تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دهم، شماره ۱، بهار و تابستان۱۳۹۳
Volume 10, No. 1, Spring and Summer 2014 (IR-WRR)
۵۱-۶۲

بررسی قابلیت داده‌های ماهواره بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی و خروجی مدل‌های سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی برای برآورد بیلان آب در مقیاس‌های مکانی بزرگ (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

اشکان فرخ‌نیا[۱] و سعید مرید[۲*]

چکیده

برآورد مؤلفه‌های مختلف بیلان آب در مقیاس‌های مکانی بزرگ به دلیل عدم در اختیار بودن داده‌های مناسب، همواره با مشکلات فراوانی روبرو بوده است. در سال‌های اخیر با رشد فزاینده پایگاه‌های داده جهانی مبتنی بر برآوردهای ماهواره‌ای و همچنین افزایش توانایی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده حاکم بر بیلان آب در سطح زمین، کوشش‌های زیادی به منظور استفاده مناسب از این ابزارهای نوین جهت کاهش مشکلات موجود در این زمینه به عمل آمده است. پروژه‌های بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی (GRACE) و سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی (GLDAS)، دو نمونه از پروژه‌های شاخصی هستند که مطالعه در خصوص امکان استفاده از نتایج آن‌ها جهت برآورد بیلان آب در مناطق مختلف کره زمین طی چند سال گذشته به صورت گسترده‌ای مورد توجه محققین قرار داشته است. با توجه به عدم توجه کافی به اینگونه منابع اطلاعاتی رایگان و سهل‌الوصول در مطالعات جاری کشور، تحقیق حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از نتایج این پروژه‌ها در برآورد بیلان آب در حوضه‌های آبریز ایران انجام شد. بدین منظور حوضه آبریز دریاچه ارومیه به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد و مؤلفه‌های بیلان آب در این حوضه با استفاده از اطلاعات GRACE و GLDAS استخراج گردید. مقایسه مقادیر برآورد شده تغییرات بیلان کل آب در حوضه توسط GRACE و تغییرات مشاهداتی حجم آب دریاچه نشان دهنده وجود روند یکسان می‌باشد. همچنین برآورد تغییرات سالانه آب زیرزمینی نیز با استفاده از اطلاعات GRACE و GLDAS انجام شد که نشان دهنده قابلیت مناسب اطلاعات GRACE برای برآورد روند تغییرات آب زیرزمینی می‌باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد اطلاعات حاصل از GRACE می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای انجام برآوردهای اولیه، سریع و کم‌هزینه در خصوص بیلان آب در حوضه‌های آبریز کشور مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بیلان آب، GRACE، GLDAS، حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

تاریخ دریافت مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۹۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۱ مرداد ۱۳۹۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

Assessment of GRACE and GLDAS Capabilities for Estimation of Water Balance in Large Scale Areas, a Case Study of Urmia Lake Watershed

A. Farokhnia [1] and S. Morid [2]

Abstract

Due to lack of appropriate data, estimation of water balance components for large areas is usually problematic. Recent development of global databases based on satellite estimates as well as rapid progress in hardware and software for modeling of complex processes governing the water balance at the land surface, caused that many efforts employ these new tools to reduce the limitations in this field. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and Global Land Data Assimilation System (GLDAS) are two particular projects, which has recently been used by many scientists to estimate water balance in different regions of the world. Regarding the lack of attention to this free information in Iranian studies, this research aims at investigating the possibility of using these resources in estimating the water balance of Iran basins. Urmia lake watershed was selected as a study area and the water balance components were extracted from GRACE GLDAS data. Comparison of the estimated changes in total water balance of the basin by GRACE data and changes in the lake water volume based on observations showed a similar trend. Besides, estimation of annual variations in groundwater using GRACE and GLDAS showed suitability of GRACE data for study of the groundwater changes. Overall, the results of present study indicated that GRACE data can be used as an appropriate tool to perform a preliminary, rapid, and inexpensive assessment of water balance in watersheds of the country.

Keywords: Water Balance, GRACE, GLDAS, Urmia Lake Watershed.

Received: November 21, 2011

Accepted: August 12, 2013

1- Ph.D. Student, Department of Water Structures Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Water Structures Engineering, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: morid_sa@modares.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- مقدمه

موجودی آب زمینی[۱] (TWS) عبارتست از مجموع آبی که در سطح و زیر سطح زمین موجود است. به عبارت دیگر TWS شامل آب زیرزمینی، رطوبت خاک و لایه‌های منجمد زیر سطحی، آب‌های سطحی، یخ و برف و همچنین رطوبت موجود در توده‌های زیستی می‌باشد. این مؤلفه که یک بخش کلیدی از چرخه جهانی هیدرولوژی می‌باشد، در کنترل جریان آب، انرژی و فرآیندهای بیوشیمیایی در سطح زمین مؤثر بوده و از این رو نقش مهمی را در توصیف سیستم اقلیمی زمین ایفا می‌نماید. علاوه بر این، TWS برای مقاصد مختلفی نظیر شرب و کشاورزی مورد استفاده گسترده بشر قرار می‌گیرد. تغییرات شدید در مؤلفه‌های سطح زمین، نظیر الگوی بارش، تبخیر–تعرق و دما بر TWS اثر خواهد داشت.

برآورد تغییرات TWS[۲] (TWSC) در مقیاس‌های مکانی بزرگ به دلیل کم بودن اطلاعات مورد نیاز معمولاً با چالش‌های فراوانی روبرو می‌باشد. روش‌های معمول اندازه‌گیری TWSC عبارت از اندازه‌گیری چاه‌های گمانه، اندازه‌گیری رطوبت خاک و همچنین ثبت تغییرات تراز دریاچه‌ها می‌باشد. روش‌های مذکور دقت مناسبی دارند، اما برای برآورد TWSC در ابعاد وسیع بسیار هزینه‌بر خواهند بود و معمولاً با کمبود داده روبرو هستند. در سال‌های اخیر داده‌های ماهواره‌ای به دست آمده از پروژه بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی[۳] (GRACE) و همچنین شبیه‌سازی‌های انجام شده در قالب سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی[۴] (GLDAS) امکانات مناسبی را برای برآورد TWSC در ابعاد مکانی گسترده ایجاد نموده است.

اطلاعات به‌دست آمده از پروژه‌های GRACE و GLDAS تاکنون در مطالعات هیدرولوژیکی متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. نکته قابل توجه در اغلب آن‌ها، استفاده توام از نتایج این دو می‌باشد، به نحوی که می‌توان گفت داده‌های بدست آمده از این دو پروژه را می‌توان به عنوان مکمل یکدیگر در تحلیل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مکانی بزرگ به کار گرفت.

Anderson et al. (2005) تغییرات TWS را در قاره اروپا برای شرایط گرمای غیرمعمول سال ۲۰۰۳ با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، اطلاعات GLDAS و همچنین ۲ ایستگاه زمینی اندازه‌گیری تغییرات گرانش زمین، بررسی نمودند. نتیجه این تحقیق نشان داد مقدار TWS در سال ۲۰۰۳ کاهش شدیدی در حدود ۱۰ سانتی‌متر را تجربه نموده است. همچنین دقت مناسب داده‌های ماهواره GRACE در مقایسه با اطلاعات زمینی اندازه‌گیری گرانش زمین و همچنین تطابق داده‌های GRACE و GLDAS از دیگر یافته‌ها بود.

در تحقیق دیگری، Rodell et al. (2009) تغییرات حجم آب زیرزمینی در ۳ ایالت هند، شامل هاریانا و دهلی[۵]، پنجاب[۶] و راجستان[۷] را با استفاده از داده‌های TWSC به دست آمده از پروژه GRACE و تغییرات رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GLDAS بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ را برآورد نمودند. در این تحقیق که نتایج آن در نشریه معتبر Nature منتشر گردید، عدم قطعیت‌های موجود در برآورد TWSC توسط اطلاعات ماهواره GRACE با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل اطلاعات خام نشان داد که عدم قطعیتی در حدود ۰/۵۴ سانتی‌متر در سال در برآورد TWSC به این روش وجود دارد. همچنین تحلیل عدم قطعیت برآورد رطوبت خاک در مدل‌های GLDAS با استفاده از بررسی ۵ برآورد انجام شده توسط مدل‌های مختلف، نشان دهنده وجود ۰/۳۸ سانتی‌متر در سال عدم قطعیت در برآورد رطوبت خاک بود. بر این اساس تغییرات آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی تحقیق مذکور بر مبنای تفاضل تغییرات TWS و رطوبت خاک تعیین گردید که نشان دهنده مقدار متوسطی برابر با ۱±۴ سانتی‌متر در سال (۴/۵±۱۷/۷ میلیارد متر مکعب در سال) کاهش آب زیرزمینی است.

Strassberg et al. (2009) از داده‌های TWS ماهواره GRACE به منظور برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در یک حوضه نیمه خشک در ایالات متحده آمریکا استفاده نمودند. منطقه مطالعاتی تحقیق مذکور که در نواحی بیابانی آمریکا قرار گرفته و سطح آب زیرزمینی آن نسبتا عمیق و در حدود ۳۰ متری سطح زمین قرار گرفته، دارای تغییرات فصلی شدید آب زیرزمینی به واسطه آبیاری زیاد در فصول مناسب کشاورزی می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد مقدار TWS ماهواره GRACE از همبستگی بسیار مناسبی با داده‌های برداشت شده توسط USGS برخوردار می‌باشد (در حدود ۰/۹۵) و می‌تواند با دقت مناسبی برای تحلیل TWSC در مناطق فاقد آمار مورد استفاده قرار گیرد.

Habte-Haile (2011) داده‌های GRACE و GLDAS را به منظور بررسی تغییرات TWS در یکی از زیر حوضه‌های رودخانه زرد به کار گرفت. در این تحقیق مقدار TWSC به دو روش از روی متغیرهای حالت و جریان مدل NOAH پروژه GLDAS تعیین گردید و با داده‌های TWSC ماهواره GRACE مقایسه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد مقدار TWSC بدست آمده از GRACE نتوانسته سیکل فصلی تغییرات هیدرولوژیکی را در حوضه مورد مطالعه به خوبی نشان دهد که این امر به کوچک بودن تغییرات

هیدرولوژیکی منطقه مطالعاتی در مقایسه با محدوده عدم قطعیت داده‌های ماهواره GRACE مرتبط می‌باشد. از طرف دیگر داده‌های GLDAS نمایش بهتری را از تغییرات فصلی TWS در منطقه مورد مطالعه ارائه نمود. همچنین در بخش دیگری از این تحقیق، داده‌های بارش و دمای به کار گرفته شده در مدل GLDAS با داده‌های زمینی مورد مقایسه قرار گرفت که نشان دهنده دقت مناسب داده‌های به کار رفته در شبیه‌سازی‌های GLDAS بود.

اطلاعات حاصل از پروژه‌های GRACE و GLDAS که یکی از جدیدترین روش‌های مورد استفاده برای تخمین سریع و کم‌هزینه میزان و روند تغییرات TWS و مؤلفه‌های آن در مقیاس‌های مکانی بزرگ می‌باشد، تاکنون کمتر در کشور مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. تحقیق حاضر ارزیابی اطلاعات این دو سیستم را هدف قرار داده و با توجه به اهمیت دریاچه ارومیه و مشکلات اخیر آن، حوضه آبریز آن به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. بدین منظور به بررسی و ارزیابی TWSC در حوضه دریاچه ارومیه و ارتباط آن با تغییرات حجم آب دریاچه و همچنین برآورد تغییرات آب زیرزمینی در این حوضه با استفاده از اطلاعات پروژه‌های GRACE و GLDAS پرداخته خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت تقریبی ۵۲.۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال غربی ایران قرار گرفته و بخشی از استان‌های آذربایجان شرقی و غربی و همچنین کردستان را شامل می‌شود. دریاچه ارومیه با طول حدود ۱۴۶ کیلومتر و عرض حداکثر برابر با ۵۸ کیلومتر، بزرگ‌ترین دریاچه داخل ایران و یکی از دریاچه‌های فوق‌شور در جهان است. بر اساس آمار موجود، حداکثر عمق آن ۱۶ متر و تراز سطح آب آن بین ۱۲۷۲ متر و ۱۲۷۸ متر از سطح آب‌های آزاد متغیر بوده است که موجب تغییرات مساحتی بین ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومتر مربع می‌گردد (Eimanifar and Mohebbi, 2007). در دریاچه ارومیه ۱۰۲ جزیره قرار دارد که این مجموعه به عنوان ذخیره بیوسفر[8] توسط یونسکو شناخته شده و جز تالاب‌های بین‌المللی تحت کنوانسیون رامسر[9] می‌باشد. کوه‌هایی از غرب، جنوب و شرق دریاچه را احاطه نموده‌اند، ولی از سمت شمال ارتفاعات مهمی وجود ندارد. حداکثر ارتفاع حوضه در بخش‌های غربی آن بـوده و در حدود ۳۶۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد.

منابع آبی ورودی به دریاچه ارومیه شامل رودخانه‌های دائمی، فصلی، مسیل‌ها و ریزش‌های مستقیم بارش می‌باشد. اهم رودخانه‌ها و مسیل‌ها که مستقیماً به دریاچه می‌ریزند عبارتند از : زرینه رود، سیمینه رود، مهاباد چای، گدار، باراندوز، شهرچای، روضه، نازلو، شیواسان، زولا، تیوان چای، تسوج چای، هریس چای، دریان چای، شانجان چای، سنیخ چای، آجی چای، آذر شهر چای، قلعه چای، چوان چای، صوفی چای، مردق چای و مسیل‌های بالستان، داش آغل، رشکان، دیزج، قوشچی و قولنجی. موقعیت کلی دریاچه ارومیه و حوضه آبریز آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

- داده‌های بارش

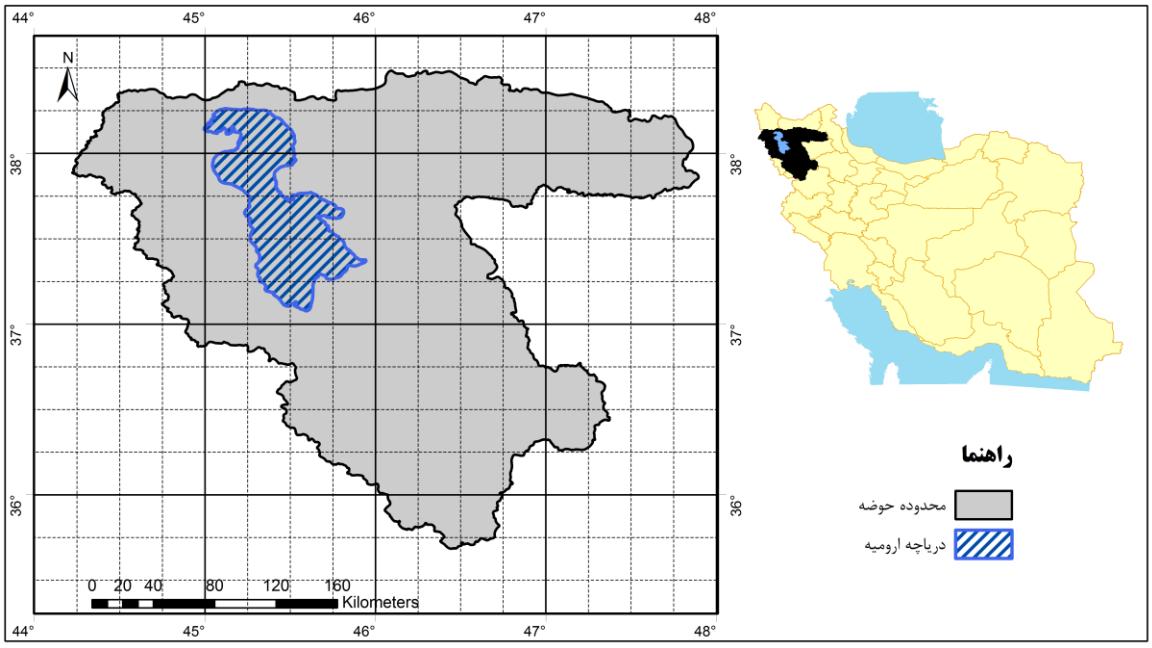
در تحقیق حاضر از اطلاعات بارش ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی که از طول دوره آماری و پراکنش مناسبی در سطح حوضه برخوردار بودند، استفاده گردید. داده‌های بارش ماهانه با استفاده از پلیگون‌بندی تیسن و مشخص نمودن مقدار اثر هر ایستگاه در سطح حوضه به داده‌های متوسط ماهانه در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه تبدیل شد. موقعیت ایستگاه‌های مذکور و سری زمانی متوسط بارش حوضه در شکل ۲ نشان داده شده است.

- داده‌های دما

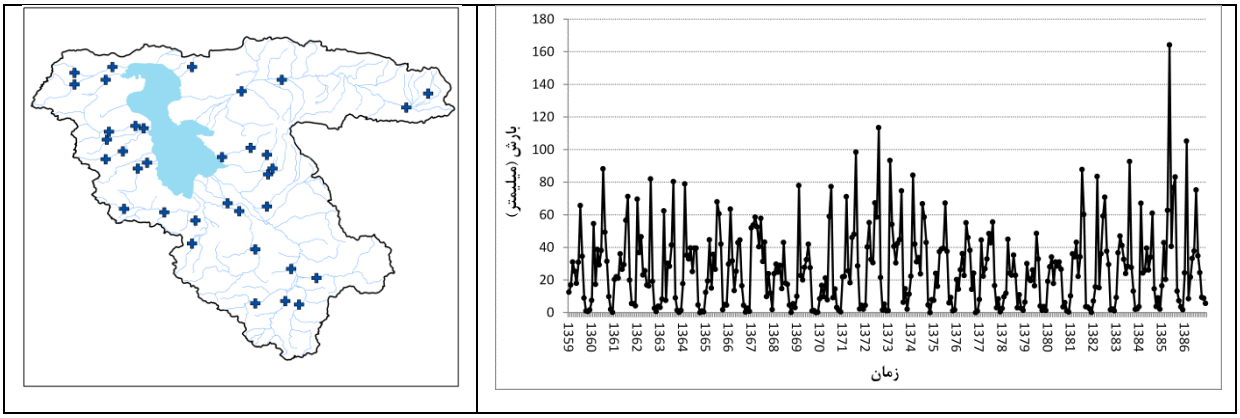
داده‌های متوسط دمای ماهانه ثبت شده در ۹ ایستگاه تبخیرسنجی وزارت نیرو که از طول دوره آماری مناسبی برخوردار بودند، مورد استفاده قرار گرفت. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. داده‌های دما نیز مشابه قبل به متوسط ماهانه در سطح حوضه تبدیل گردید که سری زمانی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

- داده‌های تغییرات آب زیرزمینی

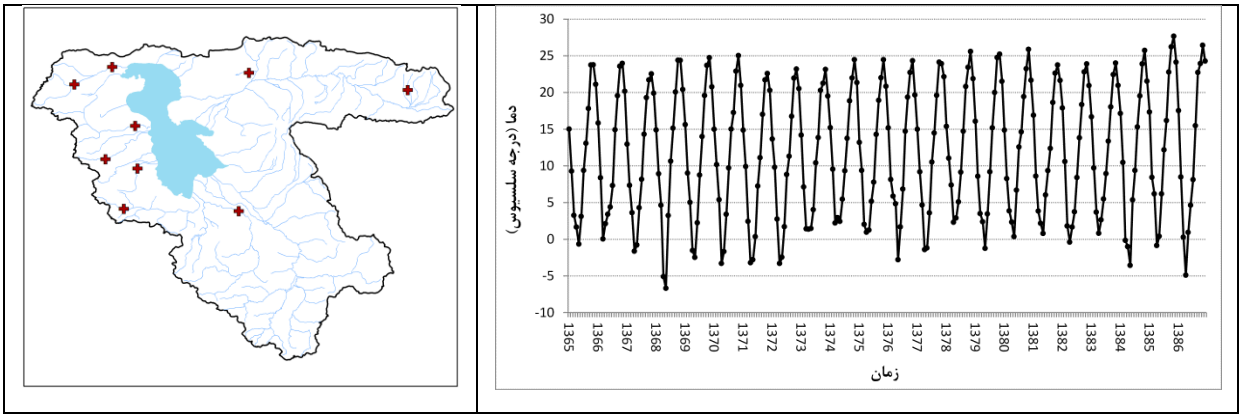
اطلاعات تراز آب زیرزمینی ۲۵ آبخوان معرف در سطح حوضه دریاچه ارومیه که دارای آمار قابل استفاده برای دوره زمانی مورد بررسی در تحقیق حاضر بودند، از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ گردید و مقدار متوسط سالانه تغییر حجم آب زیرزمینی در سطح حوضه پس از اعمال میانگین‌گیری وزنی بر اساس وسعت محدوده‌های مذکور و با فرض متوسط ضریب ذخیره برابر ۰/۰۵ برای آبخوان‌ها محاسبه شد. بر این اساس مقادیر تغییرات سالانه (تغییر در انتهای سال آبی نسبت به سال آبی قبل) و تجمعی (نسبت به شهریور ۱۳۸۱) حجم آب زیرزمینی در سطح حوضه دریاچه ارومیه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت دریاچه ارومیه و حوضه آبریز آن



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده شده در تحقیق حاضر و سری زمانی متوسط ماهانه بارش حوضه (مرید و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های تبخیرسنجی استفاده شده در تحقیق حاضر و سری زمانی متوسط ماهانه دمای حوضه (مرید و همکاران، ۱۳۹۰)

- داده‌های تراز سطح آب دریاچه

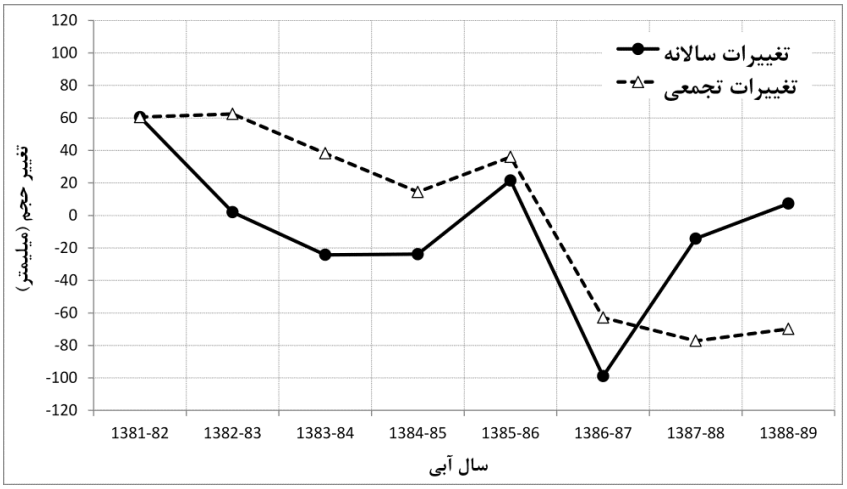
اطلاعات مربوط به متوسط تراز سطح آب دریاچه از سال ۱۳۴۴ الی ۱۳۸۹ تهیه گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین با توجه به رابطه زیر حجم آب موجود در دریاچه برآورد شده است (بی‌نام، ۱۳۸۵):

$$V = (14.4658 \times ELV - 18271.9)^2 \qquad (۱)$$

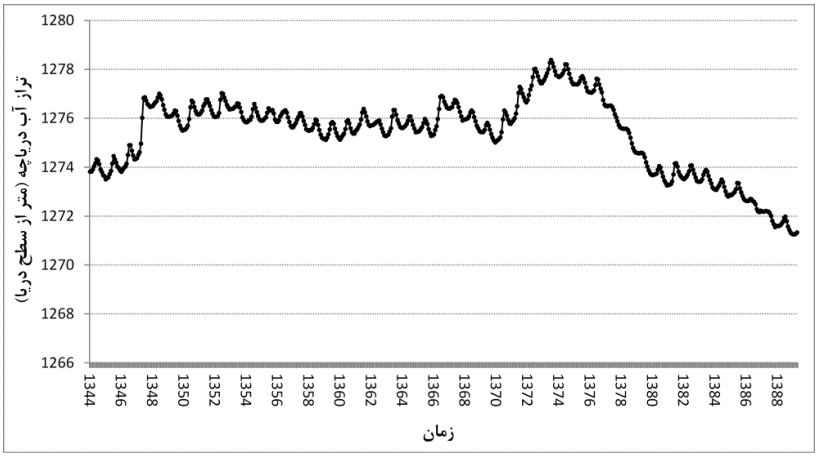
که در آن ELV تراز سطح آب دریاچه (متر از سطح دریا) و V حجم آب موجود در دریاچه (میلیون متر مکعب) می‌باشد. با استفاده از رابطه فوق و داده‌های متوسط تراز سطح دریاچه می‌توان سری زمانی حجم آب موجود در دریاچه را برآورد نمود. لازم به ذکر است، در تحلیل‌های بخش‌های بعد حجم آب دریاچه به صورت متوسط تغییرات حجم در کل سطح حوضه ارائه شده تا بتوان با سهولت بیشتری آن را با سایر داده‌ها مقایسه نمود. بدین منظور حجم آب دریاچه و یا تغییرات آن در هر زمان بر سطح حوضه تقسیم گردید تا با واحد میلی‌متر در واحد سطح حوضه بیان گردد.

۲-۲- ماهواره GRACE

ماهواره‌های دوقلوی GRACE که توسط سازمان ملی هوانوردی و فضای ایالات متحده آمریکا[۱۰] (NASA) و مرکز هوا-فضای آلمان[۱۱] (DLR) در سال ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شد، اندازه‌گیری تغییرات زمانی میدان گرانش زمین را انجام می‌دهد که می‌تواند برای برآورد TWSC بکار گرفته شود. GRACE اولین ماهواره‌ای است که امکان ارزیابی مستقیم TWSC را در کلیه شرایط آب و هوایی فراهم می‌نماید. ماهواره‌های GRACE تغییرات مقدار آب را در سطح زمین به صورت غیر مستقیم و از طریق برآورد تغییرات زمانی میدان ثقل زمین اندازه‌گیری می‌کنند و بر خلاف بسیاری از ماهواره‌ها، به صورت یک ابزار اندازه‌گیری عمل می‌کنند. در واقع سیستم GRACE شامل دو ماهواره است که در امتداد یکدیگر حرکت می‌نمایند. زمانی که مقدار گرانش زمین در زیر ماهواره جلو افزایش می‌یابد، سرعت حرکت آن نسبت به ماهواره عقب‌تر افزایش یافته و در نتیجه فاصله بین آن‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۴- متوسط تغییرات سالانه حجم آب زیرزمینی حوضه



شکل ۵- سری زمانی متوسط ماهانه تراز سطح آب دریاچه ارومیه

به عبارت دیگر تغییر در گرانش موضعی زمین موجب تغییرات موضعی در فاصله حرکتی بین دو ماهواره متوالی می‌گردد. این تغییرات فاصله به صورت لحظه‌ای توسط یک سیستم اندازه‌گیری بسیار دقیق مبتنی بر موج کوتاه در باند K ثبت می‌گردد و پس از انجام محاسبات پیچیده‌ای به تغییرات زمانی- مکانی گرانش سطح زمین و نتیجتاً به تغییرات ارتفاع آب زمینی معادل در موقعیت زمان و مکان مختلف تبدیل می‌گردد. لازم به ذکر است پیش از پردازش اطلاعات گرانشی و تبدیل آن به تغییرات آب معادل، برخی از تصحیحات، شامل حذف اثر رطوبت اتمسفر از اطلاعات صورت می‌گیرد. با توجه به پیچیده بودن روند پردازش اطلاعات و وجود پایگاه داده‌های آماده استفاده، از ارائه روند انجام پردازش‌های مذکور در این تحقیق اجتناب گردیده است و جهت کسب اطلاعات بیشتر در این خصوص می‌توان به مرجع Wahr et al. (2006) مراجعه نمود.

- تهیه و آماده‌سازی داده‌های GRACE

اطلاعات ثبت شده از ماهواره GRACE توسط مراکز مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته و در دسترس عموم قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر داده‌های مرتبه ۳ ماهواره GRACE (ارتفاع آب معادل[۱۲] (EWH)) در ابعاد یک درجه در یک درجه از اواسط سال ۲۰۰۲ تا انتهای ۲۰۱۰ از پایگاه اطلاعات لابراتوار پیشرانش جت[۱۳] انستیتوی تکنولوژی کالیفرنیا[۱۴] تهیه و مورد استفاده قرار گرفت (www.grace.jpl.nasa.gov).

پس از ذخیره داده‌های TWS ماهواره GRACE در ابعاد یک در یک درجه شبکه‌بندی مشخص شده با خطوط مشکی پیوسته در شکل ۱، بایستی ابتدا مقدار متوسط TWS هر ماه با توجه به نحوه قرارگیری سطح حوضه در شبکه یک در یک درجه تعیین شد. بدین منظور سهم هر یک از پیکسل‌های یک در یک درجه در سطح حوضه مشخص گردید و متوسط وزنی مقادیر پیکسل‌های مختلف به عنوان متوسط TWS حوضه استخراج گردید. برای به دست آوردن مقدار TWSC از رابطه زیر استفاده شد:

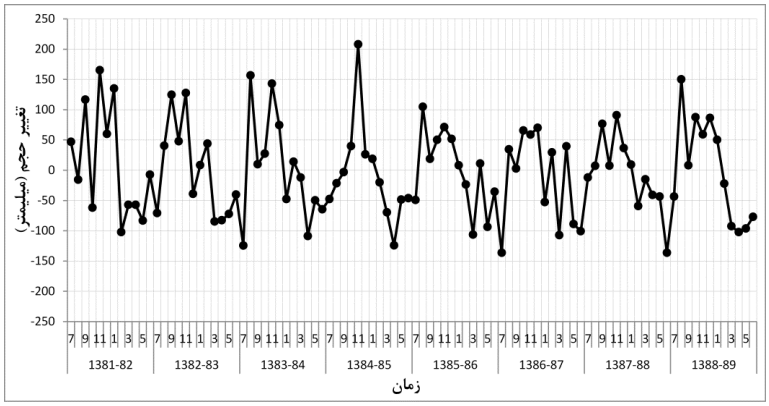
$$TWSC_N = TWS_N - TWS_{N-1} \qquad (۲)$$

که در آن $TWSC$ تغییرات آب زمینی، TWS برابر با آنومالی مقدار آب زمینی و N نشان دهنده ماه مورد بررسی می‌باشد. بر این اساس مقدار TWSC متوسط حوضه دریاچه ارومیه در مقیاس زمانی ماهانه محاسبه گردید که سری زمانی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۳- سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی (GLDAS)

شرایط حرارتی و رطوبتی سطح زمین علاوه بر تاثیرپذیری از پدیده‌های اقلیمی، هواشناختی، اکولوژیکی و ژئوفیزیکی، به طور متقابل نیز تأثیراتی بر آن‌ها دارد. از این رو برآورد دقیق و با دقت مکانی مناسب بودجه آب و انرژی زمین، برای تحلیل فرآیندهایی نظیر تغییر اقلیم، آب و هوا، بهره‌وری کشاورزی و هیدرولوژی قابل استفاده است (Rodell et al., 2004).

بر این اساس، GLDAS به صورت مشترک با همکاری مرکز GSFC[۱۵] (وابسته به NASA) و مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی[۱۶] (وابسته به مرکز ملی هوا و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا[۱۷]) به منظور برآورد متغیرهای مذکور توسعه داده شده است. GLDAS از نسل جدیدی از سیستم‌های پایش زمینی و فضایی بهره می‌گیرد که داده‌های مورد نیاز را برای محدود کردن دامنه متغیرهای حالت مورد مدل‌سازی (نظیر رطوبت خاک و بودجه برفی) فراهم می‌نماید. با اعمال داده‌های هواشناختی مشاهداتی، می‌توان از خطاهای ناشی از مدل‌سازی داده‌های مذکور جلوگیری نمود.



شکل ۶- متوسط تغییرات TWS در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه

همچنین با استفاده از روش‌های تلفیق پیشرفته داده‌ها، می‌توان از داده‌های مشاهداتی متغیرهای حالت برای اصلاح نتایج غیرمعقول احتمالی مدل استفاده نمود.

در GLDAS از مدل‌های سطح زمین[۱۸] (LSM) استفاده می‌شود که برای شبیه‌سازی فرآیندهای مربوط به تبادل آب و انرژی بین اتمسفر و خاک توسعه داده می‌شوند. این مدل‌های مفهومی عموماً در دسته مدل‌های توزیعی قرار گرفته و برای شبیه‌سازی بیلان آب و انرژی در مقیاس‌های مکانی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های LSM با دارا بودن مؤلفه‌هایی نظیر شبیه‌ساز تبادل انرژی، هیدرولوژی، فرآیندهای بیولوژیکی و چرخه کربن قادر به ارائه تحلیل‌های مناسبی از تغییرات آب در سطح زمین می‌باشند.

GLDAS هم اکنون نتایج شبیه‌سازی چهار مدل LSM، شامل NOAH[۱۹]، MOSAIC، CLM[۲۰] و VIC[۲۱] را از سال ۱۹۷۹ میلادی برای کل کره زمین در مقیاس مکانی ۱×۱ درجه به صورت متوسط ماهانه و ۳ ساعته ارائه می‌نماید. همچنین اخیراً نتایج مدل NOAH در مقیاس ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه نیز از سال ۲۰۰۰ به بعد ارائه گردیده است. داده‌هایی که به عنوان ورودی در GLDAS مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل دو دسته کلی می‌باشند. این داده‌ها شامل داده‌های هواشناختی و اطلاعات مربوط به فاکتورهای سطح زمین می‌باشد که شرح آن‌ها در پایگاه اینترنتی www.ldas.gsfc.nasa.gov ارائه شده است.

مهمترین مؤلفه‌های حالت خروجی GLDAS که در برآورد TWSC مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:
۱) متغیرهای حالت[۲۲]، شامل رطوبت لایه‌های مختلف خاک و بودجه برفی
۲) متغیرهای جریان[۲۳]، شامل بارش، رواناب سطحی و زیرسطحی، جریان حاصل از ذوب برف و تبخیر–تعرق

لازم به ذکر است در مدل‌های فعلی GLDAS، شبیه‌سازی مستقیم تغییرات آب زیرزمینی انجام نمی‌شود که این امر یک محدودیت جدی برای استفاده از نتایج آن‌ها، خصوصاً در مناطقی که برداشت قابل توجهی از منابع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد، می‌باشد (Habte-Haile, 2011).

– تهیه و آماده‌سازی داده‌های GLDAS

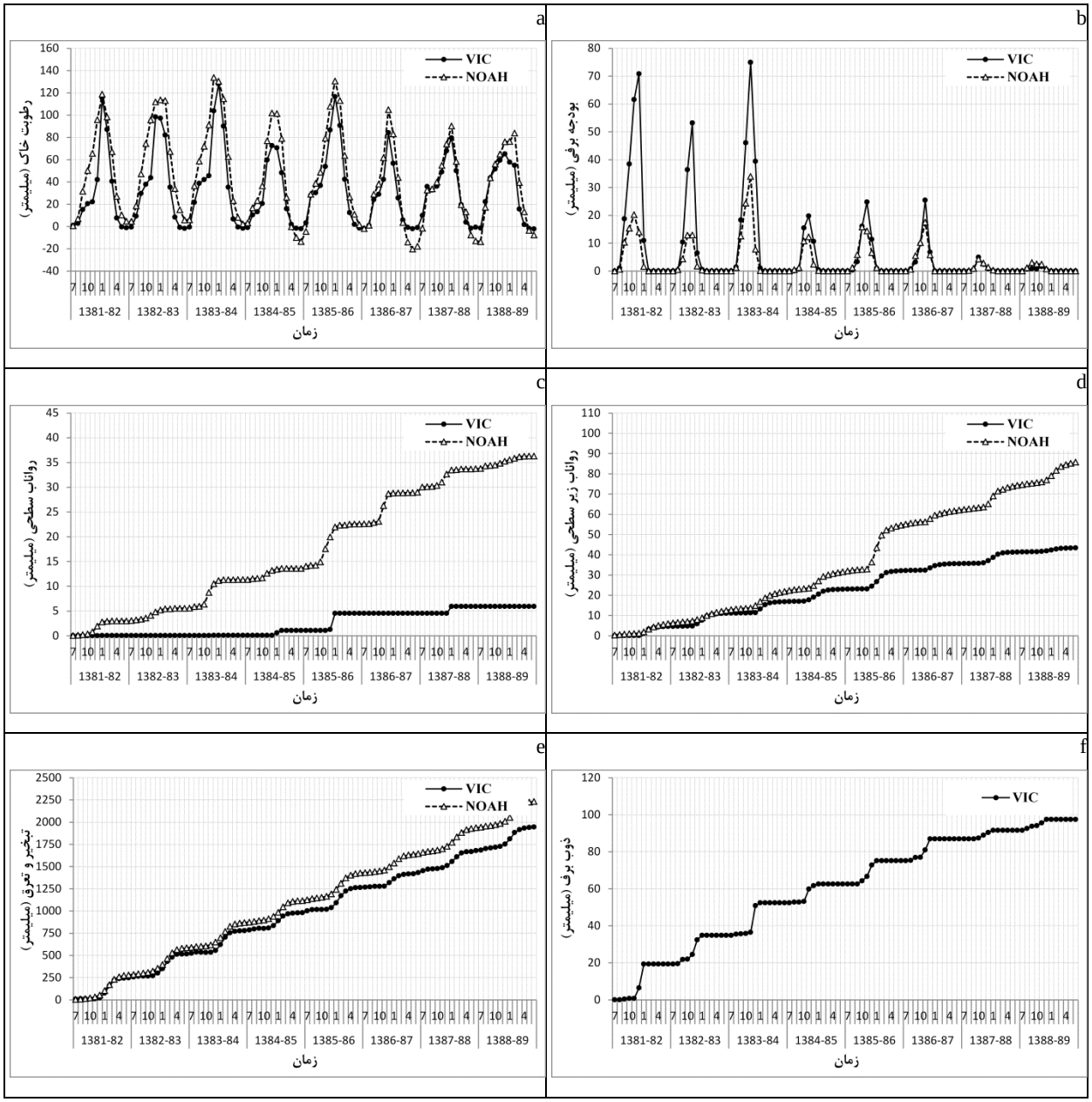
در تحقیق حاضر از دو مدل موجود در GLDAS با دو قدرت تفکیک مکانی مختلف استفاده شده است. اطلاعات مربوط به مدل VIC در مقیاس مکانی ۱×۱ درجه از سال ۱۹۷۹ به بعد و اطلاعات مدل NOAH با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه از سال ۲۰۰۰ به بعد از پایگاه اینترنتی گروه هیدرولوژیکی ناسا به آدرس http://disc.gsfc.nasa.gov/hydrology/data-holdings تهیه گردید (نحوه قرار گرفتن پیکسل‌های داده‌های مذکور با تفکیک مکانی ۱ و ۰/۲۵ به ترتیب با شبکه‌بندی خطوط پیوسته و خط‌چین در شکل ۱ نشان داده شده است).

داده‌های تهیه شده از پایگاه مذکور برای هر ماه شامل کلیه اطلاعات ورودی و خروجی هر یک از مدل‌های LSM می‌باشد. پس از استخراج داده‌های دو مدل VIC و NOAH برای پیکسل‌های منطقه مطالعاتی، مطابق آنچه برای اطلاعات ماهواره GRACE انجام شد، متوسط ماهانه هر یک از متغیرها در حوضه دریاچه ارومیه برای دوره زمانی موجود هر یک از مدل‌ها استخراج شد.

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده که شامل رطوبت لایه‌های مختلف خاک (عمق و تعداد لایه‌ها برای دو مدل مورد استفاده متفاوت می‌باشند)، بودجه برفی، بارش، تبخیر، رواناب سطحی و زیرسطحی و همچنین مقدار ذوب برف می‌باشد، می‌توان بیلان آبی در منطقه مورد مطالعه بررسی نمود. تغییرات در مقدار کل رطوبت خاک، بودجه برفی، جریان سطحی، جریان زیرسطحی و تبخیر–تعرق برای دو مدل مورد نظر در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است مقدار ذوب برف محاسبه شده توسط مدل NOAH حاوی مقادیر بسیار بالا بوده که ظاهرا به دلیل بروز خطا در پایگاه داده‌های سیستم GLDAS اتفاق افتاده و به همین دلیل از ارائه آن اجتناب گردیده است.

۳– نتایج

در این بخش قابلیت سیستم‌های GLDAS و GRACE به منظور انجام تحلیل‌های زیر در حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار می‌گیرد:
۱– مقایسه داده‌های بارش و دمای مورد استفاده در GLDAS و داده‌های مشاهداتی
۲– بررسی روند TWSC حاصل از GRACE با روند تغییرات حجم دریاچه
۳– مقایسه TWSC برآورد شده توسط GRACE و GLDAS
۴– برآورد تغییرات آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات GLDAS، GRACE و تغییرات حجم دریاچه



شکل ۷- سری زمانی تجمعی متوسط ماهانه مؤلفه‌های بیلان آب حوضه، استخراج شده از مدل‌های GLDAS (نسبت به شهریور ۱۳۸۱)

a) رطوبت خاک، b) بودجه برفی، c) رواناب سطحی، d) رواناب زیرسطحی، e)تبخیر- تعرق و f) ذوب برف

۳-۱- مقایسه داده‌های زمینی و GLDAS

نتایج خروجی از هر نوع مدل‌سازی وابسته به کیفیت داده‌های ورودی به مدل مورد استفاده می‌باشد. لذا ابتدا نتیجه بررسی داده‌های اصلی ورودی مدل‌های GLDAS، شامل بارش و دما که نقش کلیدی را در نتایج شبیه‌سازی بیلان آب و انرژی توسط مدل‌های مذکور ایفا می‌نمایند، با داده‌های مشاهداتی مربوطه ارائه می‌شود.

- بارش

پس از استخراج داده‌های بارش استفاده شده در مدل‌های GLDAS، مقادیر مربوط با متوسط بارش مشاهداتی در سطح حوضه در دوره آماری مشابه مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۸ قابل مشاهده است. این شکل نشان می‌دهد در ماه‌هایی که بارندگی مشاهداتی بیشتر از حدود ۵۰ میلیمتر بوده است، ارقام کمتری در GLDAS مورد استفاده قرار گرفته است. ضمن اینکه نوسانات در مقدار بارش مشاهداتی به مراتب بیشتر از داده‌های بارش استفاده

شده در GLDAS می‌باشد. متوسط ماهانه داده‌های بارش مشاهداتی برابر با ۳۲/۵ با انحراف معیار ۳۱/۱ میلیمتر و متوسط مقادیر بارش در GLDAS برابر با ۲۱/۶ با انحراف معیار ۱۶/۷ میلی‌متر می‌باشد.

- دما

مانند قبل ارقام این متغیر در مدل GLDAS با مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های مقایسه شد که در شکل ۹ ارائه گردیده است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت روند داده‌های دمای مورد استفاده GLDAS تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی دارند، هرچند قدری کمتر بوده‌اند. متوسط ماهانه دمای مشاهداتی در حوضه ۱۲/۵ با انحراف معیار ۹/۳ درجه سلسیوس و مقادیر مربوطه در GLDAS به ترتیب برابر ۹/۴ و ۹/۷ است.

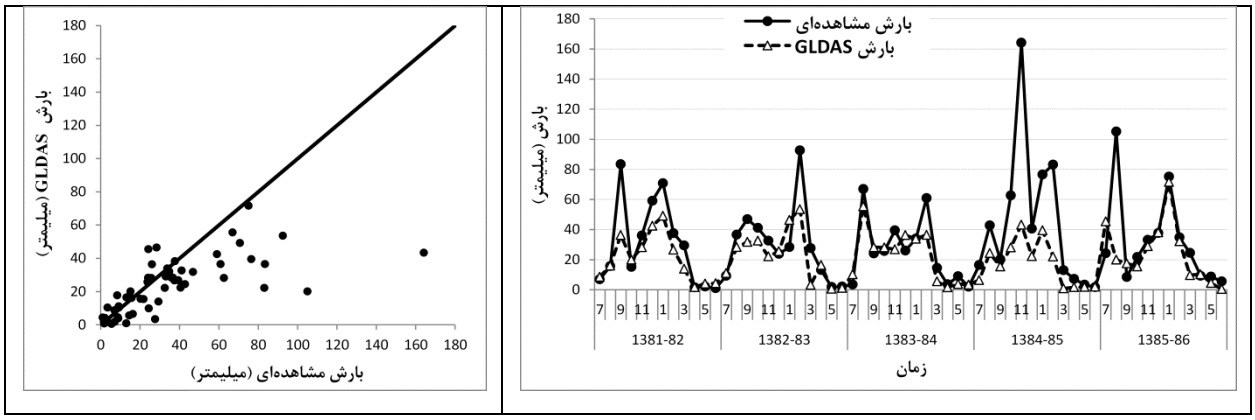
۳-۲- تغییرات TWS در حوضه و حجم دریاچه

اطلاعات بدست آمده از GRACE نشان می‌دهد بین سال‌های آبی ۸۲-۱۳۸۱ الی ۸۹-۱۳۸۸ تغییرات TWS در سطح حوضه ۱۷۲- میلیمتر (حدود ۸/۹- میلیارد متر مکعب) بوده است. این در حالیست که تغییرات حجم آب دریاچه در طول این مدت حدودا ۱۵۲- میلیمتر (حدود ۷/۸- میلیارد متر مکعب) بوده است که نشان دهنده منفی بودن روند سایر مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه طی این مدت می‌باشد (شکل ۱۰). نکته دیگری که در مقایسه روند تغییرات TWS و حجم آب دریاچه وجود روند فصلی قابل مشاهده است، مشابهت روند سالانه سری‌های زمانی آن‌ها می‌باشد که در مقیاس ماهانه نوسانات TWSC بسیار شدیدتر از تغییرات حجم دریاچه است. همچنین تغییرات حجم آب دریاچه نسبت به تغییرات TWS تاخیری ۲ ماهه دارد.

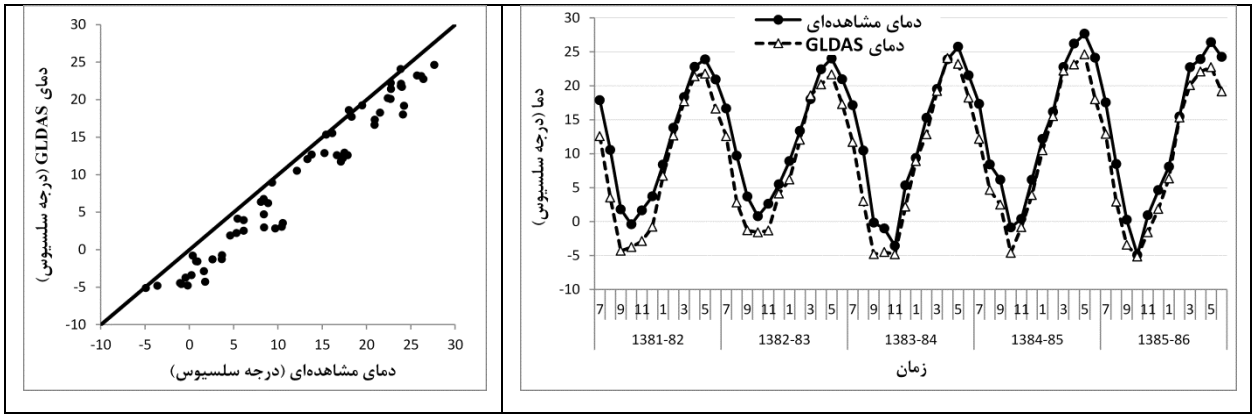
۳-۳- مقایسه TWSC حاصل از GRACE و GLDAS

در این بخش تلاش شده است تا مقدار تغییرات کل آب زمینی حوضه توسط GLDAS برآورد و با اطلاعات GRACE مورد مقایسه قرار گیرد. برای این مقایسه، ابتدا معادله عمومی زیر تعریف می‌شود:

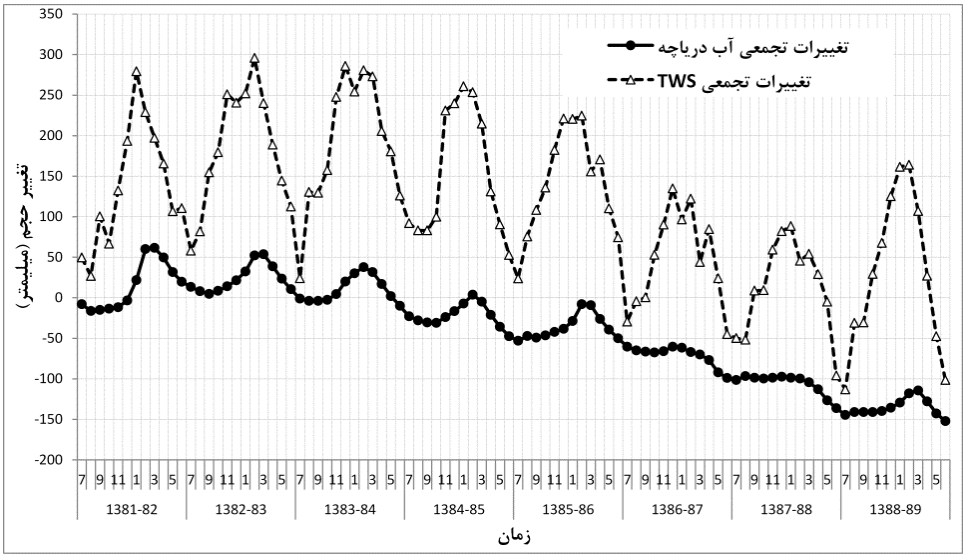
$$TWSC = P - ET + \Delta LV \qquad (۳)$$



شکل ۸- داده‌های متوسط ماهانه بارش مشاهداتی و داده‌های مورد استفاده در مدل‌های GLDAS



شکل ۹- داده‌های متوسط ماهانه دمای مشاهداتی و داده‌های مورد استفاده در مدل‌های GLDAS



شکل ۱۰- تغییرات تجمعی مشاهداتی مقدار آب دریاچه و کل آب حوضه حاصل از GRACE (نسبت به شهریور ۱۳۸۱)

که در آن $TWSC$ تغییرات کل آب در حوضه، P بارش، ET تبخیر- تعرق و LV حجم دریاچه می‌باشد. لازم به ذکر است در این معادله با توجه به بسته بودن حوضه مورد مطالعه عبارت مربوط به تغییرات حجم آب دریاچه جایگزین عبارت رواناب خروجی از حوضه شده است. بر این اساس مقادیر TWSC ماهانه تجمعی بدست آمده از مدل‌های GLDAS محاسبه و در شکل ۱۱ با داده‌های GRACE مقایسه شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، مقادیر TWSC بدست آمده از GRACE و GLDAS نشان‌دهنده وجود روند یکسان و مشابه در اطلاعات مذکور می‌باشد؛ اما دامنه تغییرات TWS مدل‌های GLDAS کمتر از GRACE است. در این بین مدل NOAH کاهش شدیدتری را نسبت به VIC نشان می‌دهد که ناشی از بیشتر بودن مقدار تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط آن می‌باشد. مقدار تغییر TWS بدست آمده از ماهواره GRACE و مدل‌های NOAH و VIC طی دوره زمانی مورد نظر به ترتیب برابر با ۱۷۲، ۳۱۳- و ۱۰۵ میلی‌متر است.

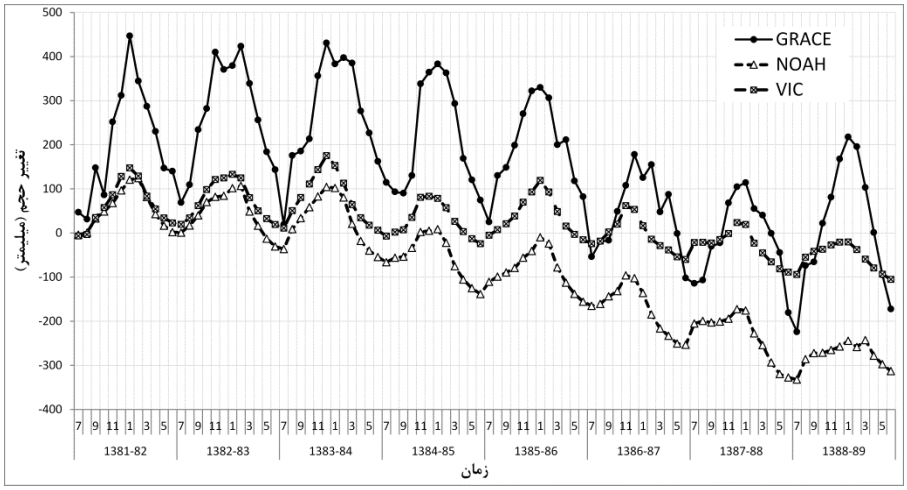
۳-۴- برآورد تغییرات آب زیرزمینی

همانطور که پیش از این ذکر شد، با استفاده از اطلاعات مدل‌های GLDAS و داده‌های GRACE می‌توان برآوردی در خصوص تغییرات آب زیرزمینی در سطح حوضه آبریز انجام داد. بر این اساس می‌توان از رابطه زیر جهت برآورد تغییرات آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات GLDAS استفاده نمود:

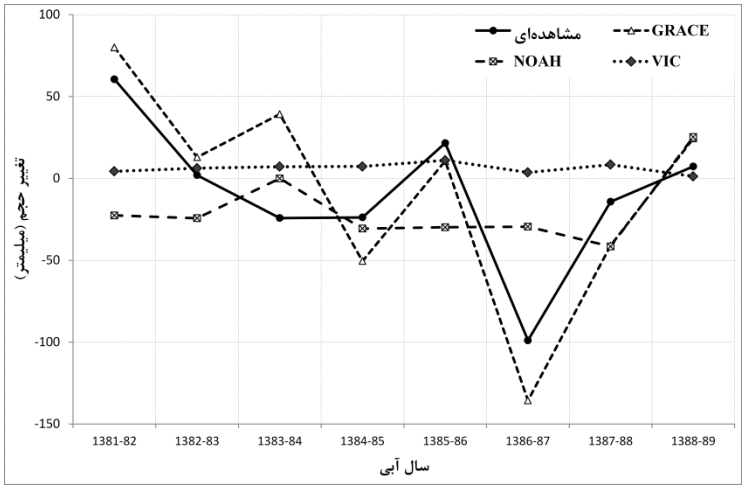
$$\Delta GW = TWSC - \Delta LV - \Delta SM - \Delta SWE \qquad (۴)$$

که در آن ΔSM تغییر رطوبت خاک، ΔSWE تغییر بودجه برفی حوضه و ΔGW تغییر در مقدار آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین می‌توان با فرض عدم تغییر در رطوبت خاک و صفر بودن ذخیره برفی حوضه در انتهای هر سال آبی (شهریور ماه) نسبت به سال قبل، مقدار تغییر سالانه آب زیرزمینی را بر مبنای TWSC حاصل از GRACE و مقدار مشاهداتی تغییرات حجم آب دریاچه محاسبه نمود.

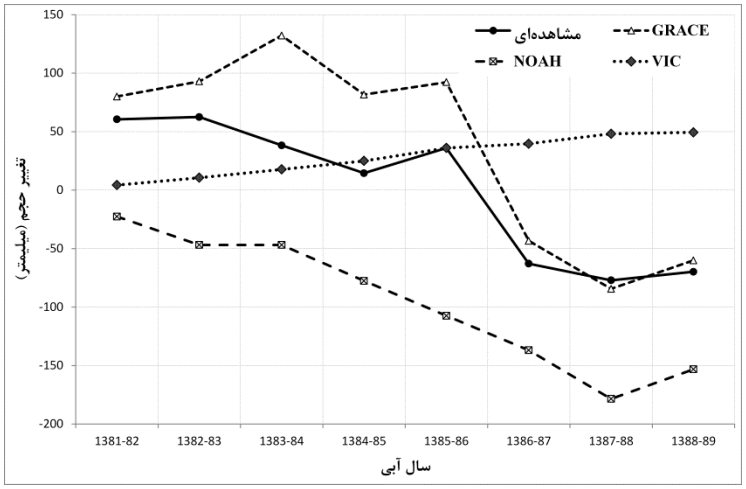
بر این اساس مقدار تغییرات حجم آب زیرزمینی در سطح حوضه با استفاده از اطلاعات GRACE و مدل‌های GLDAS محاسبه و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شدند که نتایج بر مبنای مقادیر تغییرات سالانه و تغییرات سالانه تجمعی آن‌ها به ترتیب در اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. اشکال نشان دهنده عملکرد بهتر GRACE در برآورد روند تغییرات آب زیرزمینی در حوضه می‌باشد؛ به نحوی که به جز در سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ که مقدار برآورد شده مثبت و مقدار مشاهداتی منفی بوده است، در بقیه سال‌ها روند یکسان و مقادیر نزدیک به هم می‌باشد. بروز این خطاهای موردی می‌تواند ناشی از ضعف اطلاعات ورودی مورد استفاده در تحلیل داده‌های خام ثبت شده توسط ماهواره‌های GRACE، نظیر اطلاعات مربوط به بخار آب اتمسفری باشد. لازم به ذکر است که برای این تحلیل‌ها از داده‌های سازمان‌های بین‌المللی هواشناسی که دسترسی مناسبی به داده‌های زمینی ایران برای تدقیق مدل‌های خود در سطح کشور ندارند، استفاده می‌شود. قابل قبول نبودن نتایج مدل‌های GLDAS را نیز می‌توان تا حد زیادی به همین امر، خصوصاً عدم دقت داده‌های بارش ورودی به مدل‌ها مرتبط دانست.



شکل ۱۱- تغییرات تجمعی ماهانه TWS برآورد شده توسط GRACE و GLDAS (نسبت به شهریور ۱۳۸۱)



شکل ۱۲- تغییرات سالانه حجم آب زیرزمینی حوضه



شکل ۱۳- تغییرات تجمعی سالانه حجم آب زیرزمینی حوضه (نسبت به شهریور ۱۳۸۱)

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر قابلیت اطلاعات به‌دست آمده از پروژه‌های GRACE و GLDAS برای انجام برآورد اولیه سریع و کم هزینه در مورد تغییرات آب زمینی در حوضه دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، پس از استخراج داده‌ها از پایگاه‌های اطلاعاتی، مرتب‌سازی و میانگین‌گیری مقادیر پیکسل‌های داده‌ها در سطح حوضه در مقیاس زمانی ماهانه انجام شد. مقایسه داده‌های بارش و دمای استفاده شده در مدل‌های GLDAS با مقادیر مشاهداتی آن در سطح حوضه نشان دهنده کمتر بودن مقادیر بارش و دمای استفاده شده در GLDAS می‌باشد که همین امر موجب کاهش قابل توجه دقت خروجی‌های این مدل‌ها شده است. همچنین تغییرات حجم دریاچه و تغییرات TWS در سطح حوضه بر مبنای اطلاعات ماهواره GRACE نشان دهنده رفتار یکسان در کاهش و افزایش اطلاعات مذکور بود، هر چند که اختلاف فازی در حدود ۲ ماه بین تغییرات آن‌ها مشاهده شد. بررسی مقدار TWSC به‌دست آمده از GRACE و GLDAS وجود روند یکسان در نتایج آن‌ها را نشان می‌دهد، هر چند اختلاف زیادی بین مقادیر به‌دست آمده از آن‌ها دیده می‌شود که علت آن را می‌توان به استفاده از داده‌های بارش کمتر از حد واقعی در مدل‌های GLDAS که موجب بروز بیلان منفی در محاسبات می‌شود، مربوط دانست. اختلاف نسبتا زیادی نیز در مقادیر TWSC دو مدل مورد استفاده در GLDAS مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان به برآورد زیادتر تبخیر- تعرق در مدل NOAH نسبت به VIC مرتبط دانست. برآورد تغییرات سالانه آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات GRACE و GLDAS نشان دهنده توانایی مناسب GRACE در برآورد روند تغییرات آب زیرزمینی و عدم نتایج قابل قبول مدل‌های GLDAS در این زمینه بود. در مجموع نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان دهنده قابلیت مناسب داده‌های GRACE برای برآورد سریع و کم هزینه بیلان آب در حوضه‌های آبریز بزرگ کشور می‌باشد.

پی نوشت‌ها

1-Terrestrial Water Storage
2-Terrestrial Water Storage Change
3-Gravity Recovery and Climate Experiment
4-Global Land Data Assimilation System
5-Haryana and Delhi
6-Punjab
7-Rajasthan
8-Biosphere Reserve
9-Convention of Ramsar
10-National Aeronautics and Space Administration
11-German Aerospace Centre
12-Equivalent Water Height
13-Jet Propulsion Laboratory
14-California Institute of Technology
15-Goddard Space Flight Center
16-National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
17-National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
18-Land Surface Models
19-NOAH:
N: National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
O: Oregon State University (Dept. of Atmospheric Sciences)
A: Air Force (both AFWA and AFRL - formerly AFGL, PL)
H: Hydrologic Research Lab
20-Community Land Model
21-Variable Infiltration Capacity
22-State Variables
23-Flux Variables

۵- مراجع

مرید س و همکاران (۱۳۹۰) گزارش مطالعات پایه طرح مدیریت خشکسالی دریاچه ارومیه، طرح حفاظت از تالاب‌های ایران، سازمان حفاظت محیط زیست.

بی‌نام (۱۳۸۵) گزارش مطالعات جامع منابع آب دریاچه ارومیه، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو.

Andersen OB, Seneviratne SI, Hinderer J, Viterbo P (2005) GRACE-derived terrestrial water storage depletion associated with the 2003 European heat wave. Geophysical Research Letters 32(18): L18405.

Eimanifar A, Mohebbi F (2007) Urmia lake (northwest Iran): a brief review. Saline Systems 3:5.

Habte-Haile K (2011) Estimation of terrestrial water storage in the upper reach of yellow river. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.

Rodell M, Houser P, Jambor UEA, Gottschalck J, Mitchell K, Meng C, et al. (2004) The global land data assimilation system. Bulletin of the American Meteorological Society 85(3):381-94.

Rodell M, Velicogna I, Famiglietti JS (2009) Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature 460:999–1002.

Strassberg G, Scanlon BR, Chambers D (2009) Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: case study of the high plains aquifer central United States. Water Resources Research 45:W05410.

Wahr J, Swenson S, Velicogna I (2006) Accuracy of GRACE mass estimates. Geophysical Research Letters 33:L06401.