

جمهوری اسلامی ایران



دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه

(دفتر برنامه‌ریزی و تلفیق ستاد احیای دریاچه ارومیه)

بیان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی

مبتنی بر بند ۱ الی ۳ قرارداد سال ۱۳۹۶ دفتر مطالعات سنجش از دور

مرداد ۱۳۹۶

بخشی از فعالیت‌ها که واحد مطالعات ستاد ملزم به ارائه گزارش عملکرد آن‌ها است:

۱- معرفی اجزای بیلان

۱-۱- مروری بر مطالعات گذشته پیرامون بیلان آب در حوضه‌های آبریز

۲- استخراج روش محاسبه بیلان آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۱-۲- بخش یک: استخراج روش محاسبات بیلان اولیه، بدست آوردن ترم S و مقایسه آن با داده‌های

سنجنده GRACE و مدل WGHM

۲-۲- بخش دوم: استخراج روش تدقیق ترم S بیلان با محاسبه اجزای تشکیل‌دهنده آن

۳- محاسبه اجزای بیلان آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۱-۳- محاسبات مربوط به بیلان اولیه، بدست آوردن ترم S و مقایسه آن با داده‌های سنجنده GRACE و

مدل WGHM

۲-۳- انجام اعتبارسنجی اجزای معادله بیلان آب

۳-۳- محاسبه مربوط به استخراج روش تدقیق ترم S بیلان با محاسبه اجزای تشکیل‌دهنده آن

بسمه تعالی

کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه

دفتر برنامه‌ریزی و تلفیق ستاد احیای دریاچه ارومیه

بیان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۵ و

۲۰۱۰ میلادی

مبتنی بر بند ۱ الی ۳ قرارداد سال ۱۳۹۶ دفتر مطالعات

سنجش از دور

تهیه کننده:

مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف

نام نویسندگان

احسان جلیوند - محمد فریدزاد - سهیلا یونس زاده - حامد

حمزه خانی - حمید فرهمند - مریم عمادزاده - پویا کمیلیان -

پیمان صائمان - شیرین شرفبافی

-

مرداد ۱۳۹۶

۱	عنوان سند	بیان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی	
۲	بندهای شرح خدمات (قرارداد بیان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی)	عنوان فعالیت	شماره بند
		۱ الی ۳	۱ الی ۳
		بیان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی	
۳	کد سند	OC11RN9605015	
۴	تهیه کننده	مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف	
۵	نویسندگان	احسان جلیوند- محمد فریدزاد- سهیلا یونس زاده- حامد حمزه خانی- حمید فرهمند- مریم عمادزاده- پویا کمیلیان- پیمان صائمیان- شیرین شرفبافی	
۶	تأیید کننده	-	
۷	تصویب کننده	-	
۸	محتویات سند	در این گزارش جهت بررسی تغییراتی که در طول چندین سال گذشته بحران دریاچه ارومیه را رقم زده، بیان دریاچه در دو وضعیت خوب (سال پربابی ۱۹۹۵ میلادی) و بد (در آستانه خشک شدن و کم آبی، سال ۲۰۱۰ میلادی) مورد بررسی قرار گرفته است.	
۹	تاریخ نشر	مرداد ۱۳۹۶	
۱۰	نوبت ویرایش	سوم	
۱۱	ضمائم	در صورت وجود ضمائیم نوشته شود	
۱۲	نوع تکثیر گزارش	طبقه بندی گزارش	نحوه دسترسی
	☐ مجاز ☐ غیرمجاز	☐ داخلی ☒ به کارفرما (براساس قرارداد)	☐ محدود ☐ نامحدود

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

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

برنامه ریزی و مدیریت صحیح حوضه آبریز نیازمند داشتن اطلاعات جامع و کافی از میزان منابع موجود و مصارف حوضه آبریز می باشد. شناخت رفتار هیدرولوژیکی سیستم، شامل تغییرات زمانی و مکانی اجزای بیلان آب می تواند در اتخاذ تصمیمات صحیح مدیریتی کمک شایانی نماید. در این مطالعه جهت بررسی تغییراتی که در طول چندین سال گذشته بحران دریاچه ارومیه را رقم زده، بیلان دریاچه در دو وضعیت خوب (سال پرآبی ۱۹۹۵ میلادی) و بد (در آستانه خشک شدن و کم آبی، سال ۲۰۱۰ میلادی) مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انجام این کار ابتدا بیلان کلی حوضه (بارش-تبخیر و تعرق) به هدف برآورد تغییرات ذخیره آب حوضه و مقایسه آن با خروجی های GRACE و سایر مدل های جهانی نوشته و سپس به محاسبه اجزا سازنده ذخایر آب حوضه و محاسبه تغییرات حجم مخزن آبخوان زیرزمینی به عنوان تنها ترم مجهول پرداخته شده است.

نتایج نشان می دهد مقدار ذخیره آب حوضه در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ به ترتیب معادل ۸۵۵۵ و ۵۲۲۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته در مقایسه با نتایج مطالعات گذشته در سال های مشابه به مراتب بزرگتر می باشد. تفاوت در برآورد اجزای سازنده معادله بیلان علت اصلی وجود این اختلاف می باشد. تخمین بدست آمده برای بارش در این مطالعه در هر دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ حدود ۲۰ درصد از میانگین برآوردهای سایر مطالعات در مدت مشابه کوچکتر می باشد. اما با توجه به استفاده از ایستگاه های بیشتر، حذف ایستگاه های دارای آمار مشکوک و بررسی دو روش زمین آمار در درونایی (که منجر به نتایج نزدیک به یکدیگر شدند) به نظر می رسد برآوردهای این مطالعه از بارش به واقعیت نزدیکتر می باشد. اگرچه نبود ایستگاه در ارتفاعات (جایی که اکثر بارش حوضه در آن اتفاق می افتد) باعث شده تا بارش تجمعی بدست آمده در این مطالعه قدری دست پایین برآورد شده باشد. در مقابل و در بخش مصارف، برآوردهای بدست آمده از تبخیر و تعرق در سایر مطالعات بسیار متغیر بوده ولی در سال ۲۰۱۰ مقدار محاسبه شده در این مطالعه بیشتر از مطالعات دیگر می باشد. از طرفی مقایسه با نتایج جدیدترین محصول MODIS نیز حاکی از برآورد بیش از دوبرابری تبخیر و تعرق در روش بیلان انرژی در مقایسه با این محصول MODIS می باشد. لذا اگرچه جمیع شواهد نشان دهنده تخمین دست بالای روش به کار رفته در این مطالعه می باشد، اما کمی سازی مقدار خطا نیازمند دسترسی به داده های زمینی مرجع می باشد. اما نظر به اینکه در محاسبات این ترمها از روشهای یکسانی برای هر دو سال استفاده شده است، به نظر می رسد تغییرات ذخیره آب حوضه در سال ۲۰۱۰ تقریباً بیشتر از ۷۰ درصد کاهش در مقایسه با سال ۱۹۹۵ داشته که نشان از افزایش سرعت مصرف ذخایر آب حوضه از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ و کاهش آنها می باشد.

جهت اعتبار سنجی نتایج بدست آمده در فاز اول، در ادامه با شکستن ترم تغییرات ذخیره آب حوضه به اجزای سازنده آن به محاسبه سهم هر جز و مقایسه آن با مقادیر سایر مطالعات پرداخته شد. نتایج نشان می دهد به جز دو ترم تغییرات حجم مخزن دریاچه و تغییرات رطوبت خاک ناحیه ریشه سایر اجزا مجموعاً کمتر از ۵۰۰ میلیون متر مکعب در تغییرات ذخیره آب حوضه نقش دارند. مقادیر بدست آمده از تغییرات حجم مخزن دریاچه تطابق خوبی با جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه دارد. تغییرات ذخیره رطوبت خاک نیز با وجود بزرگ بودن با توجه به میانگین ضریب تخلخل خاک منطقه (حدود ۰,۴۵) و ماندگاری رطوبت در ناحیه ریشه امکان پذیر می باشد.

با این وجود بازهم بخش اعظم تغییرات ذخیره آب حوضه برای ترم مجهول معادله (تغییرات ذخیره آب زیرزمینی) باقی مانده (۲۲۸۰- میلیون متر مکعب در سال ۱۹۹۵ و ۵۷۷۲- میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۰) که مقادیر آن هم از نظر مقدار و هم از نظر جهت تغییرات، اختلاف زیادی (دو مرتبه بزرگی) با نتایج مطالعات گذشته دارد. البته وجود حتی یک درصد خطا در برآورد اجزای اصلی معادله بیلان رقمی بزرگتر از ۱۰۰ میلیون مترمکعب خواهد بود که بیشتر از مقدار برآورد شده برای تغییرات آب زیرزمینی در اکثر مطالعات می باشد، این در حالیست که به طور قطع میزان خطا در محاسبه این ترمها بیشتر از مقدار ذکر شده بوده، لذا به نظر می رسد با این تعداد ترم ورودی و عدم قطعیت موجود در محاسبه هر یک از آنها (که بعضاً قابل ارزیابی در مقیاس حوضه نیست) نمی توان تخمین دقیقی از تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به عنوان ترم مجهول بدست آورد. بنابراین استفاده از روشهای دیگر با امکان کمی سازی دقیقتر خطا (مانند مدل سازی عددی به همراه صحت سنجی با داده های زمینی) یا نوشتن معادله بیلان در مقیاس کوچکتر (زیرحوضه) در مقیاس کوچک و کنترل شده و سپس تجمیع و تعمیم آن به کل حوضه پیشنهاد می گردد.

کلمات کلیدی: بیلان آب حوضه آبریز ارومیه، تغییرات ذخیره آب حوضه، سنجش از دور، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، GRACE

فهرست مطالب

چکیده	.....	أ
فهرست مطالب	.....	ج
۱- مقدمه	.....	۱
۱-۱- مروری بر مطالعات گذشته	.....	۲
۱-۱-۱- مطالعات بیلان آب حوضه آبریز ارومیه و حوضه های مشابه	.....	۲
۱-۱-۲- مطالعات بیلان دریاچه ارومیه و زیرحوضه های اطراف آن	.....	۸
۱-۱-۳- جمع بندی	.....	۱۰
۲- روش شناسی	.....	۱۶
۲-۱- فاز یک: بیلان اولیه، بدست آوردن ترم ΔS و مقایسه آن با داده های سنجنده GRACE و مدل WGHM	.....	۱۶
۲-۱-۱- بارش	.....	۱۶
۲-۱-۲- تبخیر و تعرق	.....	۱۶
۲-۱-۳- تبخیر از دریاچه	.....	۱۷
۲-۱-۴- نحوه صحت سنجی تغییرات ذخیره حوضه با داده های GRACE	.....	۱۷
۲-۱-۵- نحوه صحت سنجی تغییرات ذخیره حوضه با داده های WGHM	.....	۱۸
۲-۲- فاز دوم: تدقیق ترم ΔS بیلان با محاسبه اجزای تشکیل دهنده آن	.....	۱۸
۲-۲-۱- تغییرات ذخیره برف	.....	۱۹
۲-۲-۲- تغییرات حجم دریاچه	.....	۲۰
۲-۲-۳- تغییرات ذخیره سدها	.....	۲۱
۲-۲-۴- تغییرات رطوبت خاک	.....	۲۱
۲-۲-۵- تغییرات آب پوشش گیاهی	.....	۲۲
۲-۲-۶- تغییرات ذخیره آب زیرزمینی	.....	۲۲
۳- نتایج	.....	۲۳
۳-۱- نتایج فاز اول	.....	۲۳
۳-۱-۱- بارش	.....	۲۳

۲۵.....	۳-۱-۲- تبخیر و تعرق
۲۶.....	۳-۱-۳- تبخیر از دریاچه
۲۶.....	۳-۱-۴- تغییرات ذخیره آب حوضه و تحلیل اولیه آن
۳۱.....	۳-۲- اعتبارسنجی اجزای معادله بیلان
۳۱.....	۳-۲-۱- اعتبار سنجی ترم بارش
۳۲.....	۳-۲-۲- اعتبارسنجی ترم تبخیر و تعرق
۳۴.....	۳-۲-۳- اعتبار سنجی ترم تبخیر از دریاچه
۳۶.....	۳-۲-۴- تغییرات ذخیره آب حوضه و مقایسه با مقادیر بدست آمده از مطالعات گذشته
۳۶.....	۳-۲-۵- اعتبارسنجی ترم تغییرات ذخیره آب حوضه (مقایسه با داده های GRACE و مدل WGHM)
۳۹.....	۳-۲-۶- جمع بندی نتایج فاز اول
۴۰.....	۳-۳- نتایج فاز دوم
۴۰.....	۳-۳-۱- تغییرات ذخیره برف
۴۲.....	۳-۳-۲- تغییرات حجم دریاچه
۴۴.....	۳-۳-۳- تغییرات ذخیره سدها
۴۶.....	۳-۳-۴- تغییرات رطوبت خاک
۴۸.....	۳-۳-۵- تغییرات آب پوشش گیاهی
۴۹.....	۳-۳-۶- تغییرات ذخیره آب زیرزمینی
۵۳.....	۴- نتیجه گیری
۵۵.....	۵- مراجع
۱.....	پیوست الف: مقادیر بدست آمده برای اجزای معادله بیلان در مطالعات گذشته

فهرست شکل ها

- شکل ۱- مقایسه ارتفاع بارش در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی ۲۴
- شکل ۲- میزان بارش متوسط سالانه در حوزه آبریز ارومیه (ITC) ۲۴
- شکل ۳- میزان بارش متوسط سالانه در حوزه آبریز ارومیه از سال ۱۹۸۶ تا سال ۲۰۱۱ میلادی (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور) ۲۴
- شکل ۴- تغییرات ماهانه میانگین تبخیر و تعرق در سطح حوزه ارومیه ۲۵
- شکل ۵- مقایسه ارتفاع تبخیر در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی ۲۶
- شکل ۶- تغییرات ذخیره آب حوزه در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی ۲۹
- شکل ۷- رسم هم زمان ترمهای مختلف معادله بیلان آب در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ ۳۰
- شکل ۸- رسم هم زمان ترمهای مختلف معادله بیلان آب در ماههای مختلف سال ۲۰۱۰ ۳۰
- شکل ۹- مقایسه روشهای IDW و Kriging در برآورد بارش با استفاده از داده های ایستگاههای هواشناسی و وزارت نیرو ۳۲
- شکل ۱۰- نقشه ارتفاع تبخیر و تعرق (cm) حوزه آبریز ارومیه در سال ۲۰۱۰ بر اساس محصول MOD16A3 سنجنده MODIS که جدیدترین محصول ارائه شده تبخیر و تعرق از این سنجنده می باشد. این محصول برآورد به شدت پایین در مقایسه با الگوریتم بیلان انرژی در همین سال دارد ۳۴
- شکل ۱۱- مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوزه که از اختلاف بارش و تبخیر و تعرق حوزه بدست آمده با ترم TWS ماهواره GRACE ۳۷
- شکل ۱۲- مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوزه که از اختلاف بارش و تبخیر و تعرق حوزه بدست آمده با ترم TWS مدل WGHM ۳۸
- شکل ۱۳- تغییرات ذخیره آب معادل برف در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی بر اساس داده های سه ساعته آب معادل برف GLDAS ۴۱
- شکل ۱۴- سطح برف در روزهای انتهایی سال ۲۰۰۹ و روزهای ابتدایی ۲۰۱۰؛ افزایش مقدار آب معادل برف در ماه ژانویه ۲۰۱۰ قابل مشاهده می باشد ۴۱
- شکل ۱۵- تغییرات سطح برفی مشاهده شده از سنجنده AVHRR در ماههای ابتدایی سال ۱۹۹۵ میلادی که نشان دهنده بارش برف سنگین در انتهای سال ۱۹۹۴ می باشد. ۴۲
- شکل ۱۶- تغییرات حجم دریاچه در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی طبق منحنی سطح - حجم - ارتفاع موسسه تحقیقات آب ۴۳
- شکل ۱۷- تغییرات ذخیره آب سدها در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی ۴۶

- شکل ۱۸- تغییرات رطوبت خاک در ماههای مختلف دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی (خروجی های مدل GLDAS) ۴۷
- شکل ۱۹- تغییرات ضریب تخلخل در مقیاس جهان بر اساس خروجی های مدل جهانی GLDAS، در محدوده ایران (واکثر نقاط جهان) مقدار ضریب تخلخل بین ۰,۴ و ۰,۵ متغیر است ۴۸
- شکل ۲۰- تغییرات ذخیره آب پوشش گیاهی در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی بر مبنای مدل GLDAS ۴۹

فهرست جداول

جدول ۱- خلاصه ایی از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز، دریاچه ارومیه و حوضه های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط استفاده شده در هر مطالعه	۱۱
جدول ۲- مطالعات بیلان آب انجام شده بر اساس داده تغییرات ذخیره آب حوضه ماهواره GRACE و دادههای مدل GLDAS	۱۴
جدول ۳- متغیرهای هیدرولوژیکی خروجی مدل GLDAS	۲۰
جدول ۴- ۱۲ سد اصلی حوضه آبریز ارومیه که ۸۵ درصد آب تنظیمی آن را در خود ذخیره کرده اند (سدهایی که در سال ۱۹۹۵ در حال بهره برداری بوده اند با علامت ☒ نشان داده شده اند)	۲۱
جدول ۵- بیلان آب حوضه آبریز ارومیه در مقیاس ماهانه و سالانه در سال ۲۰۱۰	۲۷
جدول ۶- بیلان آب حوضه آبریز ارومیه در مقیاس ماهانه و سالانه در سال ۱۹۹۵	۲۸
جدول ۷- بیلان سالانه حوضه در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی (بر حسب میلیون متر مکعب)	۲۹
جدول ۸- مقادیر بدست آمده برای بارش در سایر مطالعات انجام شده در حوضه آبریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۱ پیوست الف آورده شده است)	۳۱
جدول ۹- مقادیر بدست آمده در سایر مطالعات برای تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۵ پیوست الف آورده شده است)	۳۳
جدول ۱۰- مقادیر بدست آمده در سایر مطالعات برای تبخیر دریاچه ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۵ پیوست الف آورده شده است)	۳۵
جدول ۱۱- مقادیر بدست آمده برای تغییرات ذخیره آب حوضه در سایر مطالعات (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۲ پیوست الف آورده شده است)	۳۶
جدول ۱۲- تغییرات ذخیره مخزن آب دریاچه در مطالعات مختلف (توضیحات تکمیلی در جدول ۳ پیوست الف آورده شده است)	۴۳
جدول ۱۳- تغییرات حجم دریاچه در ماههای مختلف سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ بر حسب متر مکعب در ماه	۴۴
جدول ۱۴- تغییرات ذخیره آب سدها در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی	۴۵
جدول ۱۵- مقادیر تغییرات ذخیره مخزن آبخوان زیرزمینی در سایر مطالعات حوضه آبریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۴ پیوست الف آورده شده است)	۵۰
جدول ۱۶- سهم هر جز تغییرات ذخیره آب حوضه در مقدار کل تغییرات ذخیره آب حوضه در سال ۱۹۹۵	۵۱

جدول ۱۷- سهم هر جز تغییرات ذخیره آب حوضه در مقدار کل تغییرات ذخیره آب حوضه در سال ۲۰۱۰
۵۲.....

۱- مقدمه

در حوضه‌های آبریزی که مقدار آب در دسترس اندک می باشد، مدیریت میزان آب موجود جهت استفاده در مصارف مختلف از اهمیت بالایی برخوردار بوده و این موضوع نیازمند دسترسی به اطلاعات درست و دقیق می باشد. معمولاً اطلاعات میدانی دقیقی از میزان منابع و مصارف حوضه در دسترس نبوده که این امر فهم چرخه هیدرولوژیکی در جریان در منطقه را با مشکل مواجه می سازد. برای درک چرخه هیدرولوژیکی اطلاع از تغییرات مکانی و زمانی اجزای سازنده بیلان آب حوضه از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. به عبارتی پایش همزمان منابع و مصارف و برر سی اندرکنش بین آنها می تواند گره گشای مسائل موجود در مدیریت حوضه باشد. البته این موضوع فقط زمانی کارایی دارد که تغییرات مکانی- زمانی پارامترها به خوبی دیده شده باشد. بر همین مبنا در این مطالعه اجزای بیلان آب با استفاده از روش‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات زمینی برای حوضه آبریز ارومیه محاسبه شده اند. همچنین جهت مشخص شدن تغییراتی که در طول چندین سال گذشته بحران دریاچه ارومیه را ایجاد کرده اند، بیلان دریاچه در دو وضعیت خوب (سال پربابی ۱۹۹۵ میلادی) و بد (در آستانه خشک شدن و کم آبی، سال ۲۰۱۰ میلادی) نوشته شده است. در این مطالعه پس از بررسی مطالعات مشابه، بیلان آب حوضه آبریز ارومیه طی دو فاز مورد بررسی قرار گرفته است. در فاز اول با محاسبه دو جز اصلی معادله بیلان یعنی بارش و تبخیر و تعرق تغییرات ذخیره آب حوضه محاسبه و با خروجی های TWS^۱ سنجنده GRACE مقایسه شده است. در فاز دوم با محاسبه اجزای سازنده ترم تغییرات ذخایر آب حوضه اقدام به اندازه گیری تقریبی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی شده است. در بخش اول این گزارش خلاصه ای از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و حوضه های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط استفاده شده در هر مطالعه به صورت خلاصه در قالب یک جدول آورده شده است، در بخش دوم (روش شناسی) ابتدا با ارائه رابطه مبنا بیلان آب، به توضیح روش اتخاذ شده برای محاسبه هر جز این معادله پرداخته و نحوه صحت سنجی ترم تغییرات ذخیره آب حوضه با داده TWS ماهواره GRACE شرح داده می شود. سپس به تشریح فاز دوم و نحوه محاسبه اجزای سازنده ترم تغییرات ذخیره آب حوضه پرداخته می شود. در ادامه و در بخش سوم نتایج هر دو فاز در قالب دو بخش مجزا ارائه می شوند:

- **نتایج فاز اول:** شامل محاسبه اجزای اصلی سازنده معادله بیلان (بارش، تبخیر و تعرق حوضه و تبخیر از دریاچه) و تغییرات ذخیره آب حوضه به عنوان خروجی در مقیاس ماهانه و مقایسه آن با داده های TWS ماهواره GRACE

^۱ Total Water Storage (TWS)

- نتایج فاز دوم: شامل محاسبه اجزای تشکیل دهنده ترم ذخیره آب حوضه و تغییرات ذخیره آب

زیرزمینی به عنوان خروجی

نهایتاً در بخش چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار توضیح داده خواهد شد.

۱-۱- مروری بر مطالعات گذشته

مطالعات بیلان انجام گرفته را می‌توان به چهار دسته‌ی بیلان آب دریاچه ارومیه، بیلان آب یک یا چند زیر حوضه از حوضه آبریز ارومیه، بیلان آب کل حوضه آبریز ارومیه و نهایتاً بیلان آب حوضه‌های مشابه ارومیه تقسیم نمود. هدف مطالعه حاضر برآورد بیلان آب حوضه آبریز ارومیه بوده، اما از آنجایی که روش محاسبه اجزای معادله بیلان نیز حائز اهمیت می‌باشد، در این گزارش مطالعات مربوط به دریاچه و زیرحوضه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه ابتدا به بررسی مطالعات بیلان حوضه آبریز ارومیه و حوضه‌های مشابه آن به هدف استخراج بهترین روش برای نوشتن معادله بیلان پرداخته می‌شود، سپس در ادامه مطالعات بیلان زیرحوضه‌ها و دریاچه ارومیه به هدف بررسی روش محاسبه و مقادیر اجزای معادله بیلان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۱-۱- مطالعات بیلان آب حوضه آبریز ارومیه و حوضه‌های مشابه

مطالعات متعددی در زمینه بیلان آب حوضه آبریز ارومیه انجام گرفته است، این مطالعات از سه منظر نحوه نوشتن معادله بیلان، نحوه محاسبه اجزای به کار رفته در آن و مقادیر بدست آمده برای هر یک از آنها حائز اهمیت می‌باشند. در این بخش ابتدا مروری بر مطالعات بیلان آب حوضه با محوریت حوضه آبریز ارومیه پرداخته سپس چند مطالعه انجام شده در سایر حوضه‌های آبریز مشابه در ایران یا سایر نقاط جهان مورد بررسی قرار خواهد گرفت در ادامه با هدف بررسی روش‌های محاسبه و مقادیر اجزای معادله بیلان مطالعات انجام شده در خصوص بیلان دریاچه و نهایتاً معادله بیلان به کار رفته در این مطالعه با بیان فرض‌ها و محدودیت‌ها آورده خواهد شد.

تقریباً مطالعات انجام شده در زمینه بیلان آب حوضه آبریز ارومیه محدود و شامل پنج مطالعه اصلی می‌باشد. موسسه بین‌المللی علوم و پایش زمین (ITC) طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۳ بیلان آب حوضه را (بدون در نظر گرفتن دریاچه) برای سالهای آبی ۱۹۹۹-۲۰۰۰ و ۱۹۹۴-۱۹۹۳ با کسر کردن مقدار بارش از تبخیر و تعرق واقعی حوضه بدست آوردند. ایشان در این مطالعه از جز نفوذ و تغییرات ذخیره آب حوضه صرف نظر کرده و فرض نمودند که اختلاف بارش و تبخیر و تعرق به صورت رواناب وارد دریاچه می‌شود

$$P - ET = Lake\ IN \quad (1)$$

در معادله (۱)، P مقدار بارش (معلوم)، TE مقدار تبخیر و تعرق (معلوم) و NI مقدار آب ورودی به دریاچه (مجهول) می‌باشد. در این مطالعه مقدار بارش با استفاده از درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های وزارت نیرو و هواشناسی برآورد شده که در سال‌های ۱۹۹۳-۱۹۹۴ و ۲۰۰۰-۱۹۹۹ به ترتیب معادل ۵۰۱ و ۲۵۹ میلی‌متر می‌باشد. مقدار تبخیر تعرق مکانی نیز با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر AVHRR در دو سال آبی ۲۰۰۰-۱۹۹۹ و ۱۹۹۴-۱۹۹۳ میلادی تخمین زده شده و به ترتیب معادل ۱۴۹۶۰ و ۱۵۶۰۰ میلیون متر مکعب می‌باشد.

در مطالعه برنامه جامع سازگاری با اقلیم و تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه‌های آبریز (وضعیت موجود و آینده منابع آب در حوضه آبریز ارومیه) که در سال ۱۳۸۴ توسط مهندسين مشاور جاماب انجام گرفت، بیلان حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از اطلاعات هواشناسی، آب سطحی و آب زیر زمینی، برای سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک معادله بیلان متوسط دراز مدت در فاصله زمانی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۴۲ (دوره شاخص) در حوضه آبریز ارومیه بسته شده است (معادله (۲)).

$$I - O = \Delta S \quad (2)$$

در معادله (۲) پارامترهای ورودی شامل حجم بارندگی و جریان‌های ورودی و انتقالی (سطحی و زیرزمینی) و پارامترهای خروجی شامل تبخیر و تعرق و جریان‌های خروجی از حوضه آبریز ارومیه می‌باشد. با تفاضل این دو مقدار عدد ذخیره حوضه محاسبه شده است.

مقدار تبخیر و تعرق شامل مجموع مقادیر تبخیر از آب باران، تبخیر از آب آزاد، تبخیر از آبخوان و مقدار مصرف خالص بوده و در سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ معادل ۱۵۸۶۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین مقدار متوسط این ترم در دوره زمانی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۴۲ معادل ۲۱۲۹۱ میلیون متر مکعب برآورد شده است. جز بارش با استفاده از آمار ۶۲ ایستگاه شاخص باران سنجی و ضرایب تعدیل (به ترتیب ۰٫۹۲ تا ۱٫۰۰)، محاسبه و مقدار آن در دوره شاخص بارندگی ۲۰۹۶۸ میلیون متر مکعب برآورد شده است. در سال ۷۹-۸۰ نیز این مقدار ۱۴۵۸۶ میلیون متر مکعب می‌باشد.

در دوره شاخص میزان کل آب ورودی (بارندگی و جریان‌های ورودی و انتقالی) و خروجی از حوضه آبریز ارومیه به ترتیب معادل ۲۱۲۶۸ و ۲۱۲۹۱ میلیون متر مکعب می‌باشد. در این دوره تغییرات ذخیره آبخوان معادل ۲۳- و تغییرات ذخیره دریاچه و سد معادل صفر میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین میزان کل ورودی و خروجی حوضه آبریز ارومیه در سال آبی ۸۰-۱۳۷۹ به ترتیب معادل ۱۴۷۸۴ و ۱۵۸۲۶ میلیون متر مکعب، تغییرات ذخیره آبخوان معادل ۸۸- و تغییرات ذخیره دریاچه و سد معادل ۹۵۴- میلیون متر مکعب می‌باشد.

در مطالعه‌ای که توسط هارونی (۱۳۹۰) انجام شد، معادله بیلان آب حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از رابطه (۳) در فاصله سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

$$Ingw = ETa - P + dWu/dt + Q \downarrow \quad (3)$$

در این رابطه $Ingw$ معادل میزان برداشت خالص آب زیرزمینی، Q معادل میزان ورودی به دریاچه (بر حسب MCM)، dWu/dt معادل تغییرات رطوبت ناحیه غیرا شباع خاک (MCM)، P معادل بارندگی بر روی دشت‌ها و ارتفاعات (MCM) و ETa معادل تبخیر و تعرق واقعی (MCM) در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، بیلان آب یک‌بار برای دریاچه و یک بار برای حوضه (غیر از دریاچه) برآورد شده است. جهت انجام اینکار ابتدا با محاسبه تبخیر از دریاچه، بارندگی بر سطح آن و تغییرات حجم دریاچه، مقدار آب سطحی و زیرزمینی ورودی به آن بدست آورده شده، سپس با استفاده از این ترم و برآورد مقدار بارش، تبخیر و تعرق از سطح حوضه بدون دریاچه و تغییرات ذخیره رطوبت خاک حوضه، مقدار خالص برداشت از آب زیرزمینی محاسبه شده است. در برآورد اجزای معادله (۲) ترم بارش از طریق درون‌یابی به روش کریجینگ از داده‌های ۷۴ ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو محاسبه و مقدار میانگین آن در دوره مطالعاتی (۲۰۰۶-۲۰۰۲) معادل ۳۶۹ میلی‌متر در سال برآورد شده است. محاسبه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBAL صورت پذیرفته و متوسط آن در دوره مطالعاتی (۲۰۰۶-۲۰۰۲) معادل ۳۱۸ میلی‌متر برآورد شده است. نهایتاً نتایج این مطالعه نشان می‌دهد میزان برداشت خالص آب زیرزمینی در دوره مطالعاتی (۲۰۰۶-۲۰۰۲)، معادل ۲۳۰ میلی‌متر (۴/۸- میلیون متر مکعب) در سال می‌باشد. نتایج مطالعه ایشان نشان می‌دهد، در فاصله سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ به طور متوسط سالانه ۲۰ میلیون مترمکعب برداشت اضافی از آب زیرزمینی انجام شده است.

مطالعه روند نمای بیلان محدوده مطالعاتی ارومیه در سال افق ۱۴۲۰ (در قالب بهنگام سازی طرح جامع آب کشور) که توسط شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس و به سفارش دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا وزارت نیرو، در سال ۱۳۹۱ صورت گرفته جهت برآورد بیلان آب، مدل بیلان جامع منابع آب سطحی و زیرزمینی برای هر یک از زیرحوضه‌های این حوضه آبریز در نرم افزار Vensim نوشته و شبیه سازی نموده است. این مطالعه در مقیاس زیرحوضه انجام شده و فرضیات موجود در نوشتن بیلان حوضه اصلی مانند بسته بودن حوضه از نظر هیدرولوژیکی و عدم تبادل آب زیرزمینی با آبخوان‌های خارج حوضه در آن وجود ندارد. رابطه بیلان به کار رفته در این مطالعه به صورت معادله (۴) است.

$$P + GW_{in} = ET + GW_{out} + Out_s + \Delta S_s + \Delta S_{GW} \quad (4)$$

در این رابطه P بارش، ΔS ذخایر آب سطحی، ET تبخیر و تعرق، Out_s آب سطحی خارج شده از زیرحوضه، GW_{in} آب زیرزمینی ورودی، Out_{GW} آب زیر زمینی خارج شده از زیرحوضه و ΔS_{GW} تغییرات ذخیره آب زیر زمینی می‌باشد.

حجم بارش ارتفاعات و حجم بارش دشت به ترتیب از حاصل ضرب مساحت ارتفاعات و دشت در مقدار بارندگی به دست آمده است. مقدار بارش در دوره زمانی ۱۳۷۶-۱۳۸۶ معادل ۳۷۵ میلی‌متر در ارتفاعات و ۳۳۸ میلی‌متر در اراضی دشتی می‌باشد. حجم کل بارش در این دوره زمانی معادل ۱۷۲۰۳ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است.

حجم تبخیر و تعرق ناشی از بارش در ارتفاعات و دشت، تبخیر از سد ها، تبخیر از کفه ها و دریاچه ها، تبخیر از آبخوان و نهایتاً تبخیر ناشی از مصارف می باشد. حجم تبخیر از حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره زمانی ۱۳۸۶-۱۳۷۶ معادل ۸۹۴۵ میلیون متر مکعب می‌باشد. همچنین مقدار تبخیر و زهکشی از سفره آب زیر زمینی در این مطالعه معادل ۵۶۵/۶ میلیون متر مکعب است. میزان جریان های ورودی و خروجی از حوضه آبریز ارومیه در دوره ۱۳۸۶-۱۳۷۶ به ترتیب معادل ۱۹۹۱/۹ و ۲۰۲۳/۷ میلیون متر مکعب، تغییرات ذخیره آب حوضه معادل ۳۱/۸- میلیون متر مکعب در سال می‌باشد.

در مطالعه‌ای که توسط موسسه پژوهشی مهندسی راهبرد دانش پویا در سال ۱۳۹۱ انجام شده است بیلان آبی حوضه دریاچه ارومیه مورد در سال ۱۳۷۳ بررسی قرار گرفته است. معادله (۵) به عنوان رابطه بیلان در این مطالعه به کار رفته است.

$$P - ET = \Delta S \quad (5)$$

در رابطه (۵)، P کل بارش حوضه، ET کل تبخیر و تعرق از دشت‌ها، ارتفاعات، آب زیرزمینی و دریاچه‌ها و کفه‌ها و ΔS مقدار تغییرات ذخیره (تفاضل تغذیه و تخلیه) در حوضه آبریز ارومیه است.

مقدار بارش بر مبنای آمار شرکت مدیریت منابع آب بوده و در سال ۱۳۷۳ در کل حوضه آبریز ارومیه معادل ۲۰۱۲۱/۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. مجموع تبخیر تعرق و تبخیر از دشت‌ها، ارتفاعات، آب زیرزمینی و دریاچه‌ها و کفه‌ها در سال ۱۳۷۳ بر اساس طرح جامع آب و آمار و اطلاعات گزارش شده مورد تحلیل قرار گرفته و معادل ۱۶۲۹۵/۴ میلیون متر مکعب می‌باشد. تغذیه شامل مجموع پارامتر های بارندگی ارتفاعات و دشت ها، جریان زیرزمینی ورودی، جریان های سطحی، تغذیه آبخوان و از مصارف و تخلیه شامل مجموع پارامتر های تبخیر از آب زیرزمینی، جریان زیرزمینی خروجی، زهکشی از آب زیرزمینی، تبخیر دریاچه ها و کفه ها، چاه و قنات و چشمه آبرفتی است. مقدار عددی تغییرات ذخیره (تفاضل تغذیه و تخلیه) در حوضه آبریز ارومیه و در سال ۱۳۷۳ معادل ۵۴/۱- میلیون متر مکعب و در سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ معادل ۴۱/۴۵- میلیون متر مکعب می‌باشد.

نهایتاً در بخشی از مطالعه انجام گرفته توسط توریان و همکاران در سال ۲۰۱۵، تحت عنوان پایش کاهش تراز دریاچه ارومیه با استفاده از چندین سنسور ماهواره‌ای، مؤلفه‌های اصلی بیلان حوضه شامل بارش و تبخیر و تعرق در ۱۳ سال متوالی با استفاده از داده‌های جهانی محاسبه و اختلاف آن‌ها که نشانگر تغییرات

ذخیره آب در حوضه است بر مبنای معادله (۶) تخمین زده شده است (Tourian et al., 2015). نهایتاً نتایج با تصاویر ماهواره‌ای GRACE در محدوده حوضه آبریز ارومیه مقایسه شده است.

$$P - ET = dM/dt \quad (۶)$$

در این معادله P بارش حوضه و ET مقدار تبخیر و تعرق و dM/dt تغییرات ذخیره آب حوضه می باشد که نهایتاً با خروجی ذخیره آب کل (TWS) ماهواره GRACE مقایسه خواهد شد. نتایج مقایسه اختلاف بارش و تبخیر و تعرق و داده TWS ماهواره GRACE در طول ۱۳ سال نشان دهنده ارتباط نزدیک این دو پارامتر با شاخص همبستگی 0.73 می باشد. نتایج این مطالعه همچنین نشان می دهد ذخیره آب حوضه آبریز ارومیه به طور متوسط $0.09 \pm 1/4$ میلیارد مترمکعب در سال در کل حوضه کاهش یافته که البته روند آن در قبل و بعد از سال ۲۰۰۸ متفاوت است. به عبارتی از بعد از سال ۲۰۰۸ کاهش ذخیره دریاچه با سرعت بیشتری در مقایسه با حوضه انجام گرفته که نشان دهنده افزایش ذخیره آب زیرزمینی در حوضه می باشد. توریان و همکاران دو سناریو را در وقوع این پدیده محتمل دانسته اند. (۱) ورود آب از دریاچه به آبخوان‌های حوضه در اثر افت تراز آب زیرزمینی در اراضی کشاورزی اطراف دریاچه، (۲) توسعه طرح‌های کنترل آب در بالادست رودخانه‌ها و تخصیص آب برای مصارف کشاورزی که کاهش ورود آب به دریاچه را به همراه داشته است. مطالعات بیان انجام شده در سایر حوضه‌های کشور و حوضه‌های خارجی مشابه دریاچه ارومیه نیز از منظر نحوه نگارش معادله بیان حائز اهمیت می باشند. لذا در این بخش سه مطالعه انجام شده در حوضه‌های آبریز مشابه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعه ای تحت عنوان ارزیابی مقدار آب در دسترس و میزان مصرف آب در حوضه آبریز کرخه با استفاده از فناوری سنجش از دور و تکنیک‌های زمین آمار (۲۰۱۰) مقادیر منابع و مصارف حوضه در گام زمانی ماهانه در مقیاس زیرحوضه بدست آورده شده است (Muthuwatta, et al., 2010). تفاوت حوضه آبریز کرخه با حوضه ارومیه وجود رواناب و جریان آب زیرزمینی ورودی و خروجی در حوضه می باشد به عبارتی حوضه کرخه یک حوضه بسته نیست، اما سهم این جریانات از کل بیان حوضه کوچک است. از طرفی مقادیر بارش و تبخیر و تعرق در این حوضه نزدیک به مقادیر حوضه آبریز ارومیه بوده، بنابراین شرایط بیان آب در این حوضه تقریباً با حوضه ارومیه قابل مقایسه می باشد. معادله بیان به کار رفته در این مطالعه به صورت رابطه (۷) می باشد.

$$P + Q_{in} + G_{in} + E_{ta} - Q_{out} - G_{out} = \Delta S \quad (۷)$$

که در آن P برابر با مقدار بارش، Q_{in} جریان ورودی آب سطحی، Q_{out} جریان خروجی آب سطحی، E_{ta} برابر با تبخیر و تعرق واقعی، G_{out} جریان خروجی آب زیر زمینی و G_{in} برابر با جریان ورودی آب زیرزمینی

برحسب میلیون متر مکعب در سال هستند. ΔS نیز برابر با تغییرات ذخیره آب در حوضه بر حسب میلیون متر مکعب در سال بوده که تغییرات در ذخیره آب زیرزمینی، آب سطحی و رطوبت خاک را شامل می‌شود. از آنجاکه بیلان آب برای یک سال آبی بسته شده و همچنین تخمین‌ها در مقیاس زیر حوضه بیان شده‌اند، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی قابل اقامض فرض شده است. در این مطالعه لایه توزیع بارش با استفاده از داده های ۳۰ ایستگاه باران سنجی و روش کریجینگ تولید شده و جهت تخمین تبخیر و تعرق مکانی نیز از روش SEBS استفاده شده است. جهت صحت سنجی نتایج تبخیر و تعرق، نتایج حاصل از روش SEBS در چند موقعیت ایستگاهی با نتایج بدست آمده از روش‌های Priestly and Taylor و Penman-Monteith مقایسه شده‌اند.

در این مطالعه مقدار اختلاف دو ترم بارش و تبخیر و تعرق برای کل حوضه معادل $7/8 \pm$ کل بارندگی آن بدست آمده که فرض شده به صورت رواناب خروجی وارد هور العظیم می‌شود. اما با توجه به ورود جریان رودخانه به هورالعظیم و ارتباط آن با آب‌های آزاد امکان سنجش تغییرات در حجم هور ناشی از جریانات خروجی حوضه وجود ندارد (موردی که در حوضه آبریز ارومیه و در دریاچه ارومیه امکان پذیر است). در مطالعه‌ی دیگری بر روی حوضه آبریز دریاچه Devils (در ایالت داکوتای شمالی) که از لحاظ هیدرولوژیکی بسته است، رویکرد بیلان آب سلول محور جهت تخمین بیلان سالانه این حوضه بکار گرفته شده است. در این روش ابتدا با استفاده از لایه توزیع مکانی بارش، داده‌های کاربری اراضی و طبقه‌بندی خاک، رواناب سطحی ورودی و خروجی به هر سلول از شبکه با روش شماره منحنی (curve number) محاسبه شده است. سپس تبخیر و تعرق مکانی نیز با استفاده از یک مدل بیلان انرژی سطحی با داده‌های سنجش از دور تخمین زده شده نهایتاً معادله بیلان آب برای شبکه ساخته شده نوشته و مقادیر تغییرات ذخیره به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر مشاهده شده مقایسه شده‌اند. معادله به کار رفته در این مطالعه به صورت رابطه (۸) است:

$$P + GWin + Qin = Qout + ET + GWout \pm \Delta Storage \quad (8)$$

که در آن P بارش (MCM/yr)، $GWin$ تغذیه آب زیرزمینی (MCM/yr)، Qin دبی ورودی به هر سلول از سلول‌های بالادست (MCM/yr)، $Qout$ دبی است که از سلول خارج می‌شود (MCM/yr)، ET تبخیر و تعرق (MCM/yr)، $GWout$ خروجی آب زیرزمینی (MCM/yr) و $\Delta Storage$ تغییر در ذخیره آب از سال گذشته (MCM/yr) است.

حجم بارش بر سطح حوضه با استفاده از روش چندضلعی تیسن با استفاده از شبکه‌ای با ۷ ایستگاه بارندگی تخمین زده شده است. رواناب حاصل از بارش با روش شماره منحنی (CN) و با استفاده از لایه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی محاسبه شده و با استفاده از داده‌های دبی ۹ سیلاب در یکی از زیرحوضه‌ها در ۴ سال مختلف مطابق رابطه (۹) کالیبره شده است. لایه تبخیر و تعرق با استفاده از روش SEBAL

محاسبه و مقدار پارامتر ذخیره (Storage) نیز با محاسبه سایر مؤلفه‌های بیلان به عنوان باقیمانده رابطه بیلان آب تعیین شده است.

$$(9) \quad \text{رواناب خالص در هر سلول} = \text{ورودی بالادست (Qin)} - \text{خروجی (Qout)}$$

۱-۲- مطالعات بیلان دریاچه ارومیه و زیر حوضه های اطراف آن

تقریباً اکثر مطالعات بیلان انجام شده در منطقه مربوط به بیلان آب دریاچه ارومیه می باشد که در آنها بسته به اطلاعات ورودی یکی از اجزای معادله به عنوان مجهول محاسبه شده است. این جز در اکثر مطالعات تغییرات حجم آب دریاچه (موسسه تحقیقات آب و همکاران، ۱۳۸۵، شرکت مهندسی مشاور یکم ۱۳۸۳؛ Water research institute & International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) 2005) و در برخی مقدار آب ورودی به دریاچه (شامل آب های سطحی و زیرزمینی) می باشد (باقری هارونی، ۱۳۹۰). هدف اصلی در بررسی این مطالعات روش به کار رفته در برآورد سه جز تبخیر، بارش و تغییرات حجم دریاچه می باشد. مطالعات انجام گرفته بر روی زیر حوضه های اطراف دریاچه ارومیه نیز با توجه به در نظر گرفتن اجزای آب سطحی و زیرزمینی ورودی و خروجی به زیر حوضه، متفاوت از مطالعات بیلان آب حوضه اصلی است. اما این مطالعات از نظر روش محاسبه اجزای معادله بیلان (به ویژه تبخیر و تعرق) و ارزیابی دقت محاسباتی در روش های به کار رفته مورد توجه می باشند. در مطالعه ای توسط شرکت مهندسی مشاور یکم به سفارش شرکت سهامی آب منطقه ای آذربایجان غربی در سال ۱۳۸۳، بیلان آبی دریاچه ارومیه در یک دوره ۳۵ ساله مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه بیلان آب دریاچه ارومیه با استفاده از رابطه (۱۰) بررسی شده است.

$$(10) \quad V2 = V1 + R + Qs + QG - E$$

اجزای معادله (۱۰) بر اساس واحد میلیون متر مکعب بوده و شامل $V2$ حجم آب در پایان دوره هیدرولوژیکی، $V1$ معادل حجم آب در شروع دوره هیدرولوژیکی، R معادل بارش بر روی دریاچه، Qs معادل خالص جریان های ورودی سطحی به دریاچه، QG معادل خالص جریان های ورودی زیرزمینی به دریاچه و E معادل با تبخیر از سطح دریاچه در یک دوره هیدرولوژیکی می باشد. پس از حل معادله فوق و جهت بررسی دقت محاسبه مدل، نتایج آن با تغییرات واقعی حجم دریاچه که به کمک منحنی حجم-ارتفاع به دست آمده، مقایسه شده که نتایج قابل قبولی نشان داده است.

در این مطالعه میزان تبخیر دریاچه ارومیه (E) با استفاده از ضریب متوسط تبدیل ارتفاع تبخیر تشت آب شیرین به ارتفاع تبخیر آب شور دریاچه ارومیه (۰/۷۶) و درون یابی اطلاعات ایستگاه ها با روش کریجینگ محاسبه گردیده است. بر اساس روش شناسی مذکور در این مطالعه، متوسط ترم تبخیر از دریاچه ارومیه در

دوره ۳۵ ساله (۱۳۸۰-۱۳۴۵) معادل ۱۱۵۸/۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین این مقدار در سال ۱۳۷۳-۱۳۷۴ معادل ۸۶۶/۲ میلی‌متر می‌باشد. ترم بارش (R) نیز از طریق برر سی توزیع مکانی بارش در محدوده دریاچه، با استفاده از اطلاعات ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک اطراف آن و با بهره‌جستن از تکنیک‌های زمین‌آمار کریجیگ به‌دست‌آمده است. مقدار متوسط بارش بر سطح دریاچه در دوره ۳۵ ساله (۱۳۷۹-۱۳۴۴) برابر ۲۹۶/۹ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در این مطالعه مقدار بارش در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۷۴ به ترتیب معادل ۳۶۹/۳ و ۲۶۹/۷ میلی‌متر می‌باشد.

در مطالعه‌ای که توسط هارونی (۱۳۹۰) انجام شده است، معادله بیلان آبی دریاچه ارومیه با استفاده از رابطه (۱۱) در فاصله سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

$$Q \downarrow = E - P + d\text{Level}/dt \quad (11)$$

در این رابطه P معادل حجم بارندگی روی دریاچه (MCM)، E معادل تبخیر از سطح دریاچه (MCM)، $d\text{Level}/dt$ معادل تغییرات تراز دریاچه (MCM) و $Q \downarrow$ میزان ورودی به دریاچه (بر حسب MCM) می‌باشد. در برآورد اجزای معادله (۱۱) ترم بارش از طریق درون‌یابی به روش کریجینگ و ۷۴ ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو محاسبه و مقدار میانگین آن در دوره مطالعاتی (۲۰۰۲-۲۰۰۶) معادل ۳۱۰ میلی‌متر می‌باشد. محاسبه تبخیر با استفاده از مدل شار انرژی صورت پذیرفته و متوسط حجم تبخیر از سطح دریاچه در دوره مورد نظر معادل ۴/۵ میلیارد متر مکعب در سال می‌باشد. متوسط حجم آب ورودی به دریاچه از حل معادله حاصل شده و معادل ۲/۲ میلیارد متر مکعب در سال بدست آمده است.

ITC در سال ۲۰۰۵ بیلان آب در دریاچه ارومیه را در دوره ۲۰۰۲-۱۹۶۷ مورد مطالعه قرار داده است (ITC, 2005). در این مطالعه از رابطه (۱۲) استفاده شده است.

$$I - O = \Delta S \quad (12)$$

در این معادله I معادل مجموع پارامترهای ورودی، O معادل مجموع پارامترهای خروجی و ΔS معادل میزان تغییر ذخیره آب می‌باشد. پارامترهای ورودی به دریاچه در مطالعه مذکور شامل آب سطحی ورودی، بارش ورودی، آب زیرزمینی ورودی بوده و پارامتر خروجی، تبخیر از سطح دریاچه می‌باشد.

مقدار ترم بارش در این مطالعه با استفاده از درون‌یابی داده‌های ۲۲۴ ایستگاه وزارت نیرو و سازمان هواشناسی برآورد شده است. این مقدار در دوره زمانی ۲۰۰۲-۱۹۶۷ و بر روی دریاچه معادل ۱۱۴۵/۱۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. مولفه‌های بیلان آب زیرزمینی نیز با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهداتی موجود برر سی شده و تغییرات آب زیرزمینی در سال ۲۰۰۲-۱۹۶۷ معادل ۴۲ میلیون متر مکعب بدست آمده است. جهت تخمین میزان تبخیر از دریاچه از ایستگاه‌های تبخیر سنجی اطراف دریاچه، رابطه تبخیر از سطح آزاد آب و تشک تبخیر با ضریب ۰/۷ و جهت برآورد میزان تبخیر و تعرق پتانسیل از روابط پنمن-

مونتیث و بلانی-کریدل استفاده شده است. مقدار ترم تبخیر از سطح دریاچه در سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۶۷، ۱۹۹۴-۱۹۹۳ و ۲۰۰۰-۱۹۹۹ به ترتیب معادل ۵۸۷۳/۲، ۵۱۸۰ و ۴۹۰۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. موسسه تحقیقات آب و با مشارکت شرکت DLG هلند و دو شرکت مهندسی مشاور داخلی یکم و پندام، در سال ۱۳۸۵ بیلان کمی آب دریاچه ارومیه را محاسبه و از بیلان در سطح زیرحوضه به معادله کلی بیلان در حوضه ارومیه رسیده است. در این گزارش مقادیر میانگین هر یک از پارامترهای بیلان آب دریاچه طی دوره ۳۵ ساله (۱۳۸۱-۱۳۴۴) تعیین و مقدار تغییرات ذخیره آب دریاچه بدست آمده است. معادله (۱۳) رابطه مورد استفاده در این گزارش را نشان می‌دهد.

$$\Delta S = P + GW + In1 + In2 - E \quad (13)$$

در این معادله (ΔS) معادل تغییرات حجم مخزن، (E) تبخیر از سطح دریاچه، (GW) ورود از آب زیر زمینی، (P) بارندگی، ($In1$) آب‌های سطحی اندازه‌گیری شده و ($In2$) آب‌های سطحی اندازه‌گیری نشده می‌باشد.

به این ترتیب مقدار بارش بر روی دریاچه طی دوره ۳۵ ساله (۱۳۸۱-۱۳۴۴) که با استفاده از درون‌یابی اطلاعات ایستگاه‌ها به دست آمده است معادل ۱۱۴۵/۱۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. میزان تبخیر از دریاچه بر اساس روابط تبخیر از سطح آزاد آب و تشتک تبخیر معادل ۵۸۷۳/۲ میلیون متر مکعب می‌باشد. مهندسین مشاور طرح نو اندیشان در سال ۱۳۸۳ مقدار بارش بر سطح دریاچه ارومیه را با استفاده از آمار دو ایستگاه شرفخانه و آباجلو سفلی و در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۴۵، معادل ۲۵۷ میلی متر برآورد کردند. در این مطالعه میزان تبخیر از دریاچه در دوره زمانی ۱۳۷۹-۱۳۴۵ با استفاده از تنظیم مدل بیلان دریاچه و آمار دو ایستگاه شرفخانه و آباجلو سفلی معادل ۱۲۲۳ میلی متر تخمین زده شده است.

۱-۱-۳- جمع بندی

در این مطالعه سعی شده تا با بررسی تمام مطالعات بیلان آب صورت گرفته در حوضه آبریز ارومیه و حوضه‌های مشابه، معادله مناسب برای بیلان آب حوضه استخراج و بهترین روش جهت محاسبه اجزای آن انتخاب گردد. در جدول ۱ و ۲ خلاصه‌ای از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و حوضه‌های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط و فرضیات استفاده شده در هر مطالعه و جنبه‌هایی از تحقیق که از منظر این مطالعه حائز اهمیت می‌باشد آورده شده است. نهایتاً در انتها نیز به جمع بندی نتایج بدست آمده از این مطالعات و انتخاب بهترین فرمولاسیون برای نوشتن معادله بیلان آب حوضه پرداخته شده است.

جدول ۱- خلاصه ایی از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز، دریاچه ارومیه و حوضه های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط استفاده شده در هر مطالعه

مرجع	نوع بیلان (زیر حوضه/حوضه/دریاچه)	منطقه	اجزای تشکیل دهنده معادله	رابطه	پارامتر محاسبه شده	ملاحظات
مدیریت جامع منابع آب حوضه دریاچه ارومیه (موسسه تحقیقات آب و همکاران، ۱۳۸۵)	دریاچه	حوضه ارومیه	تغییرات حجم مخزن (ΔS) تبخیر از سطح دریاچه (E) ورود از آب زیر زمینی (GW) بارندگی (P) آب های سطحی اندازه گیری شده ($In1$) آب های سطحی اندازه گیری نشده ($In2$)	$\Delta S = P + GW + In1 + In2 - E$	تغییرات حجم مخزن دریاچه (ΔS)	این مطالعه روی بیلان آب دریاچه انجام شده، بنابراین رابطه به کار رفته در آن برای بیلان آب حوضه کاربردی نداشته ولی روش محاسبه و مقادیر بدست آمده برای ترمهای تغییرات حجم مخزن، تبخیر از سطح دریاچه و بارش جهت مقایسه مفید می باشد.
مطالعه برنامه جامع سازگاری با اقلیم و تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه های آبریز (وضعیت موجود و آینده منابع آب در حوضه آبریز ارومیه) - (مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۸۴)	حوضه	حوضه آبریز ارومیه	I : حجم بارندگی و جریان های ورودی و انتقالی (سطحی و زیرزمینی) O : تبخیر و تفرق و جریان های خروجی از حوضه آبریز ارومیه	$I - O = \Delta S$	تغییرات ذخیره آب حوضه (ΔS)	
مطالعات آب زیرزمینی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس ۱۳۹۱b)	زیر حوضه (بیلان آب زیر زمینی)	حوضه ارومیه	جریان ورودی به آب زیر زمینی (IN) تغذیه از ریزش های جوی (IN) تغذیه از بستر رودخانه ها (IN) آب برگشتی کانال های آبیاری (IN) آب برگشتی چاه ها چشمه و قنات (IN) جریان خروجی از آب زیر زمینی (OUT) تبخیر سطحی آبخوان (OUT) تخلیه از طریق زهکشی (OUT) تخلیه چاه ها چشمه و قنات (OUT) تغییرات ذخیره آبخوان (ΔS)	$\sum IN = \sum OUT + \Delta S$	تغییرات ذخیره آب زیر زمینی (ΔS)	این مطالعه شامل بیلان آب زیرزمینی حوضه بوده و صرفاً از نظر نحوه برآورد نفوذ و میزان جریانهای ورودی به آب زیرزمینی در این حائظ اهمیت می باشد.

جدول ۱ (ادامه)- خلاصه ایی از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز، دریاچه ارومیه و حوضه های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط استفاده شده در هر مطالعه

مرجع	نوع بیلان	منطقه	اجزای تشکیل دهنده معادله	رابطه	پارامتر محاسبه شده	ملاحظات
ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مولفه های بیلان آب در مقیاس حوضه ای، با تاکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی، مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه، (باقری هارونی، ۱۳۹۰)	دریاچه	ارومیه	P بارندگی روی دریاچه E تبخیر از سطح دریاچه $dLevel/dt$ تغییرات تراز دریاچه $Q \downarrow = E - P + dLevel/dt$ میزان آب ورودی به دریاچه	بیلان دریاچه	$Q \downarrow$ میزان آب ورودی به دریاچه	در این مطالعه طی دو مرحله بیلان آب کل حوضه نوشته شده؛ در مرحله اول بیلان آب دریاچه برای بدست آوردن میزان آب ورودی به دریاچه و در مرحله دوم بیلان آب حوضه (بدون دریاچه) جهت استخراج تغییرات آب زیرزمینی نوشته شده است. نحوه محاسبه و مقادیر تبخیر و تغییرات حجم دریاچه از مرحله اول و نحوه محاسبه و مقادیر تبخیر و تعرق و بارش حوضه از مرحله دوم حائز اهمیت می باشد.
	اراضی حوضه (غیر از دریاچه)		$Q \downarrow$ میزان ورودی به دریاچه که از برقراری بیلان بر روی دریاچه برآورد گردیده است. Dwu/dt تغییرات رطوبت ناحیه غیراشباع خاک P بارندگی بر روی دشت ها و ارتفاعات Eta تبخیر تعرق واقعی	$I_{ngw} = ET_a - P + Dwu/dt + Q \downarrow$	میزان برداشت خالص آب زیرزمینی (I_{ngw})	
گزارش روند نمای بیلان محدوده ای مطالعات ارومیه، بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۱)	زیر حوضه	حوضه ارومیه	بارش (P) ذخایر آب سطحی (ΔS) تبخیر و تعرق (ET) آب سطحی خارج شده از زیر حوضه (Out_s) آب زیر زمینی خارج شده از زیر حوضه (Out_{GW})	$P + GW_{in} = ET + Out_{GW} + Out_s + \Delta S_s + \Delta S_{GW}$	تغییرات ذخیره آب زیر زمینی (ΔS_{GW}) مقادیر مصارف، آب برگشتی، میزان نفوذ	این مطالعه در مقیاس زیر حوضه انجام شده و فرضیاتی مانند بسته بودن حوضه از نظر هیدرولوژیکی و عدم تبادل آب زیرزمینی با آبخوان های خارج حوضه در آن وجود ندارد. نحوه محاسبه و مقدار تبخیر و تعرق و بارش حائز اهمیت می باشد.
A spaceborn multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran, (Tourian et al. 2015)	کل حوضه (اراضی و دریاچه)	ارومیه	P بارش، ET تبخیر تعرق و dM/dt معادل تغییرات ذخیره آب دریاچه	$P - ET = dM/dt$	تغییرات ذخیره آب دریاچه (dM/dt)	این مطالعه در سطح کل حوضه انجام شده است، محصولات ماهواره ایی به کار رفته در محاسبه بارش و تبخیر و تعرق و نحوه صحت سنجی dM/dt با ماهواره GRACE حائز اهمیت می باشد.
Integrated water resource management for lake Urmieh basin, (Water research institute & International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2005)	دریاچه	ارومیه	ورودی به دریاچه (آب سطحی ورودی، بارش ورودی، آب زیرزمینی ورودی)، تبخیر خروجی، تغییرات ذخیره آب دریاچه	$I - O = \Delta S$	تغییرات ذخیره آب دریاچه	این مطالعه بیلان آب دریاچه بوده، نحوه محاسبه و مقادیر بارش، تبخیر از سطح دریاچه و تغییرات حجم دریاچه حائز اهمیت می باشد.
	حوضه (بدون دریاچه)	ارومیه	ET تبخیر و تعرق واقعی از حوضه، P بارش حوضه، $Lake_{IN}$ آب ورودی به دریاچه	$P - ET = Lake_{IN}$	مقدار آب ورودی به دریاچه	در این مطالعه فرض شده مابه التفاوت بارش و تبخیر و تعرق به صورت رواناب وارد دریاچه شده، و از نفوذ و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی صرف نظر شده است، نحوه برآورد ET و P در این مطالعه مهم است.

جدول ۱ (ادامه) - خلاصه ایی از مطالعات بیلان آب انجام شده در حوضه آبریز، دریاچه ارومیه و حوضه های مشابه در سایر نقاط دنیا با تاکید بر روابط استفاده شده در هر مطالعه

مرجع	نوع بیلان	منطقه	اجزای تشکیل دهنده معادله	رابطه	پارامتر محاسبه شده	ملاحظات
مطالعات پیامدهای زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرحهای توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه (شرکت مهندسين مشاور یکم، ۱۳۸۳)	دریاچه	ارومیه	$V2 = \text{حجم در پایان دوره هیدرولوژیکی (۱ سال)}$ $V1 = \text{حجم در شروع دوره هیدرولوژیکی}$ $R = \text{بارش بر روی دریاچه در یک دوره هیدرولوژیکی}$ $Qs = \text{خالص جریان های ورودی سطحی به دریاچه در یک دوره هیدرولوژیکی}$ $QG = \text{خالص جریان های ورودی زیرزمینی به دریاچه در یک دوره هیدرولوژیکی}$ $E = \text{تبخیر از سطح دریاچه در یک دوره هیدرولوژیکی}$	$dS/dt = I - O$ $(V2 = V1 + R + Qs + QG - E)$	تغییرات ذخیره آب دریاچه	در این مطالعه بیلان آب دریاچه ارومیه نوشته شده و نحوه محاسبه و مقادیر بارش، تبخیر از دریاچه حائظ اهمیت می باشد.
Spatial Surface Water Balance Modeling, (Melesse et al. 2006)	حوضه (اراضی و دریاچه)	حوضه دریاچه Devils	P بارش، $GWin$ تغذیه آب زیرزمینی (نادیده گرفته شده)، Qin دبی ورودی به سلول، $Qout$ دبی خروجی از سلول، ET تبخیر و تعرق، $GWout$ خروجی آب زیرزمینی (نادیده گرفته شده)، و $\Delta Storage$ تغییر در ذخیره آب از سال گذشته	$P + GWin + Qin = Qout + ET + GWout \pm \Delta Storage$	ΔS تغییرات ذخیره آب	این مطالعه در سطح حوضه دریاچه Devils انجام گرفته ولی معادله بیلان برای هر سلول نوشته شده است و از آن لحاظ حائظ اهمیت می باشد.
Assessment of water availability and consumption in the Karkhe river basin, Iran, (Muthuwatta et al. 2010)	حوضه	حوضه کرخه	P بارش، Qin جریان ورودی آب سطحی، Gin جریان ورودی آب زیرزمینی (نادیده گرفته شده)، Eta تبخیر و تعرق واقعی، $Qout$ جریان خروجی آب سطحی، $Gout$ جریان خروجی آب زیرزمینی (نادیده گرفته شده) و ΔS تغییرات ذخیره	$P + Q_{in} + G_{in} - Eta - Q_{out} - G_{out} = \Delta S$	ΔS تغییرات ذخیره	این مطالعه در حوضه کرخه انجام شده که مانند حوضه ارومیه بسته نمی باشد، اما روش محاسبه تبخیر و تعرق و بارش حائظ اهمیت می باشد.
Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites, (Alsdorf et al. 2010)	زیر حوضه	رود آمازون	باران، تبخیر و تعرق، برآیند میزان رواناب ورودی به زیر حوضه و تغییرات ذخیره ی آب درون زیر حوضه	$S(t) = \int [P(t) - ET(t) - Q(t)] dt$		این مطالعه در سطح زیر حوضه انجام شده و نحوه محاسبه ماهواره ایی بارش و ET حائظ اهمیت می باشد.

از طرف دیگر با توجه به وجود دسته خاصی از مطالعات که در آنها بیلان آب حوضه‌های آبریز بر اساس داده‌های مدل‌های جهانی مانند GLDAS توسعه و سپس با سنجنده GRACE صحت‌سنجی شده است، در جدول ۲ به صورت جداگانه به معرفی این مطالعات و محصولات و روابط به کار رفته در آنها پرداخته شده است.

جدول ۲- مطالعات بیلان آب انجام شده بر اساس داده تغییرات ذخیره آب حوضه ماهواره **GRACE** و داده‌های مدل **GLDAS**

مرجع	نوع بیلان (حوضه/دریاچه)	منطقه	اجزای تشکیل دهنده معادله	رابطه
large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data, (Forootan et al. 2014)	چند حوضه ای	کشور ایران	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، تغییرات آب سطحی خزر و آرال و دریاچه های محلی	آنالیز اجزای مستقل ICA $H = \bar{P}_H \hat{R}_H \hat{R}_H^T E_H^T$ $R = \bar{P}_R \hat{R}_R \hat{R}_R^T E_R^T = C_R A_R^T$
Challenges and Opportunities in GRACE-Based Groundwater Storage Assessment and Management: An Example from Yemen, (Moore & Fisher 2012)	چند حوضه ای	یمن	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، داده های مشاهداتی	ΔS $= \Delta GWS + \Delta SW + \Delta SM$ $+ \Delta SWE$ ^۲
Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley, (Famiglietti et al. 2011)	حوضه	دره مرکزی، کالیفرنیا	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، داده های مشاهداتی	$\Delta S = \Delta GWS + \Delta SW + \Delta SM$ $+ \Delta SWE$
Satellite based estimates of terrestrial water storage variations in Turkey, General Command of Mapping, Tip Fakultesi Caddesi, (Lenk 2013)	چند حوضه ای	کشور ترکیه	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، داده های مشاهداتی	$\Delta S = \Delta GWS + \Delta SW + \Delta SM$ $+ \Delta SWE$
Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris Euphrates-Western Iran region, (Voss et al. 2013)	چند حوضه ای	دجله، فرات و ناحیه غربی ایران	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، داده های مشاهداتی	$\Delta S = \Delta GWS + \Delta SW + \Delta SM$ $+ \Delta SWE$
Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS, (Syed et al. 2008)	حوضه	تیانشان، آسیای مرکزی	تغییرات حجم ذخیره زمینی از GRACE و GLDAS، داده های مشاهداتی	$\Delta S = \Delta GWS + \Delta SW + \Delta SM$ $+ \Delta SWE$

^۲ در تمامی این روابط ΔGWS تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، ΔSW تغییرات ذخیره آب سطحی، ΔSM تغییرات رطوبت خاک و ΔSWE تغییرات آب معادل برف می باشد.

بنابراین به طور کلی معادله بیلان آب حوضه به صورت معادله (۱۴) خواهد بود

$$I - O = \Delta S \quad (14)$$

در این معادله I مجموع آب ورودی به حوضه شامل بارش و جریانات آب سطحی و زیر زمینی ورودی، O مجموع آبهای خروجی شامل تبخیر از پیکره های آبی، تبخیر و تعرق، جریانات سطحی و زیر زمینی خروجی و ΔS تغییرات ذخیره آب حوضه شامل تغییرات در ذخیره برف، آب پشت سدها و سایر پیکره های آبی، رطوبت خاک، آب های زیرزمینی، آب ذخیره شده در پوشش گیاهی می باشد. حوضه آبریز ارومیه یک حوضه آبریز بسته بوده و طبق مطالعات انجام شد میزان ورود و خروج آب زیرزمینی به آن ناچیز می باشد، بنابراین تنها جز ورودی بارش و اجزای خروجی اصلی تبخیر و تعرق و تبخیر از دریاچه ارومیه می باشند. در اکثر مطالعات انجام شده با انتخاب مقیاس زمانی سالانه از برخی اجزای تغییرات ذخیره مانند، رطوبت خاک، ذخیره برف و حتی تغییرات ذخیره آب زیر زمینی صرف نظر شده است. بنابراین تغییرات ذخیره حوضه شکل ساده تر به خود گرفته و اجزای مجهول آن به سادگی و با نوشتن معادله بیلان قابل محاسبه می باشند. اما در صورت انتخاب مقیاس زمانی کوتاهتر (مثلا ماهانه) دیگر فرضیات بالا قابل استفاده نیست و این اجزا نیز باید در این ترم دخیل شوند.

رویکرد دیگر در نوشتن معادله بیلان، رویکرد جز به کل مانند نوشتن معادله برای زیر حوضه و تجمیع آنها به حوضه اصلی یا شبکه بندی حوضه و نوشتن معادله بیلان برای هر سلول می باشد، طبیعتاً در این رویکرد اجزایی مانند جریانات سطحی و زیرزمینی، جز داخلی نبوده و باید در معادلات لحاظ شوند که پیچیدگی های خاص خود را به معادله بیلان اضافه خواهند نمود.

در این مطالعه رویکرد یکپارچه برای نوشتن بیلان آب حوضه به کار گرفته شده است و به دلیل استفاده از مقیاس زمانی ماهانه، تمامی اجزای ذخیره آب حوضه که در این بازه زمانی، حداقل میزان تبادل آب را با یکدیگر دارند (اجزای ذخیره آب مستقل در مقیاس زمانی ماهانه) در معادله بیلان لحاظ شده اند. در پیوست الف مقادیر بدست آمده برای اجزای این معادله در مطالعات مختلف به تفکیک در چندین جدول گردآوری شده که در بخش نتایج جهت اعتبار سنجی با مقادیر بدست آمده در این مطالعه مقایسه شده است.

۲- روش شناسی

در این بخش ابتدا روش به کار رفته در برآورد بیلان آب حوضه آبریز ارومیه به صورت کلی و در قالب فاز بندی تعریف شده برای پروژه شرح داده می شود سپس به اختصار روش محاسبه هر جز معادله بیلان آورده می شود.

۲-۱- فاز یک: بیلان اولیه، بدست آوردن ترم ΔS و مقایسه آن با داده های

سنجنده GRACE و مدل WGHM

در این فاز داده های بارش، تبخیر و تعرق و تبخیر دریاچه در مقیاس ماهانه و سالانه برای دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی تولید و مقدار تغییرات ذخیره آب حوضه در مقیاس ماهانه و سالهای ذکر شده با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه شده و سپس جهت صحت سنجی با داده TWS سنجنده GRACE برای سال ۲۰۱۰ و WGHM برای سال ۱۹۹۵ مقایسه خواهد شد.

$$P - E - ET = \Delta S \quad (15)$$

در این رابطه P بارش، E تبخیر از سطح دریاچه، ET تبخیر و تعرق و ΔS تغییرات ذخیره آب حوضه می باشد. در ادامه روش محاسبه هر جز این معادله و فرضیات در نظر گرفته شده در محاسبه آن آورده می شود.

۲-۱-۱- بارش

بارش تنها ترم ورودی آب در معادله بیلان می باشد. برای اندازه گیری این جز از ترکیبی از داده های ایستگاهی موجود در منطقه استفاده شده است. در این راستا ابتدا بارش بر اساس آمار موجود از به ترتیب ۱۳ و ۲۸ ایستگاه سینوپتیک در سطح حوزه آبریز ارومیه و برای سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی و سپس با افزودن آمار بارش ۱۱۰ ایستگاه باران سنجی وزارت نیرو به آمار اولیه، تبدیل مقیاس زمانی از سال آبی شمسی به سال میلادی و درونیابی با روش IDW بین این داده ها برای سراسر حوضه به صورت ماهانه محاسبه شد.

۲-۱-۲- تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مهمترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی و بیلان آب بوده که معیار خوبی جهت بررسی میزان موثر بودن آبیاری و کل مصرف آب توسط گیاهان می باشد. تبخیر و تعرق (ET) ترکیب دو پدیده فیزیکی بوده که در اثر آنها آب به وسیله تبخیر از سطوح خاک و تعرق از گیاهان به اتمسفر منتقل

می شود. داشتن تخمین های دقیق از این متغیر در برنامه ریزی آبیاری، تعیین حق آبه و مطالعات هیدرولوژیکی حوضه آبریز ضروری می باشد (Allen et al. 2002).

برای محاسبه تبخیر و تعرق در سال های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی از روش بیلان انرژی برای سطح (SEBAL) با اعمال اثر ارتفاع استفاده شده است. محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق در این روش با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های زمینی صورت می گیرد. برای محاسبات سال ۱۹۹۵ میلادی، از تصاویر لحظه ای سنجنده AVHRR و برای سال ۲۰۱۰ میلادی از محصولات سنجنده MODIS استفاده گردیده است. توضیحات تکمیلی در خصوص روش محاسبه در گزارش برآورد تبخیر و تعرق از حوضه آبریز ارومیه در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ آورده شده است (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۳).

۲-۱-۳- تبخیر از دریاچه

تبخیر از سطح دریاچه نیز یکی دیگر از ترم های تاثیر گذار در بیلان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه می باشد. این جز به عنوان تنها ترم خروجی آب از دریاچه ارومیه همواره مورد توجه بوده است. روش بیلان انرژی دقیقترین روش موجود در برآورد میزان تبخیر از پیکره های آبی می باشد (Assouline 1993)، اما تعداد زیاد داده های ورودی و در دسترس نبودن برخی از آنها استفاده از این روش را با مشکلاتی همراه کرده است. بنابراین لزوم استفاده از روشی مشابه که در عین داشتن هزینه محاسباتی کمتر از دقت بالایی نیز برخوردار باشد احساس می شود. در این مطالعه بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه شریف، در سال ۱۳۹۳ از بین روشهای مختلف برآورد تبخیر، روش دوبرین-کیجمن به عنوان نزدیکترین روش به روش بیلان انرژی ولی با هزینه محاسباتی کمتر جهت برآورد تبخیر از سطح دریاچه انتخاب شد (فاضل مجتهدی و همکاران، ۱۳۹۳). داده های مورد نیاز این روش ترکیبی از داده های زمینی و ماهواره ایی بوده که مهمترین آنها دمای سطح می باشد که از داده های سنجنده MODIS بدست آورده شده است.

۲-۱-۴- نحوه صحت سنجی تغییرات ذخیره حوضه با داده های GRACE

ماهواره های GRACE تخمینی از میدان جاذبه زمین را به صورت منظم و ماهانه به شکل مدل های ژئوپتانسیلی در مقیاس های چند صد کیلومتر در اختیار قرار می دهد. اگر فرض کنیم عامل اصلی در تغییر میدان گرانشی زمین تغییر در جرم سیال آن می باشد (گرانش دینامیکی) می توان از روی میدان ژئوپتانسیل تغییرات ذخایر آب را با حذف اثر بخش جامد (گرانش استاتیکی) روی این میدان بدست آورد. از طرفی در مقایسه با اندازه گیری های زمینی مانند داده های چاه های مشاهداتی، ماموریت GRACE می تواند جایگزین بسیار کارآمد و کم هزینه تری برای بررسی تغییرات ذخیره آب حوضه ها که همواره در مقیاس های جهانی دشوار بوده است، باشد. در این قسمت، جهت صحت سنجی تغییرات ذخیره حوضه با داده های GRACE از

مجموعه داده های این ماهواره، نسخه ۵ از پایگاه داده ^۳GFZ، JPL و CSR برای ۱۲ ماه (سال ۲۰۱۰) بنا بر پیشنهاد بخش GRACE سازمان فضایی ناسا، انتخاب و استفاده شده است. با توجه به اینکه داده های GRACE حاوی اطلاعاتی درباره میدان ثقل زمین ناشی از بخش سیال و جامد زمین است، با حذف میانگین بلند مدت آن (به عنوان سهم بخش جامد زمین)، می توان نوسانات جرم سیال زمین را محاسبه نمود. همچنین برای کاهش خطاهای اندازه گیری (نویز)، استفاده از فیلتر مناسب توصیه شده که به دلیل عدم درک مناسب از منبع خطا در داده های GRACE، انتخاب روش مناسب غالباً به صورت سعی و خطا بوده و بستگی به حوضه مطالعاتی و شرایط منطقه دارد. در این مطالعه روشی مشابه مطالعات انجام شده در حوضه دره مرکزی کالیفرنیا (Rodell et al. 2004) و حوضه دریاچه ارومیه (Tourian et al. 2015) و بسیاری از مطالعات دیگر انتخاب شده است. برای دستیابی به تخمین های عددی از تاثیر روش های استفاده شده در پردازش داده های GRACE، از نوسانات ماهیانه حجم ذخایر آبی از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۲ شبیه سازی شده در مدل زمینی NOAH که در سیستم جهانی تلفیق داده های زمینی ^۴GLDAS اجرا شده، استفاده شده است (Rodell et al. 2004). در گام بعد، با استفاده از روابط معرفی شده در مدل، ارتفاع معادل آب ΔM بر روی یک شبکه مختصات جغرافیایی به دست می آید.

۲-۱-۵- نحوه صحت سنجی تغییرات ذخیره حوضه با داده های WGHM

مدل WGHM در سال ۲۰۰۳ توسط پروفیسور دال^۵ و همکاران در مرکز تحقیقات سیستم های محیط زیستی در دانشگاه کاسل^۶ آلمان ساخته شده است. البته در حال حاضر این گروه در دانشگاه گوتته^۷، در فرایبورگ فعالیت می کنند. این مدل با هدف پیش بینی جریان رودخانه طراحی شده است. نتایج آن به صورت سری های زمانی برای یک شبکه بندی ۰٫۵° * ۰٫۵° ارائه می شود. این مدل همچنین سری های زمانی ذخیره آب در برف، رطوبت خاک (مقدار آب در متوسط عمق ریشه)، آب زیرزمینی و آب سطحی ذخیره شده در رودخانه ها، دریاچه ها و تالاب ها را ارائه می دهد. نتایج این مدل در حال حاضر از ابتدای سال ۱۹۰۱ تا پایان ۲۰۰۹ قابل دسترسی است (Döll et al. 2003).

۲-۲- فاز دوم: تدقیق ترم ΔS بیلان با محاسبه اجزای تشکیل دهنده آن

در این فاز در ادامه فاز اول، ترم ΔS به اجزای تشکیل دهنده خود شکسته شده و هر یک از اجزای آن محاسبه خواهد شد. اجزای سازنده ΔS در رابطه ۱۶ نشان داده شده اند.

^۳ Geo Forschungs Zentrum

^۴ Global Land-Data Assimilation System

^۵ Döll

^۶ Castle University

^۷ Guttehue University

$$\Delta S = \Delta_{\text{snow}} + \Delta_{\text{SM}} + \Delta_{\text{Dam}} + \Delta_{\text{Can}} + \Delta_{\text{Lake}} + \Delta_{\text{GW}} \quad (16)$$

در این رابطه Δ_{snow} تغییرات ذخیره برف حوضه، Δ_{SM} تغییرات ذخیره رطوبت خاک، Δ_{Dam} تغییرات ذخیره آب مخزن ها، Δ_{Can} تغییرات آب پوشش گیاهی، Δ_{Lake} تغییرات حجم دریاچه و Δ_{GW} تغییرات ذخیره آب زیرزمینی می باشد.

در ادامه معادله بیلان مجدداً تشکیل و ترم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی مطابق رابطه ۱۷ محاسبه خواهد شد.

$$\Delta_{\text{GW}} = \Delta S - (\Delta_{\text{snow}} + \Delta_{\text{SM}} + \Delta_{\text{Dam}} + \Delta_{\text{Can}} + \Delta_{\text{Lake}}) \quad (17)$$

نهایتاً داده ی تغییرات آب زیرزمینی حوضه (Δ_{GW}) با تغییرات ذخیره آب خوان های حوضه که بر مبنای داده های چاه های مشاهداتی بدست آورده شده، مقایسه خواهد شد.

در این فاز با توجه به مقیاس زمانی (ماهانه یا سالانه) ترم رطوبت خاک و آب پوشش گیاهی در معادلات لحاظ خواهد شد، یعنی در مقیاس ماهانه این ترم ها وارد شده ولی در مقیاس سالانه لحاظ نخواهد شد.

۲-۲-۱- تغییرات ذخیره برف

مقدار آب معادل برف یکی از پارامترهای مهم برای تشکیل معادله ی بیلان بخصوص در مناطقی که پوشش برفی قابل توجه دارند می باشد. تعیین میزان آب معادل برف با استفاده از نمونه گیری از برف موجود در مناطق کوهستانی مورد محاسبه قرار می گیرد. سختی دسترسی به مناطق مرتفع کوهستانی و عدم پوشش مکانی کافی از جمله موانع کاهش دقت محاسبه ی آب معادل برف با این روش می باشد. استفاده از تصاویر ماهواره ای و مدل های جهانی سطح زمین، مشکلات اشاره شده را به آسانی حل نموده است. سنجنده های بسیاری به مأموریت سنجش عمق و سطح برف پرتاب شده اند که یکی از کاربردی ترین آنها سنجنده AMSR-E بوده که در سال ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شد. با توجه به عدم دسترسی به داده های برف سال ۱۹۹۵ با استفاده از سنجنده AMSR-E و به منظور داشتن رویکردی یکسان برای هر دو سال، داده های آب معادل برف مدل جهانی GLDAS به عنوان داده مبنا انتخاب گردید. مدل جهانی GLDAS با بهره گیری از تعداد زیادی پارامتر ورودی مانند مشاهدات ایستگاههای باران سنجی و مشاهدات ماهواره ای بارش، طبقه بندی ارتفاع و شیب زمین، سطح و آب معادل برف، نقشه های مربوط به طبقه بندی خاک ها و پوشش گیاهی و چندین داده ی دیگر در سر تا سر جهان، خروجی های متنوعی ارائه می کند. نمونه ایی از داده های قابل استخراج از پایگاه GLDAS، در جدول 3 آورده شده است.

جهت برآورد مقادیر آب معادل برف حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سال های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ داده های GLDAS با استفاده از سامانه‌ی تحت وب GIOVANNI پردازش و میانگین مکانی آب معادل برف در حوضه استخراج گردید. برای این کار از تصاویر GLDAS – NOAH با دوره زمانی سه ساعته با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده گردید. داده های اخذ شده بیانگر میانگین آب معادل برف بر حسب کیلوگرم بر متر مربع بوده که جهت تبدیل به حجم این مقدار به چگالی آب (۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب) تقسیم می گردد. نهایتاً با کسر داده های سه ساعت آخر هر ماه از ماه بعد در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه تغییرات ذخیره آب معادل برف در هر ماه محاسبه می گردد.

لازم به ذکر است که مساحت آب دریاچه ارومیه به صورت جداگانه با استفاده از منحنی سطح- حجم- ارتفاع تهیه شده توسط موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو در سال (۱۳۹۴) برای هرماه استخراج گردید و در محاسبه سطح حوضه بدون دریاچه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول 3- متغیرهای هیدرولوژیکی خروجی مدل GLDAS

متغیر	واحد
ذخیره کل آب روی تاج پوشش گیاهی (Total canopy water storage)	کیلوگرم بر متر مربع
تبخیر و تعرق کل (Total evapotranspiration)	کیلوگرم بر متر مربع
رواناب سطحی (surface runoff)	کیلوگرم بر متر مربع
رواناب زیرزمینی (Subsurface runoff)	کیلوگرم بر متر مربع
آب حاصل از ذوب برف (Snowmelt)	کیلوگرم بر متر مربع در هر ثانیه
شدت بارندگی (Rainfall rate)	کیلوگرم بر متر مربع در هر ثانیه
آب معادل برف (Snow water equivalent)	کیلوگرم بر متر مربع
شدت ریزش برف (Snowfall rate)	کیلوگرم بر متر مربع در هر ثانیه
رطوبت خاک در 10 لایه ریشه ای آن (average layer soil moisture)	کیلوگرم بر متر مربع

۲-۲-۲- تغییرات حجم دریاچه

دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مخازن اصلی ذخیره آب در حوضه آبریز ارومیه نقش به سزایی در تغییرات ذخیره آب حوضه و به دنبال آن بیلان آب حوضه ایفا می کند. تغییرات ذخیره آب حوضه در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از منحنی سطح - حجم - ارتفاع موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو (۱۳۹۲) و داده های تراز روزانه ثبت شده دریاچه محاسبه گردید. جهت انجام این کار از نرم افزار ArcGIS و ابزار Surface volume جهت استخراج سطح و حجم دریاچه به ازای ترازهای مختلف در هر ماه استفاده

شده است. اختلاف حجم انتها و ابتدای ماه به عنوان تغییرات حجم ماهانه و اختلاف حجم انتها و ابتدای سال به عنوان تغییرات حجم سالانه در محاسبات بیلان در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۳- تغییرات ذخیره سدها

حوضه آبریز ارومیه مشتمل بر ۵۶ سد بوده که ۱۲ عدد آن سهم عمده در ذخیره آب سطحی حوضه دارند (جدول ۴) به طوری که از کل ۲۰۶۰ میلیون متر مکعب آب قابل تنظیم در حوضه ۱۷۳۶ میلیون مترمکعب در این سدها ذخیره شده که معادل ۸۵ درصد کل آب تنظیمی سدهای حوضه می باشد (شرکت مدیریت منابع آب ایران ۲۰۱۵). طبق آمار اخذ شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران از این میان در سال ۱۹۹۵ میلادی ۴ سد و در سال ۲۰۱۰ میلادی هر ۱۲ سد در حال بهره برداری بوده اند. در این مطالعه جهت محاسبه تغییرات ذخیره آب سدها آمار مربوط به همین سدها در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- ۱۲ سد اصلی حوضه آبریز ارومیه که ۸۵ درصد آب تنظیمی آن را در خود ذخیره کرده اند (سدهایی که در سال ۱۹۹۵ در حال بهره برداری بوده اند با علامت ☒ نشان داده شده اند)

سد های اصلی داخل حوضه آبریز ارومیه			
۱	☒ بوکان	۷	☒ ارس
۲	شهرچای	۸	کدکندی
۳	☒ مهاباد	۹	دریک سلماس
۴	حسنلو	۱۰	زولا
۵	علویان	۱۱	قلعه چای
۶	☒ بارون	۱۲	ساروق
آب قابل تنظیم		۱۷۳۶/۷۴	
کل		۲۰۶۰/۳	

۲-۲-۴- تغییرات رطوبت خاک

منظور از رطوبت خاک مقدار آبی است که از سطح تا عمق ریشه (حدوداً دو متر اول خاک) موجود می باشد که می تواند در اثر تداوم بارش و اشباع شدن خاک به لایه های پایینتر نفوذ یا با فرایند تبخیر و تعرق به اتمسفر بازگردد، بنابراین مقداری آب ممکن است در این لایه ذخیره شده باشد که نه در جز تبخیر و تعرق و نه در جز ذخیره آب زیرزمینی دیده شده است. به این ترتیب یکی از اجزای سازنده تغییرات ذخیره آب حوضه تغییرات محتوای رطوبتی خاک می باشد. این پارامتر به شدت در زمان و مکان متغیر بوده و معمولاً از تصاویر ماهواره ایی به جای برداشتهای میدانی برای سنجش آن استفاده می شود. اما تصاویر ماهواره ایی تنها قادر به اندازه گیری رطوبت سطحی خاک (۵ تا ۱۰ سانتیمتر ابتدای آن) بوده و برای برآورد رطوبت

خاک تا عمق ریشه می توان از ترکیب آنها با برخی مدل‌های ریاضی استفاده نمود. در این مطالعه مقدار این پارامتر با استفاده از داده های سنجنده SMOS در سال ۲۰۱۰ و داده های پایگاه GLDAS در سال ۱۹۹۵ بدست آورده شده است. سنجنده SMOS که در سال ۲۰۰۹ توسط آژانس فضایی اروپا به فضا پرتاب شد، رطوبت خاک را با قدرت تفکیک مکانی ۴۰ کیلومتر در فاصله زمانی ۳ روزه، ۷ روزه و ماهانه برای ۵ سانتیمتر سطح خاک تولید می کند. این سنجنده نیز مانند سنجنده AMSR-E بر روی ایران صحت سنجی نشده و بعضاً در برخی از ماهها و در بعضی از مناطق کشور داده ایی برداشت نکرده است. همانطور که ذکر شد جهت محاسبه مقدار رطوبت خاک در سال ۱۹۹۵ از داده های پایگاه جهانی GLDAS استفاده شده است. داده رطوبت خاک GLDAS مربوط به ۱ متر اول خاک (ناحیه ریشه) بوده و به همین دلیل انتظار می رود که بیشتر از مقدار برآورد شده با سنجنده SMOS در سال ۲۰۱۰ باشد، بنابراین در این مطالعه جهت داشتن رویکردی یکسان برای هر دو سال، از داده های رطوبت خاک عمق ریشه مدل جهانی GLDAS برای هر دو سال استفاده خواهد شد.

۲-۲-۵- تغییرات آب پوشش گیاهی

آب موجود در پوشش گیاهی داده دیگری هست که در ترم تغییرات ذخیره آب حوضه مورد بررسی قرار می گیرد. در این مطالعه برای استخراج این ترم از داده های پایگاه جهانی GLDAS برای هر دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی استفاده شده است. مطالعات نشان می دهد مقدار این ترم در مقایسه با سایر ترم های تشکیل دهنده ذخیره آب حوضه کوچکتر بوده و معمولاً از آن صرف نظر می شود.

۲-۲-۶- تغییرات ذخیره آب زیرزمینی

این ترم به عنوان خروجی معادله بیلان و پس از محاسبه تغییرات ذخیره کلی آب حوضه به صورت ماهانه و کسر اجزای تشکیل دهنده آن با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه خواهد شد. سپس خروجی های این ترم با داده های تغییرات حجم آب زیرزمینی که از چاههای مشاهداتی واقع در آب خوان های حوضه آبریز ارومیه بدست آمده، مقایسه خواهد شد.

۳- نتایج

نتایج این مطالعه در دو بخش ارائه می گردند:

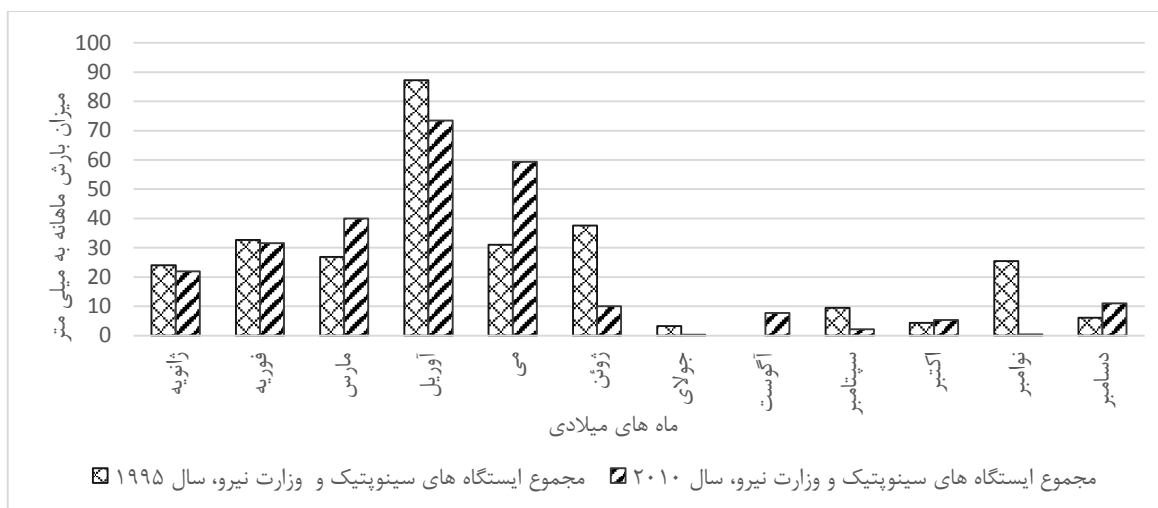
نتایج فاز اول: در این بخش ابتدا تغییرات ماهانه اجزای اصلی معادله بیلان یعنی بارش، تبخیر و تعرق و تغییرات ذخیره آب حوضه به صورت جداگانه آورده می شود، سپس در ادامه مقادیر بدست آمده برای هر جز معادله بیلان با برآوردهای بدست آمده در سایر مطالعات مرتبط با حوضه آبریز ارومیه مقایسه و اعتبار سنجی می گردد. نهایتاً تغییرات ذخیره آب حوضه در ماههای مختلف برای دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی مورد بررسی قرار گرفته و با داده TWS ماهواره GRACE مقایسه می شود.

نتایج فاز دوم: در این بخش ابتدا اجزای تشکیل دهنده ترم ذخیره آب حوضه آورده و با مقادیر مشابه در سایر مطالعات مقایسه می گردد، سپس مقدار جز تغییرات آب زیرزمینی به صورت ماهانه در هر سال محاسبه شده و تحلیل و جمع بندی نهایی انجام می شود.

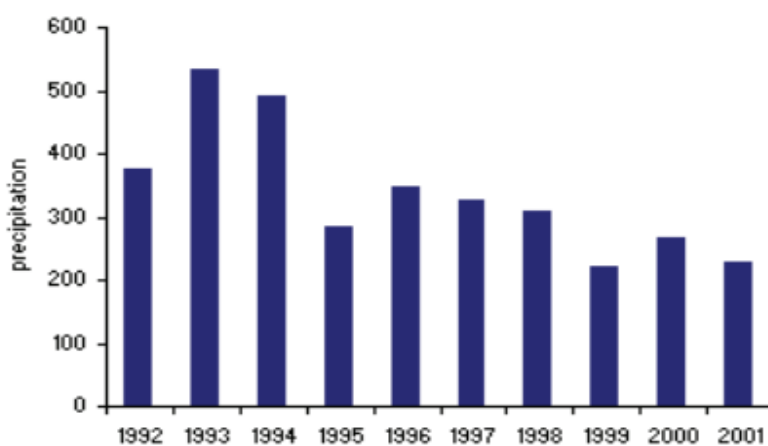
۳-۱- نتایج فاز اول

۳-۱-۱- بارش

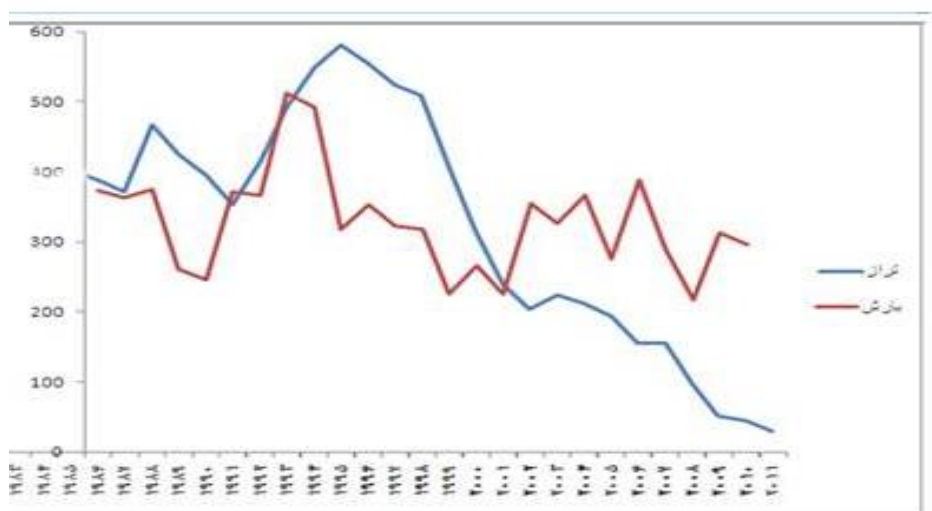
در شکل ۱ ارتفاع بارش برای ماه های مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ بر اساس ترکیب اطلاعات ایستگاه های سینوپتیک و وزارت نیرو، آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود در بیشتر ماه های سال ۱۹۹۵ ارتفاع بارش بیشتر از ماه مشابه در سال ۲۰۱۰ می باشد که نهایتاً باعث شده ارتفاع بارش در سال ۱۹۹۵ تقریباً ۱۹,۶۶ میلی متر بیشتر از سال ۲۰۱۰ باشد. شکل ۲ مقدار بارش ماهانه را بر اساس مطالعات جامع مدیریت منابع آب حوزه آبریز ارومیه (ITC) نشان می دهد بر اساس این شکل میزان بارش در سال ۱۹۹۵ حدود ۲۹۰ تا ۳۰۰ میلی متر است که با مقدار محاسبه شده در این فاز مطالعات همخوانی دارد. بررسی روند بارشی حوزه آبریز ارومیه در شکل ۳ نشان می دهد که علی رغم وقوع خشکسالی در سال ۲۰۰۹ و ترسالی در سال ۱۹۹۴ در سطح حوزه آبریز ارومیه، سال های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ مقدار بارش میانگین و تقریباً همگنی داشته و در آستانه های ترسالی و یا خشکسالی قرار نمی گیرند.



شکل ۱- مقایسه ارتفاع بارش در ماههای مختلف سال ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰ میلادی



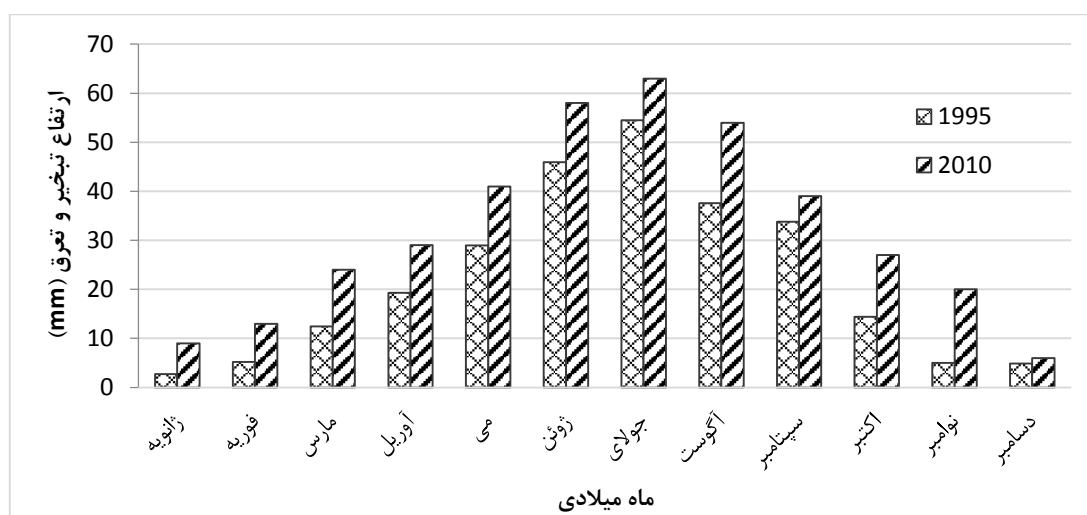
شکل ۲- میزان بارش متوسط سالانه در حوزه آبریز ارومیه (ITC)



شکل ۳- میزان بارش متوسط سالانه در حوزه آبریز ارومیه از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۴۰۱ میلادی (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

۳-۱-۲- تبخیر و تعرق

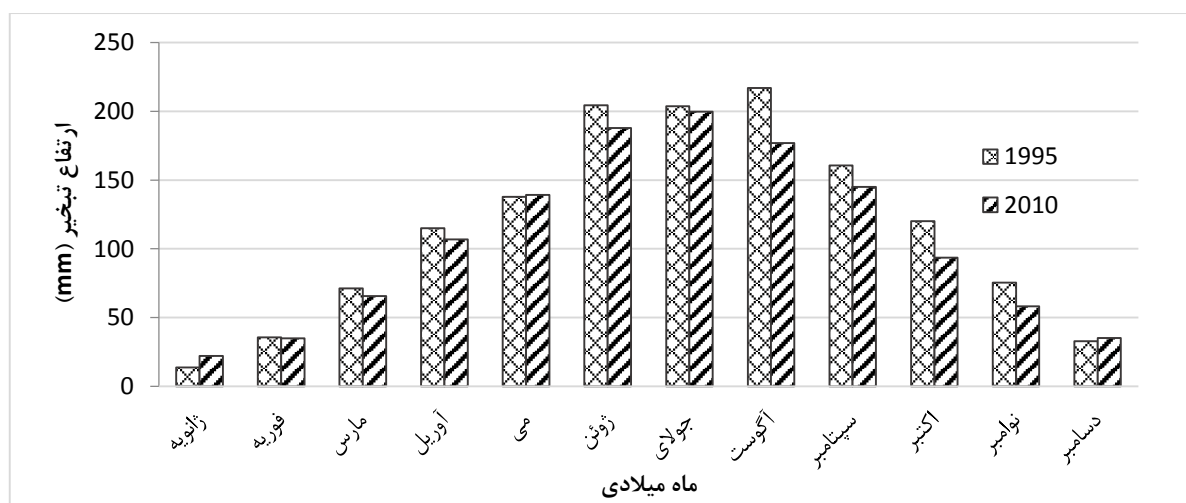
شکل ۴ تغییرات تبخیر و تعرق ماهانه در سطح حوضه آبریز ارومیه در سال های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی را نمایش می دهد. همانطور که مشخص است تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۰ میلادی در تمامی ماه ها بیش از مقادیر مشابه در سال ۱۹۹۵ می باشد. در هر دو سال بیشینه تبخیر و تعرق به ماه جولای تعلق دارد که مقدار آن از ۵۴/۵ میلیمتر در سال ۱۹۹۵ به ۷۶ میلیمتر در سال ۲۰۱۰ افزایش یافته است. در مقیاس سالانه نیز تبخیر و تعرق واقعی از ۲۶۵ میلیمتر در سال ۱۹۹۵ میلادی، به ۴۰۹ میلیمتر در سال ۲۰۱۰ میلادی افزایش یافته است که این افزایش معادل ۵۴/۵ درصد می باشد. بررسی ها نشان می دهد بخشی از این افزایش در اثر عوامل اقلیمی و بخشی دیگر در اثر عوامل انسانی می باشد. از عوامل اقلیمی تاثیرگذار در این افزایش می توان به افزایش دمای هوا اشاره کرد. در سال ۲۰۱۰ میلادی در مجموع شاهد ۶۴۷ درجه روز افزایش در میانگین دمای هوا به نسبت سال ۱۹۹۵ میلادی هستیم که این مقدار افزایش معادل حدود ۱۵٪ افزایش در میانگین دمای هوا می باشد (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۳). از دیگر متغیرهای اقلیمی تاثیر گذار نیز می توان به سرعت باد اشاره کرد. طی این مدت سرعت باد در ایستگاه ارومیه حدود ۱۲۵٪ افزایش را تجربه کرده است و در ایستگاه تبریز نیز حدود ۴۵٪ افزایش در سرعت باد مشاهده می شود. از عوامل انسانی نیز می توان به افزایش سطح زیر کشت اراضی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به میزان ۱۴ درصد از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۰ میلادی اشاره نمود. همچنین الگوی کشت حوضه نیز از الگوی کشت کم مصرف به پر مصرف تبدیل شده و سطح زیر کشت باغی نیز افزایش پیدا کرده است. (مرکز تحقیقات سنجش از دور، ۱۳۹۳).



شکل ۴- تغییرات ماهانه میانگین تبخیر و تعرق در سطح حوضه ارومیه

۳-۱-۳- تبخیر از دریاچه

در شکل ۵ ارتفاع تبخیر برای ماه‌های مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در بیشتر ماه‌های سال ۱۹۹۵ ارتفاع تبخیر بیشتر از ماه مشابه در سال ۲۰۱۰ می‌باشد ولی این اختلاف ناچیز بوده و نهایتاً باعث شده تا ارتفاع تبخیر در سال ۱۹۹۵ تقریباً ۱۲۰ میلیمتر بیشتر از سال ۲۰۱۰ باشد. دو عامل موثر در ارتفاع تبخیر؛ حجم آب در دسترس برای تبخیر و شوری آب می‌باشد، که افزایش هر یک از این پارامترها می‌تواند مقدار تبخیر را کاهش دهد (مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه شریف، ۱۳۹۳). بررسی‌ها نشان می‌دهد حجم آب در سال ۱۹۹۵ تقریباً هفت برابر سال ۲۰۱۰ بوده درحالی‌که شوری آب تقریباً نصف سال ۲۰۱۰ می‌باشد (حسین پور، ۱۳۹۱)، بنابراین عملکرد معکوس این دو پارامتر باعث شده تا مقدار ارتفاع تبخیر در ماه‌های مختلف این دو سال تقریباً یکسان باشد. اما با توجه به سطح بزرگ دریاچه در سال ۱۹۹۵ (به طور میانگین ۵۷۰۰ کیلومتر مربع) که تقریباً دو برابر سطح دریاچه در سال ۲۰۱۰ می‌باشد حجم تبخیر در سال ۱۹۹۵ نیز تقریباً دو برابر سال ۲۰۱۰ بدست آمده است. این موارد در شکل ۵ و جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه ارتفاع تبخیر در ماه‌های مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی

۳-۱-۴- تغییرات ذخیره آب حوضه و تحلیل اولیه آن

در جدول ۵ و جدول ۶ محاسبات فاز اول بیلان جهت برآورد مقدار تغییرات ذخیره آب حوضه در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی آورده و سپس نتایج آن با مطالعات مشابه جهانی به صورت ترم به ترم مقایسه شده است. نمودار تغییرات ذخیره آب حوضه در ماه‌های مختلف سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی در شکل ۶ آمده است. در ادامه نتایج بدست آمده برای ترم تغییرات ذخیره آب حوضه با ترم TWS ماهواره GRACE و مدل WGHM مقایسه و نتیجه آن مورد تحلیل قرار گرفته است.

جدول ۵- بیلان آب حوضه ابریز ارومیه در مقیاس ماهانه و سالانه در سال ۲۰۱۰

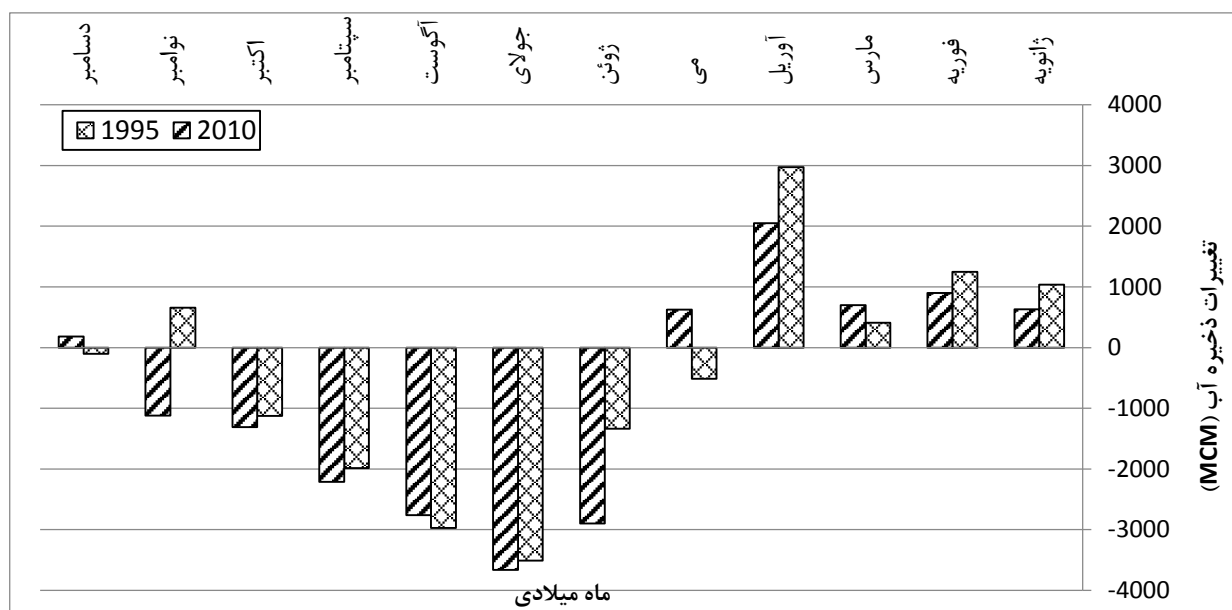
بیلان سال ۲۰۱۰										
تغییرات ذخیره (MCM)	تبخیر و تفرق حوضه			بارش			تبخیر از دریاچه			ماه میلادی
	ET (MCM)	مساحت حوضه بدون دریاچه (km ²)	ارتفاع تبخیر و تفرق (mm)	بارش (MCM)	مساحت حوضه (km ²)	ارتفاع بارش (mm)	تبخیر (MCM)	مساحت دریاچه (km ²)	ارتفاع تبخیر (mm)	
628.84	439.02	48779.94	9	1135.33	51842	21.9	67.48	3062.06	22.04	ژانویه
897.63	633.81	48754.63	13	1639.23	51842	31.62	107.80	3087.37	34.91	فوریه
699.20	1168.74	48697.46	24	2074.19	51842	40.01	206.24	3144.54	65.59	مارس
2051.71	1409.47	48602.58	29	3807.25	51842	73.44	346.07	3239.42	106.83	آوریل
623.93	1989.62	48527.35	41	3074.73	51842	59.31	461.18	3314.65	139.13	می
-2899.28	2821.81	48651.86	58	521.53	51842	10.06	599.00	3190.14	187.77	ژوئن
-3664.60	3074.75	48805.51	63	16.59	51842	0.32	606.45	3036.49	199.72	جولای
-2762.81	2640.42	48896.62	54	398.66	51842	7.69	521.06	2945.38	176.91	آگوست
-2211.12	1910.39	48984.42	39	113.53	51842	2.19	414.26	2857.58	144.97	سپتامبر
-1309.26	1323.92	49033.90	27	277.35	51842	5.35	262.70	2808.10	93.55	اکتبر
-1120.63	980.82	49041.06	20	22.81	51842	0.44	162.62	2800.94	58.06	نوامبر
180.58	294.29	49048.36	6	572.85	51842	11.05	97.98	2793.64	35.07	دسامبر
-8885.82	18687.06		383	13654.07		268.44	3852.83		1264.55	سال ۲۰۱۰

جدول ۶- بیلان آب حوضه ابریز ارومیه در مقیاس ماهانه و سالانه در سال ۱۹۹۵

بیلان سال ۱۹۹۵										
تغییرات ذخیره (MCM)	تبخیر و تعرق حوضه			بارش			تبخیر از دریاچه			ماه میلادی
	ET (MCM)	مساحت حوضه بدون دریاچه (Km ²)	ارتفاع تبخیر و تعرق (mm)	بارش (MCM)	مساحت حوضه (Km ²)	ارتفاع بارش (mm)	تبخیر (MCM)	مساحت دریاچه (Km ²)	ارتفاع تبخیر (mm)	
1038.88	125.91	46120.71	2.73	1243.16	51841.70	23.98	78.38	5720.99	13.70	ژانویه
1248.72	240.75	46120.27	5.22	1693.15	51841.70	32.66	203.68	5721.43	35.60	فوریه
411.24	573.27	46120.08	12.43	1392.47	51841.70	26.86	407.95	5721.62	71.30	مارس
2974.03	889.65	46119.92	19.29	4521.11	51841.70	87.21	657.43	5721.78	114.90	آوریل
-514.87	1336.56	46119.92	28.98	1610.72	51841.70	31.07	789.03	5721.78	137.90	می
-1337.59	2117.83	46119.92	45.92	1949.77	51841.70	37.61	1169.53	5721.78	204.40	ژوئن
-3509.71	2512.15	46119.92	54.47	167.97	51841.70	3.24	1165.53	5721.78	203.70	جولای
-2973.88	1732.27	46120.00	37.56	0.00	51841.70	0.00	1241.61	5721.70	217.00	آگوست
-1986.95	1557.94	46120.27	33.78	490.42	51841.70	9.46	919.43	5721.43	160.70	سپتامبر
-1125.23	664.13	46120.39	14.40	226.03	51841.70	4.36	687.13	5721.31	120.10	اکتبر
655.39	231.53	46120.65	5.02	1318.85	51841.70	25.44	431.94	5721.05	75.50	نوامبر
-100.05	225.99	46120.60	4.90	314.16	51841.70	6.06	188.22	5721.10	32.90	دسامبر
-5220.03	12207.98		264.70	14927.82	51841.70	288.01	7939.87	5721.10	1387.70	سال ۱۹۹۵

جدول ۷- بیلان سالانه حوضه در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی (بر حسب میلیون متر مکعب)

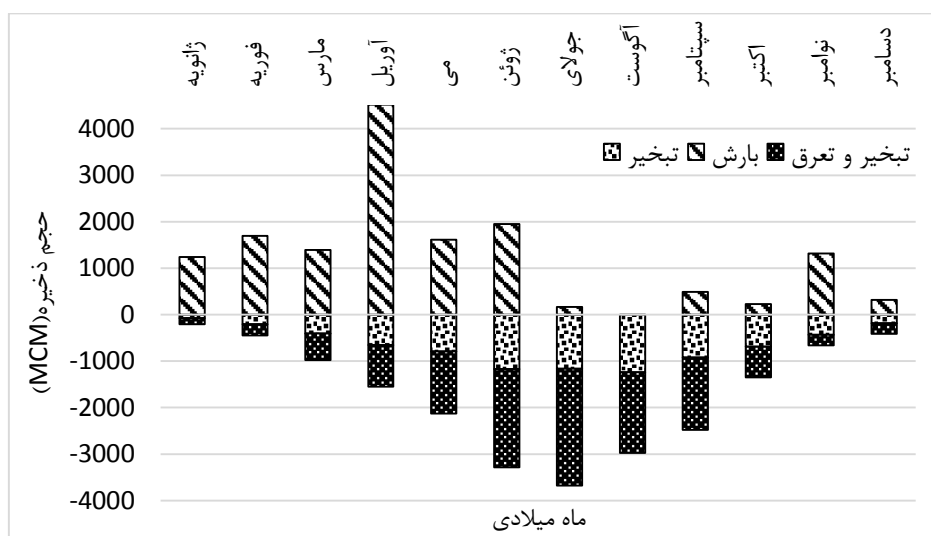
سال	تبخیر	بارش	تبخیر و تعرق	تغییرات ذخیره آب حوضه
۱۹۹۵	7939	14928	12208	-5220
۲۰۱۰	3853	13654	18687	-8885



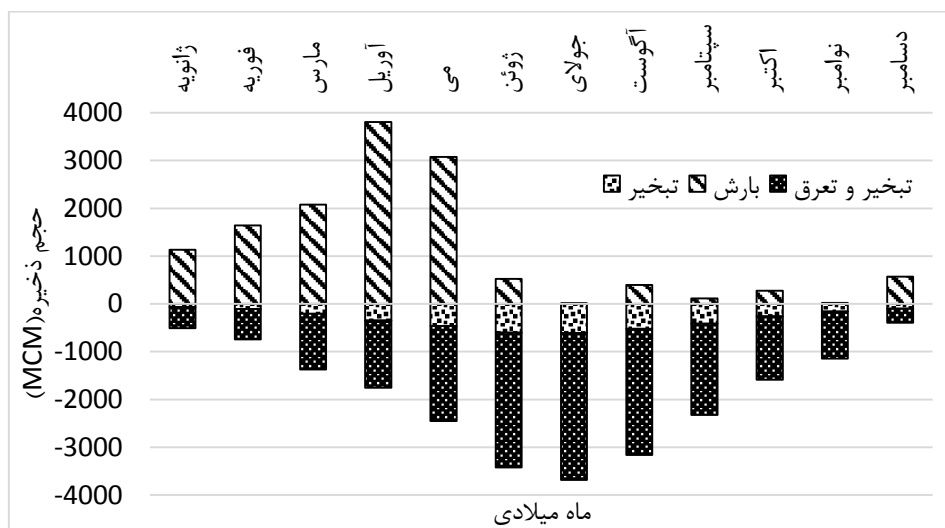
شکل ۶- تغییرات ذخیره آب حوضه در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی

با فرض استفاده از الگوریتم مشابه برای بدست آوردن ترم ΔS برای دو سال و اینکه خطاها (در صورت وجود) در یک جهت می باشند؛ مقدار ترم تغییرات ذخیره آب حوضه در مقیاس سالانه برای سال ۲۰۱۰ میلادی برابر ۸۸۸۵- و در سال ۱۹۹۵ میلادی ۵۲۲۰- میلیون مترمکعب می باشد. مقایسه بین سال ۲۰۱۰ و ۱۹۹۵ نشان دهنده کاهش تقریباً دوبرابری ذخیره آب حوضه در سال ۲۰۱۰ میلادی می باشد که با توجه به میانگین بارش پایین این سال (۲۶۸ میلیمتر) در مقایسه با سال ۱۹۹۵ (۲۸۸ میلی متر) انتظار بهره برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی و کاهش ذخایر آب حوضه دور از ذهن نمی باشد. از طرفی مقایسه ماه به ماه این ترم نشان می دهد که در ۶ ماه سرد سال که مصادف با بارش زیاد و تبخیر و تعرق کم می باشد، یعنی از چهار ماه ابتدایی و دو ماه انتهایی سال میلادی، ذخایر آب حوضه افزایش می یابد، ولی در فصول گرم با افزایش دما و در پی آن کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق، مقدار ذخایر آب حوضه کاهش می یابد به طوری که بیشترین مقدار برداشت از ذخایر آب حوضه در ماه جولای صورت گرفته که مصادف با گرمترین

ماه سال می باشد. روند تغییرات ΔS در بیشتر ماههای این دو سال به جز دو ماه می و نوامبر یکسان می باشد. جهت بررسی دقیقتر علت این موضوع، اجزای سازنده معادله بیلان برای هر ماه در شکل ۷ و شکل ۸ در کنار یکدیگر رسم شده است. در نوامبر سال ۲۰۱۰، مقدار ترم تبخیر و تعرق بسیار بیشتر از مقدار بارش بوده، در حالی که در سال ۱۹۹۵ مقدار بارش زیاد و تبخیر و تعرق کم می باشد که این باعث افزایش ذخیره آب حوضه در این ماه از سال ۱۹۹۵ در مقایسه با زمان مشابه در سال ۲۰۱۰ شده است. در ماه می ۲۰۱۰، مقدار بارش بسیار بیشتر از مقدار مشابه در سال ۱۹۹۵ بوده در حالی که سایر ترمها تقریباً برابرند که این باعث افزایش ذخیره آب حوضه در ماه می ۲۰۱۰ در مقایسه با زمان مشابه در سال ۱۹۹۵ شده است.



شکل ۷- رسم هم زمان ترمهای مختلف معادله بیلان آب در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵



شکل ۸- رسم هم زمان ترمهای مختلف معادله بیلان آب در ماههای مختلف سال ۲۰۱۰

اعداد بدست آمده برای ترم تغییرات ذخیره آب حوضه در صورت برآورد صحیح همه ترمها، نشان دهنده مصرف بسیار زیاد از ذخایر آب حوضه (مانند ذخایر آب سطحی، زیرزمینی یا آب دریاچه) در سال ۲۰۱۰ در مقایسه با سال ۱۹۹۵ میلادی می باشد. اما در صورت وجود خطا در برآورد ترمهای ورودی و خروجی معادله بیلان امکان جمع شدن خطاها در ترم مجهول (تغییرات ذخیره آب حوضه) وجود داشته که می تواند منجر به نتیجه گیری نادرست شود، لذا در ادامه به اعتبار سنجی مقادیر ترم های اصلی معادله بیلان در مقایسه با مقادیر بدست آمده در مطالعات گذشته و سایر روشها پرداخته و تفاوت ها تحلیل می گردد.

۳-۲- اعتبارسنجی اجزای معادله بیلان

۳-۲-۱- اعتبار سنجی ترم بارش

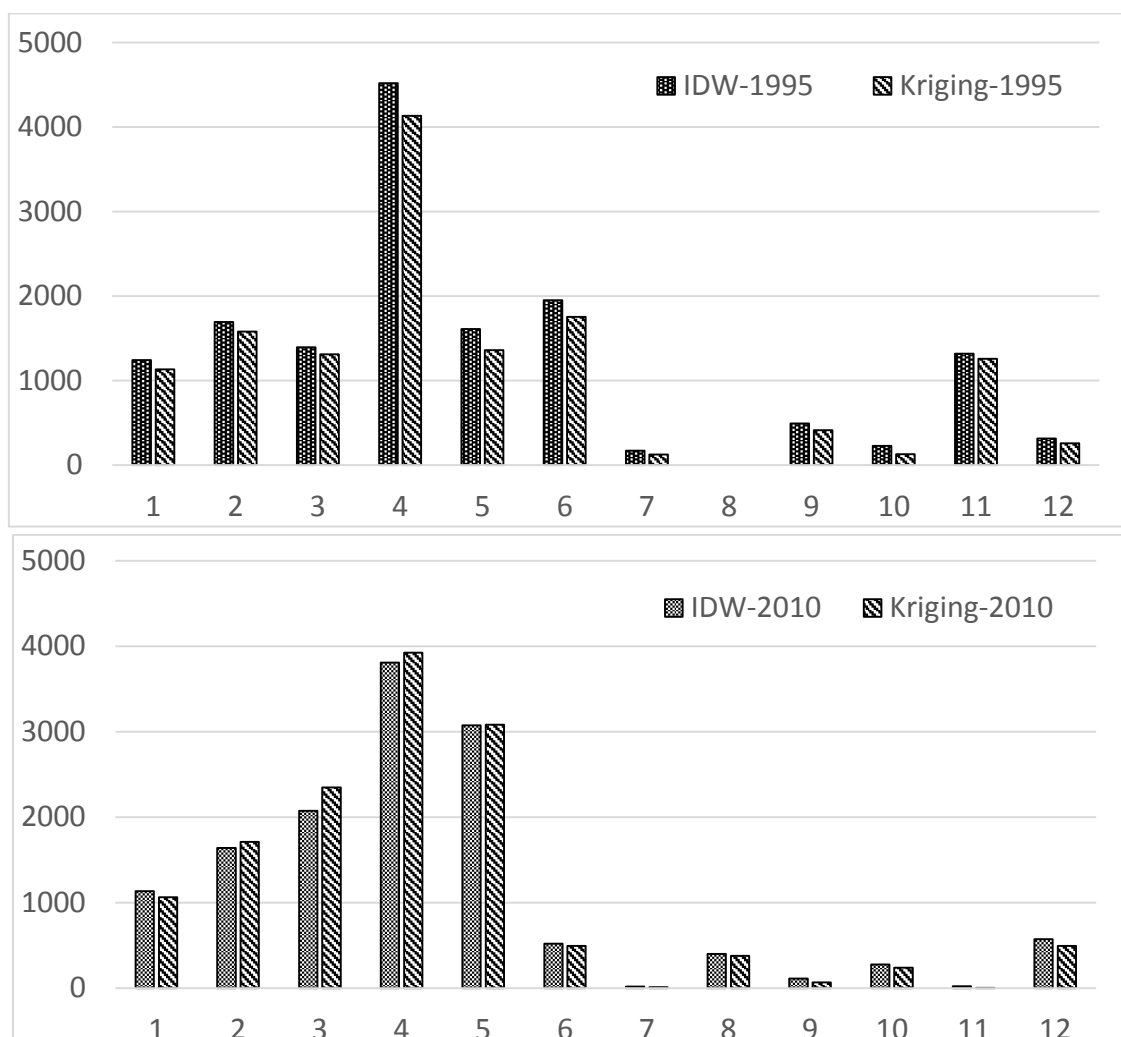
مقادیر بدست آمده برای بارش حوضه در سایر مطالعات بیلان حوضه آبریز ارومیه به شرح جدول ۸ می باشد. مطابق این جدول میانگین مقادیر برآورد شده برای بارش در سالهای نزدیک به ۲۰۱۰ (مطالعه مهتاب ۱۳۹۱ و باقری هارونی ۱۳۹۰) ۱۸۱۰۰ میلیون متر مکعب و در سالهای نزدیک به ۱۹۹۵ (سایر مطالعات ذکر شده در جدول ۸)، ۲۰۳۰۰ میلیون مترمکعب می باشد که تقریباً ۲۵٪ بیشتر از مقادیر بدست آمده در مطالعه حاضر می باشد (توضیحات تکمیلی در خصوص مطالعات و نحوه محاسبه ترم بارش در جدول ۱ پیوست الف آورده شده است). در ادامه برای روشن شدن اینکه کدام تخمین به واقعیت نزدیکتر است، محاسبات با روش زمین آمار متفاوت و با حذف ایستگاههای مشکوک مجدداً در حوضه انجام شد.

جدول ۸- مقادیر بدست آمده برای بارش در سایر مطالعات انجام شده در حوضه آبریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۱ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار بارش (MCM)	توضیحات
جاماب ۱۳۸۴	۱۳۴۲-۱۳۸۰	۲۰۹۶۸	میانگین بلند مدت
مهتاب ۱۳۹۱	۱۳۷۶-۱۳۸۶	۱۷۲۰۳	میانگین ۱۰ ساله
صدرا ۲۰۰۵	۱۹۵۵-۱۹۸۵	۲۱۱۰۰	میانگین ۳۰ ساله
راهبردانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۳	۲۰۱۲۱	تجمعی سالانه
ITC (2003)	۱۹۹۳-۱۹۹۴	۲۵۹۷۲	تجمعی سالانه
	۱۹۹۹-۲۰۰۰	۱۳۴۲۷	تجمعی سالانه
باقری هارونی ۱۳۹۰	۲۰۰۲-۲۰۰۶	۱۹۱۲۹	میانگین ۵ ساله

برآوردهای انجام شده از ترم بارش با حذف آمار ایستگاههای مشکوک و استفاده از روش Kriging در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ به ترتیب برابر ۱۳۴۴۲ و ۱۳۸۱۴ می باشد که در مقایسه با برآورد قبلی با تمام ایستگاهها و

روش IDW به ترتیب ۱۰٪ کاهش و ۱٪ افزایش را نشان داده که اختلاف فاحشی نمی باشد. تفاوت محاسبات بارش با دو روش ذکر شده در مقیاس زمانی ماهانه در شکل ۹ نشان داده شده است. با این توصیف و با توجه به استفاده از دو روش درونیایی متفاوت در مطالعه حاضر، بیشترین تعداد ایستگاه (به جدول ۱ پیوست الف و بخش بارش روش شناسی مراجعه گردد) و حذف ایستگاه‌های مشکوک به نظر می رسد مقدار برآورد شده برای بارش واقعی در این حوضه باید به مقادیر واقعی نزدیکتر باشد، اگرچه عدم وجود ایستگاه در مناطق کوهستانی (جایی که حداکثر مقدار بارش حوضه رخ می دهد) و عدم اندازه گیری نزولات برفی می تواند منجر به برآورد دست پایین از بارش در این مطالعه شده باشد.



شکل ۹- مقایسه روشهای IDW و Kriging در برآورد بارش با استفاده از داده های ایستگاههای هواشناسی و وزارت نیرو

۳-۲-۲- اعتبارسنجی ترم تبخیر و تعرق

مقادیر بدست آمده برای ترم تبخیر و تعرق در مطالعات گذشته در حوضه آبریز ارومیه در جدول ۹ نشان داده شده است. به جز مقادیر بدست آمده در گزارشات جاماب ۱۳۸۴ و مهاب ۱۳۹۱ که بیش از ۳۰ درصد با

مقادیر سایر مطالعات اختلاف دارند. میانگین مقادیر گزارش شده برای تبخیر و تعرق حوضه در سال‌های نزدیک به ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ به طور میانگین بین ۱۶۰۰۰-۱۵۰۰۰ میلیون متر مکعب بوده است. به این ترتیب برآورد تبخیر و تعرق در در سال ۱۹۹۵، ۲۰٪ کمتر و در سال ۲۰۱۰ حدود ۲۰٪ بیشتر از مقادیر بدست آمده در سایر گزارشات می باشد.

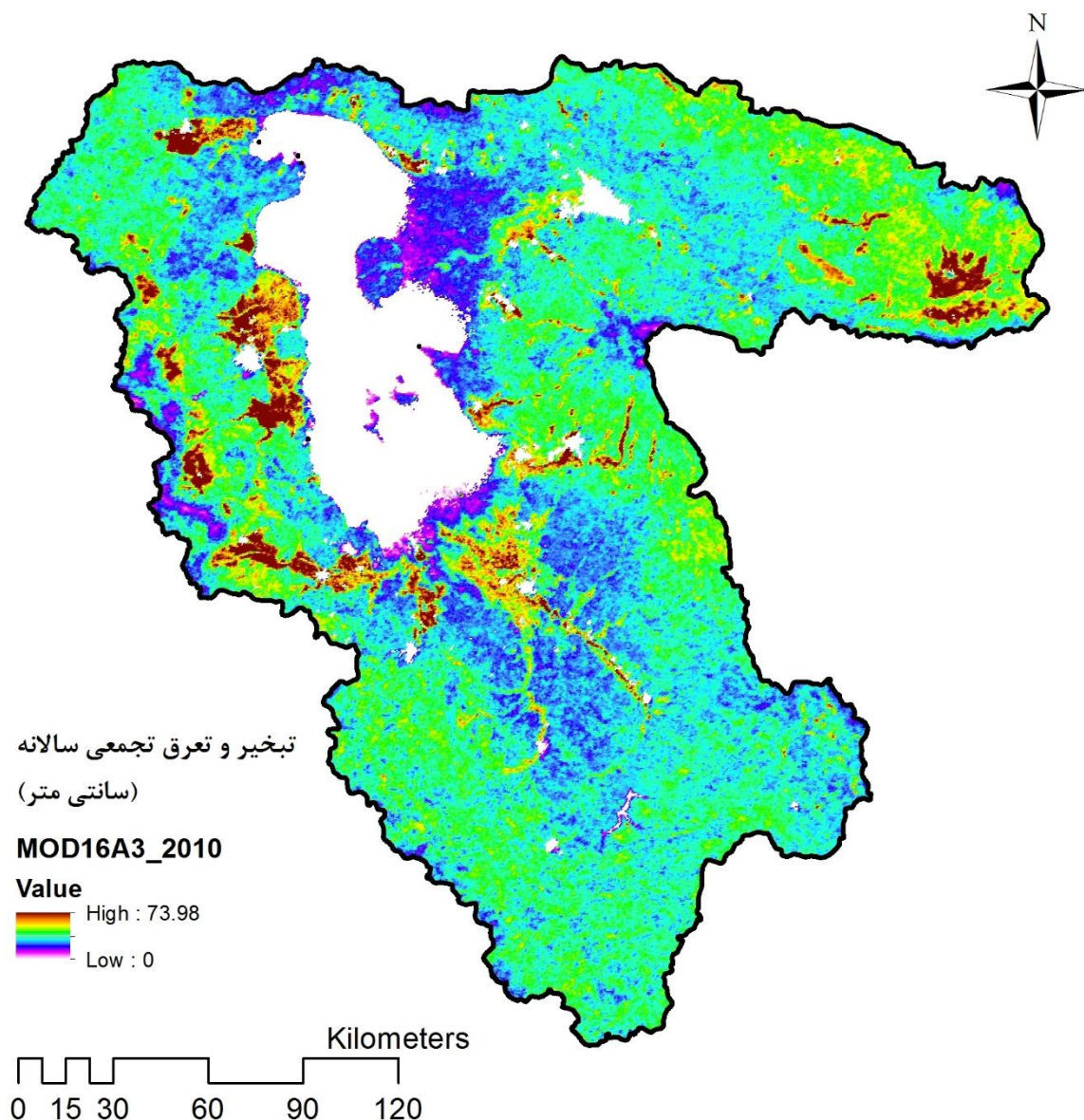
جدول ۹- مقادیر بدست آمده در سایر مطالعات برای تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۵ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار تبخیر و تعرق (MCM)	توضیحات
جاماب ۱۳۸۴	۱۳۸۰-۱۳۴۲	۲۱۲۹۱	میانگین بلند مدت
	۱۳۸۰-۱۳۷۹	۱۵۸۲۶	تجمعی سالانه
مه‌اب ۱۳۹۱	۱۳۸۶-۱۳۷۶	۸۹۴۵	میانگین ۱۰ ساله
راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۳	۱۲۴۱۱	تجمعی سالانه
ITC (2003)	۱۹۹۴-۱۹۹۳	۱۴۹۶۰	تجمعی سالانه
	۲۰۰۰-۱۹۹۹	۱۵۶۰۰	تجمعی سالانه
باقری هارونی ۱۳۹۰	۲۰۰۶-۲۰۰۲	۱۵۱۰۰	میانگین ۵ ساله

با توجه به پراکندگی اعداد در مطالعات گذشته و اختلاف حدوداً ۲۰ درصدی با تخمین‌های مطالعه حاضر جدیدترین محصول تبخیر و تعرق سنجنده MODIS (MOD16A3) که در ماه مارچ ۲۰۱۷ ارائه شده، به عنوان یک محصول مستقل در سال ۲۰۱۰ دریافت، پردازش و مقدار تبخیر و تعرق سالانه کل حوضه از آن استخراج گردید. نقشه ارتفاع تبخیر (سانتی متر) سال ۲۰۱۰ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار تبخیر و تعرق بر اساس خروجی این محصول ۸۷۸۲ میلیون مترمکعب بوده که حدوداً ۱۰ میلیارد مترمکعب از تبخیر و تعرق برآورد شده با مدل بیلان انرژی در سال ۲۰۱۰ کمتر است. مجموعاً با توجه به خروجی مطالعات گذشته و جدیدترین محصول MODIS برای تبخیر و تعرق به نظر می رسد برآورد مدل بیلان انرژی از میزان تبخیر و تعرق دست بالا بوده اما مقدار دقیق آن مشخص نیست و نیازمند وجود داده مستقل تبخیر و تعرق دیگری در منطقه می باشد.

بررسی دقیقتر خروجی‌های روش بیلان انرژی نشان می دهد مقدار این ترم در اراضی کشاورزی تطابق خوبی با سایر مطالعات دارد ولی به نظر می رسد که در اراضی غیر کشاورزی مقدار آن دست بالا برآورد شده است، که می تواند در نتیجه نهایی بدست آمده برای ΔS تاثیرگذار باشد. در مورد علت وجود خطا در برآورد تبخیر و تعرق در مراتع و نواحی مرتفع حوضه می توان بیان نمود که اصولاً الگوریتم SEBAL جهت استفاده در اراضی زراعی و باغی توسعه داده شده است. از آنجا که اراضی زراعی حوضه سطحی حدود ۴۳۰۰ کیلومتر

مربع را اشغال نموده و حدود ۴۱۰۰۰ کیلومتر مربع از اراضی حوضه در مراتع و ارتفاعات قرار دارد، لذا اندکی برآورد بیشتر در این اراضی می تواند سبب تغییر زیاد در حجم تبخیر و تعرق حوضه گردد.



شکل ۱۰- نقشه ارتفاع تبخیر و تعرق (*cm*) حوضه آبریز ارومیه در سال ۲۰۱۰ بر اساس محصول *MOD16A3* سنجنده *MODIS* که جدیدترین محصول ارائه شده تبخیر و تعرق از این سنجنده می باشد. این محصول برآورد به شدت دست پایین در مقایسه با الگوریتم بیلان انرژی در همین سال دارد

۳-۲-۳- اعتبار سنجی ترم تبخیر از دریاچه

در محاسبه ترم تبخیر از دریاچه نیز مقادیر بدست آمده از روش دویرین-کیچمن با روش بیلان انرژی (سیما، ۱۳۹۲)، به عنوان دقیقترین روش برآورد تبخیر، مقایسه شده است که با توجه به همبستگی بالای $R^2=0.99$ با $RMSE=0.06$ ، نشان دهنده خطای اندک این روش در مقایسه با روش بیلان انرژی می باشد. مقایسه

مقادیر بدست آمده برای حجم تبخیر با سایر مطالعات در جدول ۱۰ و به صورت تکمیلی در جدول شماره ۵ پیوست الف نشان داده شده است. روش برآورد تبخیر در اکثر این مطالعات درونیابی مقادیر تبخیر از تشتک در ایستگاه‌های اطراف دریاچه با اعمال ضریبی برای تبدیل تبخیر آب شور به شیرین می باشد. میانگین حجم تبخیر در این مطالعات در سالهای نزدیک به ۱۹۹۵ تقریباً ۵۵۰۰ میلیون متر مکعب بوده که حدود ۴۳٪ کمتر از برآورد این مطالعه می باشد. این تخمین در سال ۲۰۱۰ (یا با شرایط مشابه مثلاً سال کم آب ۱۳۸۰) تقریباً ۴۵۰۰ میلیون متر مکعب (حدود ۱۵ در صد بیشتر از برآورد مطالعه حاضر) می باشد. به عبارتی به نظر می رسد مدل تجربی به کار فته در این مطالعه در سالهای خشک تخمین کمتر و در سالهای تر تخمین بیشتر از مقدار تبخیر از سطح دریاچه را دارد. با این حال با توجه به خطاهای زیاد روش تشتک (خطای ناشی از تفاوت تشتک با دریاچه، خطای تبدیل آب شور به شیرین و خطای درونیابی بین ایستگاه ها و ...) روش های نزدیک به بیلان انرژی مانند روش تجربی دوبرین - کیجمن که در این مطالعه به کار رفته، می بایست جواب دقیقتری را در سطح دریاچه بدست دهند.

جدول ۱۰- مقادیر بدست آمده در سایر مطالعات برای تبخیر دریاچه ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۵ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار تبخیر (MCM)	توضیحات
جاماب ۱۳۸۴	۱۳۴۲-۱۳۸۰	۵۲۹۴	میانگین بلند مدت
	۱۳۷۹-۱۳۸۰	۳۶۵۴	تجمعی سالانه
راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۶-۱۳۷۷	۵۷۷۸	تجمعی سالانه
	۱۳۸۷-۱۳۸۸	۴۶۸۴	تجمعی سالانه
ITC (2003)	۱۹۶۷-۲۰۰۲	۵۸۷۳,۲	میانگین بلند مدت
	۱۹۹۳-۱۹۹۴	۵۱۸۰	تجمعی سالانه
	۱۹۹۹-۲۰۰۰	۴۹۰۰	تجمعی سالانه
باقری هارونی ۱۳۹۰	۲۰۰۲-۲۰۰۶	۴۵۰۰	میانگین ۵ ساله
طرح نو اندیشان، ۱۳۸۳	۱۳۴۵-۱۳۷۹	۱۲۷۳ mm	میانگین بلند مدت
یکم، ۱۳۸۳	۱۳۴۵-۱۳۸۰	۹۶۰ mm	میانگین بلند مدت
	۱۳۷۳-۱۳۷۴	۸۶۶,۲ mm	تجمعی سالانه

مقایسه میزان تبخیر در سال ۱۹۹۵ با سال ۲۰۱۰ نشان می دهد که این مقدار در سال ۱۹۹۵ تقریباً دو برابر سال ۲۰۱۰ بوده، که با توجه به سطح بزرگتر دریاچه در سال ۱۹۹۵ که آن هم تقریباً دو برابر سال ۲۰۱۰ می باشد (به طور متوسط ماهانه ۲۵۰۰ کیلومتر بزرگتر از سال ۲۰۱۰) دور از ذهن نمی باشد. از این

گذشته مقدار ترم تبخیر در مقایسه با دو ترم دیگر بسیار کمتر بوده و تاثیر کمتری در مقدار ترم ΔS خواهد داشت.

۳-۲-۴- تغییرات ذخیره آب حوضه و مقایسه با مقادیر بدست آمده از مطالعات گذشته

با فرض استفاده از الگوریتم مشابه برای بدست آوردن ترم ΔS برای دو سال و اینکه خطاها (در صورت وجود) در یک جهت می باشند؛ مقدار تغییرات ذخیره آب حوضه در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ به ترتیب ۵۲۲۰ و ۸۸۸۵ میلیون متر مکعب کاهش را نشان می دهد. این در حالیست که در اکثر مطالعات گذشته که به محاسبه این ترم در حوضه آبریز ارومیه پرداخته اند (جدول ۱۱)، مقدار تغییرات ذخیره آب حوضه عددی نزدیک به صفر می باشد. به عبارتی حتی اگر ۱ درصد خطا در محاسبه ترمهای ورودی و خروجی معادله بیلان در نظر گرفته شود (که اصلاً دور از ذهن نبوده و مقدار آن به مراتب بیشتر از این خواهد بود) میزان خطا از مقدار ترم تغییرات ذخیره آب زیر زمینی بیشتر خواهد شد و لذا نتایج بدست آمده از این مطالعات قابل استناد نمی باشد. اما در مطالعه دیگری که توسط توریان و همکاران در سال ۲۰۱۵ انجام گرفت، متوسط تغییرات ذخیره آب حوضه از سال ۲۰۱۴-۲۰۰۲ برابر با ۱۴۰۰ میلیون مترمکعب کاهش در هر سال گزارش شده است. رقم بدست آمده در مطالعه حاضر برای این ترم در سال ۲۰۱۰ تقریباً ۶ برابر این مقدار می باشد که با توجه به توضیحات بخش ۳-۲-۲ در خصوص تبخیر و تعرق می تواند از برآورد دست بالا از تبخیر و تعرق و تا حدودی برآورد دست پایین از بارش نشأت گرفته باشد. در ادامه برای بررسی عمیقتر این موضوع نتایج بدست آمده از این مطالعه با دو مرجع مستقل؛ ماهواره GRACE و مدل جهانی WGHM، مقایسه می شود.

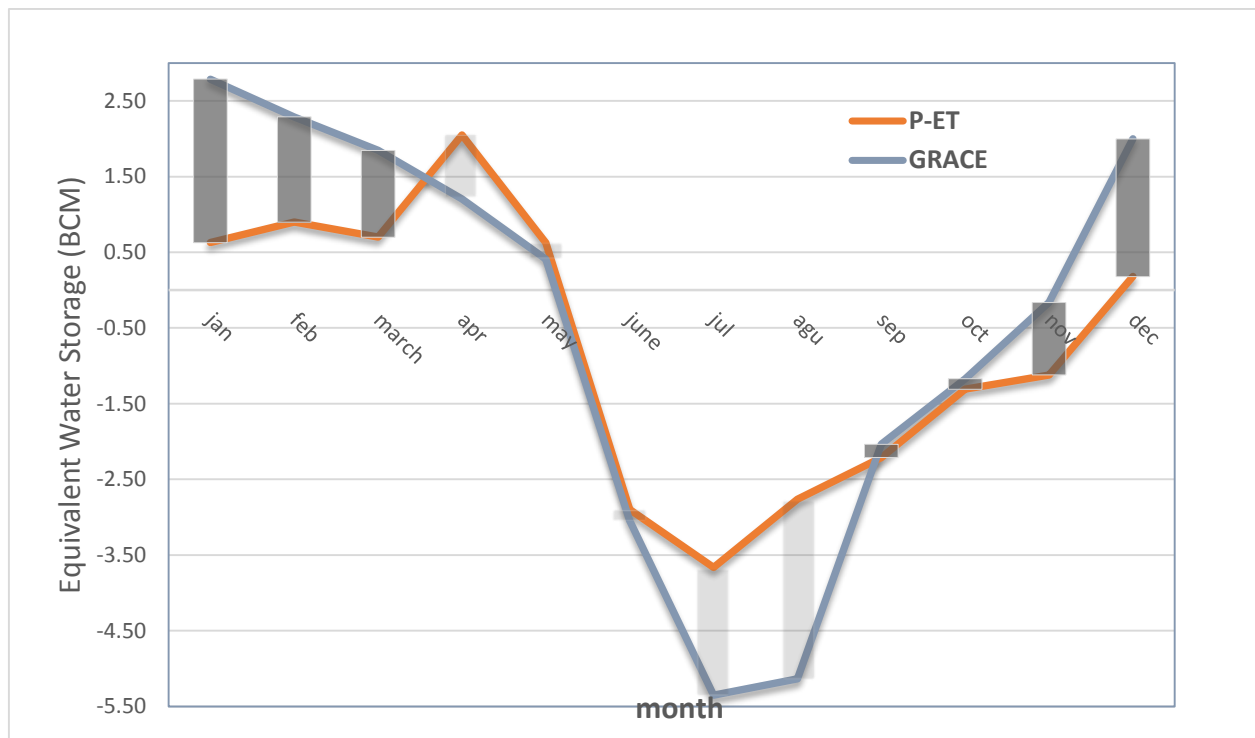
جدول ۱۱- مقادیر بدست آمده برای تغییرات ذخیره آب حوضه در سایر مطالعات (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۲ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار تبخیر (MCM)	توضیحات
جاماب ۱۳۸۴	۱۳۴۲-۱۳۸۰	-۲۳	میانگین بلند مدت
	۱۳۷۹-۱۳۸۰	-۸۸	تجمعی سالانه
راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۳	-۵۴,۱	تجمعی سالانه
Tourian et al., 2015	۲۰۰۲-۲۰۱۴	-۱۴۰۰	میانگین بلند مدت

۳-۲-۵- اعتبارسنجی ترم تغییرات ذخیره آب حوضه (مقایسه با داده های GRACE و مدل WGHM)

همانطور که در مقدمه عنوان شد ماهواره GRACE امکان سنجش تغییرات جرم سیال زمین را دارد، حال با توجه به اینکه مسئول سهم عمده در تغییرات جرم سیال زمین تغییرات در ذخایر آب آن می باشد، داده

های GRACE مبنای مناسبی برای صحت سنجی ترم تغییرات ذخیره آب حوضه که از روش بیلان بدست آمده می باشد. مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوضه با ترم ماهواره GRACE در شکل ۱۱ انجام شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود سری زمانی تغییرات GRACE در قیاس با آنچه از P-ET حاصل شده، رفتار مشابهی را دنبال می کند هرچند مقادیر بدست آمده از GRACE تخمین بیش از اندازه داشته که این مساله می تواند ناشی از فرضیات مطرح شده در روند محاسبات GRACE می باشد.



شکل ۱۱- مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوضه که از اختلاف بارش و تبخیر و تعرق حوضه بدست آمده با ترم TWS ماهواره GRACE

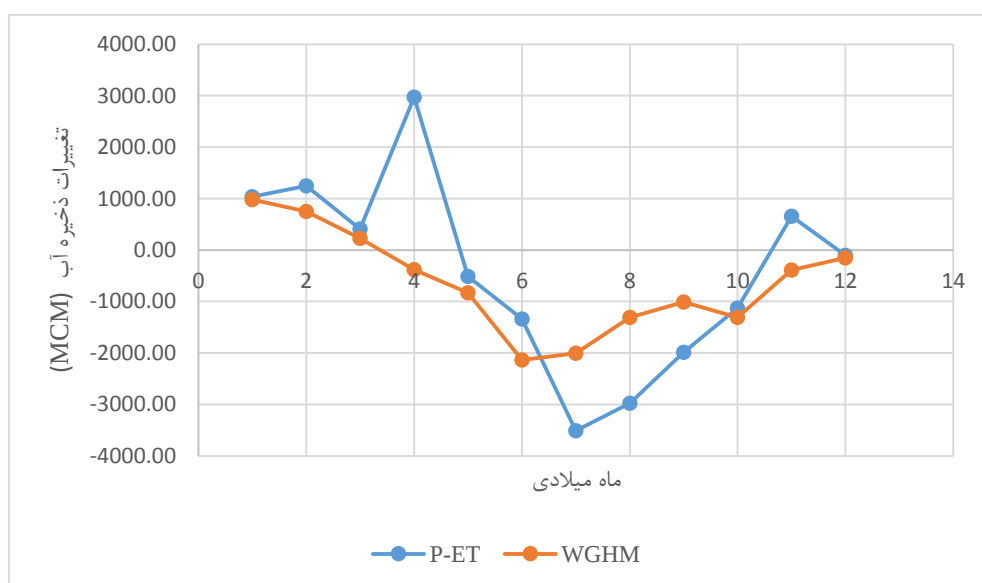
اما مروری بر مطالعات پیشین در این زمینه نشان می دهد که عوامل متعددی می تواند در این نتایج تاثیرگذار باشد:

- ۱- بنا بر مطالعات فروتن و همکاران (۲۰۱۴) و همچنین مثال هایی مشابه در شمال غرب استرالیا و یا غرب آفریقا، زمانی که یک خشکسالی مدت دار در یک ناحیه رخ می دهد، به زمانی قابل توجه نیاز است تا رفتار تغییرات حجم ذخایر زمینی با الگوی زمانی بارش در آن منطقه تطبیق پیدا کند.
- ۲- الگوریتم به کار رفته جهت فیلتر کردن و مدل های کمکی مورد استفاده نیز در مقدار این ترم تاثیرگذار می باشند برای صحت سنجی نتایج می توان از روش های پیشنهاد شده دیگر نیز در

محاسبه تغییرات ذخیره زمینی آب استفاده کرد (الگوریتم های فیلتر مختلف، مدل های کمکی و ...).

۳- حوضه ارومیه با مساحت ۵۱،۹۳۱ کیلومتر مربع برای دقت نتایج GRACE که معمولاً برای حوضه های با مساحت بیشتر از ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع استفاده می شود، بسیار کوچک محسوب می شود؛ اما مطالعات نشان داده است که عامل دیگری نیز در کنار مساحت در اعتبارسنجی این نتایج تاثیرگذار است و آن قدرت سیگنال (شدت تغییرات) در ناحیه مورد نظر است که به آن وضوح جاذبی نیز گفته می شود (Tourian et al., 2015). به بیان دیگر، اگر یک حوضه نوسانات ذخیره آبی بزرگی را نشان دهد، می توان نتایج معناداری از مشاهدات GRACE انتظار داشت. اما اینکه آیا این تغییرات در ارومیه به اندازه کافی بزرگ بوده که توسط GRACE دیده شود به صورت قطعی مشخص نیست.

مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوضه با ترم TWS از مدل WGHM در شکل ۱۲ نیز حاکی از تخمین بیش از حد در نتایج بدست آمده از مدل نسبت به آنچه از $P - ET$ بدست آمده، می باشد.



شکل ۱۲- مقایسه بین ترم تغییرات ذخیره آب حوضه که از اختلاف بارش و تبخیر و تعرق حوضه بدست آمده با ترم TWS مدل WGHM

البته بررسی نتایج WGHM در حوضه های آبریز مختلف، نشان می دهد که عملکرد درست این مدل وابسته به تامین برخی شرایط است که در صورت عدم ارضای آنها خروجیهای مدل توأم با خطا خواهد بود. به عنوان مثال در حوضه های نیمه خشک و خشک، نتایج نسبت به مناطق مرطوب دقت پایین تری دارد که تا حدی

ناشی از در نظر نگرفتن افت های آبی در کانال رودخانه و تبخیر از رواناب برکه های موقتی می باشد. همچنین، هیدرولوژی حوضه های توسعه یافته که شامل مخازن مصنوعی بزرگ و الگوهای متنوع کشاورزی هستند را نمی توان بخوبی با این مدل شبیه سازی کرد. در تمامی حوضه هایی که دبی رودخانه ها بوسیله مخازن ساخته دست بشر کنترل می شود، تغییرات فصلی نتایج به درستی با WGHM مدل نمی شود زیرا اطلاعات جامعی از مدیریت مخازن سدها ارائه نمی شود. بعلاوه در حوضه هایی که برف عامل تعیین کننده ای در متغیرات هیدرولوژیکی بوده و ایستگاه هایی برای کالیبراسیون وجود ندارد، نتایج کمتر از میزان واقعی پیش بینی شده و ویژگی تغییرات فصلی نیز به دلیل الگوریتم ساده استفاده شده در WGHM بخوبی ارائه نمی شود. نهایتاً در حوضه های شامل دریاچه های بزرگ با وجود بهبود نتایج به کمک مدل سازی صریح در هر دو راستای بیلان قائم و انتقال افقی آب، داده های کافی برای مشاهده دقیق هیدرولوژی این بدنه های آبی فراهم نبوده که منجر به تولید خطا در نتایج مدل خواهد شد. با توجه به اینکه اکثر موارد فوق در حوضه آبریز ارومیه صادق می باشد، اختلاف بین تخمین مدل WGHM و TWS بدست آمده از بیلان قابل توجیه می باشد.

۳-۲-۶- جمع بندی نتایج فاز اول

برآورد بدست آمده برای بارش نسبت به سایر مطالعات انجام شده جهت تخمین بارش حوضه بیشتر بوده اما با توجه به استفاده از ایستگاه های بیشتر، حذف ایستگاه های دارای آمار مشکوک و بررسی دو روش زمین آمار در درونیابی (IDW و Kriging) به واقعیت نزدیکتر می باشد و اگرچه با توجه به لحاظ نشدن آمار برف، نبود ایستگاه در ارتفاعات (جایی که اکثر بارش حوضه در آن اتفاق می افتد) احتمالاً بارش تجمعی بدست آمده در این مطالعه دست پایین برآورد شده است.

تخمین بدست آمده از تبخیر و تعرق در سایر مطالعات بسیار متغیر بوده ولی به طور کلی در سال ۲۰۱۰ مقدار محاسبه شده در مطالعه حاضر بیشتر از مطالعات دیگر می باشد، مقایسه با نتایج جدیدترین محصول MODIS نیز حاکی از برآورد بیش از دوبرابری روش بیلان انرژی از تبخیر و تعرق در مقایسه با این محصول می باشد. بنابراین نمی توان با اطمینان از برآورد دقیق تبخیر و تعرق با روش بیلان انرژی سخن گفت. همچنین جمیع شواهد نشان دهنده تخمین دست بالای روش به کار رفته در این مطالعه می باشد، اما کمی سازی آن نیازمند دسترسی به داده های زمینی مرجع می باشد.

در این مطالعه تبخیر از دریاچه از روش تجربی با نتایج نزدیک به روش بیلان انرژی (دقیقترین روش برآورد تبخیر از پیکره های آبی) بدست آمده که یک روش توزیعی بوده و تحت هر شرایط نتیجه دقیقتری از درونیابی داده های تشک تبخیر (داده نقطه ای) اطراف دریاچه (روش به کار رفته در سایر مطالعات) در برخواهد

داشت. با این حال ترم تبخیر از دریاچه سهم بزرگی از بیلان آب حوضه نداشته و تاثیر زیادی در محاسبات نخواهد داشت.

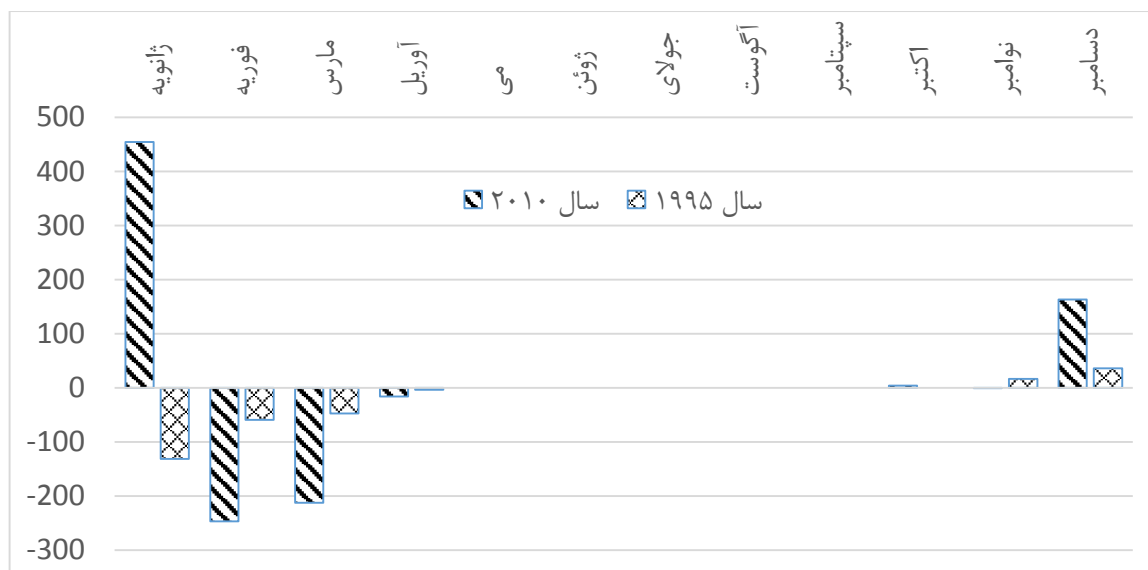
بنابر این توضیحات کاهش تغییرات ذخیره آب حوضه در این مطالعه بیشتر از سایر مطالعات خواهد بود که نتیجه برآورد دست بالا از تبخیر و احتمالاً برآورد دست پایین از بارش می باشد. مقایسه نمودار ماهانه تغییرات ذخیره آب حوضه از این مطالعه با داده های سنجنده GRACE روند یکسانی را نشان می دهد اگرچه GRACE افزایش بیشتر ذخایر آب در فصول گرم و کاهش بیشتر این ذخایر در فصول سرد را نشان می دهد که عواملی مانند کوچک بودن حوضه آبریز ارومیه در برابر اندازه پیکسلهای GRACE (دخیل شدن تغییرات ذخیره سایر حوضه ها) و خشکسالی بلند مدت در منطقه در آن موثر می باشند. مدل WGHM نیز به دلیل وجود برخی محدودیت ها در دریافت داده ها از سدها و نحوه تخصیص و همچنین خشک بودن اقلیم منطقه خطای بیشتری در محاسبات داشته با این حال روند یکسانی با خروجی های تغییرات ذخیره آب در این حوضه را نشان می دهد. با این جمع بندی در بخش بعدی اجزای سازنده تغییرات ذخیره آب حوضه به تفکیک محاسبه شده تا ترم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی از روی آن محاسبه گردد. جهت اعتبار سنجی محاسبات در این مطالعه مقادیر بدست آمده برای هر جز با مطالعات گذشته نیز مقایسه شده است.

۳-۳- نتایج فاز دوم

همانطور که پیشتر عنوان شد در این بخش ابتدا مقادیر بدست آمده برای اجزای تشکیل دهنده ترم ذخیره آب حوضه آورده و تحلیل می شوند سپس نتایج بدست آمده برای جز تغییرات آب زیرزمینی به صورت ماهانه در هر سال محاسبه شده و تحلیل می گردد. فرض کلیدی در این فاز مطالعه این است که در مقیاس زمانی ماهانه تبادل آبی بین ترم های مختلف ذخیره آب اتفاق نمی افتد. به عبارتی یک مقدار آب در دو ترم محاسبه نمی شود.

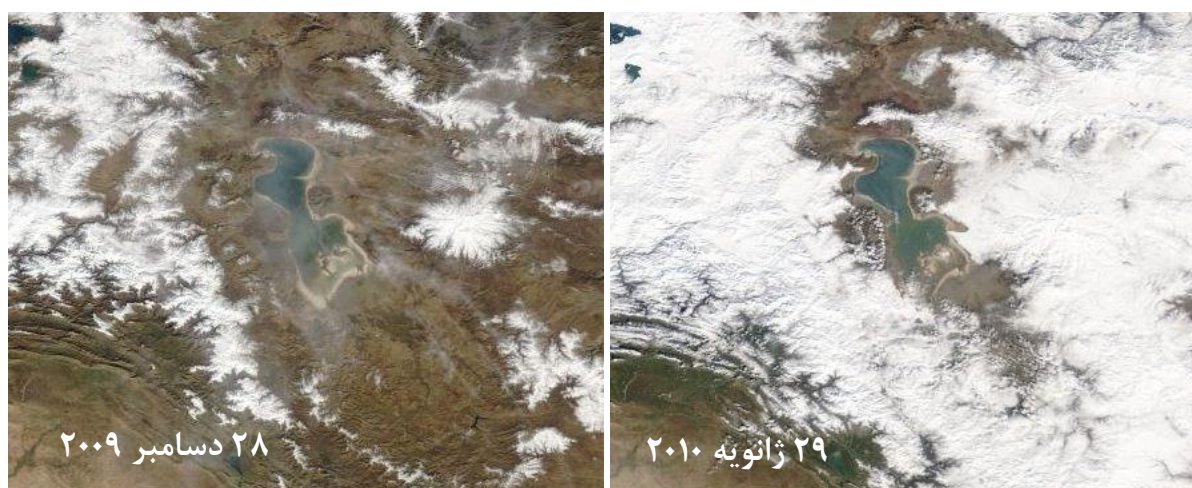
۳-۳-۱- تغییرات ذخیره برف

انتظار می رود که با بارش برف در ماه های سرد سال، ذخیره آب معادل برف در این ماه ها افزایش پیدا کند و با وقوع گرما در ماه های گرم، میزان آب کاهش داشته باشد. این روند به خوبی در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. بیشترین مقادیر آب معادل برف در ماه های اکتبر تا ژانویه (آبان تا بهمن) و کمترین مقدار آب معادل برف در ماه های جولای تا سپتامبر (تیر، مرداد و شهریور) رخ می دهد.

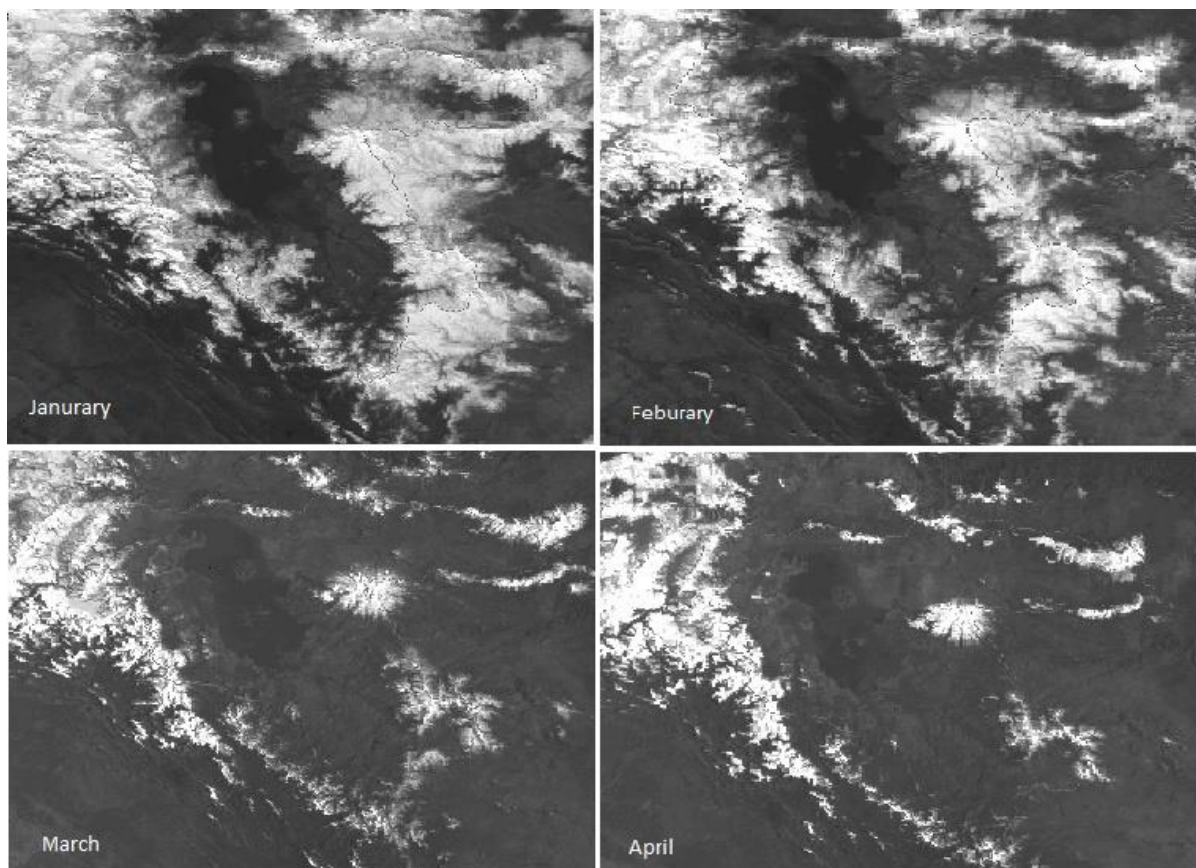


شکل ۱۳- تغییرات ذخیره آب معادل برف در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی بر اساس داده های سه ساعته آب معادل برف **GLDAS**

افزایش آب معادل برف در ماه ژانویه ۲۰۱۰ نشان دهنده بارش برف سنگین در طول این ماه می باشد مقایسه دو تصویر رنگ واقعی MODIS از روزهای انتهایی سال ۲۰۰۹ و اواخر ژانویه ۲۰۱۰ جمع شدگی برف را در این ماه تایید می کند (شکل ۱۴). در سال ۱۹۹۵ اما مقدار ذخیره آب معادل برف از ابتدا روندی کاهشی داشته که می تواند به آب شدن برف های سال ۱۹۹۴ مرتبط باشد، بررسی تصاویر ماهواره ای سنجنده AVHRR در ماههای انتهایی سال ۱۹۹۴ و ماههای ابتدایی ۱۹۹۵ وجود این بارش سنگین را تایید می نماید.



شکل ۱۴- سطح برف در روزهای انتهایی سال ۲۰۰۹ و روزهای ابتدایی ۲۰۱۰؛ افزایش مقدار آب معادل برف در ماه ژانویه ۲۰۱۰ قابل مشاهده می باشد



شکل ۱۵- تغییرات سطح برفی مشاهده شده از سنجنده **AVHRR** در ماههای ابتدایی سال ۱۹۹۵ میلادی که نشان دهنده بارش برف سنگین در انتهای سال ۱۹۹۴ می باشد.

۳-۲- تغییرات حجم دریاچه

نتایج نشان می دهد به طور کلی تغییرات ماهانه و سالانه حجم دریاچه در سال ۱۹۹۵ بیشتر از سال ۲۰۱۰ بوده که با توجه به ۷ برابر بودن متوسط حجم دریاچه در این سال در مقایسه با سال ۲۰۱۰ قابل انتظار است. بیشترین تغییرات حجم در هر دو سال در ماه بهار و تابستان رخ داده است که حداکثر آن حدود ۱,۴ میلیارد مترمکعب در ماه آوریل سال ۱۹۹۵ بوده است. این موارد در شکل ۱۶ و جدول ۱۳ نشان داده شده است.

اما مقایسه مقادیر بدست آمده از تغییرات حجم مخزن دریاچه در مطالعات گذشته با مطالعه حاضر که در جدول ۱۲ آورده شده است، نشان می دهد، مقدار محاسبه شده برای سال ۲۰۱۰ با برآورد بدست آمده از بیلان حجمی مبتنی بر تصاویر ماهواره ای (Tourian et al, 2015) بسیار نزدیک بوده و کمتر از ۱۰ درصد اختلاف دارد، استفاده از تصاویر ماهواره ای برای استخراج سطح آب دریاچه و نقشه بسیمتری برای بستر دریاچه، از نقطه اشتراک این دو مطالعه می باشد. سایر برآوردها برای تغییرات حجم آب دریاچه مبتنی بر معادله بیلان حجمی دریاچه (ورودی - خروجی) بوده که نتایج کاملاً متفاوتی را ارائه نموده اند که خطا در محاسبه هر ترم ورودی یا خروجی می تواند در آن نقش داشته باشد.

جدول ۱۲- تغییرات ذخیره مخزن آب دریاچه در مطالعات مختلف (توضیحات تکمیلی در جدول ۳ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار تبخیر (MCM)	توضیحات
راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۶-۱۳۸۸	-۲۳۴۳۹	تجمعی ۱۰ ساله
	۱۳۸۷-۱۳۸۸	-۳۲۷۱	تجمعی سالانه
ITC (2003)	۱۹۹۳-۱۹۹۴	۵۳۰۰	تجمعی سالانه
	۱۹۹۹-۲۰۰۰	-۶۷۰۰	تجمعی سالانه
Tourian et al., 2015	۲۰۰۲-۲۰۱۴	1003 ± 20	منحنی سطح- حجم-ارتفاع



شکل ۱۶- تغییرات حجم دریاچه در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی طبق منحنی سطح - حجم - ارتفاع موسسه تحقیقات آب

جدول ۱۳- تغییرات حجم دریاچه در ماههای مختلف سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ بر حسب متر مکعب در ماه

سال	شماره ماه	ماه میلادی	تراز انتهای ماه	سطح	حجم	تغییرات حجم
1994	12	Dec	1277.56		32,097,880,000	
	1	Jan	1277.68	5,720,987,921	32,778,640,000	680,760,000
	2	Feb	1277.8	5,721,427,603	33,459,400,000	680,760,000
	3	Mar	1277.92	5,721,620,827	34,140,160,000	680,760,000
	4	Apr	1278.17	5,721,777,000	35,558,410,000	1,418,250,000
	5	May	1278.39	5,721,777,000	36,806,470,000	1,248,060,000
	6	June	1278.33	5,721,777,000	36,466,090,000	- 340,380,000
	7	July	1278.17	5,721,777,000	35,558,410,000	- 907,680,000
	8	Agu	1277.98	5,721,703,857	34,480,540,000	- 1,077,870,000
	9	Sep	1277.8	5,721,427,603	33,459,400,000	- 1,021,140,000
	10	Oct	1277.75	5,721,308,831	33,175,750,000	- 283,650,000
	11	Nov	1277.69	5,721,045,662	32,835,370,000	- 340,380,000
	12	Dec	1277.7	5,721,100,261	32,892,100,000	56,730,000
2009	12	Dec	1271.57	3,010,508,102	5,066,885,602	
	1	Jan	1271.65	3,062,059,256	5,309,790,337	242,904,734
	2	Feb	1271.69	3,087,372,257	5,432,776,892	122,986,556
	3	Mar	1271.78	3,144,537,947	5,713,213,131	280,436,238
	4	Apr	1271.92	3,239,416,826	6,159,911,545	446,698,414
	5	May	1272	3,314,654,364	6,421,741,397	261,829,852
	6	June	1271.85	3,190,141,561	5,934,914,597	- 486,826,800
	7	July	1271.61	3,036,492,907	5,187,822,093	- 747,092,503
	8	Agu	1271.47	2,945,377,949	4,769,091,519	- 418,730,574
	9	Sep	1271.34	2,857,584,384	4,391,858,335	- 377,233,184
	10	Oct	1271.27	2,808,104,340	4,193,568,144	- 198,290,191
	11	Nov	1271.26	2,800,937,400	4,165,525,680	- 28,042,464
	12	Dec	1271.25	2,793,639,532	4,137,554,281	- 27,971,399
2010	1	Jan	1271.65	3,062,059,256	5,309,790,337	242,904,734
	2	Feb	1271.69	3,087,372,257	5,432,776,892	122,986,556
	3	Mar	1271.78	3,144,537,947	5,713,213,131	280,436,238
	4	Apr	1271.92	3,239,416,826	6,159,911,545	446,698,414
	5	May	1272	3,314,654,364	6,421,741,397	261,829,852
	6	June	1271.85	3,190,141,561	5,934,914,597	- 486,826,800
	7	July	1271.61	3,036,492,907	5,187,822,093	- 747,092,503
	8	Agu	1271.47	2,945,377,949	4,769,091,519	- 418,730,574
	9	Sep	1271.34	2,857,584,384	4,391,858,335	- 377,233,184
	10	Oct	1271.27	2,808,104,340	4,193,568,144	- 198,290,191
	11	Nov	1271.26	2,800,937,400	4,165,525,680	- 28,042,464
	12	Dec	1271.25	2,793,639,532	4,137,554,281	- 27,971,399

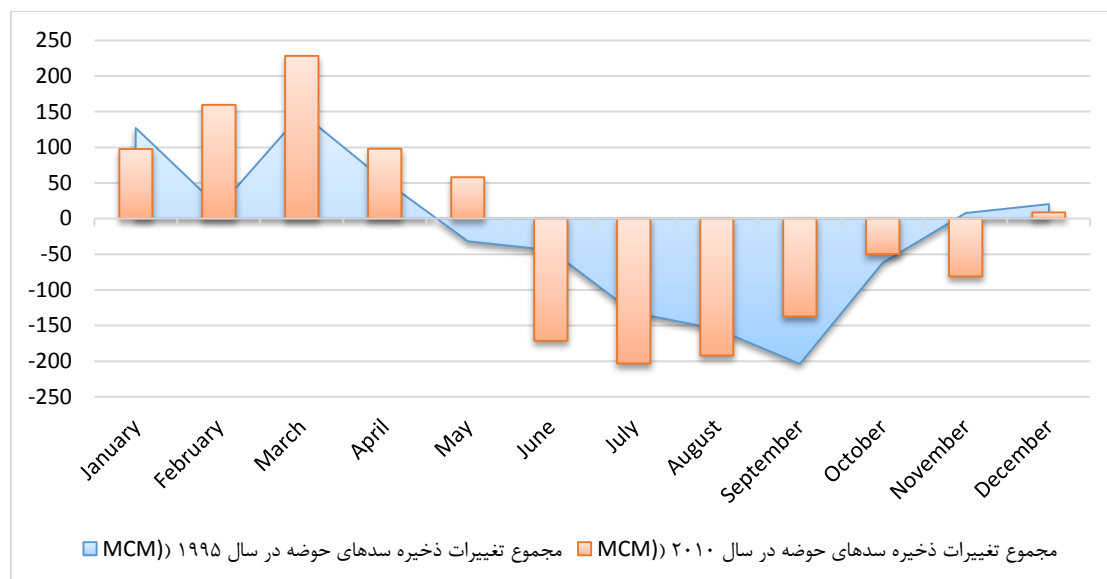
۳-۳-۳- تغییرات ذخیره سدها

تغییرات ذخیره آب مخازن سدهای موجود در حوضه آبریز ارومیه در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی در جدول ۱۴ آمده است. بیشترین افزایش ذخیره آب سدها در دو سال در ماه مارس (اوایل بهار) به ترتیب با مقدار ۱۴۷/۷ و ۲۲۸/۲ میلیون متر مکعب مشاهده می شود. بیشترین مقدار کاهش در ذخیره مخازن سدها نیز در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی به ترتیب در فصل تابستان و ماههای سپتامبر (۲۰۳/۹- میلیون متر مکعب) و جولای (۲۰۳/۴- میلیون متر مکعب) مشاهده می گردد. از دیگر نکات قابل توجه در این آمار کاهش ۳۲ میلیون متر مکعبی ذخایر سدها در ماه می سال ۱۹۹۵ در مقایسه با افزایش ۵۸ میلیون متر مکعبی در ماه مشابه در سال ۲۰۱۰ میلادی می باشد. در ماه نوامبر نیز چنین مساله ای مشاهده می شود. به این ترتیب که در سال ۱۹۹۵ میلادی شاهد افزایش ۷/۸ میلیون متر مکعبی حجم ذخایر سدها هستیم،

در حالیکه در مدت مشابه در سال ۲۰۱۰ حدود ۸۱ میلیون متر مکعب کاهش را مشاهده می کنیم. در نهایت در مقیاس زمانی سالانه، شاهد ۲۵۶ میلیون متر مکعب افزایش در حجم مخازن حوضه هستیم، در حالیکه در سال ۲۰۱۰ میلادی، حدود ۱۸۵ میلیون متر مکعب کاهش مشاهده می شود. همچنین با توجه به آمار بارش در حوضه می توان مشاهده نمود که در چهار ماه اول سال میلادی شاهد افزایش ذخیره حوضه هستیم که این افزایش به دلیل وقوع عمده بارش حوضه در ماههای ژانویه، فوریه، مارس و آوریل می باشد که ماه آوریل در هر دو سال شاهد بیشترین مقدار بارش بوده است. اما این بارش بیشینه سبب ماکسیمم شدن تغییرات ذخیره سدها در این ماه نشده و بیشترین افزایش در ذخیره سدها در ماه مارس اتفاق می افتد. علت این امر را می توان افزایش مصرف کشاورزی در ماه آوریل ذکر کرد چرا که دوره رشد عمده محصولات زراعی و باغی حوضه از ماه آوریل آغاز شده و تا ماه اکتبر ادامه می یابد.

جدول ۱۴- تغییرات ذخیره آب سدها در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی

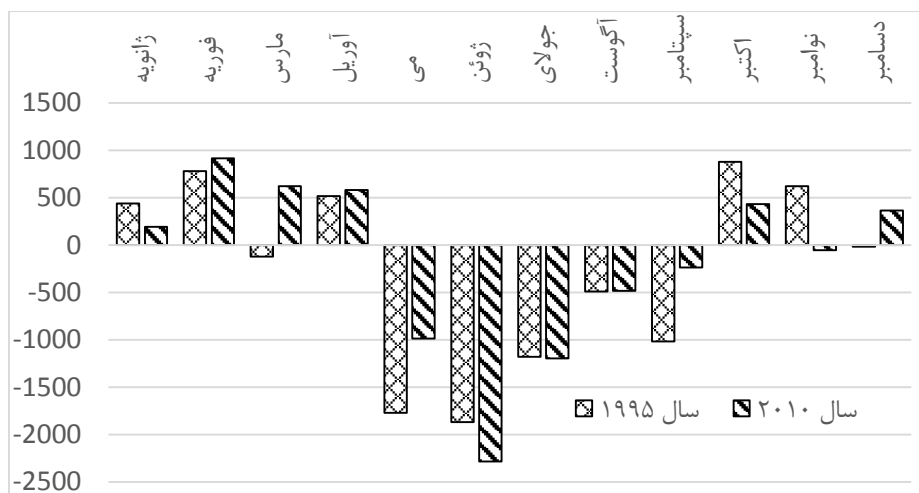
ماه میلادی	مجموع تغییرات ذخیره سدهای حوضه در سال ۱۹۹۵ (MCM)	مجموع تغییرات ذخیره سدهای حوضه در سال ۲۰۱۰ (MCM)
ژانویه	127.24	97.44
فوریه	15.78	159.4
مارس	147.72	228.17
آوریل	53.24	98.05
می	-31.97	58.25
ژوئن	-44.17	-171.42
جولای	-131.85	-203.41
آگوست	-154.89	-192.09
سپتامبر	-203.92	-137.32
اکتبر	-61.88	-49.8
نوامبر	7.82	-80.96
دسامبر	20.37	8.61
سالانه	256.51	-185.08



شکل ۱۷- تغییرات ذخیره آب سدها در ماههای مختلف سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی

۳-۴- تغییرات رطوبت خاک

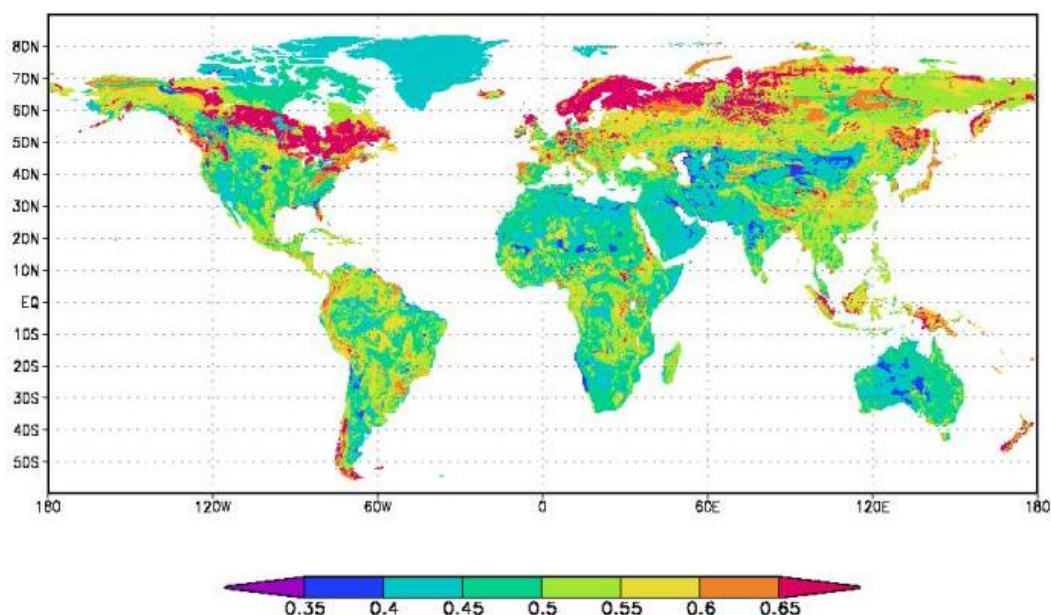
تغییرات رطوبت خاک در سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ با داده های GLDAS در ادامه آورده شده است. همانطور که در بخش روش شناسی عنوان شد داده های رطوبت خاک برای سال ۱۹۹۵ فقط از داده های GLDAS و در سال ۲۰۱۰ از دو منبع GLDAS و داده های سنجنده SMOS گردآوری شده است. اما با توجه به اینکه داده های سنجنده SMOS مربوط به ۵ سانتی متر ابتدایی خاک بوده در حالی که داده های GLDAS تا عمق ۲ متر (ناحیه ریشه) را پوشش می دهند، تفاوت فاحشی بین اعداد گزارش شده از آنها وجود دارد بنابراین برای داشتن رویکردی یکسان در داده های رطوبت خاک در معادلات فاز دوم از داده های رطوبت GLDAS برای هر دو سال استفاده شده است. در ادامه داده های مدل GLDAS برای سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ در شکل ۱۸ آورده می شود.



شکل ۱۸- تغییرات رطوبت خاک در ماههای مختلف دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی (خروجی های مدل **GLDAS**)

با توجه به ارقام نسبتاً بزرگ کاهش رطوبت خاک ناحیه ریشه که از مدل **GLDAS** بدست آمده، در اینجا امکان پذیر بودن این اعداد و ارقام با محاسبات ساده ریاضی و براساس خصوصیات خاک می پردازیم. درصد تخلخل متوسط در خاک های مختلف عموماً بین ۰٫۴ تا ۰٫۵ متغیر می باشد (Rodell et al. 2004) (شکل ۱۹)، اگر فرض کنیم خاکی در ابتدای دوره اشباع و در پایان آن خشک می گردد، با ضرب عمق سنجش رطوبت خاک (۱ متر) در مساحت حوضه بدون دریاچه و مناطق مرتفع کوهستانی (۴۲۳۵۰ کیلومترمربع به طور متوسط در سال ۲۰۱۰) و فرض تخلخل متوسط ۰٫۴۵ مقدار تغییرات رطوبت خاک برابر با ۲۱ میلیارد مترمکعب خواهد شد. بزرگترین تغییر در رطوبت خاک حوضه حدود ۲۲۰۰ میلیون مترمکعب کاهش در ابتدای فصل گرم در ماه جون ۲۰۱۰ بوده که در صورت وقوع یک بارش سنگین در ابتدای ماه و خشک بودن خاک در انتهای ماه کاملاً امکان پذیر می باشد.

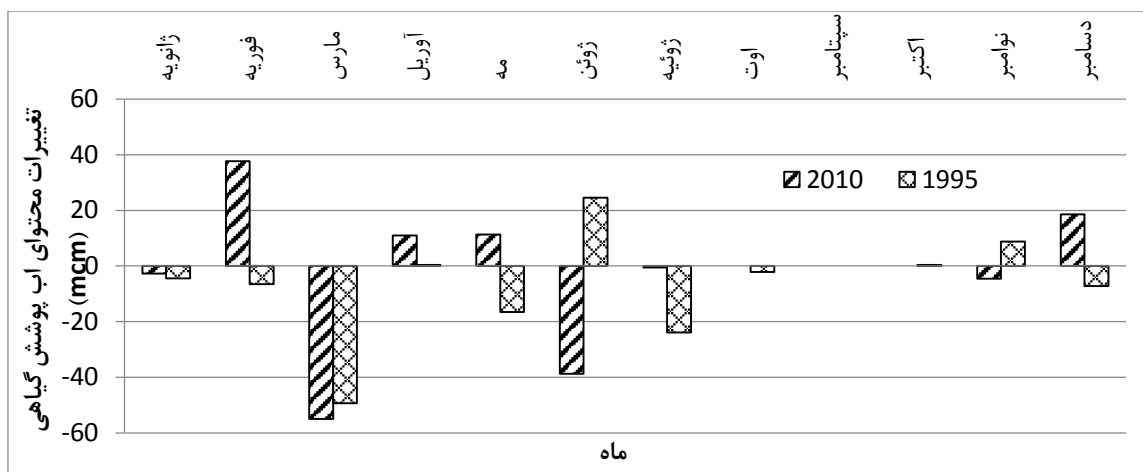
یکی از مشکلاتی که می تواند در محاسبات این ترم ذخیره ایجاد شود، امکان تبادل آب از این منبع با سایر منابع یا مصارف حوضه در مقیاس زمانی کوچکتر از ماه می باشد. به عبارتی تغییرات رطوبت خاک می تواند در تبخیر و تعرق، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و ... در بازه زمانی کمتر از ماه نمود پیدا کرده و دوبار در محاسبات بیلان لحاظ گردد. این نظریه تا حدودی در مورد رطوبت سطحی خاک صادق است. متوسط ماندگاری رطوبت در عمق ۰ تا ۵ سانتی متر اول خاک ۳ روز می باشد، اما پایداری زمانی رطوبت با افزایش عمق، بیشتر و در نواحی ریشه به ماه نزدیک می شود، به این ترتیب فرض عدم تبادل آب بین ذخایر آب حوضه با تقریب خوبی در مورد این ترم صادق می باشد نمودار تغییرات رطوبت خاک در سه عمق ۵، ۱۰ و ۱۰۰ سانتی متری در شکل زیر بر اساس داده های یکی از ایستگاه های شبکه **ISMN** نمایش داده شده است.



شکل ۱۹- تغییرات ضریب تخلخل در مقیاس جهان بر اساس خروجی های مدل جهانی *GLDAS*، در محدوده ایران (واکثر نقاط جهان) مقدار ضریب تخلخل بین ۰,۴ و ۰,۵ متغیر است

۳-۳-۵- تغییرات آب پوشش گیاهی

آب پوشش گیاهی بخشی از آب ذخیره شده در حوضه را تشکیل می دهد اما با توجه به مقیاس زمانی و پتانسیل ذخیره کم آب در گیاهان این عدد در مقایسه با ترمهای دیگر معادله بیلان کوچک و حتی قابل صرف نظر کردن می باشد. در این مطالعه مقدار تغییرات ذخیره آب داخل پوشش گیاهی بر اساس داده های خروجی مدل *GLDAS* در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ استخراج شده که بزرگترین مقدار آن در دو سال برابر ۵۵ میلیون متر مکعب بوده که در ماه مارس و همزمان با آغاز فصل بهار اتفاق افتاده است تغییرات این ترم در فصل پاییز و با توجه به خشک شدن و نبود پوشش گیاهی روی زمین تقریباً برابر با صفر می باشد. تغییرات ذخیره آب پوشش گیاه در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰- تغییرات ذخیره آب پوشش گیاهی در دو سال ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی بر مبنای مدل GLDAS

۳-۳-۶- تغییرات ذخیره آب زیرزمینی

نهایتاً از کنار هم قرار دادن اجزای سازنده جز تغییرات ذخیره آب حوضه و جمع تفریق کردن ترمهای افزایشنده و کاهشنده آن تنها جز مجهول این معادله یعنی ذخایر آب زیرزمینی در مقیاس ماهانه و سالانه بدست می‌آید. این عملیات در جدول ۱۶ و برای هر ماه انجام شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده است تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برای سال ۱۹۹۵ برابر ۲۲۷۹,۹۲- و برای سال ۲۰۱۰ برابر ۵۷۷۲,۷۳- میلیون مترمکعب بدست آمده است. در سال ۱۹۹۵ تغییرات ذخیره رطوبت خاک در ناحیه ریشه سهم بزرگتری در کاهش ذخایر آب حوضه نسبت به تغییرات مخزن آبخوان زیرزمینی دارد اما در سال ۲۰۱۰ سهم عمده در تغییرات ذخیره آب حوضه را تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به عهده دارد. مقادیر سالانه سایر ترمها سازنده ذخیره آب حوضه به جز رطوبت ناحیه ریشه و بعضاً تغییرات حجم مخزن دریاچه، تقریباً در یک محدوده مقداری قرار دارند.

اما بررسی مطالعات گذشته روند و مقادیر کاملاً متفاوتی را ارائه می‌کند. در اکثر مطالعات مقدار تغییرات ذخیره آبخوان زیرزمینی از مرتبه کوچکتر از ۱۰۰ میلیون مترمکعب بوده، که برخی از آنها از نوشتن بیلان آب در سطح حوضه (باقری هارونی، ۱۳۹۰، موسسه راهبرد دانش پویا، ۱۳۹۱، ITC, 2003)، برخی بر اساس داده‌های چاه‌های مشاهداتی و ضرایب ذخیره آبخوان‌ها (دفتر برنامه ریزی آبفا وزارت نیرو، ۱۳۸۹) و یا تجمیع بیلان جامع آب سطحی و زیرزمینی در زیرحوضه‌ها (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۱) بدست آمده است. خلاصه‌ای از نتایج این مطالعات در جدول ۱۵ آورده شده است (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۴ پیوست الف قابل ملاحظه می‌باشد). نتایج یکی از جدیدترین مطالعات که توسط توریان و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس بیلان حجمی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجنده GRACE انجام گرفته، نشان می‌دهد از سال ۲۰۰۹ سرعت کاهش ذخایر آب در کل حوضه (حوضه+دریاچه) از سرعت کاهش حجم آب دریاچه کمتر بوده که نشان دهنده افزایش سطح آب زیرزمینی در حوضه می‌باشد.

باشد. افزایش تراز آب در ۱۹ ایستگاه پیزومتریک در حوضه نیز بر وجود این روند مثبت صحنه گذاشته است (Tourian et al., 2015). با این فرض به نظر می آید خطای تجمعی در سایر ترمهای معادله بیلان، علی الخصوص دو ترم اصلی ورودی و خروجی یعنی بارش و تبخیر و تعرق می تواند در ترم تغییرات ذخیره آب زیرزمینی جمع شده و منجر به برآورد دست بالا از کاهش ذخایر آب زیرزمینی حوضه شده باشد. همانطور که در جمع بندی فاز اول عنوان شد، به نظر می رسد برآورد انجام شده با روش بیلان انرژی از مقدار تبخیر و تعرق در سال ۲۰۱۰ دست بالا بوده ولی به دلیل نبود مرجع زمینی مقدار آن قابل کمی سازی دقیق نیست، از طرف دیگر برآورد از بارش دقیقتر بوده ولی به دلایلی چون نبود ایستگاه در ارتفاعات و عدم محاسبه نزولات برفی در آمار ایستگاه ها مقداری دست پایین می باشد. لذا در صورت وجود ۳۰-۲۰ درصد خطا در محاسبات ترمهای فوق الذکر و در جهت های ذکر شده، این تخمین از کاهش ذخایر آب زیرزمینی محتمل می باشد. از طرف دیگر وجود حتی ۱ درصد خطا در ترمهای ورودی و خروجی اصلی معادله بیلان رقمی بزرگتر از ۱۰۰ میلیون مترمکعب خواهد بود که بیشتر از مقدار برآورد شده برای تغییرات آب زیرزمینی در اکثر مطالعات می باشد، این در حالیست که به طور قطع میزان خطا در محاسبه این ترمها بیشتر از مقدار ذکر شده بوده، لذا به نظر می رسد با این تعداد ترم ورودی و عدم قطعیت موجود در محاسبه هر یک از آنها (که بعضا قابل ارزیابی در مقیاس حوضه نیست) نمی توان تخمین دقیقی از تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به عنوان ترم مجهول بدست آورد. بنابراین استفاده از روشهای دیگر با امکان کمی سازی دقیقتر خطا (مانند مدل سازی عددی به همراه صحت سنجی با داده های زمینی) یا نوشتن معادله بیلان در مقیاس کوچکتر (زیرحوضه) برای محاسبه این ترم پیشنهاد می گردد.

جدول ۱۵- مقادیر تغییرات ذخیره مخزن آبخوان زیرزمینی در سایر مطالعات حوضه ابریز ارومیه (اطلاعات تکمیلی در خصوص این مطالعات در جدول ۴ پیوست الف آورده شده است)

مطالعه	سال مطالعه	مقدار تغییرات ذخیره آبخوان (MCM)	توضیحات
راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)	۱۳۷۳	-۵۴/۱	تجمعی سالانه
	۱۳۸۸-۱۳۸۷	-۴۱/۴۵	تجمعی سالانه
ITC (2003)	۱۹۶۷-۲۰۰۲	+۴۲	میانگین بلند مدت
باقری هارونی ۱۳۹۰	۲۰۰۲-۲۰۰۶	-۴/۸	میانگین ۵ ساله
Tourian et al., 2015	۲۰۰۹-۲۰۱۴	+۲۲۰	متوسط ۶ ساله
دفتر برنامه ریزی آبفا وزارت نیرو (۱۳۸۹)	۱۳۸۴-۱۳۸۵	-۲۵	تجمعی سالانه
	۱۳۷۴-۱۳۸۵	-۲۵/۳۷	میانگین ۱۰ ساله
شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس (۱۳۹۱)	۱۳۷۶-۱۳۸۶	-۳۱/۸	میانگین ۱۰ ساله

جدول ۱۶- سهم هر جز تغییرات ذخیره آب حوضه در مقدار کل تغییرات ذخیره آب حوضه در سال ۱۹۹۵

تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حوضه در سال ۱۹۹۵ بر حسب میلیونمتر مکعب (MCM)							
ماه	تغییرات ذخیره آب حوضه ΔS	تغییرات برف	تغییرات ذخیره آب سدها	تغییرات حجم دریاچه	تغییرات رطوبت خاک	تغییرات ذخیره آب پوشش گیاهی	تغییرات ذخیره آب زیرزمینی
ژانویه	1038.88	-131.05	127.24	680.76	441.43	-4.42	-75.08
فوریه	1248.72	-59.09	15.78	680.76	781.90	-6.51	-164.11
مارس	411.24	-47.42	147.72	680.76	-121.71	-49.26	-198.85
آوریل	2974.03	-3.39	53.24	1418.25	517.81	0.37	987.75
می	-514.87	0.00	-31.97	1248.06	-1769.02	-16.53	54.59
ژوئن	-1337.59	0.00	-44.17	-340.38	-1867.39	24.61	889.74
جولای	-3509.71	0.00	-131.85	-907.68	-1179.42	-23.86	-1266.90
آگوست	-2973.88	0.00	-154.89	-1077.87	-489.96	-2.14	-1249.02
سپتامبر	-1986.95	0.00	-203.92	-1021.14	-1015.22	0.00	253.33
اکتبر	-1125.23	0.00	-61.88	-283.65	880.43	0.35	-1660.48
نوامبر	655.39	16.35	7.82	-340.38	622.43	8.81	340.36
دسامبر	-100.05	36.40	20.37	56.73	-15.12	-7.18	-191.25
سالانه	-5220.03	-188.20	-256.51	794.22	-3213.85	-75.76	-2279.92

جدول ۱۷- سهم هر جز تغییرات ذخیره آب حوضه در مقدار کل تغییرات ذخیره آب حوضه در سال ۲۰۱۰

تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حوضه در سال ۲۰۱۰							
ماه	تغییرات ذخیره آب حوضه ΔS -	تغییرات ذخیره آب معادل برف	تغییرات ذخیره آب سدها	تغییرات حجم دریاچه	تغییرات رطوبت خاک	تغییرات ذخیره آب پوشش گیاهی	تغییرات ذخیره آب زیرزمینی
ژانویه	628.84	454.17	97.44	242.90	194.73	-2.69	-357.72
فوریه	897.63	-246.84	159.4	122.99	915.45	37.67	-91.04
مارس	699.20	-212.07	228.17	280.44	621.69	-54.92	-164.10
آوریل	2051.71	-16.16	98.05	446.70	581.46	10.96	930.70
می	623.93	0.00	58.25	261.83	-986.52	11.34	1279.03
ژوئن	-2899.28	0.00	-171.42	-486.83	-2284.70	-38.73	82.40
جولای	-3664.60	0.00	-203.41	-747.09	-1193.49	-0.50	-1520.10
آگوست	-2762.81	0.00	-192.09	-418.73	-480.86	0.00	-1671.13
سپتامبر	-2211.12	0.00	-137.32	-377.23	-236.89	0.00	-1459.67
اکتبر	-1309.26	4.45	-49.8	-198.29	433.70	0.00	-1499.32
نوامبر	-1120.63	-0.20	-80.96	-28.04	-54.42	-4.51	-952.50
دسامبر	180.58	163.27	8.61	-27.97	367.39	18.57	-349.29
سالانه	-8885.82	146.63	-185.08	-929.33	-2122.48	-22.82	-5772.73

۴- نتیجه گیری

در حوضه های آبریز که مقدار آب در دسترس اندک می باشد مدیریت میزان آب موجود جهت استفاده در مصارف مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً اطلاعات میدانی دقیقی از میزان منابع و مصارف حوضه در دسترس نبوده و پایش همزمان منابع و مصارف و بررسی اندرکنش بین آنها می تواند گره گشای مسائل موجود در مدیریت حوضه باشد. در این مطالعه بر همین مبنا اجزای بیلان آب با استفاده از روشهای مبتنی بر تصاویر ماهواره ای و اطلاعات زمینی برای حوضه آبریز ارومیه محاسبه شده اند. همچنین جهت مشخص شدن تغییراتی که در طول چندین سال گذشته بحران دریاچه ارومیه را رقم زدند، بیلان دریاچه در دو وضعیت خوب (سال پرآبی ۱۹۹۵ میلادی) و بد (در آستانه خشک شدن و کم آبی، سال ۲۰۱۰ میلادی) نوشته شده است.

اختلاف ترم های ورودی (بارش) و خروجی (تبخیر و تعرق و تبخیر از دریاچه) در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ حاکی از کاهش حدود ۵ و ۹ میلیارد متر مکعب آب از ذخایر آب حوضه که به نظر می رسد در درجه اول از برآورد دست بالای تبخیر و تعرق و سپس برآورد دست پایین بارش نشأت گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می دهد افزایش تبخیر و تعرق حوضه در سال ۲۰۱۰ حدود ۶۰ درصد افزایش در مقایسه با سال ۱۹۹۵ میلادی داشته که می تواند نشانه ای از گسترش کشاورزی و یا تغییر الگوی کشت در منطقه باشد. اگرچه استفاده از الگوریتم SEBAL - که مخصوص برآورد تبخیر و تعرق در اراضی کشاورزی می باشد - در برآورد تبخیر و تعرق از زمینهای بایر و مراتع حوضه که سطح زیادی را در بر گرفته اند نیز می تواند موجب برآورد دست بالای تبخیر و تعرق و به دنبال آن تخمین بالای کاهش ذخایر آبی حوضه شده باشد. از طرف دیگر برآورد بدست آمده از ترم تبخیر و تعرق در این مطالعه از تمامی مطالعات و محصولات جهانی و ماهواره ای موجود در زمان مشابه بیشتر بوده (به عنوان مثال ۵۰ درصد بیشتر از محصول سالانه تبخیر و تعرق سنجنده MODIS، Mod16A3)، که می تواند نشانه ای دیگر از برآورد دست بالای آن باشد ولی به دلیل نبود داده مرجع میزان خطای آن قابل کمی سازی نیست.

در مقابل مقدار بدست آمده برای حجم بارش حوضه کمتر از برآوردهای سایر مطالعات بوده، اما استفاده از حداکثر تعداد ایستگاه بارانسنجی (وزارت نیرو و هواشناسی)، حذف ایستگاههای مشکوک و دو روش درونیابی مختلف که منجر به نتیجه نزدیک به یکدیگر گردید، می بایست مقادیر بدست آمده در این مطالعه به واقعیت نزدیکتر باشد. البته توجه به این نکته ضروریست که نبود ایستگاه در ارتفاعات با حجم بارش زیاد نیز باعث می شود تا دقیقترین برآورد بر اساس داده های ایستگاههای زمینی نیز مقداری دست پایین باشد.

مقایسه تغییرات زمانی P-ET با داده های تغییرات ذخیره آب حوضه GRACE و مدل WGHM با وجود رفتار یکسان مقادیر متفاوتی را نشان می دهد. محدوده پایش بزرگتر ماهواره GRACE که تغییرات ذخیره

آب حوضه های مجاور را نیز در نظر می گیرد و عملکرد ضعیفتر مدل WGHM در حوضه های توسعه یافته به دلیل نیاز به داده های مخازن و سدها نیز دقت تخمین های این مدل از تغییرات ذخیره آب حوضه را کاهش داده است.

توسعه معادله بیلان در فاز دوم و شکستن ترم تغییرات ذخیره آب حوضه به اجزای سازنده آن برای محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی نشان می دهد، دو جز تغییرات ذخیره مخزن دریاچه و ذخیره رطوبت خاک ناحیه ریشه نقش برجسته تری در تغییرات ذخیره آب حوضه دارند. استفاده از تصاویر ماهواره ای برای تخمین تغییرات سطح دریاچه در کنار نقشه بسیمتری و داده های تراز آب ایستگاهی برآورد دقیقتری را در مقایسه با روش های مبتنی بر بیلان آب دریاچه از تغییرات حجم آن بدست داده که نزدیک به نتایج مطالعات مشابه (Tourian et al., 2015) می باشد. برای محاسبه تغییرات ذخیره رطوبت خاک از مدل GLDAS استفاده شده که مقادیر آن در عین بزرگ بودن با توجه به میانگین ضریب تخلخل خاک منطقه (حدود ۰,۴۵) و ماندگاری رطوبت در ناحیه ریشه امکان پذیر می باشد.

با این وجود بازهم بخش اعظم تغییرات ذخیره آب حوضه برای ترم مجهول معادله (تغییرات ذخیره آب زیرزمینی) باقی مانده (۲۲۸۰- میلیون متر مکعب در سال ۱۹۹۵ و ۵۷۷۲- میلیون متر مکعب در سال ۲۰۱۰) که مقادیر آن هم از نظر مقدار و هم از نظر جهت تغییرات، اختلاف زیادی (دو مرتبه بزرگی) با نتایج مطالعات گذشته دارد.

آنالیز حساسیت روی اجزای معادله بیلان نشان می دهد وجود حتی یک درصد خطا در برآورد اجزای اصلی (تبخیر و تعرق و بارش) رقمی بزرگتر از ۱۰۰ میلیون متر مکعب بوده که از مقدار بدست آمده برای تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حوضه در اکثر مطالعات گذشته بیشتر می باشد. که این اعتماد پذیری به نتایج مطالعاتی که از روش بیلان استفاده نموده اند را کاهش می دهد. گذشته از این، مسلماً خطا در برآورد منابع و مصارف در مقیاس حوضه بزرگتر از این مقدار بوده که عدم قطعیت بیشتری در جواب نهایی را به همراه خواهد شد. لذا به نظر می رسد استفاده از روش بیلان حجمی برای تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی تنها زمانی قابل قبول است که امکان آنالیز دقیق خطا برای ترمهای مختلف وجود داشته باشد که این خود نیازمند داشتن مرجع اطلاعاتی معتبر برای اجزای مختلف معادله بوده که در مطالعه حاضر برای برخی از اجزای اصلی و تاثیرگذار محقق نشد. بنابراین استفاده از روشهای دیگر با امکان کمی سازی دقیقتر خطا (مانند مدل سازی عددی به همراه صحت سنجی با داده های زمینی) یا نوشتن معادله بیلان در مقیاس کوچکتر (زیرحوضه) برای محاسبه این تغییرات ذخیره آب زیرزمینی پیشنهاد می گردد.

۵- مراجع

باقری هارونی، م.ج.، (۱۳۹۰)، ارزیابی فناوری سنجش از دور در برآورد مولفه های بیلان آب در مقیاس حوضه‌ای، با تاکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی، مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی منابع آب.

حسین پور، ا.، (۱۳۹۱). "شیمی فیزیک دریاچه ارومیه محاسیه پارامترهای شیمی فیزیکی از شورابه ی دریاچه ارومیه". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، دانشکده شیمی.

سیما، س.، (۱۳۹۲). "تحلیل دینامیکی/ مکانی تغییرات تبخیر و نمک در دریاچه های شور/ مطالعه موردی دریاچه ارومیه". پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۹۰)، گزارش لیمنولوژی و پالئو لیمنولوژی دریاچه ارومیه - فاز بررسی نوسانات سطح تراز از سال ۱۳۵۵ - ۱۳۹۰، تارنمای داده های علوم زمین دریاچه ارومیه، برگرفته از تارنمای <http://geourmialake.com/Article.aspx?CId=2&Txt=3>

شرکت مهندسين مشاور جاماب (۱۳۸۴)، وضعیت موجود و آینده منابع آب حوزه آبریز ارومیه (جلد ۱ و ۲) شرکت مهندسين مشاور طرح نو اندیشان (۱۳۸۳)، مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه طرح آزاد راه شهید کلانتری

شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس، دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا (۱۳۹۱)، گزارش روند نمای بیلان محدوده‌ی مطالعات ارومیه. بهنگام سازی طرح جامع آب کشور.

شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس (۱۳۹۱)، دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا گزارش منابع آب سطحی (کمی و کیفی)، بهنگام سازی طرح جامع آب کشور.

شرکت مهندسين مشاور مهتاب قدس، دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا (۱۳۹۱)، مطالعات آب زیرزمینی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. بهنگام سازی طرح جامع آب کشور.

شرکت مهندسين مشاور یکم، کارفرما شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی (۱۳۸۳)، مطالعات پیامدهای زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرح‌های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه.

فاضل مجتهدی، سیدفرید؛ سروش سراوانی؛ احسان جلیلوند و سمیه سیما، ۱۳۹۴، برآورد نرخ تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در زمان حداکثر تراز آب، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه

تبریز دانشکده مهندسی عمران، https://www.civilica.com/Paper-ICCE10-ICCE10_0325.html

مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۳)، تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه در سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی، کد سند: F-01TR-08/1393

مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۴)، بررسی تغییرات تبخیر و تعرق، مصارف و بیلان آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین سالهای ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ میلادی، کد سند: F-01TR-10/1393

موسسه راهبرد دانش پویا (۱۳۹۱)، بررسی مسائل، چالش ها و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه
موسسه تحقیقات آب، شرکت DLG هلند، شرکت مهندسی مشاور یکم، شرکت مهندسی مشاور پندام
(۱۳۸۵)، مدیریت جامع منابع آب حوضه دریاچه ارومیه.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Adv. Train. Users Manual–Idaho Implementation, version 1, 97.

Assefa M. Melesse, Vijay Nangia, Xixi Wang. (2006). Spatial Surface Water Balance Modeling, *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.6, No.1.

Assouline, S., 1993. Estimation of lake hydrologic budget terms using the simultaneous solution of water, heat, and salt balances and a Kalman filtering approach: application to Lake Kinneret. *Water Resources Research*, 29(9), pp.3041–3048.

Döll, P., Kaspar, F. & Lehner, B., 2003. A global hydrological model for deriving water availability indicators: Model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270(1-2), pp.105–134.

Famiglietti, J.S. et al., 2011. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38(3).

Forootan, E., Rietbroek, R., Kusche, J., Sharifi, M.A., Awange, J.L., Schmidt, M., Omondi, P., Famiglietti, J., 2014. Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data. *Remote Sens. Environ.* 140, 580–595.

International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC, WaterWatch), 2003. Integrated water resource management for Lake Urumieh basin.

Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D.,

2004. The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 85, 381–394. doi:10.1175/BAMS-85-3-381

Water Resources Dept., Water Research Institute (WRI, Iran); International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC, WaterWatch), 2005. Integrated water resource management for Lake Urumieh basin.

Jin, S. G., Hassan, A. A., & Feng, G. P. (2012). Assessment of terrestrial water contributions to polar motion from GRACE and hydrological models. *Journal of Geodynamics*, 62, 40-48.

Joodaki, G., Wahr, J., & Swenson, S. (2014). Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. *Water Resources Research*, 50(3), 2679-2692.

Moiwo, J. P., Lu, W., & Tao, F. (2012). GRACE, GLDAS and measured groundwater data products show water storage loss in Western Jilin, China. *Water Science & Technology*, 65(9), 1606-1614.

Jin, S., & Feng, G. (2013). Large-scale variations of global groundwater from satellite gravimetry and hydrological models, 2002–2012. *Global and Planetary Change*, 106, 20-30.

Lenk, O. (2013). Satellite based estimates of terrestrial water storage variations in Turkey. *Journal of Geodynamics*, 67, 106-110.

Lorenz, C., & Kunstmann, H. (2012). The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalysis: intercomparison and performance analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 13(5), 1397-1420.

Melesse, A.M., Nangia, V. & Wang, X., 2006. Hydrology and Water Balance of Devils Lake Basin: Part 1-Hydrometeorological Analysis and Lake Surface Area Mapping. *Journal of spatial hydrology*, 6(1).

Moore, S. & Fisher, J.B., 2012. Challenges and opportunities in grace-based groundwater storage assessment and management: an example from Yemen. *Water resources management*, 26(6), pp.1425–1453.

Muthuwatta, Lal P., M. G. Bos, and T. H. M. Rientjes. "Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River Basin, Iran—using remote sensing and geo-statistics." *Water Resources Management* 24.3 (2010): 459-484.

McCabe, G.J., and Markstrom, S.L., 2007, a monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p.

Moore, S. & Fisher, J.B., 2012. Challenges and opportunities in grace-based groundwater storage assessment and management: an example from Yemen. *Water resources management*, 26(6), pp.1425–1453.

Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, 156, 349-360.

Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., Linage, C., Rodell, M., & Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research*, 49(2), 904-914.

Water research institute & International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2005. *Integrated water resource management for lake Urmia basin*

پیوست الف: مقادیر بدست آمده برای اجزای معادله بیلان در مطالعات گذشته

مقادیر بدست آمده برای اجزای مختلف معادله بیلان در جداول ۱-۵ آورده شده است:

پیوست الف. جدول ۱- مقادیر بارش در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار بارش		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
۴۰۴	۲۰۹۶۸	با استفاده از آمار ۶۲ ایستگاه شاخص باران سنجی با ضرایب تعدیل (به ترتیب ۰,۹۲ تا ۱,۰۰)	۱۳۴۲-۱۳۸۰	حوضه آبریز	مطالعه برنامه جامع سازگاری با اقلیم و تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه های آبریز (جاماب، مهر ۱۳۸۴)
ارتفاعات: ۳۷۵ دشت: ۳۳۸	۱۷۲۰۳	ضرب مساحت ارتفاعات و دشت ها در مقدار بارندگی مربوطه.	۱۳۷۶-۱۳۸۶	حوضه آبریز	بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (گزارش روند نمای بیلان محدوده مطالعاتی ارومیه) سال افق ۱۴۲۰ (مهاب، شهریور ۱۳۹۱)
۲۶۴	۱۷۵۵/۶	$P = 0.264 * 6650 * 100000$	۱۹۵۵-۱۹۸۵	دریاچه	Hydrodynamic & Hydraulic And Environmental (sediment & Salinity Investigation report (صدرا ۲۰۰۵)
۲۰۰-۶۷۰	۲۱۱۰۰	—		حوضه آبریز	

پیوست الف. جدول ۱ (ادامه)- مقادیر بارش در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار بارش		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
—	۲۹۶/۹	با استفاده از داده های ایستگاههای مجاور دریاچه و روش زمین آمار کریجینگ	۱۳۴۴-۱۳۸۰	دریاچه	"مطالعه پیامد های زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرح های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه (بیان آبی دریاچه جلد دوم) (مهندسین مشاور یکم، دی ماه ۱۳۸۳)
	۳۶۹/۳		۱۳۷۳		
	۲۶۹/۷		۱۳۷۴		
—	۲۵۷	آمار دو ایستگاه شرفخانه و آباجلو سفلی	۱۳۴۵-۱۳۷۹	دریاچه	مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه جلد دوم: اطلاعات پایه (مهندسین مشاور طرح نو اندیشان ، ۱۳۸۳)
۱۱۴۵/۱۲	۳۸۴	پارامتر بارش در این مطالعه با استفاده از درون یابی میان داده های ۲۲۴ ایستگاه وزارت نیرو و سازمان هواشناسی ایستگاه های باران سنجی برآورد شده است.	۱۹۶۷-۲۰۰۲	دریاچه	Integrated Water Resources Management for Lake Uromiyeh Basin (ITC, JUNE 2005)

پیوست الف. جدول ۱ (ادامه) - مقادیر بارش در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار بارش		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
—	۱۱۴/۳	متوسط حجم بارش سال آبی بیلان در سطح آبخوان محاسبه گردیده.	۱۳۷۴-۱۳۸۵	حوضه آبریز (در سطح آبخوان ها)	مطالعه آب زیر زمینی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (جلد هشتم) بهنگام سازی طرح جامع آب کشور در حوضه آبریز ارس، (تالش-تالاب انزلی)، سفید رود بزرگ، سفیدرود و هراز، (هراز قره سو)، گرگانرود - قره سو، اترک، ارومیه (وزارت نیرو دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا، آذر ۱۳۸۹)
	۱۱۲		۱۳۸۴-۱۳۸۵		
—	۳۱۰	ترم بارش از طریق درون یابی به روش کریجینگ و ۷۴ ایستگاه باران سنجی وزارت نیرو محاسبه و مقدار میانگین آن در دوره مطالعاتی برآورد گردید.	۲۰۰۲-۲۰۰۶	دریاچه	ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مولفه های بیلان در مقیاس حوضه ای ، با تاکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی مطالعه موردی : حوضه آبریز دریاچه ارومیه (باقری هارونی، بهمن ۱۳۹۰)
—	۳۶۹			حوضه آبریز	

پیوست الف. جدول ۱ (ادامه) - مقادیر بارش در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار بارش		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
۲۰۱۲۱/۲	—	با استفاده از آمار مدیریت شرکت منابع آب	۱۳۷۳	حوضه آبریز	بررسی مسائل ، چالش ها ، و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش نهایی)
—	۳۳۶		۱۳۸۳-۱۳۸۸		
۹۹۸	۱۶۹/۵	--	۱۳۷۶-۱۳۷۷	دریاچه	(موسسه راهبرد دانش پویا، مرداد ۱۳۹۱)
۷۸۶	۱۹۸/۲		۱۳۸۷-۱۳۸۸		
۱۰۶۱۰	۲۳۰۷/۵		۱۳۷۶-۱۳۸۸		
—	۵۰۱	با استفاده از آمار ۶ ایستگاه هواشناسی و تصاویر ماهواره ای NOAA- AVHRR	۱۹۹۳-۱۹۹۴	حوضه آبریز	Integrated water resources management for the Uromiyeh basin – Iran (ITC , 2003)
—	۲۵۹		۱۹۹۹-۲۰۰۰		

پیوست الف. جدول ۲- مقادیر تغییرات ذخیره آب در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	مقدار تغییرات ذخیره آب (mcm)
مطالعه برنامه جامع سازگاری با اقلیم و تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه های آبریز (جاماب، مهر ۱۳۸۴)	حوضه آبریز	۱۳۴۲-۱۳۸۰	جهت برآورد کاهش ذخیره آبخوان از آبنمود تغییرات سطح آب زیر زمینی طولانی مدت استفاده شد.	جریان های ورودی: ۲۱۲۶۸ جریان های خروجی: ۲۱۲۹۱ ΔS یا تغییرات ذخیره آب حوضه: ۲۳- ΔS یا تغییرات ذخیره آب دریاچه و سد: ۰
		۱۳۸۰-۱۳۷۹		جریان های ورودی: ۱۴۷۸۴ جریان های خروجی: ۱۵۸۲۶ ΔS یا تغییرات ذخیره آب حوضه: ۸۸- ΔS یا تغییرات ذخیره آب دریاچه و سد: ۹۵۴-
A Spaceborne multisensor aproach to monitor the desiccation of lake urmia in iran (توریان ، ۲۰۱۵)	حوضه آبریز	۲۰۰۲-۲۰۱۴	این مقدار برابر با میزان آب از دست رفته به صورت سالانه در کل حوضه به علاوه دریاچه است.	تغییرات ذخیره آب در حوضه: ۱۴۰۰-

پیوست الف. جدول ۲(ادامه)- مقادیر تغییرات ذخیره آب در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	مقدار تغییرات ذخیره آب در حوضه (mcm)
بررسی مسائل ، چالش ها ، و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش نهایی) (موسسه راهبرد دانش پویا، مرداد ۱۳۹۱)	حوضه آبریز	۱۳۷۳	شامل مجموع آمار بدست آمده از مقادیر مصارف، جریان ها، و مقادیر مازاد می باشد.	تغییرات ذخیره آب در حوضه: ۵۴/۱-
مطالعات چگونگی کاهش شوری دریاچه محمد کارآموز و عباسقلی جهان، وزارت نیرو، مرکز تحقیقات آب (بهمن، ۱۳۷۵)	دریاچه	۱۳۷۲-۱۳۴۴	—	جریان های ورودی : ۵۴۴۸
تلفیق مطالعات منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه، سازمان مدیریت منابع آب ایران ، مرکز تحقیقات منابع آب (تماب) (معاونت تافیق مطالعات، بهار ۱۳۷۷)	دریاچه	۱۳۷۳-۱۳۴۳	—	جریان های ورودی : ۵۰۴۲/۸۷

پیوست الف. جدول ۳- مقادیر تغییرات ذخیره مخزن در دریاچه ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	مقدار تغییرات ذخیره مخزن (mcm)
مطالعه پیامد های زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرح های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه (بیان آبی دریاچه جلد دوم) (مهندسین مشاور یکم، دی ماه ۱۳۸۳)	دریاچه	۱۳۴۴-۱۳۸۰	$V2=V1+R+Q-E$ $V2$ = حجم دریاچه در پایان دوره هیدرولوژیک $V1$ = حجم دریاچه در شروع دوره هیدرولوژیک R = بارش بر روی دریاچه در یک دوره Q = مجموع حجم جریان های ورودی سطحی و زیر زمینی به دریاچه E = تبخیر از سطح دریاچه در یک دوره که با نوشتن بیان آب دریاچه محاسبه شده است.	جریان های ورودی: ۴۸۵۴/۵۳
		۱۳۷۴-۱۳۷۳		جریان های ورودی: ۶۴۶۴/۸۵
بررسی مسائل ، چالش ها ، و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش نهایی) (موسسه راهبرد دانش پویا، مرداد ۱۳۹۱)	دریاچه	۱۳۷۶-۱۳۸۸	معادله بیان $\Delta S = I - O$ I = مجموع پارامترهای ورودی O = مجموع پارامترهای خروجی	مجموع تغییرات ذخیره مخزن طی ۱۲ سال: -۲۳۴۲۹
		۱۳۸۷-۱۳۸۸	ΔS = میزان تغییر ذخیره آب	تغییرات ذخیره مخزن: -۳۲۷۱

پیوست الف. جدول ۳ (ادامه) - مقادیر تغییرات ذخیره مخزن در دریاچه ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	مقدار تغییرات ذخیره مخزن (mcm)
Integrated water resources management for the Uromiyeh basin – Iran (ITC , 2003, 2005)	دریاچه	۱۹۶۷-۲۰۰۲	معادله بیلان $\Delta S = I - O$ I = مجموع پارامترهای ورودی O = مجموع پارامترهای خروجی ΔS = میزان تغییر ذخیره آب	ورودی: ۵۸۲۲/۶۷ خروجی: ۵۸۷۳/۲۰ تغییرات آب مخزن دریاچه: ۵۰/۵۳-
		۱۹۹۳-۱۹۹۴		ورودی: ۱۰/۲ خروجی: ۴/۹ تغییرات آب مخزن دریاچه: ۵/۳
		۱۹۹۹-۲۰۰۰		ورودی: ۱/۱- خروجی: ۵/۵ تغییرات آب مخزن دریاچه: ۶/۷-
A Spaceborne multisensor aproach to monitor the desiccation of lake urmia in iran (توریان ، ۲۰۱۵)	حوضه آبریز	۲۰۰۹-۲۰۱۴	بیلان حجمی با استفاده از تصاویر ماهواره ای	1003 ± 20 - میلیون متر مکعب

پیوست الف. جدول ۴ - مقادیر تغییرات در مخزن آبخوان در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	مقدار تغییرات در مخزن آبخوان (mcm)
بررسی مسائل، چالش ها، و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش نهایی) (موسسه راهبرد دانش پویا، مرداد ۱۳۹۱)	حوضه آبریز	۱۳۷۳	تغذیه شامل مجموع پارامتر های بارندگی ارتفاعات و دشت ها، جریان زیرزمینی ورودی، جریان های سطحی، تغذیه آبخوان و از مصارف و تخلیه شامل مجموع پارامتر های تبخیر از آب زیرزمینی، جریان زیرزمینی خروجی، زهکشی از آب زیرزمینی، تبخیر دریاچه ها و کفه ها، چاه و قنات و چشمه آبرفتی است.	تغذیه: ۲۸۴۶/۹ تخلیه: ۲۹۰۱
		۱۳۸۸-۱۳۸۷		تغییرات حجم آب مخزن: ۴۱/۴۵-
بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (گزارش روند نمای بیلان محدوده مطالعاتی ارومیه) سال افق ۱۴۲۰ (مهاب، شهریور ۱۳۹۱)	حوضه آبریز	۱۳۸۶-۱۳۷۶	مدل بیلان جامع منابع آب سطحی و زیرزمینی برای هر یک از زیرحوضه های این حوضه آبریز در نرم افزار Vensim کد نویسی و شبیه سازی شده است.	تغذیه: ۱۹۹۱/۹ تخلیه: ۲۰۲۳/۷ تغییرات حجم آب مخزن: ۳۱/۸-
مطالعه آب زیر زمینی حوضه آبریز دریاچه ارومیه (جلد هشتم) بهنگام سازی طرح جامع آب کشور در حوضه آبریز ارس، (تالش-تالاب انزلی)، سفید رود بزرگ، سفیدرود و هراز، (هراز قره سو)، گرگانرود - قره سو، اترک، ارومیه (وزارت نیرو دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا، آذر ۱۳۸۹)	حوضه آبریز	۱۳۸۵-۱۳۸۴	با استفاده از معادله $V = AS (\pm \Delta h)$ $A =$ مساحت محدوده بیلان $S =$ ضریب ذخیره (آبدهی ویژه) $\Delta h =$ تغییرات تراز مخزن	تغذیه: ۲۰۳۱/۱ تخلیه: ۲۰۵۶/۱ تغییرات حجم آب مخزن: ۲۵-
		۱۳۸۵-۱۳۷۴		تغذیه: ۱۸۳۱/۶ تخلیه: ۱۸۵۶/۳ تغییرات حجم آب مخزن: ۲۵/۳۷-

پیوست الف. جدول ۴ (ادامه)- مقادیر تغییرات آب زیرزمینی در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

نام مطالعه	نوع مطالعه	سال محاسبه	روش برآورد	تغییرات آب زیرزمینی (mcm)
A Spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of lake urmia in iran (توریان ، ۲۰۱۵)	حوضه آبریز	۲۰۰۹-۲۰۱۴	بیان حجمی با استفاده از تصاویر ماهواره ای	۲۲۰+ میلیون متر مکعب
ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مولفه های بیان در مقیاس حوضه ای ، با تاکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی مطالعه موردی : حوضه آبریز دریاچه ارومیه(باقری هارونی، بهمن ۱۳۹۰)	حوضه آبریز	۲۰۰۲-۲۰۰۶	میزان برداشت خالص آب زیرزمینی که از حل معادله بیان حوضه آبریز تخمین زده شده است.	تغییرات: ۴/۸- (MCM) یا ۲۳۰ (mm)
Integrated Water Resources Management for Lake Uromiyeh Basin (ITC, JUNE 2005)	دریاچه	۱۹۶۷-۲۰۰۲	مولفه های بیان آب زیرزمینی نیز با استفاده از اطلاعات چاه-های مشاهداتی موجود بررسی شده است.	تغییرات: ۴۲
مطالعه پیامد های زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرح های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه (بیان آبی دریاچه جلد دوم) (مهندسین مشاور یکم، دی ماه ۱۳۸۳)	دریاچه	۱۳۸۰-۱۳۴۴	براساس آخرین آمار منابع تخلیه کننده آب زیر زمینی در طرح جامع آب کشور آب تخلیه شده به دریاچه محاسبه شد .	میانگین تخلیه آب زیر زمینی به دریاچه : ۲۱۰/۷
		۱۳۷۴-۱۳۷۳		تخلیه آب زیر زمینی به دریاچه : ۲۷۸/۲۹

پیوست الف. جدول ۵- مقادیر تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار تبخیر و تعرق		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
۲۱۲۹۱	—	طبق روش های متداول برای ایستگاه های دارای تبخیر سنجی یا دارای اندازه گیری حرارت محاسبه گردیده. در برخی محدوده ها نیز به عنوان مجهول بیلان از برقراری بیلان محاسبه شده است.	۱۳۴۲-۱۳۸۰	حوضه آبریز	مطالعه برنامه جامع سازگاری با اقلیم و تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه های آبریز (جاماب، مهر ۱۳۸۴)
۱۵۸۲۶			۱۳۷۹-۱۳۸۰		
۵۲۹۴	—	تبخیر از سطح آب آزاد یا سطح آب دریاچه ارومیه با استفاده از میزان تبخیر از تشت محاسبه گردیده.	۱۳۴۲-۱۳۸۰	دریاچه	
۳۶۵۴			۱۳۷۹-۱۳۸۰		
۱۶۸	—	برای گستره ای از آب خوان ها که سطح ایستابی کمتر از ۳ متر است با استفاده از روش هایی از جمله منحنی وایت، تبخیر از آب زیر زمینی محاسبه شده است.	۱۳۴۲-۱۳۸۰	تبخیر از آب زیرزمینی	
۱۲۷			۱۳۷۹-۱۳۸۰		

پیوست الف. جدول ۵(ادامه)- مقادیر تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار تبخیر و تعرق		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه		نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)					
۹۰۲۶	—	بر طبق طرح جامع آب و آمار و اطلاعات گزارش شده مورد تحلیل قرار گرفته است.	۱۳۷۳	ارتفاعات	حوضه آبریز	بررسی مسائل ، چالش ها ، و فرصت های حوضه آبریز دریاچه ارومیه (گزارش نهایی) موسسه راهبرد دانش پویا، مرداد (۱۳۹۱)
۳۱۴۶/۹				دشت ها		
۲۳۷/۵				آب زیرزمینی		
۳۸۸۵				دریاچه ها و کفه ها		
۵۷۷۸	—	—	۷۶-۷۷	دریاچه		
۴۶۸۴			۸۷-۸۸			
جمع ۵۸۹۹۱			۷۶-۸۸			

پیوست الف. جدول ۵(ادامه) - مقادیر تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار تبخیر و تعرق		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
—	۱۵۲۴/۴	توزیع مکانی تبخیر در سطح دریاچه با استفاده از روش کریجینگ بر اساس موقعیت و مختصات ۲۳ ایستگاه تبخیر سنجی اطراف دریاچه ، آمار تکمیل و برآورد گردید.	۱۳۴۵-۱۳۸۰	متوسط سالانه تبخیر از تشت	مطالعه پیامد های زیست محیطی (اثرات کمی و کیفی) طرح های توسعه منابع آب حوضه دریاچه ارومیه بر دریاچه ارومیه (بیان آبی دریاچه جلد دوم) (مهندسین مشاور یکم، دی ماه ۱۳۸۳)
—	۱۳۷۵		۱۳۷۳-۱۳۷۴	دریاچه	
—	۹۶۰/۴	جهت تبدیل ارقام تبخیر اندازه گیری شده از سطح تشت به تبخیر از سطح آزاد آب از روش تجربی پمن استفاده شده است.	۱۳۴۵-۱۳۸۰	متوسط سالانه تبخیر آب شور	
—	۸۶۶/۲		۱۳۷۳-۱۳۷۴	دریاچه	
—	۱۲۲۳	با استفاده از تنظیم مدل بیان دریاچه با آمار دو ایستگاه شرفخانه و آباجلو سفلی	۱۳۴۵-۱۳۷۹	دریاچه	مطالعات تفصیلی هیدرولیک دریاچه ارومیه جلد دوم: اطلاعات پایه (مهندسین مشاور طرح نو اندیشان ، ۱۳۸۳)
۴۵۰۰	—	محاسبه تبخیر با استفاده از مدل شار انرژی صورت پذیرفته و متوسط حجم تبخیر از سطح دریاچه در دوره مورد نظر برآورد گردیده است.	۲۰۰۲-۲۰۰۶	دریاچه	ارزیابی فن آوری سنجش از دور در برآورد مولفه های بیان در مقیاس حوضه ای ، با تاکید بر میزان برداشت خالص آب زیرزمینی مطالعه موردی : حوضه آبریز دریاچه ارومیه (باقری هارونی، بهمن ۱۳۹۰)
—	۳۱۸	محاسبه تبخیر تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBAL صورت پذیرفته که بدون دریاچه است.		حوضه آبریز	

پیوست الف. جدول ۵(ادامه) - مقادیر تبخیر و تعرق در حوضه آبریز ارومیه در مطالعات مختلف

مقدار تبخیر و تعرق		روش برآورد	سال محاسبه	نوع مطالعه	نام مطالعه
ارتفاع (mm)	حجم (mcm)				
۸۹۴۵	—	حجم تبخیر و تعرق ناشی از بارش در ارتفاعات و دشت، تبخیر از سد ها، تبخیر از کفه ها و دریاچه ها، تبخیر از آبخوان و نهایتا تبخیر ناشی از مصارف می باشد	۱۳۷۶-۱۳۸۶	سطح حوضه	بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (گزارش روند نمای بیلان محدوده مطالعاتی ارومیه) سال افق ۱۴۲۰ (مهاب، شهریور ۱۳۹۱)
۵۶۵/۶	—	—		تبخیر و زهکشی از آب زیرزمینی	
۵۸۷۳/۲	۱۰۴۵	جهت تخمین میزان تبخیر از دریاچه از رابطه تبخیر از سطح آزاد آب و تشتک تبخیر با ضریب ۰/۷ و تبخیر و تعرق پتانسیل از روابط پنمن-مونتیث و بلانی-کریدل استفاده شده است. لایه تبخیر تعرق مکانی هم با استفاده از الگوریتم SEBAL و تصاویر AVHRR در دو سال آبی ۱۹۹۹-۲۰۰۰ میلادی و ۱۹۹۴-۱۹۹۳ میلادی تخمین زده شده است.	۱۹۶۷-۲۰۰۲	دریاچه	Integrated Water Resources " Management ,for Lake Uromiyeh Basin (ITC,2003 & ITC, 2005)
۵۱۸۰			۱۹۹۳-۱۹۹۴		
۴۹۰۰			۱۹۹۹-۲۰۰۰		
۱۴۹۶۰	۳۹۹		۱۹۹۳-۱۹۹۴	حوضه	
۱۵۶۰۰	۴۰۸		۱۹۹۹-۲۰۰۰		



Sharif University of Technology
Remote Sensing Research Center

Estimation of water Balance at Urmia Lake Basin for 1995 and 2010

By

Ehsan Jalilvand	Soheila Youneszadeh	Mohammad Faridzad	Hamid Farahmand
Pooya Komilian	Maryam Emadzadeh	Hamed Hamzeh Khani	Peyman Saemian

Technical report

Agust 2017