

Changes in Water Surface of Aquifers Using GRACE Satellite Data in the Google Earth Engine: A Study of the Urmia Lake Watershed From 2002 to 2017

Vahid Issazadeh^{1*}, Meysam Argany²

1. Master's Student, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: June 12, 2020; Accepted: September 20, 2020)

Abstract

Investigating the changes in groundwater aquifers in planning the sustainable management of water resources in each region is of particular importance. Therefore, reducing the level of groundwater aquifer changes requires proper management and planning to exploit water resources. In this study, the level of groundwater aquifer changes in Urmia Lake basin was examined for the period from 2002 to 2017 using GRACE satellite data (JPL, GFZ, CSR triple bands, CRI Filtered model, time and space filter, and Lew-Thiknth uncertainty dry product) in the Google Earth Engine. The results of the triple bands showed that the JPL band estimated the average level of groundwater aquifer changes on May 1, 2004 as 14.947 cm, while the GFZ band on estimated this as -30.558 cm on September 1, 2015 and the CSR band estimated this amount as -28.206 cm. Therefore, CRI Filtered model can very accurately identify the boundary between land and water zones. The results showed that this model estimated the maximum thickness of liquid water in the groundwater aquifer at March 31, 2002 as about 11.599 cm and its uncertainty at about 9.767 cm. It can be said that the least amount of thickness of liquid water is estimated on 13 August 2015 as 12.309 cm with an uncertainty level of 10.759 cm. According to the results, the level of groundwater change in aquifers in terms of liquid water thickness parameter (Lew-Thiknth) in the northern parts of the Urmia Lake basin and in terms of uncertainty in the northeastern part of the Urmia Lake basin is experiencing a strong decline in the aquifer water levels.

Keyword

GRACE satellite data, Urmia Lake basin, Aquifer, Google Earth Engine.

* Corresponding Author, Email: argany@ut.ac.ir

تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE در موتور گوگل ارث (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷)

وحید عیسی‌زاده^۱، میثم ارگانی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰)

چکیده

بررسی تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی در برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب هر منطقه از اهمیتی ویژه برخوردار است. بنابراین کاهش سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی درست برای بهره‌برداری از منابع آب است. در این مطالعه سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE (باند‌های سه‌گانه JPL و GFZ و CSR). مدل CRI Filtered، فیلتر زمانی و مکانی و پروداکت خشکی (Lew-Thiknth Uncertainty) در موتور گوگل ارث مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ بررسی شد. نتایج حاصل از باندهای سه‌گانه نشان داد باند JPL در ۱ مه ۲۰۰۴ میانگین سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را ۱۴/۹۴۷ سانتی‌متر، باند GFZ در ۱ سپتامبر ۲۰۱۵ این تغییرات را ۳۰/۵۵۸- سانتی‌متر، و باند CSR این تغییرات را ۲۸/۲۰۶- سانتی‌متر برآورد کرده است. بنابراین، مدل CRI Filtered می‌تواند مرز میان پهنه‌های خشکی و آبی را به طور بسیار دقیق تشخیص دهد. نتایج حاصله نشان داد این مدل بیشترین ضخامت کل آب مایع در سفره آب‌های زیرزمینی را در ۳۱ مارس ۲۰۰۲ حدود ۱۱/۵۹۹ سانتی‌متر و عدم قطعیت آن را حدود ۹/۷۶۷ سانتی‌متر برآورد کرده است. می‌توان گفت مدل مورد نظر، در ۲۲ مه ۲۰۱۷، کمترین میزان ضخامت کل آب مایع را ۱۲/۳۰۹- و عدم قطعیت آن را ۱۰/۷۵۹ سانتی‌متر تخمین زده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت میزان سطح تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه از نظر پارامتر ضخامت کل آب مایع (Lew-Thiknth) در قسمت‌های شمالی حوضه دریاچه ارومیه و از نظر پارامتر عدم قطعیت در قسمت شمال شرقی حوضه دریاچه ارومیه به‌شدت با افت سطح آب سفره‌های زیرزمینی روبه‌روست.

کلیدواژگان

حوضه دریاچه ارومیه، داده‌های ماهواره GRACE، سفره آب‌های زیرزمینی، موتور گوگل ارث.

* رایانامه نویسنده مسئول: argany@ut.ac.ir

مقدمه

آب زیرزمینی به آبی گفته می‌شود که در لایه‌های آبدار و اشباع زیر زمین تجمع پیدا کرده است. این آب‌ها فقط حدود ۴ درصد از مجموعه آب‌هایی است که فعالانه در چرخه آب‌شناختی دخالت دارند و حدود چهار میلیون متر مکعب از ذخایر آب جهان را تشکیل می‌دهند. آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب در همه کشورهای محسوب می‌شوند و استفاده از آن‌ها، چه در آبیاری کشاورزی چه در مصارف شهری و صنعتی، رو به افزایش است (رضایی و همکاران ۱۳۸۹: ۸۹-۹۸). منابع آب زیرزمینی بزرگ‌ترین ذخیره قابل دسترس آب شیرین در کره زمین است. به دلیل اینکه ۹۷ درصد منابع آبی شور هستند، انسان مقدار بسیار محدودی از آن‌ها را به طور مستقیم استفاده می‌کند (خلیلیان و مهرجردی ۱۳۸۴: ۸۳-۹۶). امروزه کمبود آب یکی از تنگناهای توسعه اقتصادی ایران، به‌ویژه در بخش کشاورزی، است. گرچه آماری مدون در دسترس نیست، به گمان غالب، افت سطح آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین عامل وجود صدها روستای خالی از سکنه در مرکز و جنوب و شرق ایران است. استخراج بیش از اندازه آب و حفر چاه‌های بدون پروانه، در سرزمینی که میانگین بارندگی ۴۷ درصد از پهنه آن فقط ۱۱۵ میلی‌متر تخمین زده می‌شود، خشکی بسیاری از چاه‌ها و کاریزها را موجب شده است (کوثر ۱۳۷۴: ۵۵۲). بنابراین، نیاز فزاینده به منابع آب در ایران موجب بهره‌برداری بی‌رویه و سبب بر هم خوردن تعادل طبیعی منابع آب زیرزمینی شده است؛ طوری که تراز سفره‌های آبدار در بسیاری از نقاط کشور منفی است (هندآبادی ۱۳۷۵). ایران از نظر جغرافیایی در منطقه‌ای از جهان واقع شده که متوسط بارندگی آن ۲۵۰ میلی‌متر (یک‌سوم متوسط بارندگی سالیانه جهان) است (علی‌زاده ۱۳۸۶: ۸۰۸). در حال حاضر، به دلیل برداشت بیش از حد مجاز آب از سفره‌های زیرزمینی، بسیاری از قنات‌ها خشک شده یا در حال نابودی است. کاهش حجم آب‌های زیرزمینی از یک سو و فعالیت‌های انسان از سوی دیگر موجب کاهش کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی و تخریب اراضی با گذشت زمان می‌شود. بر پایه آمار سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲، در کشور حدود ۷۴/۶ میلیارد متر مکعب آب از طریق چاه‌ها و چشمه‌ها و قنات‌ها برداشت شده است (هاشمی‌نژاد و همکاران ۱۳۸۵). بنابراین، محدودیت آب و کمبود منابع آبی، به منزله حیاتی‌ترین نیاز زندگی انسان‌ها و گیاهان و جانوران، موضوعی است که در بسیاری از کشورها به مثابه یکی از تنگناهای توسعه اقتصادی مطرح می‌شود. متأسفانه در ایران

بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، به دلیل صرفه اقتصادی آن، گسترش قابل ملاحظه‌ای یافته که بدون برنامه‌ریزی در جهت توسعه و ماندگاری منابع آب زیرزمینی صورت گرفته است. در بسیاری از نقاط کشور، بیلان آب‌های زیرزمینی منفی است و این وضعیت به علت حفر چاه‌های غیر مجاز و پمپاژ بی‌رویه شدت بیشتری یافته است. تقریباً همه سفره‌های آبی در مناطق کویری و حاشیه کویر و فلات مرکزی، که آب‌وهوای خشک دارند، در معرض این خطرند؛ به نحوی که در بسیاری از آن‌ها حفر چاه ممنوع شده است. بدیهی است اگر برنامه‌ریزی جامعی برای نواحی مختلف که دارای استرس آبی هستند صورت نگیرد، باید انتظار داشت هر روز بر وسعت کویرها و اراضی لم‌یزرع افزوده شود و مهاجرت مردم از محل مسکونی خود به سوی شهرها یا نقاطی که از نظر آب غنی هستند به مشکلی اقتصادی-اجتماعی تبدیل شود (افضل‌اولی ۱۳۷۷: ۱۵۴). با توجه به اینکه در سال‌های اخیر حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با تغییرات زیادی- همانند وقوع خشک‌سالی‌ها، کاهش منابع آب سطحی، خشک شدن رودخانه‌های فصلی و در نتیجه خشک شدن سطح تالاب‌های حوضه دریاچه ارومیه در مرکز این حوضه و افت سطح آب زیرزمینی- روبه‌رو بوده است و با در نظر گرفتن این موضوع که سفره آب‌های زیرزمینی در تأمین آب نقش مهمی دارد و اینکه تا کنون مطالعه‌ای عمیق با فناوری سنجنش از دور در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه انجام نشده است، پژوهشگران در پژوهش حاضر بر آن بودند که محدودیت‌ها و روند تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی این حوضه را بررسی و با توجه به روند موجود تغییرات آن‌ها را در آینده با تأکید بر بررسی علل افت کمی و با هدف کنترل و سازماندهی آن‌ها پیش‌بینی کنند. در این پژوهش از مدل سری زمانی برای تعیین کارایی آن‌ها استفاده و پیش‌بینی‌های میزان افت تراز بررسی و اولویت‌بندی شد. علت انتخاب حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، به عنوان منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر، تغییرات در سطح سفره آب‌های زیرزمینی این حوضه بود. اگر بهره‌برداری آب از سفره‌های زیرزمینی در این منطقه بیش از حد صورت گیرد، بحران‌های اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی در منطقه به وجود می‌آورد. بنابراین، با فناوری روز دنیا، از جمله سنجنش از دور، می‌توان نحوه ارزیابی استفاده درست از منابع آب‌های زیرزمینی را در اختیار مدیران و کارشناسان قرار داد. حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، طی سال‌های اخیر، دچار افت تراز شدیدی شده که بخش عمده آن در اثر کاهش جریان‌های سطحی ورودی به آن بوده است. در این خصوص، عواملی از قبیل تغییر

اقلیم و تغییر کاربری اراضی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب دلایل اصلی سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه شناخته شده است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE در سامانه موتور گوگل ارث در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ بود.

پیشینه تجربی پژوهش

کاهش سفره آب‌های زیرزمینی، در جایگاه ارزشمندترین منابع آب‌های شیرین، ناشی از عوامل مختلف اقلیمی و انسانی، اثری مخرب- از جمله کاهش تأمین آب، کاهش مقاومت خاک، پدیده فرونشست زمین، و ... در یک منطقه بر جای می‌گذارد. از سویی سطح سفره‌های آب زیرزمینی در بلندمدت به گونه‌ای می‌تواند کاهش یابد که برای بارش‌های بعدی قابلیت احیا را از دست بدهد. در نتیجه، رودخانه‌ها و تالاب‌ها خشک و پمپاژ این آب‌ها به سطح زمین ناممکن خواهند شد. این وضعیت در نهایت به فجایع زیست‌محیطی و قحطی می‌انجامد. بنابراین، با توجه به اهمیت زیاد منابع آب زیرزمینی و مخاطره‌آمیز بودن برداشت بیش از حد از منابع، مطالعه و یافتن عوامل مؤثر بر این پدیده و اولویت‌بندی آن‌ها و بررسی تغییر سطح سفره آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر در مدیریت این منابع اهمیتی ویژه یافته است. در این زمینه، در دنیا مطالعات گوناگونی انجام شده است. مکی و همکارانش (۲۰۱۴) با استفاده از یک مدل مفهومی یکپارچه سری زمانی تراز آب زیرزمینی را در چهار آبخوان آزاد انگلستان شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد مدل Aquimod، در عین سرعت اجرا، توانایی پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی را در آبخوان دارد. چن و همکارانش (۲۰۱۶)، با هدف یافتن روشی برای افزایش دقت داده‌های GRACE، به بررسی داده‌های این ماهواره طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ پرداختند. در این تحقیق از داده‌های مرکز پردازش GFZ و CSR و JPL استفاده و داده‌های ماهواره GRACE با استفاده از فیلتر گاوسی ۳۰۰ کیلومتر اصلاح شد. مقایسه تغییرات ذخیره آب داده‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده ماهواره GRACE نشان‌دهنده بهبود روند تغییرات در داده‌های اصلاح‌شده بود. لی و همکارانش (۲۰۱۴)، پس از محاسبه بیلان آب در استان جیونجی در کره جنوبی، تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را با داده‌های مدل GLDAS و ماهواره GRACE مقایسه کردند. نتایج نشان داد در فصل‌هایی که مقدار بارش زیاد است داده‌های GLDAS دقت

بیشتری نسبت به داده‌های GRACE دارند. زیائو و همکارانش (۲۰۱۶) در تحلیل تغییرات زمانی- مکانی سطح آب زیرزمینی در دشت‌های پای‌کوهی شمال غرب چین از مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی بهره‌جستند. نتایج حاکی از برازش بهتر روش کریجینگ ساده نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی بود. لیو و همکارانش (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای تغییرات زمانی و مکانی خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از شاخص سطح آب‌های زیرزمینی استاندارد (SGI) بر اساس چهل سال مشاهدات ماهیانه سطح آب‌های زیرزمینی چاه در بازه سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۲ در استان جیانگ سو چین بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند رابطه SGI و SPI در مناطق مختلف متفاوت است. ادیکاری و همکارانش (۲۰۱۳) در تحقیقی با عنوان «بررسی خشک‌سالی آب‌های زیرزمینی در شمال شرق بنگلادش» به این نتیجه رسیدند که به دلیل برداشت بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی شدت خشک‌سالی افزایش یافته است. فرخ‌نیا و همکارانش (۱۳۹۳) قابلیت داده‌های ماهواره‌های GRACE و مدل GLDAS را در برآورد بیلان آب و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بررسی کردند. نتایج نشان داد تغییرات حجم آب دریاچه نسبت به تغییرات GRACE تأخیری دو ماهه دارد. اشرف‌زاده و همکارانش (۲۰۱۵) منابع آب زیرزمینی جنوب ایران، در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰، را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد منابع آب زیرزمینی در این محدوده با کاهش محسوس مواجه بوده و ماهواره GRACE این روند کاهشی را نشان داده است. فلاح و همکارانش (۱۳۹۵) با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و آماری به بررسی پتانسیل منابع آب زیرزمینی محدوده خرم‌آباد پرداختند. نتایج نشان داد این روش با صحت‌سنجی ۸۲ درصد مدلی قابل اعتماد در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه است. جاودانیان و همکارانش (۱۳۹۵) با بررسی میزان برداشت از منابع سفره آب‌های زیرزمینی و وضعیت فرونشست شهر دامنه اصفهان نشان دادند افت سطح آب زیرزمینی اثری مستقیم بر ایجاد و گسترش فرونشست در محدوده این شهر داشته و بیشترین میزان بهره‌برداری از آبخوان‌های منطقه به مصارف کشاورزی اختصاص یافته است. کیانی و همکارانش (۱۳۹۶) به بررسی پتانسیل فرونشست شهر کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS پرداختند و نشان دادند وضعیت افت آب‌های زیرزمینی طی دوره آماری پانزده‌ساله حدود ۱۴ متر بوده که می‌تواند در فرونشست کلی منطقه تأثیر بسزایی بگذارد.

پیشینه نظری پژوهش

آب‌های زیرزمینی

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب شیرین مورد نیاز انسان در جهان‌اند که بعد از یخچال‌ها و پهنه‌های یخی بزرگ‌ترین ذخیره آب شیرین زمین را تشکیل می‌دهند. در حال حاضر برداشت آب از منابع زیرزمینی ایران بالغ بر ۷۹ میلیارد مکعب است که بیش از ۹۰ درصد آن در کشاورزی مصرف می‌شود. بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی با حفر چاه و قنات پیشه قدیمی ایرانیان بوده است. با ورود فناوری چاه و پمپ، به تدریج سطح ایستابی در اکثر دشت‌ها افت پیدا کرد و تعداد زیادی از آن‌ها خشک یا شور شدند (بهارلویی ۱۳۹۲). علاوه بر برداشت بی‌رویه آب از چاه‌ها، نوسان عوامل اقلیمی، از جمله بارندگی، در کاهش سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی نقشی مؤثر داشته است.

ماهواره‌های GRACE

ماهواره‌های دو قلو GRACE، که سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا (NASA) و مرکز هوا-فضای آلمان (DLR) در سال ۲۰۰۲ آن را به فضا پرتاب کردند، اندازه‌گیری تغییرات زمانی میدان گرانش زمین را انجام می‌دهد که می‌تواند در برآورد TWSC به کار گرفته شود. GRACE اولین ماهواره‌ای است که امکان ارزیابی مستقیم TWSC را در شرایط آب‌وهوایی فراهم کرد. ماهواره‌های GRACE تغییرات مقدار آب در سطح زمین را به صورت غیر مستقیم و از طریق برآورد تغییرات زمانی میدان ثقل زمین اندازه می‌گیرند 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 می‌کنند. زمانی که مقدار گرانش زمین در زیر ماهواره جلو افزایش می‌یابد، سرعت حرکت آن نسبت به ماهواره عقب‌تر افزایش می‌یابد و در نتیجه فاصله بین آن‌ها بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، تغییر در گرانش موضعی زمین موجب تغییر موضعی در فاصله حرکتی بین دو ماهواره متوالی می‌شود. این تغییرات فاصله به صورت لحظه‌ای توسط یک سیستم اندازه‌گیری بسیار دقیق، مبتنی بر موج کوتاه، در باند K ثبت می‌شود و پس از محاسبات پیچیده به تغییرات ارتفاع آب‌های زیرزمینی در موقعیت زمان و مکان‌های مختلف می‌پردازد (Wahr et al 2006).

موتور گوگل ارث

از دیگر منابع اطلاعاتی و نرم‌افزارهای استفاده‌شده در پایش زمانی تغییرات کاربری اراضی و تغییرات سطح پهنه‌های آبی و تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی می‌توان به سامانه تخصصی سنجش از دور تحت وب، مانند سامانه موتور گوگل ارث (GEE^۱)، اشاره کرد. این سامانه توانسته است بسیاری از فرایندهای پردازش تصاویر ماهواره‌ای را در سال‌های اخیر آسان کند. در سامانه موتور گوگل ارث امکان استخراج اطلاعات منابع آبی- مانند مساحت سطح آب، رطوبت سطحی و زیر سطحی، بارش باران، نسبت پوشش برف، عمق برف، آب معادل برف، رواناب، آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، آشکارسازی مناطق سیل‌زده، پایش خشک‌سالی- فراهم است و تحقیقات متعددی در این زمینه صورت گرفته است. در حال حاضر، ابزارهای مبتنی بر سیستم‌های عامل محاسبات ابری^۲ برای پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس بزرگ و بدون نیاز به تخصص فنی درخور توجهی طراحی شده‌اند. موتور گوگل ارث یکی از این پلتفرم‌های مبتنی بر محاسبات ابری^۳ است که می‌تواند داده‌های موجود در پایگاه داده را پردازش و نتایج مناسب را ارائه کند. پایگاه داده عظیمی از تصاویر لندست برای تحلیل جامع تغییرات کاربری اراضی و پهنه‌های آبی از ژانویه ۲۰۰۸ آماده شده است (Wulder et al 2019).

رامپلین و همکارانش (۲۰۰۸) به ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ در حوضه رودخانه آمازون پرداختند. بدین منظور از داده‌های دو ایستگاه در حوضه مد نظر استفاده و پس از اصلاح داده‌های ماهواره GRACE روند تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده بیش‌برآوردی معادل ۴۰۰ میلی‌متر در داده‌های ماهواره GRACE نسبت به داده‌های ایستگاهی بود. همچنین نتایج بیانگر آن بود که چگونگی اصلاح داده‌های GRACE در نتایج نهایی بسیار تأثیرگذار است. لانگو و همکارانش (۲۰۱۰) داده‌های مرکز پردازش GRGS و CSR ماهواره GRACE را در حوضه‌ای به مساحت ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ ارزیابی کردند. در این پژوهش برای اصلاح داده‌های ماهواره GRACE از فیلتر گاوسی ۳۰۰ کیلومتر

-
1. Google Earth Engine
 2. Cloud computing operating systems
 3. Cloud computing platform

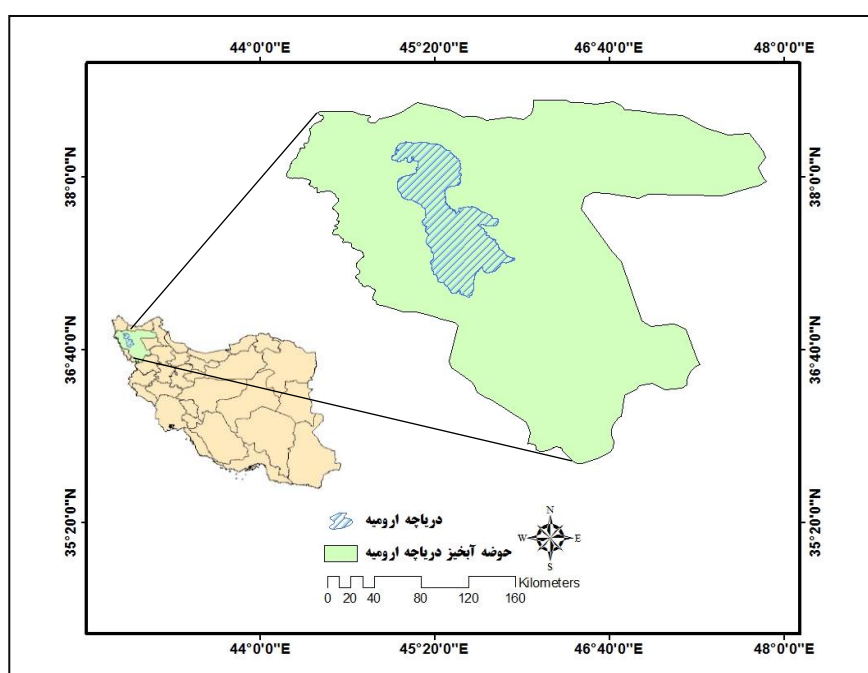
استفاده شد. پس از مقایسه روند تغییرات ذخیره آب به دست آمده از مدل GLDAS، ماهواره GRACE، و داده‌های چاه پیزومتری مشخص شد ماهواره GRACE روند تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را بهتر از مدل GLDAS نشان می‌دهد. ژانگ و همکارانش (۲۰۰۹) الگوی مکانی و زمانی مقادیر حداقل و حداکثر تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی در ناحیه دلتای رودخانه پرل چین را با روش من-کندال و روش پیش‌سفید کردن شناسایی کردند. نتایج نشان داد در قسمت بالایی دلتا روند تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی کاهش و در قسمت میانی و پایینی آن افزایشی است.

امیر عطایی و همکارانش (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای در غرب دریاچه ارومیه به بررسی روند کمی و کیفی در آب‌های زیرزمینی با توجه به ضرایب همبستگی با آزمون‌های من-کندال و من-کندال اصلاح شده پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که در غرب دریاچه ارومیه ۹۳ درصد از آماره Z دارای روند کاهش (منفی) بوده است. پس از حذف اثر ضرایب همبستگی در آزمون من-کندال اصلاح شده در حدود ۱۸ درصد کاهش روند در سطح سفره آب‌های زیرزمینی مشاهده شد. تمرکز خاکی و همکارانش (۲۰۱۸) در شناسایی تخلیه سفره آب‌های زیرزمینی ایران با ترکیب داده‌های گریس در مدل آب‌شناختی W3RA بر تغییر منابع آبی زیر سطحی و رطوبت خاک در شش بخش اصلی آبخیز ایران بود. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد سفره آب‌های زیرزمینی ایران در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ به طور متوسط $-8/9$ میلی‌متر در سال کاهش یافته است. نتیجه مطالعه جودکی (۲۰۱۴) در بررسی نوسان تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی منطقه خاورمیانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ با ماهواره گریس کاهش چشم‌گیر تراز ایست‌آبی آبخوان‌های غرب ایران و شمال عراق را نشان داد. چاه‌های مشاهده‌ای نصب شده در آبخوان‌های غرب کشور و بررسی‌های سنجش از دور در این نُه سال نشان‌دهنده بیش از ۲۵ گیگا تن بر سال کاهش آب‌های زیرزمینی بود. با حذف آثار طبیعی، افت آب زیرزمینی به دلیل برداشت بی‌رویه بوده است.

محدوده و قلمرو مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به منزله یکی از حوضه‌های آبریز شش‌گانه اصلی ایران، در شمال غرب کشور واقع شده و بخش وسیعی از اراضی استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی و کردستان را شامل می‌شود. این حوضه، با وسعتی برابر ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع و مساحتی معادل ۳/۲

درصد مساحت کل کشور، بین مدارهای ۴۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. سیزده رودخانه اصلی زهکشی جریان‌های سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را به عهده دارند و رودخانه‌های یادشده، پس از تأمین آب کشاورزی و شرب اراضی دشت‌های حاصلخیز و مناطق مسکونی مسیر جریان، خود به دریاچه ارومیه تخلیه می‌شوند.



شکل ۱. موقعیت استانی و کشوری منطقه مورد مطالعه

روش و ابزار پژوهش

برای انجام دادن پژوهش حاضر ابتدا در نرم‌افزار ARC GIS شیب فایل حوضه دریاچه ارومیه استخراج شد و بعد از آن شیب فایل مورد نظر به فایل Zip تبدیل و از طریق موتور گوگل ارث با استفاده از گزینه Assets اقدام به فراخوانی شیب فایل منطقه مورد مطالعه شد. در این پژوهش پژوهشگران از پروداکت خشکی داده‌های ماهواره GRACE برای مطالعه سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی

حوضه دریاچه ارومیه از موتور گوگل ارث استفاده کردند تا بتوانند میزان سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه را نشان دهند. بنابراین، برای پروداکت خشکی ماهواره GRACE از باندهای سه‌گانه مراکز تحقیقاتی (CSR^۱, GFZ^۲, JPL^۳)، و مدل CRI Filtered که یکی از مدل‌های بسیار دقیق برای تخمین خشکی‌ها و دارای نویز کمتری نسبت به دیگر پروداکت‌ها از نظر داده‌های ماهواره‌ای GRACE است، در پژوهش حاضر استفاده شد. این مدل مرز بین خشکی و آب را دقیق‌تر تخمین می‌زند. این مدل به مثابه شبکه جمعی ماهیانه GRACE Tellus ناهنجاری‌های گرانشی را نسبت به یک میانگین، که زمان شروع آن ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ است، فراهم می‌کند. داده‌های موجود در مدل CRI Filtered مجموعه داده‌های واحدی از ضخامت آب مایع است که بیانگر انحراف جرم از نظر میزان عمودی آب است که واحد آن سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود، پروداکت‌های Lew_Thiknth، Uncertainty برای سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ در پژوهش حاضر استفاده شد برای فراخوانی این پروداکت‌ها در موتور گوگل ارث، ابتدا شناسه تصویر ماهواره‌ای GRACE از قسمت سرچ موتور گوگل ارث دریافت شد و شناسه پروداکت خشکی در قسمت Script نویسی مورد استفاده قرار گرفت. در نتیجه یک فیلتر مکانی و یک فیلتر زمانی برای شناسه داده مورد نظر استفاده شد. با توجه به نمونه‌برداری و پس از پردازش مشاهدات GRACE مشخص شد تغییرات جرم سطح در مقیاس‌های مکانی کوچک تمایل به ضعیف شدن دارند. بنابراین، کاربران باید از داده‌های CRC Tell us Land در مقیاس‌گذاری استفاده کنند. داده‌های به‌کاررفته در این پژوهش در جدول ۱ و باندهای مدل CRI Filtered در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی بر اساس اطلاعات مراکز تحقیقاتی سه‌گانه اندازه‌گیری ضخامت آب مایع

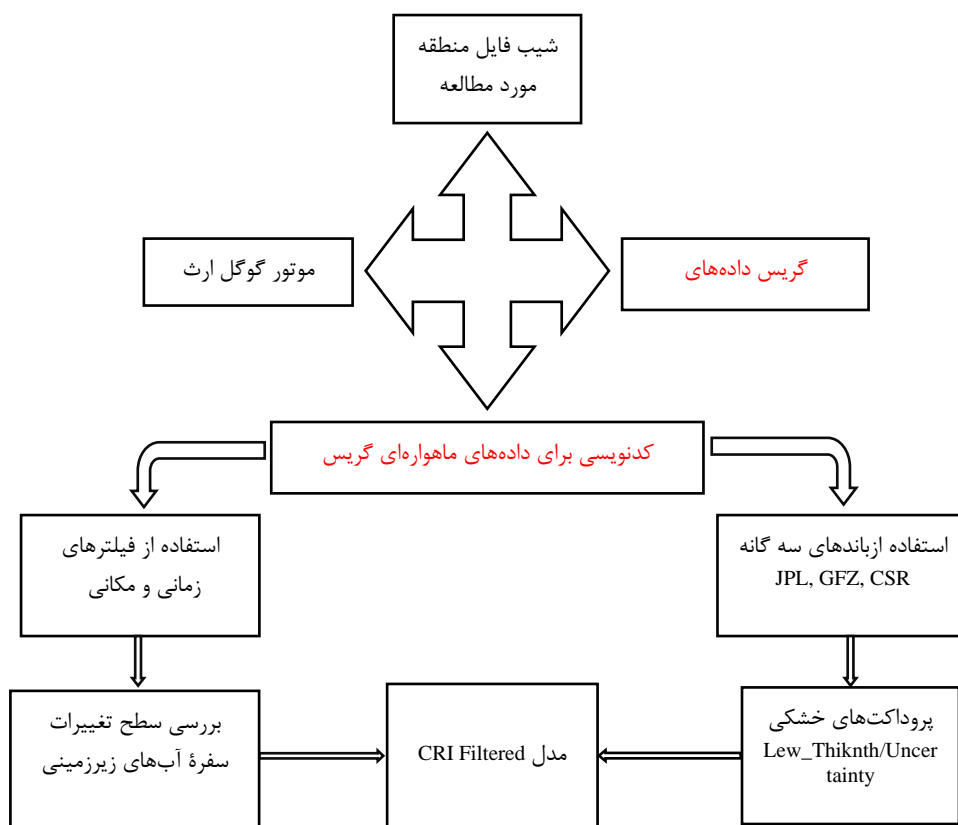
واحد	حداکثر	حداقل	نام
Cm	۷۴/۸۸	-۱۳۹/۲	اندازه ضخامت آب مایع بر اساس اطلاعات مرکز CSR
Cm	۷۰/۱۹	-۱۴۵/۴۵	اندازه ضخامت آب مایع بر اساس اطلاعات مرکز GFZ
Cm	۷۱/۸۶	-۱۳۷/۹۴	اندازه ضخامت آب مایع بر اساس اطلاعات مرکز JPL

1. Centre for Space Research (CSR), Austin, Texas, USA
2. GeoForschungs Zentrum (GFZ), Potsdam, Germany
3. Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, California, USA

جدول ۲. باندهای مورد استفاده برای مدل CRI Filtered

نام	حد اقل	حد اکثر	واحد
ضخامت آب مایع	-۵۷۰/۶۵	۴۹۵/۵۳	Cm
عدم قطعیت	۰/۲۹	۳۱/۱	Cm

مراحل بررسی سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فلوچارت کلی مراحل پژوهش

جدول ۳. کدها و اسکریپت‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه در موتور گوگل ارث با استفاده از ماهواره GRACE

```
Map.centerObject (table);
Map.addLayer (table);
Var grace = ee.ImageCollection ('NASA/GRACE/MASS_GRIDS/LAND')
.filter Bounds (table)
.filter Date ('2002-01-01','2017-01-01');
Print (grace);
Var chart = ui.Chart.image.series (grace, table, e.Reducer.mean ()
, 1000, 'system: time start');
Print (chart);
//grace mascon cri
Var grace = ee.ImageCollection ('NASA/GRACE/MASS_GRIDS/MASCON_CRI')
.filter Bounds (table)
.filter Date ('2002-01-01','2017-01-01');
Print (grace);
Var chart = ui.Chart.image.series (grace, table, e.Reducer.mean ()
, 1000, 'system: time start');
Print (chart);
// grace raster
Var grace = ee.ImageCollection ('uncertainty')
.filter Bounds (table)
.filter Date ('2002-01-01','2017-01-01')
//.median ()
//.clip (table);
//Map.addLayer (grace)
Print (chart)
```

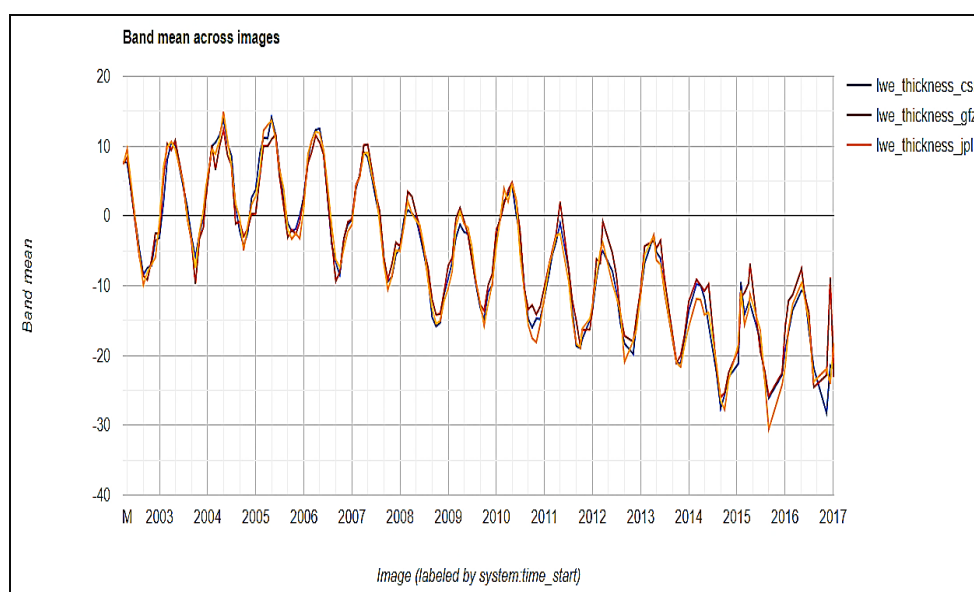
یافته‌های پژوهش

میانگین تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی بر اساس باندهای سه‌گانه JPL, GFZ, CSR

برای محاسبه تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی در موتور گوگل ارث از باندهای سه‌گانه مراکز تحقیقاتی استفاده شد.

منطقه مورد نظر را معادل شیب فایل منطقه مورد مطالعه قرار دادیم و میزان کاهش تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را معادل میانگین به کار بردیم که در این مطالعه آزمایشگاه محرکه موتور جت JLP در ۱ مه ۲۰۰۴ میانگین کل سطح تغییرات سفره آب زیرزمینی را حدود ۱۴/۹۷۴ سانتی‌متر برآورد کرده است؛ درحالی‌که آزمایشگاه محرکه موتور جت GFZ در ۱ سپتامبر ۲۰۱۵ میانگین کل سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را برای حوضه دریاچه ارومیه حدود ۳۰/۵۵۸- سانتی‌متر برآورد کرده است. اما مرکز تحقیقات فضایی امریکا (CSR) میانگین تغییرات سفره

آب‌های زیرزمینی را در ۱۳ نوامبر ۲۰۱۶ حدود $28/256$ سانتی‌متر نشان داده است. با توجه به شکل ۳، می‌توان گفت بیشترین تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی را آزمایشگاه موتور محرکه جت JPL ثبت کرده است. در نتیجه میانگین کل تغییرات ثبت شده برای هر سه مرکز تحقیقاتی از ۱ مه ۲۰۰۲ شروع شده و تا سال ۲۰۱۷ روندی نزولی به خود گرفته است و تا امروز هم می‌توان شاهد این تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی در سطح کل حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بود.

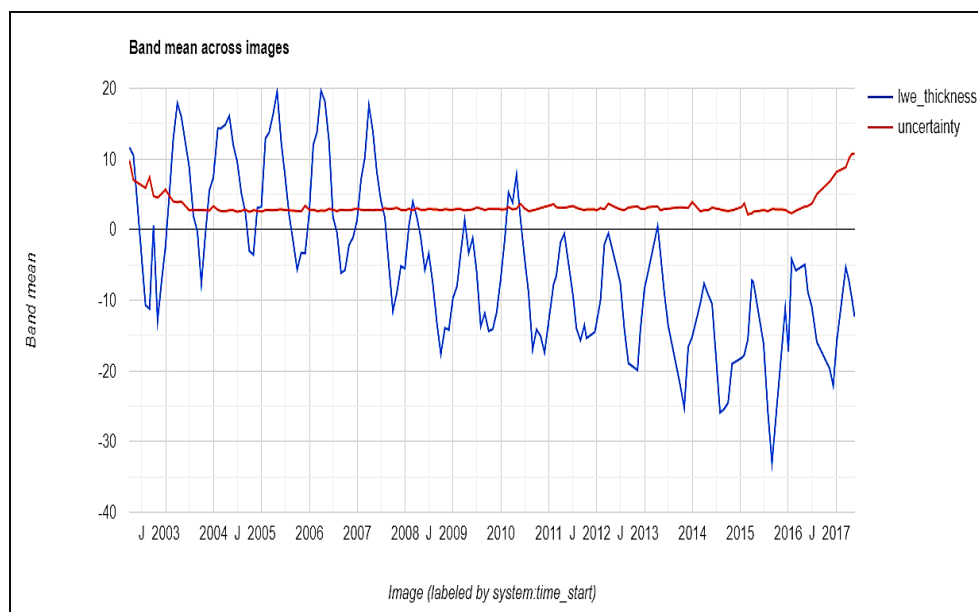


شکل ۳. روند میانگین تغییرات سفره آب زیرزمینی بر اساس مراکز تحقیقات سه‌گانه

پیش‌بینی میزان افت تراز سفره آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل CRI Filtered

مجموعه داده‌های Global Mascon (GRC Tellus) GRACE Tellus مبتنی بر مشاهدات سطح ۱ است و در آزمایشگاه موتور محرکه جت ناسا (JPL) پردازش می‌شود و از محدودیت‌های پیش‌بینی در فضا و زمان برای تخمین زمینه‌های گرانش جهانی و ماهیانه بر حسب توابع مساوی سه درجه در سه درجه غلظت جرم کروی (Mascon) استفاده می‌کند تا اثر خطاهای اندازه‌گیری را به حداقل برساند. این نتایج باعث می‌شود نسبت S/N بهتری از Masconها نسبت به محلول کروی- هارمونیک معمولی داشته باشد. قدرت تفکیک مکانی این مدل از نظر بانندی ۰/۵ درجه

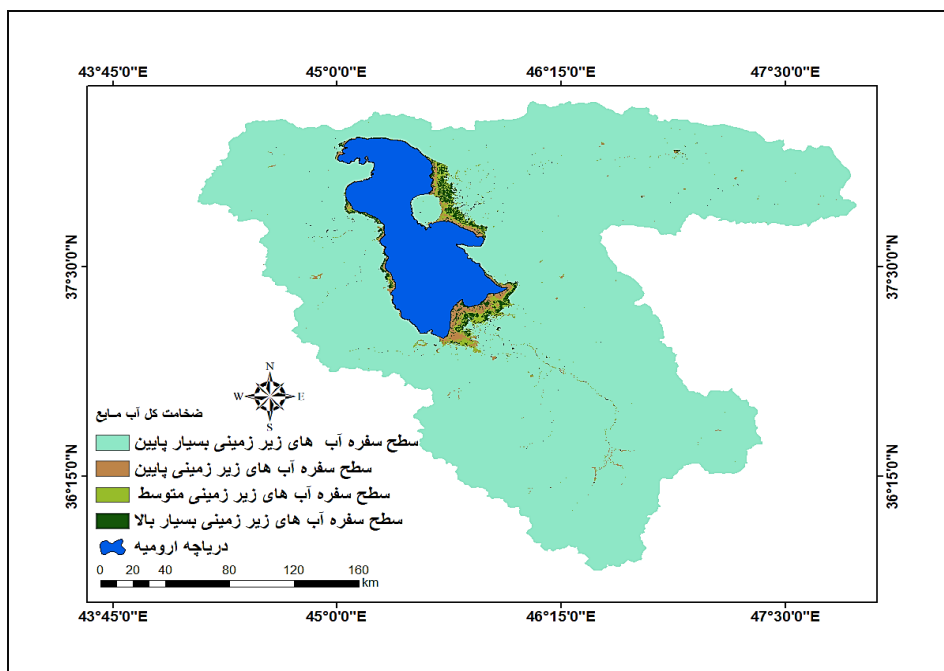
(۵۵,۵ کیلومتر) در نظر گرفته شده است. نتایجی که از مدل CRI Filtered به دست آمده نشان دهنده این است که این مدل ضخامت کل آب مایع حوضه آبخیز دریاچه ارومیه در ۳۱ مارس ۲۰۰۲ را ۱۱/۵۹۹ سانتی متر نشان داده است. در حالی که عدم قطعیت ضخامت کل آب مایع حوضه در همین بازه به ۹/۷۶۷ سانتی متر رسیده است. بنابراین، در ۳۱ مارس ۲۰۰۶ میزان ضخامت کل آب مایع حوضه آبخیز عدد ۱۹/۶۶۹ سانتی متر و میزان عدم قطعیت ضخامت کل آب مایع حوضه عدد ۲/۶۸۸ سانتی متر را نشان داد و در ۱۱ آوریل ۲۰۱۵ ضخامت کل آب مایع عدد ۷/۴۴۱- سانتی متر و عدم قطعیت آن عدد ۲/۵۳۱ سانتی متر را نشان داد. در ۲۲ مه ۲۰۱۷ ضخامت کل آب مایع عدد ۱۲/۳۰۹- سانتی متر و عدم قطعیت آن عدد ۱۰/۷۵۹ سانتی متر را برای حوضه آبخیز نشان داد. می توان گفت ضخامت کل آب مایع حوضه آبخیز دریاچه ارومیه برای سال های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ به شدت با افت تراز سطح سفره آب های زیرزمینی روبه رو بوده است. نتایج حاصل از پیش بینی میزان افت تراز سفره آب های زیرزمینی در شکل ۴ نشان داده شده است.



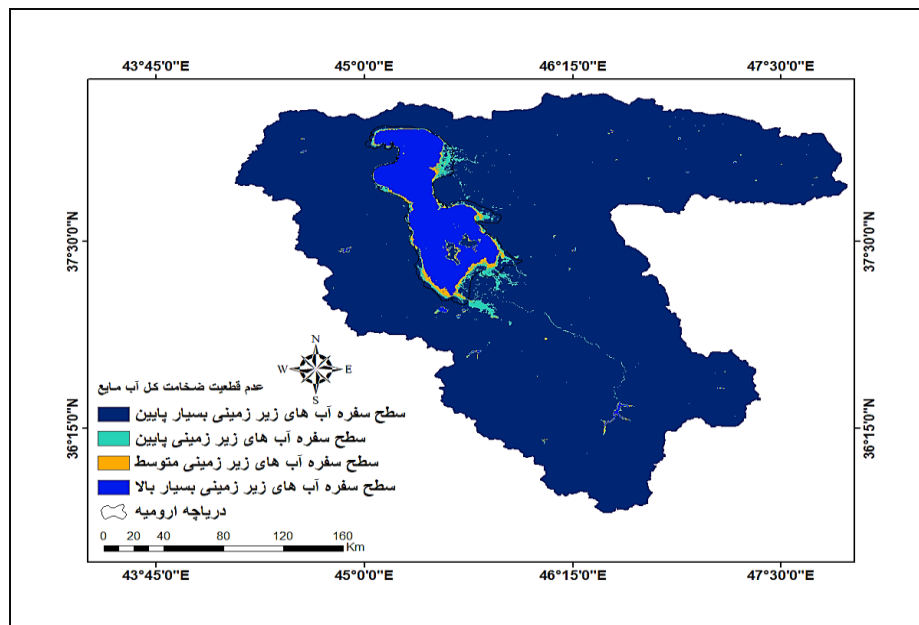
شکل ۴. میانگین تغییرات ضخامت آب و عدم قطعیت بر اساس مدل CRI Filtered

استفاده از پروداکت خشکی داده ماهواره GRACE برای تغییر سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه

بررسی تغییرات مکانی سفره آب‌های زیرزمینی به دست آمده از حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از پروداکت خشکی تصاویر ماهواره‌ای گریس در موتور گوگل ارث درک بهتری از تغییرات بلندمدت سفره آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌کند. بدین منظور، برای به دست آوردن پروداکت خشکی در موتور گوگل ارث از دو شاخص ضخامت کل آب مایع (Lew Thickness) و عدم قطعیت کل ضخامت آب مایع (Uncertainty) در این پژوهش استفاده شد. بنابراین، نقشه‌های ضخامت کل آب مایع و عدم قطعیت برای اندازه‌گیری تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه از بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گریس استخراج شد. خروجی تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه بر اساس دو پارامتر ضخامت کل آب مایع و عدم قطعیت در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از پروداکت خشکی ضخامت کل آب مایع



همان‌طور که در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است، در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ بر اساس پارامترهای ضخامت کل آب مایع و عدم قطعیت میزان پروداکت خشکی برای حوضه دریاچه ارومیه بررسی شد. می‌توان گفت شکل ۵ تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بر اساس پارامتر ضخامت کل آب مایع در سه کلاس (پایین بودن سطح سفره آب‌های زیرزمینی، متوسط بودن سطح سفره آب‌های زیرزمینی، بالا بودن سطح سفره آب‌های زیرزمینی) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، می‌توان گفت قسمت‌های شمالی حوضه دریاچه ارومیه از بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ به شدت با افت تغییرات سطح سفره آب‌هایی زیرزمینی روبه‌رو بوده است. درحالی‌که قسمت‌های شمال شرقی و جنوبی حوضه دریاچه ارومیه از نظر تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ با تغییرات زیادی مواجه نبوده است و این تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی در حالت مطلوبی قرار دارد. اما شکل ۶ تأثیر پارامتر عدم قطعیت در میزان سطح تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. با توجه به پارامتر عدم قطعیت می‌توان گفت تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی در قسمت شمال شرقی

حوضه دریاچه ارومیه با تغییرات بسیار شدید مواجه بوده و میزان تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی در این قسمت از حوضه آبخیز با استرس آبی و کمبود آب روبه‌رو هستند. با توجه به شکل ۶، می‌توان گفت قسمت‌های جنوبی حوضه دریاچه ارومیه از نظر سطح تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی با کمبود آب زیادی روبه‌رو نیستند. سطح تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی در این قسمت در حالت متوسط قرار دارد و استفاده درست و مدیریت‌شده را در این قسمت از حوضه ایجاب می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش هم‌سو با مطالعات سایر پژوهشگران است. فرزام فتح‌الله‌زاده و همکارانش (۱۳۹۵) به مقایسه نتایج چاه‌های پیژومتری و مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی گریس در برآورد سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه پرداخته‌اند. همچنین، تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی در منطقه دریاچه ارومیه به کمک بیست چاه آب پیژومتری موجود در منطقه محاسبه و این نتایج و نتایج حاصل از مشاهدات گریس بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ مقایسه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد ضریب همبستگی محاسبه‌شده بین روش فیلترگوسین و داده‌های چاه مشاهداتی $R^2=0.49$ به دست آمد؛ درحالی‌که این همبستگی با روش موجک $R^2=0.70$ به دست آمد.

نتیجه

مقایسه روند سطح تغییرات زمانی سفره آب‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه در این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای گریس در موتور گوگل ارث، باندهای JPL و GFZ و CSR مدل CRI Filtered، و پروداکت خشکی Lew_Thiknth و Uncertainty برای بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ بررسی شد. تغییرات سطح آب سفره‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه بر اساس مدل CRI Filtered نتایج متفاوتی را با باندهای مراکز تحقیقاتی سه‌گانه نشان می‌دهد. بر اساس مدل یادشده، در ۳۱ مارس ۲۰۰۲، میزان تغییرات ضخامت کل آب مایع $11/599$ سانتی‌متر و عدم قطعیت ضخامت کل آب مایع در این تاریخ $9/767$ سانتی‌متر برآورد شده است. این مدل ضخامت کل آب مایع را در ۳۱ مارس ۲۰۰۶ برای حوضه دریاچه ارومیه $19/669$ سانتی‌متر و میزان عدم قطعیت آن را $2/688$ سانتی‌متر نشان داده است. و در ۲۲ مه ۲۰۱۷ میزان ضخامت کل آب مایع $12/309$ - سانتی‌متر و عدم قطعیت آن را $10/759$ سانتی‌متر نشان داده است. می‌توان گفت این مدل می‌تواند

به طور دقیق مرز پهنه‌های آبی و خشکی را تشخیص دهد. میزان سطح تغییرات آب سفره‌های زیرزمینی حوضه دریاچه ارومیه بر اساس پروداکت خشکی دارای مقدار حداقل و حداکثر است. این پروداکت حداقل ضخامت کل آب مایع را ۵۷/۰۶۵ و حداکثر آن را ۴۹۵/۵۳ سانتی‌متر برآورد کرده است؛ درحالی‌که میزان حداقل عدم قطعیت آن عدد ۰/۲۹ و حداکثر آن عدد ۳۱/۱ سانتی‌متر را نشان داده است. بر اساس این مقادیر نتایج نشان داد تغییرات مکانی سطح آب سفره‌های زیرزمینی بر اساس ضخامت کل آب مایع از بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ در قسمت‌های شمالی حوضه دریاچه ارومیه به شدت با افت تغییرات در سطح آب سفره‌های زیرزمینی روبه‌رو بوده است. درحالی‌که حوضه از نظر پارامتر عدم قطعیت در قسمت‌های شمال شرقی به شدت دچار تغییرات در میزان سطح سفره‌های آب زیرزمینی بوده است. سطح آب سفره‌های زیرزمینی از بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ برای حوضه دریاچه ارومیه به شدت کاهش یافته است. در نتیجه، اگر برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های زیرزمینی به همین ترتیب ادامه یابد، بدون شک، در آینده اتفاقات نامطلوب در منابع سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه روی خواهد داد و به تبع آن بحران‌های اجتماعی و اقتصادی و سیاسی در منطقه اتفاق خواهد افتاد. تغذیه سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه و تجدید نظر در میزان بهره‌برداری از سفره آب‌های زیرزمینی مربوطه، افزایش راندمان آبیاری، پوشش انهار، و صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند تا حدودی از افت بی‌رویه سطح تغییرات سفره آب‌های زیرزمینی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه جلوگیری کند.

منابع

- اشرف‌زاده، افشار؛ جودکی، غلامرضا؛ شریفی، محمد (۲۰۱۵). «ارزیابی منابع آب زیرزمینی ایران با استفاده از داده‌های بررسی گرانش ماهواره GRACE»، نقشه‌برداری علوم و فناوری تحقیقات، (۴)، صص ۷۳ - ۸۴.
- افضل‌اولی، رامین (۱۳۷۷). «ارزیابی اثرات پخش سیلاب بر تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت موسیان (استان ایلام)»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۵۴ صفحه.
- امیرعطایی، بهمن؛ زینال‌زاده؛ کامران (۲۰۱۶). «تجزیه و تحلیل روند تغییرات کمی و کیفی در آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی در غرب دریاچه ارومیه»، علوم زمین محیطی، (۵)، صص ۱ - ۱۰.
- بهارلویی، محسن (۱۳۹۲). «تأثیر نوسانات بارش بر آب‌های زیرزمینی دشت دامنه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی با گرایش اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، استاد راهنما: عباس علی آروین، دانشگاه پیام نور اصفهان.
- جاودانیان، حامد؛ احمدی دارانی؛ محمود (۱۳۹۵). «برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و نشست منطقه‌ای (مطالعه موردی: شهر دامنه اصفهان)»، علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۱)، صص ۴۹ - ۶۰.
- جودکی، غلامرضا (۲۰۱۴). «رديابی تغییرات گسترده زمین با استفاده از داده‌های گرانشی GRACE»، دانشگاه علوم و فناوری نروز، تروندهایم.
- خاکی، مهدی؛ فروتن ایمان؛ کوهن، مایکل؛ آوانژ، جوزف، وان دایک آی جم؛ شوماخر، مایکل؛ شریفی، محمدعلی (۲۰۱۸). «تعیین میزان کاهش ذخیره آب در ایران توسط داده‌های Assimilatin GRACE به مدل هیدرولوژیکی W3RA»، پیشرفت در منابع آب، ۱۱۴، صص ۱ - ۱۸.
- خلیلیان، صمد؛ زارع مهرجردی، محمدرضا (۱۳۸۴). «ارزش‌گذاری آب‌های زیرزمینی در بهره‌برداری‌های کشاورزی»، اقتصاد کشاورزی و توسعه، س ۱۳، ش ۵۱، صص ۸۳ - ۹۶.
- رضایی، رضا؛ ملکی، افشین؛ صفری، مهدی؛ قوامی عبدالله (۱۳۸۹). «ارزیابی آلودگی شیمیایی منابع آب زیرزمینی مناطق پایین دست محل دفن زباله شهر سندرچ»، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان، د ۱۵، صص ۸۹ - ۹۸.
- علی‌زاده، ا. (۱۳۸۶). اصول هیدرولوژی کاربردی، دانشگاه امام رضا^(ع).

فتح‌الله‌زاده، فرزاد؛ بوثوقی، بهزاد؛ نائینی، مهدی رئوفیان محبی، محمود (۱۳۹۵). «مقایسه نتایج چاه‌های پیرومتری و مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی گریس در برآورد تغییرات آب‌های زیرزمینی»، د ۲۳، همایش ژئوماتیک دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

فرخ‌نیا، اشکان؛ سعید، مرید (۱۳۹۳). «ارزیابی اثرات بارش و دما بر روند جریان رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه»، آب و فاضلاب، ش ۳، صص ۸۶ - ۹۷.

فلاح، فاطمه؛ قربانی‌نژاد، سعید؛ رحمتی، احمد؛ دانشفر، محمد؛ زینویوند، حامد (۱۳۹۵). «کاربرد مدل افزودنی تعمیم‌یافته در مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی و مقایسه عملکرد آن با روش‌های آماری دو متغیره»، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰، ۳۲، ۱۰۶۹ - ۱۰۸۹. کوثر، سید آسیه (۱۳۷۴). مقدمه‌ای بر مهار سیلاب‌ها و بهره‌وری بهینه از آن‌ها، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع.

کیانی، فاطمه؛ عابدینی، موسی؛ احمدزاده، غلامرضا (۱۳۹۶). «بررسی پتانسیل فرونشست شهرستان کرج با استفاده از روش تلفیق وزنی در محیط GIS»، سومین کنگره بین‌المللی علوم زمین و توسعه شهری و اولین کنفرانس هنر، معماری و مدیریت شهری، تهران، ایران.

هاشمی‌نژاد، هستی؛ کریمی‌جشنی، امیر (۱۳۸۵). «بررسی کاهش کیفیت آب زیرزمینی واحدهای هیدرولوژیکی نجف‌آباد و اصفهان طی سال‌های ۷۶ تا ۸۳»، اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب در حوضه کارون-زاینده‌رود (فرصت‌ها و چالش‌ها).

هندآبادی، محمدکریم (۱۳۷۵). «بررسی رسوبات در حوزه‌های پخش سیلاب لاسجرد سمنان و نقش آن در تغذیه آب‌های زیرزمینی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.

References

- Alizadeh, A. (2007). *Principles of Applied Hydrology*, Imam Reza University Press. (in Persian)
- Adhikary, S., Das, K., Saha, S. K., & Chaki, T. (2013). "Groundwater drought assessment for Barind irrigation Project in Northwestern Bangladesh", 20th International Congress on Modeling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 December.
- Afzal-Oli, R. (1998). "Evaluation of the effects of flood spreading on artificial nutrition of groundwater aquifer in Mosian plain (Ilam province)", Master Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, 154 p. (in Persian)
- Amirataee, B. & Zeinalzadeh, K. (2016). "Trends analysis of quantitative and qualitative changes in groundwater with considering the autocorrelation coefficients in west of

- Lake Urmia”, *Environmental Earth Sciences*, 75(5), pp. 1-10. (in Persian)
- Ashrafzade, A., Judaki, GH., & Sharif, M. (2015). “Iran's groundwater resources assessment using data from the GRACE satellite gravity survey”, *Journal of Research Science and Technology Mapping*, 5(4), pp. 73-84. (in Persian)
- Baharloui, M. (2013). “The effect of precipitation fluctuations on groundwater in Damaneh plain”, Master Thesis in Natural Geography Climatology in Environmental Planning, Supervisor: Abbas Ali Arvin, Payame Noor University of Isfahan. (in Persian)
- Chen, Q., Shen, Y., Chen, W., Zhang, X., & Hsu, H. (2016). “An improved GRACE monthly gravity field solution by modeling the non-conservative acceleration and attitude observation errors”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 90, pp. 503-523.
- Falah, F., Ghorbani-Nejad, S., Rahmati, O., Daneshfar, M., & Zeinivand, H. (2016). “Applicability of generalised additive model in groundwater potential modelling and comparison its performance by bivariate statistical methods”, *Geocarto International*, 32(10), pp. 1069-1089. (in Persian)
- Farrokhnia, A. & Morid, S. (2014). “Evaluation of the effects of rainfall and temperature on the flow of rivers in the catchment area of Lake Urmia”, *Journal of Water and Sewerage*, No. 3., pp. 86-97. (in Persian)
- Fathollahzadeh, F., Vosuogi, B., Raufian Naeni, M., & Mohebbi, M. (2016). “Comparison of the results of piezometric wells and observations of Grace gravimetric satellite in estimating groundwater changes”, Vol. 23, Geomatics Conference of Islamic Azad University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Hasheminejad, H. & Karimi Jashni, A. (2006). “Investigation of groundwater quality loss in Najafabad and Isfahan hydrological units during the years 76 to 83”, The first regional conference on the exploitation of water resources in the Karun Zayandehrud basins (opportunities and challenges). (in Persian)
- Hindabadi, M. K. (1996). “Investigation of sediments in the areas of Lasjerd flood distribution in Semnan and its role in groundwater nutrition”, Master Thesis, Faculty of Natural Resources, Karaj, University of Tehran. (in Persian)
- Javadanian, H. & Ahmadi Darani, M. (2016). “Irregular abstraction of groundwater resources and regional meeting: a case study of the city of Isfahan”, *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 1(1), pp. 49-60. (in Persian)
- Joodaki, G. (2014). *Earth Mass Change Tracking Using GRACE Satellite Gravity Data*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. (in Persian).
- Khaki M, Forootan E, Kuhn M, AWange J, van Dijk A I J M, Schumacher M, Sharip M A.(2018). *Determining water storage Depletion within iran by Assimilatin GRACE data into the W3RA Hydrological Model, Advances in Water Resources*. 114: 1-18.(in Persian).
- Khalilian, S. & Mehrjerdi, M. (2005). “Evaluation of groundwater in agricultural exploitation”, *Agricultural Economics and Development*, Year 13, No. 51, pp. 96-83. (in Persian)
- Kiani, F., Abedini, M., & Ahmadzadeh, Gh. (2017). “Investigation of subsidence potential of Karaj city using weight integration method in GIS environment”, 3rd International Congress of Earth Sciences and Urban Development and the first conference on art, architecture and urban management, Tehran, Iran. (in Persian)
- Kowsar, S. A. (1995). *An Introduction to Flood Control and Optimal Utilization*, Forest and

- Rangeland Research Institute, 552. (in Persian)
- Lee, S., Seo, J., & Lee, SK. (2014). "Validation of Terrestrial Water Storage Change Estimates Using Hydrologic Simulation", *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 3(1), pp. 5-9.
- Liu, B., Zhou, X., Li, W., Lu, C., & Shu, L. (2016). "Spatiotemporal Characteristics of Groundwater Drought and Its Response to Meteorological Drought in Jiangsu Province, China", *Water Journal*, 8(11), 480.
- Longuevergne, L., Scanlon, BR., & Wilson, CR. (2010). GRACE hydrological estimates for small basins: evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*, 46: W11517. DOI: 10.1029/2009WR008564.
- Mackay, J. D., Jackson, C. R., & Wang, L. (2014). "A lumped conceptual model to simulate groundwater level time-series", *Environmental Modelling and Software*, 61, pp. 229-245.
- Rami lien, G, Famiglietti, JS, & Wahr, J. (2008). Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review, *Surveys in Geophysics*, 29, pp. 361-374. DOI: 10.1007/s10712-008-9048-9.
- Rezaei, R. Maleki, A. Sarifi, M. Ghavami, A. (2010). "Evaluation of chemical pollution of groundwater resources in downstream areas of Sanandaj city landfill", *Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*, Vo. 15, pp. 1989-1998. (in Persian)
- Wahr, J., Swenson, S., & Velicogna, I. (2006). Accuracy of GRACE mass estimates, *Geophysical Research Letters* 33: L06401.
- Wulder, M. Michael A. Thomas R. David P. Roy, Christopher J. Crawford, Jeffrey G. Masek, Curtis E. Woodcock, Richard G. Allen, Martha C. Anderson, Alan S. Belward, Warren B. Cohen, John Dwyer, Angela Erb, Feng Gao, Patrick Griffiths, Dennis Helder, Txomin Hermosilla, James D. Hipple, Patrick Hostert... Zhe Zhu Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment*, 2019. 225: p. 127-147.
- (2019). "Current status of Landsat program, science, and applications", *Remote sensing of environment*, 225, pp. 127-147.
- Xiao, Y., GU, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., & Niu, Y. (2016). "Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China", *SpringerPlus*, 5(1), pp. 1-15.
- Zhang, W., Yan, Y., Zheng, J., Li, L., Dong, X., & CAI, H. (2009). "Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China", *Global and Planetary Change*, 69(1), pp. 35-47.