۳-۱۵: بیلان آب دریاچه و ارتفاع سطح آب مشاهداتی در سال ۲۰۱۶ (معادل سال ۹۵-۱۳۹۴). ۵۵
- شکل ۳-۱۶: تغییرات روزانه بارش و ارتفاع سطح آب دریاچه. ۵۵
- شکل ۳-۱۷: تغییرات روزانه تبخیر و ارتفاع سطح آب دریاچه. ۵۷
- شکل ۳-۱۸: تغییرات روزانه دبی و ارتفاع سطح آب دریاچه. ۵۸
- شکل ۳-۱۹: تغییرات روزانه پوشش برف و ارتفاع سطح آب دریاچه. ۵۸
- شکل ۳-۲۰: تغییرات بارش تجمعی و ارتفاع سطح آب روزانه. ۵۹
- شکل ۳-۲۱: تغییرات تبخیر تجمعی و ارتفاع سطح آب روزانه. ۵۹
- شکل ۳-۲۲: تغییرات دبی تجمعی و ارتفاع سطح آب روزانه. ۶۰
- شکل ۳-۲۳: داده‌های تجمعی سالانه و ارتفاع سطح آب. ۶۰
- شکل ۳-۲۴: سری زمانی تغییرات سالانه شاخص SPI. ۶۲
- شکل ۳-۲۵: تغییرات ماهانه TWS. ۶۲
- شکل ۳-۲۶: ارتفاع سطح آب دریاچه ارومیه در مقایسه با رهاسازی سدها. ۶۶
- شکل ۳-۲۷: رهاسازی سدها در مقایسه با بارش حوضه. ۶۶
- شکل ۳-۲۸: میزان افت ارتفاع سطح آب نسبت به اولین روز سال ۱۳۸۷. ۶۶
- شکل ۳-۲۹: تغییرات تبخیر و تعرق در محدوده خارج دریاچه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ با توجه به مرز کلی. ۶۷
- شکل ۳-۳۰: تغییرات تبخیر و تعرق سالانه از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸. ۶۸
- شکل ۳-۳۱: ارتفاع آب دریاچه به دست آمده از بیلان آب در حالت اول. ۶۹
- شکل ۳-۳۲: ارتفاع آب دریاچه به دست آمده از بیلان آب در حالت دوم. ۷۰
- شکل ۳-۳۳: ارتفاع آب دریاچه به دست آمده از بیلان آب در حالت سوم. ۷۰
- شکل ۳-۳۴: ارتفاع سطح آب در رویکرد اول در مقایسه با داده‌های مشاهداتی (مساحت ماهانه). ۷۱
- شکل ۳-۳۵: ارتفاع سطح آب در رویکرد اول در مقایسه با داده‌های مشاهداتی (مساحت ثابت فصلی). ۷۲

- شکل ۳-۳۶: ارتفاع سطح آب در رویکرد اول در مقایسه با داده‌های مشاهداتی (مساحت ثابت سالیانه)..... ۷۲
- شکل ۳-۳۷: ارتفاع سطح آب محاسبه شده با بیلان آب برای مساحت ثابت فصلی و سالیانه و ماهانه..... ۷۳
- شکل ۳-۳۸: ارتفاع سطح آب در رویکرد دوم در مقایسه با داده‌های مشاهداتی..... ۷۴
- شکل ۳-۳۹: بیلان آب دریاچه در رویکرد دوم با احتساب رسوب و ترسیب بستر..... ۷۴
- شکل ۳-۴۰: نتایج کلی بیلان آب..... ۷۵
- شکل ۳-۴۱: سری زمانی تغییرات مصرف آب کشاورزی..... ۷۷
- شکل ۳-۴۲: تغییرات تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات حوضه آبریز اصلی دریاچه ارومیه..... ۷۸
- شکل ۳-۴۳: تغییرات مقدار تخلیه از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات حوضه آبریز اصلی دریاچه ارومیه..... ۷۸
- شکل ۳-۴۴: تغییرات میزان مصرف از منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز اصلی ارومیه..... ۷۹

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: دسته‌بندی دیدگاه‌های موجود در زمینه اندرکنش آب زیرزمینی و دریاچه. ۱۲
- جدول ۲-۲: دیدگاه هیدرولوژیکی در مورد اندرکنش آب زیرزمینی و دریاچه. ۱۲
- جدول ۲-۳: دیدگاه زمین‌شناسی در مورد اندرکنش آب زیرزمینی و دریاچه. ۱۳
- جدول ۲-۴: مقایسه مؤلفه‌های بیلان آب دو مطالعه. ۱۷
- جدول ۲-۵: خلاصه‌ای از مطالعات بررسی شده در زمینه بیلان آب در دریاچه ارومیه. ۲۰
- جدول ۲-۶: شاخص‌های موجود برای محاسبه پوشش آبی. ۲۷
- جدول ۲-۷: خلاصه‌ای از مطالعات بررسی شده در زمینه مساحت دریاچه ارومیه. ۳۰
- جدول ۲-۸: داده‌های مشاهداتی حجم آب دریاچه ارومیه از سال ۲۰۱۱ (معادل سال ۹۰-۱۳۸۹) تا ۲۰۲۰ (معادل سال ۹۹-۱۳۹۸) (میلیارد مترمکعب). ۳۱
- جدول ۲-۹: خلاصه‌ای از مطالعات بررسی شده در زمینه عوامل مؤثر بر خشک شدن دریاچه ارومیه. ۳۴
- جدول ۳-۱: مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در نظر گرفته شده. ۴۱
- جدول ۳-۲: طبقه‌بندی شاخص SPI. ۴۲
- جدول ۳-۳: تفاوت مساحت در مقیاس‌های زمانی مختلف. ۴۷
- جدول ۳-۴: تغییرات ضخامت نمک بستر از سال ۲۰۰۹ (معادل سال ۸۸-۱۳۸۷) تا ۲۰۱۹ (معادل سال ۹۸-۱۳۹۷). ۵۲
- جدول ۳-۵: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه بارش سال ۱۹۹۰ (معادل سال ۶۹-۱۳۶۸) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶). ۵۶
- جدول ۳-۶: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه بارش سال ۱۹۹۰ (معادل سال ۶۹-۱۳۶۸) تا ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷). ۵۶
- جدول ۳-۷: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه بارش سال ۲۰۰۰ (معادل سال ۷۹-۱۳۷۸) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶). ۵۶
- جدول ۳-۸: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه دما در طول فصل رشد. ۵۶
- جدول ۳-۹: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه تبخیر سال ۱۹۹۰ (معادل سال ۶۹-۱۳۶۸) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶). ۵۷
- جدول ۳-۱۰: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه دبی ورودی رودخانه‌ها. ۵۸
- جدول ۳-۱۱: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های روزانه پوشش برف. ۵۹
- جدول ۳-۱۲: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های تبخیر سالانه. ۶۰

- جدول ۳-۱۳: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های بارش سالانه. ۶۱
- جدول ۳-۱۴: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های دبی سالانه. ۶۱
- جدول ۳-۱۵: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی داده‌های TWS ماهانه. ۶۲
- جدول ۳-۱۶: ضرایب همبستگی ارتفاع سطح آب و بارش روزانه. ۶۳
- جدول ۳-۱۷: ضرایب همبستگی ارتفاع سطح آب و تبخیر روزانه. ۶۳
- جدول ۳-۱۸: ضرایب همبستگی ارتفاع سطح آب و دبی روزانه. ۶۴
- جدول ۳-۱۹: همبستگی ارتفاع سطح آب و مقدار تجمعی مؤلفه‌های بیلان آب. ۶۴
- جدول ۳-۲۰: مساحت محاسبه شده با ارتفاع سطح آب بر اساس رابطه ستاد احیا از سال ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶). ۶۹
- جدول ۳-۲۱: مساحت محاسبه شده در هر سال برای هر دو رویکرد و میزان اتلاف از سال ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶). ۷۶
- جدول ۳-۲۲: تعداد سدهای جمع‌آوری شده در این پژوهش. ۷۷
- جدول ۳-۲۳: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی میزان تخلیه از آب زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ ۷۹
- جدول ۳-۲۴: نتایج آزمون Mann-Kendall بر روی مجموع تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات در حوضه آبریز دریاچه ارومیه سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۵ ۷۹

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ بیان مسئله

دریاچه‌های آب شور حدود ۴۴ درصد از حجم و ۲۳ درصد از مساحت کل دریاچه‌های روی زمین را تشکیل می‌دهند. دریاچه نمک یوتا، دریاچه مونو^۱، دریاچه سالتون^۲، دریاچه اونز^۳ در آمریکا؛ دریاچه بحرالمت در فلسطین؛ دریاچه آرال در مرز ازبکستان و قزاقستان؛ دریاچه کورنگومیت^۴ در استرالیا و دریاچه ارومیه در ایران از جمله دریاچه‌های آب شور دنیا هستند که در معرض خشک‌شدگی و نابودی قرار دارند [۱]. دریاچه‌های شور نام برده شده، زیستگاه بسیاری از پرندگان مهاجر بوده و نقش مهمی در صنعت، کشاورزی و گردشگری سرزمین‌های اطراف خود دارند. به علت افزایش دما، کاهش بارندگی و استفاده بیش از حد، دریاچه‌های شور با چالش‌های زیست‌محیطی بی‌سابقه‌ای در مقیاس جهانی مواجه هستند و ارتفاع سطح آب در آن‌ها کاهش چشمگیری یافته است [۲].

به‌عنوان مثال استفاده از آب دریاچه آرال برای کشاورزی و آبیاری باعث شده تا مساحت این دریاچه ۷۴ درصد و حجم آن ۹۰ درصد کاهش یابد و این دریاچه در معرض خشک‌شدگی قرار بگیرد و از نیمه اول قرن بیستم، ارتفاع سطح آب در دریاچه بحرالمت بیش از ۲۰ متر کاهش یافته است و از سال ۱۹۹۶ (معادل سال ۷۵-۱۳۷۴) میانگین نرخ افت سطح آب حدود یک متر در سال است [۳]. خشک‌شدگی دریاچه‌های آب شور می‌تواند احتمال وقوع طوفان‌های گرد و غبار را افزایش دهد که در این صورت سلامت انسان‌ها و فعالیت‌های کشاورزی با خطر جدی روبه‌رو خواهد شد [۱].

دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین دریاچه شور ایران در شمال غربی، بین دو استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی با جمعیت کل ۷/۲ میلیون نفر طبق آمار سرشماری سال ۱۳۹۵ و بخش کوچکی از کردستان، نقش بسیار مهمی را در زندگی افراد منطقه ایفا می‌کند (شکل ۱-۱).

از سال ۱۹۹۵ (معادل سال ۷۴-۱۳۷۳) ارتفاع سطح آب در دریاچه همراه با کاهش چشم‌گیری بوده است. عوامل انسانی مانند مدیریت ناپایدار، ساخت سدها، توسعه کشاورزی و عوامل تغییر اقلیمی باعث این افت چشمگیر ارتفاع سطح آب و افزایش زمین‌های شور در اطراف دریاچه و در نتیجه کاهش مساحت آبی دریاچه شده است و باعث ایجاد مشکلات متعدد محیط‌زیستی و اقتصادی در منطقه و چالش بزرگ در سطح بین‌المللی شده است [۴]، [۵]، [۶].

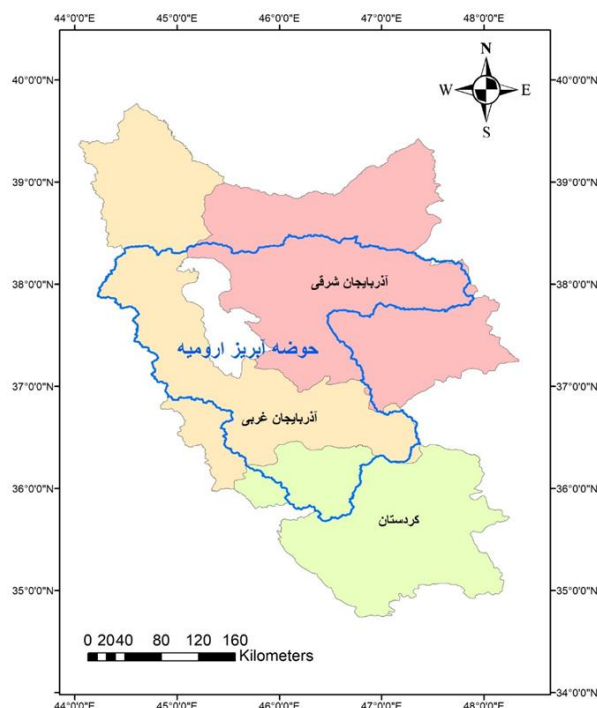
¹ Mono Lake

² Salton Lake

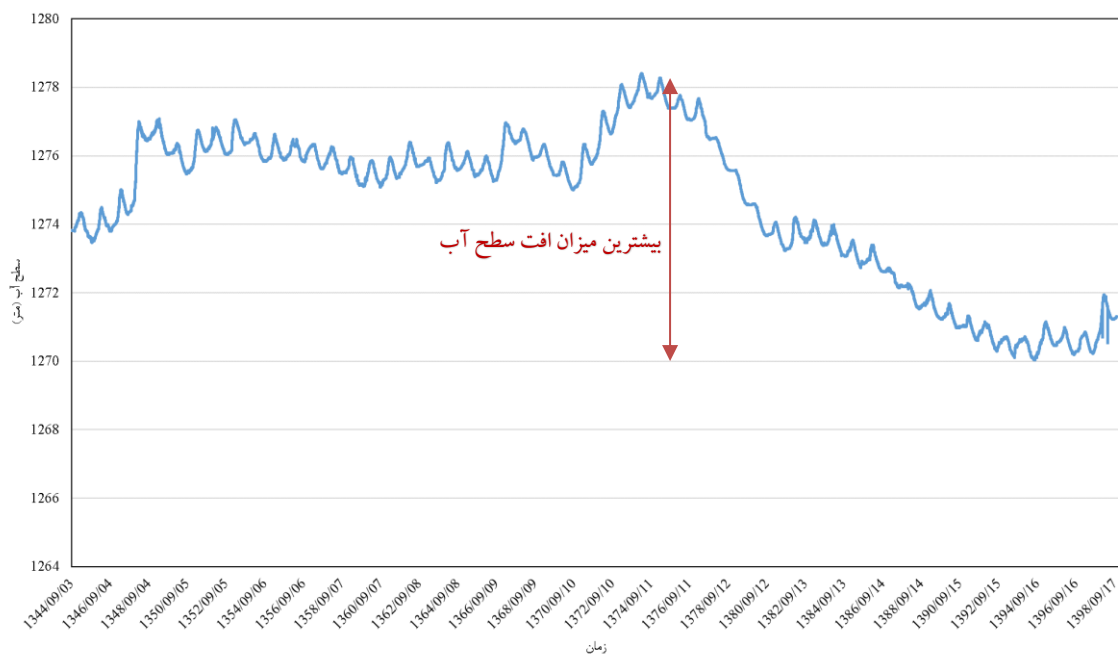
³ Owens Lake

⁴ Corangamite Lake

دریاچه ارومیه از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۴ حدود ۸ متر از آب خود را از دست داده است [۷]. نوسانات سطح آب دریاچه را در یک دوره ۵۰ ساله در (شکل ۱-۲) نشان داده شده است. در سال ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷)، مساحت کل دریاچه ۵۱۴۴۰ کیلومتر مربع گزارش شده است، دریاچه از ۲۱ رودخانه دائمی و فصلی تغذیه شده است. در سال ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷)، ورودی سالیانه به دریاچه از طریق رودخانه‌ها ۴۹۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد [۸]. همچنین سازمان حفاظت محیط زیست (سال ۱۳۸۹) گزارش داد که میانگین درازمدت دبی آب به دریاچه تقریباً معادل ۵۳۰۰ میلیون مترمکعب است [۹].



شکل ۱-۱: استان‌های تحت پوشش حوضه آبریز درجه دو دریاچه ارومیه.



شکل ۱-۲: نوسانات سطح آب دریاچه [۷].

همواره بر روی میزان تأثیر عوامل انسانی و اقلیمی بر روی روند خشک شدن دریاچه ارومیه اختلاف نظر وجود داشته است. برای مثال تعدادی از مطالعات ادعا دارند که بارش روند نزولی داشته و در مقابل تعداد دیگری از مطالعات روند معناداری را در داده‌های بارش نشان نمی‌دهند. به عنوان مثال چوداری و همکاران (۲۰۱۸) و شادکام و همکاران (۲۰۱۶)، روند کاهشی در بارش سالانه را به دست آوردند. [۱۰]، [۱۱]. در مقابل مطالعه خزائی و همکاران (۲۰۱۸) و پورعلی‌حسین و همکاران (۲۰۲۰) و غفاریان و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که روند قابل توجهی برای تغییرات بارش در بلندمدت وجود ندارد [۱۴]، [۱۳]، [۱۲].

از سال ۲۰۰۲ (معادل سال ۸۱-۱۳۸۰) تا ۲۰۱۴ (معادل سال ۹۳-۱۳۹۲) سطح آب دریاچه و مساحت آن به ترتیب ۳۴ سانتی متر در سال و ۲۲۰ کیلومتر مربع در سال کاهش یافته است که نشان می‌دهد دریاچه در ۱۴ سال حدود ۷۰ درصد مساحت خود را از دست داده است [۱۵]. با کاهش حجم آب در دریاچه غلظت نمک افزایش یافته و جانداران آبزی و زنجیره غذایی پرندگان به خطر می‌افتند و لایه‌های نمک می‌توانند منجر به طوفان و گرد و غبارهای نمکی شوند [۱۶]. همچنین با افزایش افت در سطح آب و بالا آمدن بستر دریاچه و جزیره‌های نمکی، ممکن است ورود مخلوطی از گرد و غبار و ذرات معلق به هوا باعث اثرات منفی بر سلامت مردم ساکن در منطقه شود [۱۷]. کاهش سطح آب در دریاچه دریاچه، فاصله استراحتگاه‌ها تا آبی را که به اندازه کافی عمیق برای تفریح باشند، افزایش داد و در نتیجه استراحتگاه‌های توریستی بسته شدند [۵].

سطح زمین کشاورزی آبی حوضه ارومیه در سال ۱۹۷۹ (معادل سال ۵۸-۱۳۵۷)، ۱۵۸۵۲۳ هکتار بود و تا سال ۲۰۱۱ (معادل سال ۹۰-۱۳۸۹) به ۴۵۰۰۰۰ هکتار رسید و تقریباً سه برابر شد. در نتیجه توسعه کشاورزی در حوضه آبریز، تخمین زده شده است که سالانه حدود ۱۲۱۳ میلیون متر مکعب آب از سه رودخانه زرینه رود، مهاباد و شهر چای برای آبیاری زمین‌های کشاورزی منتقل می‌شود [۱۸].

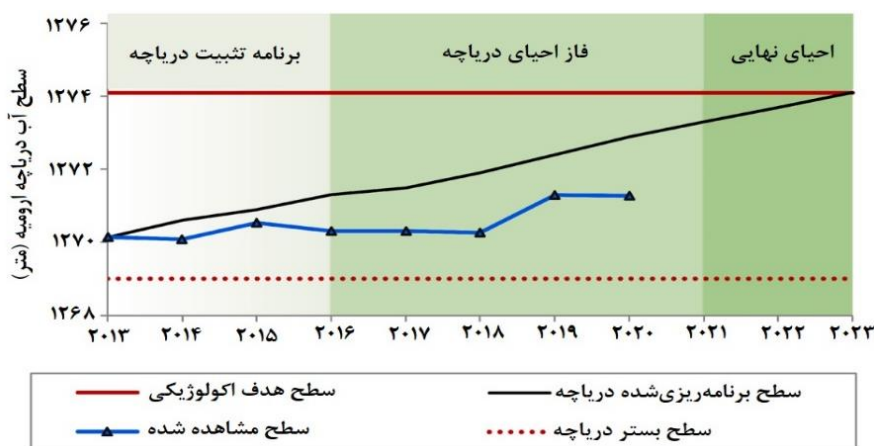
در نتیجه این شرایط نامناسب دولت را مجبور به اقدامات فوری و جدی در این زمینه کرد، که به این منظور در سال ۱۳۹۲ ستاد احیای دریاچه ارومیه به عنوان متولی احیای دریاچه شروع به گرد هم آوردن ذی‌نفعان، قانون‌گذاران و همکاران بین‌المللی برای طراحی و اجرای نقشه راه کرد [۷]. اهداف اصلی نقشه راه احیای دریاچه ارومیه در پنج دسته قرار می‌گیرد [۱۹]، [۲۰]: (۱) کنترل و کاهش مصرف آب کشاورزی، (۲) تأمین آب برای دریاچه از منابع جدید و همچنین رهاسازی از سدها، (۳) کنترل برداشت غیرقانونی آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی، (۴) جمع‌آوری داده‌های میدانی و توسعه مدل برای برنامه‌ریزی منابع آب و اجرای یک سیستم پشتیبانی تصمیم، و (۵) بازسازی و نوسازی آبراهه‌ها برای افزایش ظرفیت تحویل جریان‌های تغذیه‌کننده دریاچه.

اقدامات ستاد احیای دریاچه ارومیه دارای سه فاز اصلی بود [۵]، [۷]، [۱۵]، [۲۰]، [۲۱]:

(۱) فاز تثبیت (۱۳۹۵-۱۳۹۳)؛ هدف اصلی از این فاز تثبیت تراز دریاچه ارومیه و متوقف کردن کاهش سطح آب در دریاچه و کاهش اثرات محتمل ناشی از خشک شدن دریاچه ارومیه است [۲۱].

(۲) دوره احیای دریاچه ارومیه (۱۴۰۱-۱۳۹۶)؛ هدف اصلی این فاز اجرای پروژه‌هایی برای تأمین حبابه زیست‌محیطی دریاچه و رساندن سطح آب دریاچه به تراز اکولوژیک تا سال ۱۴۰۱ بود [۱۵]، [۲۱]. در ابتدا برای احیای دریاچه سطح آب یکنواخت ۱۲۷۴/۱ متر به عنوان سطح اکولوژیک هدف قرار داده شد؛ سطح اکولوژیک به عنوان ارتفاع آب مناسب برای کاهش شوری به ۲۶۳ گرم در لیتر که اجازه‌ی رشد میگوی آرتیمیا را می‌دهد [۲۲].

(۳) دوره احیای نهایی (۱۴۰۲)؛ هدف مورد انتظار از این فاز تثبیت شرایط احیاء شده دریاچه و ایجاد الزامات لازم برای احیای نهایی و حفظ پایدار شرایط دریاچه است [۲۱]. در (شکل ۳-۱) نقشه راه احیای دریاچه ارومیه نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: نقشه راه برنامه احیای دریاچه ارومیه [۵].

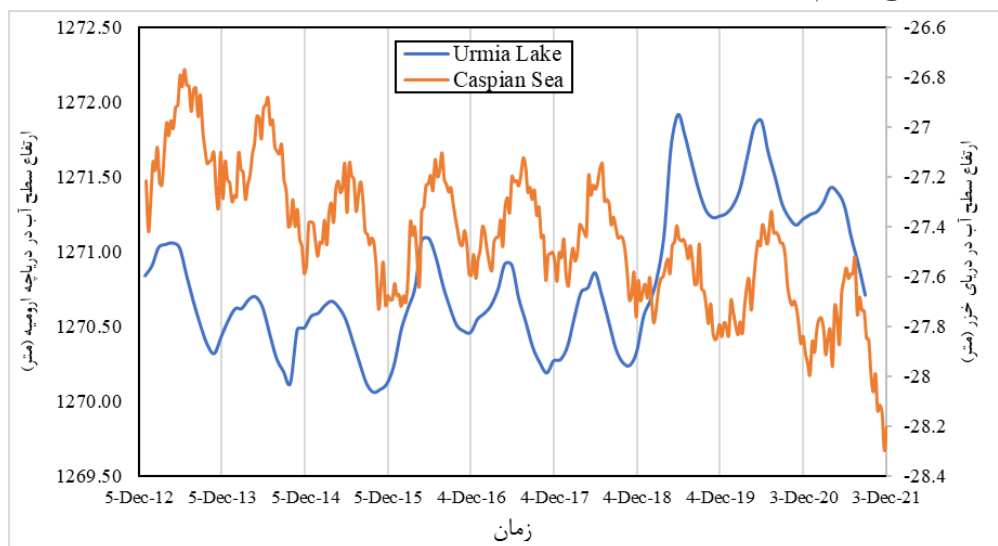
اما با وجود تشکیل ستاد احیاء، نسبت به زمانی که بیشترین ارتفاع آب در تاریخچه زمانی دریاچه ثبت شده است تا تیر ۱۳۹۹، دریاچه ۴۵ درصد از مساحت و ۸۵ درصد از حجم خود را از دست داده است [۵].

سطح آب در دریاچه ارومیه و دریای خزر بعد از شروع اقدامات ستاد از اواخر سال ۲۰۱۳ (معادل سال ۱۳۹۲) در (شکل ۴-۱) نشان داده شده است. مقایسه سطح آب در دریای خزر و دریاچه ارومیه نشان می‌دهد که روند تغییرات سطح آب حتی بعد از شروع اقدامات ستاد با الگوی شبیه به هم تغییر می‌کند؛ پس نیاز به بررسی چندجانبه وضعیت دریاچه برای ارزیابی بهتر وضعیت دریاچه ارومیه و روند خشک شدن آن است.

سطح آب در دریاچه ارومیه تقریباً ۱۲۷۶ متر بالاتر از سطح دریا بوده است، در سال ۱۹۹۵ (معادل سال ۷۴-۱۳۷۳) به علت ترسالی به بیشتر از ۱۲۷۸ متر رسید. از آن زمان به بعد، به ویژه به دلیل خشکسالی شدید در سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۱، تشدید آن باتوجه به مصرف آب توسط انسان، سطح آب در سال ۲۰۰۳ (معادل سال ۸۲-۱۳۸۱) به ۱۲۷۴ متر کاهش یافت. از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ (معادل سال ۹۳-۱۳۹۲)، وسعت دریاچه تقریباً به نصف کاهش یافت و سطح آب تا ۳ متر دیگر کاهش یافت، درحالی که تغییرات فصلی وسعت آب دریاچه افزایش یافت. پس از سال ۲۰۱۵ (معادل سال ۹۴-۱۳۹۳)، وسعت و ذخیره‌سازی به دلیل بارش نسبتاً زیاد در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶

(معادل سال ۹۵-۱۳۹۴)، افزایش رهاسازی از مخازن و فعالیت‌های مدیریتی برای کاهش مصرف آب تا حدودی بهبود یافته است [۱۶].

پایش مستمر و پویای محدوده دریاچه‌ها و بیلان آب موضوع کلیدی در مدیریت دریاچه‌ها است. یکی از روش‌های پایش وضعیت دریاچه، بررسی بیلان آب در دریاچه است. با استفاده از بیلان آب می‌توان سهم مؤلفه‌های ورودی و خروجی به دریاچه را محاسبه کرد و روابط بین اجزای مختلف و تغییرات دینامیکی آن‌ها را ارزیابی کرده و پاسخ حجم آب را به تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به دست آورد [۲۳].



شکل ۴-۱: ارتفاع سطح آب دریاچه ارومیه و دریای خزر بعد از تشکیل ستاد احیا [۲۶], [۲۵], [۲۴].

باتوجه به وضعیت بحرانی دریاچه فوق شور ارومیه در سال‌های اخیر، نیاز به بررسی وضعیت بلندمدت دریاچه از زمان شدت گرفتن تغییرات است. باتوجه به نبود اتفاق نظر در مورد دریاچه ارومیه و نیاز به بررسی چندوجهی مسئله خشک شدن دریاچه ارومیه، در این پژوهش مؤلفه‌های مؤثر بر دریاچه ارومیه از سال ۱۹۹۰ (معادل سال ۶۹-۱۳۶۸) تا ۲۰۱۸ (معادل سال ۹۷-۱۳۹۶) پایش می‌شود تا بتوان همبستگی و میزان تأثیر هر کدام از این مؤلفه‌ها بر روند تغییرات دریاچه ارزیابی شود و با محاسبه بیلان آب دریاچه برای سال ۱۹۹۹ (معادل سال ۷۸-۱۳۷۷) تا ۲۰۱۸، سرنوشت آب ورودی به دریاچه ارومیه مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت با بررسی تغییرات در حوضه آبریز مانند ساخت سدها، افزایش برداشت از چاه‌ها و تغییرات اقلیمی بررسی می‌شود تا بتوان مهم‌ترین علل مؤثر بر شرایط دریاچه ارومیه را به دست آورد. به‌طور کلی هدف از این پژوهش بررسی مؤلفه‌های بیلان آب در کنار هم و مقایسه مجموع آن‌ها در بیلان آب است تا در وهله اول بتوان از صحت داده‌های استفاده شده اطمینان حاصل کرد و در ادامه بتوان رفتار دریاچه را در مقابل آب ورودی بررسی کرد و نشان داد که چه میزان از آب ورودی به دریاچه ارومیه بعد از تبخیر به‌عنوان تنها خروجی دریاچه باعث افزایش ارتفاع سطح آب می‌شود و آیا در این میان ائتلافی صورت می‌گیرد یا خیر.

۲-۱ نوآوری و سؤالات پاسخ داده شده در پایان نامه

در این مطالعه تلاش شده است تا به سؤالات زیر پاسخ داده شود:

- ۱) رفتار مؤلفه‌های بیلان آب در کنار هم و در مقایسه با ارتفاع سطح آب چگونه است؟
- ۲) آیا آب ورودی به دریاچه بعد از ایستگاه‌های هیدرومتری و تا رسیدن به پهنه آبی دچار تلفات می‌شود و یا کامل وارد دریاچه شده و باعث افزایش سطح آب می‌شود؟
- ۳) دریاچه در برابر دریافت آب چه رفتاری دارد و آیا تمام آب وارد بدنه اصلی دریاچه می‌شود و یا بخش‌های خشک شده دریاچه مانند اسفنج رفتار می‌کند؟
- ۴) در نهایت برای ارزیابی اثر فعالیت‌های انسانی، مؤلفه‌هایی مانند ساخت سدها، احداث چاه‌ها و افزایش زمین‌های کشاورزی در کنار مؤلفه‌های بیلان آب بررسی خواهد شد و تأثیر این تغییرات بر ارتفاع سطح آب در دریاچه به دست خواهد آمد.

باتوجه به مطالب ذکر شده در بالا، نوآوری اصلی این پژوهش در بررسی بیلان آب دریاچه به صورت بلندمدت و با در نظر گرفتن تغییرات مساحت و مقایسه با ارتفاع سطح آب اندازه‌گیری شده در دریاچه و تعیین علت اختلاف آن‌ها است تا بتوان دریافت که آب تا رسیدن به دریاچه چه تلفاتی دارد و چرا به اندازه‌ای که آب باید وارد دریاچه شود ارتفاع سطح آب دریاچه بالا نرفته است یا اینکه آب به اندازه‌ی نیاز زیست‌محیطی دریاچه وارد نمی‌شود.

۳-۱ فرضیات پژوهش

فرضیات در نظر گرفته شده در این مطالعه نیز به ترتیب زیر است:

- استفاده از اطلاعات هواشناسی استخراج شده توسط GEE که در سطح دریاچه میانگین گرفته شده است و برای به دست آمدن بیلان آب دریاچه به یک نقطه یعنی ایستگاه گل‌مانخانه که ارتفاع سطح آب در آن ثبت شده است اختصاص داده شده است. در واقع میانگین نماینده خوبی برای داده‌های اقلیمی بر روی دریاچه است.
- دبی تخلیه آب زیرزمینی و اندرکنش آن با دریاچه یکی از دشوارترین مؤلفه‌های معادله بیلان آب است. دسترسی سخت به آب زیرزمینی، داده‌های محدود سطح آب زیرزمینی، گرادیان هیدرولیکی بسیار کم و تنوع زیاد خاک منطقه باعث می‌شود که اندازه‌گیری آب زیرزمینی بسیار دشوار و یا در اکثر مواقع همراه با خطا باشد [۲۷]. بر اساس مطالعات قبلی، با توجه به ناچیز بودن اثرات آن بر دریاچه ارومیه از تأثیر آب زیرزمینی در مدل‌سازی صرف نظر شده است.

۴-۱ ساختار پایان نامه

در ادامه، این گزارش در پنج فصل دیگر ارائه می‌شود. در فصل دوم نتایج پژوهش‌های موجود در زمینه بررسی بلندمدت دریاچه ارائه شده تا بتوان با نتایج این مطالعه بررسی شود. همچنین مطالعات موجود در زمینه بیلان آب دریاچه بررسی شده و نواقص و ایرادات هر کدام مورد بررسی می‌گیرد و با توجه به روش‌های موجود برای محاسبه مساحت پوشش آبی، بهترین شاخص برای محاسبه مساحت و استفاده در بیلان آب دریاچه ارائه می‌شود. در نهایت، مروری بر عوامل مؤثر بر خشک شدن دریاچه انجام می‌شود تا بتوان علل اختلاف بیلان آب با ارتفاع سطح آب را بررسی کرد. در فصل سوم روش‌های جمع‌آوری اطلاعات مطرح می‌شود و سپس مبانی نظری روش‌های مورد استفاده برای تعیین روند تغییرات داده‌ها و همبستگی بین آن‌ها توضیح داده می‌شود و روش‌های محاسبه مساحت و در نظر گرفتن در بیلان آب بررسی می‌شود. در فصل چهارم نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات مؤلفه‌ها و همبستگی بین آن‌ها توضیح داده می‌شود و در نهایت ارتفاع سطح آب دریاچه، محاسبه شده از مساحت مطالعات پیشین و این پژوهش ارائه می‌شود. در فصل پنجم، نتایج به دست آمده تحلیل و جمع‌بندی و با مطالعات پیشین مقایسه می‌شود و پیشنهادهایی در راستای بهبود مطالعه ارائه می‌شود.