نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۶۷۲-۶۵۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 657-672

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تغییرات ذخیره و تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان دشت بیرجند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE-FO و CHIRPS در بستر سامانه Google Earth Engine

مهدی دستورانی*[۱]، الهام قوچانیان حقوردی[۲]، امید خراشادیزاده[۳]، حسین خزیمه نژاد[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

چکیده

بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی موجب کاهش تراز سطح آب در آبخوان دشت بیرجند شده است. در این مطالعه، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE وGRACE-FO و بارندگی سالانه با داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS ، در بستر سامانه Google Earth Engine طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ موردبررسی قرار گرفت. تغذیه آب زیرزمینی از طریق سری‌های زمانی مربوط به ذخیره آب، با بهره‌گیری از روش نوسانات تراز سطح آب، برآورد شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های GRACE و GRACE-FO نشان داد که بیشترین افزایش تراز آب زیرزمینی نسبت به میانگین بلندمدت، حدود ۷ سانتی‌متر در فوریه ۲۰۰۵ رخ‌داده است و بیشترین افت سطح آب، با کاهش حدود ۲۵ سانتی‌متر، در دسامبر ۲۰۲۳ به ثبت رسید. نرخ تغذیه خالص آب زیرزمینی در بازه ۲۱ ساله مورد مطالعه، بین ۳ تا ۱۲ سانتی‌متر در ماه متغیر بوده و میانگین آن برابر با ۶/۴ سانتی‌متر در سال محاسبه شد. این مطالعه نشان می‌دهد که تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی بر پایه داده‌های ماهواره‌ای GRACE از دقت قابل قبولی برخوردار است و می‌تواند در مناطقی که با کمبود داده‌های چاه‌های مشاهداتی مواجه هستند، روند ماهانه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را نشان داده و به تصمیم‌گیری منابع آب کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: داده‌های ماهواره‌ای GRACE، ذخیره آب زیرزمینی، CHIRPS، Google Earth Engine.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی بزرگ‌ترین ذخیره قابل‌دسترس آب شیرین در کره زمین است. به دلیل اینکه ۹۷ درصد منابع آبی شور هستند، انسان مقدار بسیار محدودی از منابع آب زیرزمینی را به‌طور مستقیم استفاده می‌کند. جمع‌آوری اطلاعات تراز آب در چاه‌ها رایج‌ترین روش پایش منابع آب زیرزمینی است(Pulla et al.,2023) . ازآنجاکه نصب و نگهداری تجهیزات مشاهداتی بسیار پرهزینه است، بنابراین استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تکنیک‌های سنتی و پرهزینه سابق، رو به گسترش است(فرجی و همکاران،۱۳۹۶). مقدار آبی که در هنگام تغذیه (نفوذ) و تخلیه، در سفره آب زیرزمینی باقی می‌ماند و ذخیره می‌شود، ذخیره آب زیرزمینی نامیده می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، ذخیره آب زیرزمینی، سهم زیادی در تأمین ذخیره کل آب[۴] دارد. (Barbosa et al., 2022; Raza et al., 2019; Seo and Lee., 2016). با توجه به ویژگی‌های طبیعی حوضه، آب از مسیرهای مختلف مستقیم یا غیرمستقیم وارد آبخوان شده یا از آن خارج می‌شود. آب اضافی، پس از نفوذ در خاک، تحت تأثیر نیروی گرانش به سمت لایه‌های پایین حرکت کرده و وارد سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. تغییرات بین مقدار ورود و خروج آب از آبخوان در طول زمان باعث افزایش یا کاهش ذخیره آب زیرزمینی می‌شود. وقتی ورود آب بیشتر از خروج باشد، ذخیره آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند و وقتی کمتر باشد، ذخیره کاهش می‌یابد. عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم میزان ورود و خروج آب، بزرگ‌ترین مشکل

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- دانشجو دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و کارشناس بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان جنوبی،سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بیرجند، ایران
۳-کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، شرکت آب منطقه ای خراسان جنوبی، شرکت مدیریت منابع آب، بیرجند، ایران
(*-نویسنده مسئول: Email: mdastourani@birjand.ac.ir)

4 -Total Water Storage (TWS)

در محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی[1] است. به دلیل گستردگی آبخوان‌ها و کمبود داده‌های هیدرولوژیکی، ارزیابی تغییرات تراز آب زیرزمینی و ذخیره آب با استفاده از روش‌های سنتی دشوار است (Shami and Ghorbani, 2019). با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و اطلاعات ماهواره‌ای که قادر به جمع‌آوری داده‌ها در یک منطقه جغرافیایی وسیع با وضوح مکانی و زمانی هستند، امکان پایش و تحلیل تغییرات تراز آب زیرزمینی و ذخیره آب فراهم می‌شود (Shami and Ghorbani, 2019). به‌عبارت‌دیگر، سنجش‌ازدور می‌تواند تکمیل‌کننده شبکه‌های پایش و مطالعات مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی باشد و خلأهای زمانی و مکانی داده‌ها را پوشش دهد (Miro et al.,2018). روش تراز آبی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مشاهدات میدانی (مانند تراز آب زیرزمینی) نمونه‌هایی از روش‌های سنتی برای محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی هستند (Pulla et al., 2023; Seo and Lee, 2016). اگرچه این روش‌ها در مطالعات بسیاری استفاده‌شده‌اند، اما در عمل با محدودیت‌هایی مانند پراکندگی نامنظم چاه‌های مشاهده‌ای مواجه هستند. بنابراین، تأمین به‌موقع و قابل‌اعتماد منابع آب زیرزمینی همچنان یک چالش مهم جهانی به شمار می‌رود. ازجمله ماهواره‌هایی که داده‌های سنجش‌ازدور را در اختیار پژوهشگران در سراسر جهان قرار می‌دهد ماهواره ثقل سنجی[2] است(دنیائی،۱۴۰۰). دانشمندان زیادی از داده‌های ماهواره GRACE برای سنجش آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند. یکی از وظایف این ماهواره ردیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی است. لذا تاکنون، محبوب‌ترین روش برای ثبت تغییرات ذخیره‌ی آب زیرزمینی در ماهوارهGRACE ثبت ردیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی بوده است. سایر اجزای ذخیره‌ی آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE با استفاده از اطلاعات کمکی یا مدل‌های سطح زمین قابل‌دسترسی است. ماهواره GRACE و مدل همسان‌سازی داده‌های جهانی[3] دو فن مکانی هستند که اطلاعات مفیدی را درباره نوسانات ذخیره آب زیرزمینی در اختیار محققان قرار می‌دهند ترکیب داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل هیدرولوژیکی داده‌های جهانی در محیط محاسبات ابری، قابلیت بالایی در پایش تغییرات ذخایر آب زیرزمینی دارد. بدین منظور در دشت روانسر استان کرمانشاه نوسانات آب زیرزمینی آبخوان روانسر در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ با ماهواره GRACE پایش و تحلیل شد. برای تحلیل مکانی نوسان آبخوان روانسر، نقشه‌ی پهنه‌بندی با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان تهیه‌شده است. در این راستا به‌منظور ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در منطقه‌ی موردمطالعه کد نویسی الگوریتم‌های CRI,CSR,GFS,JPL در محیط محاسبات ابری گوگل‌ارث‌انجین صورت گرفت. سپس تغییرات ماهانه و سالانه آب معادل مایع محاسبه‌گردید. پس‌ازآن مقدار رطوبت خاک از مدل هیدرولوژیکی GLDAS برآورد گردید و درنهایت با کسر مقدار رطوبت خاک از مقادیر برآوردی ماهواره GRACE میزان تغییرات ذخیره‌ی آب زیرزمینی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی آن به‌دست آمد. نتایج نشان داد که روند تغییرات آب زیرزمینی طی دوره مورد بررسی، به‌طور معناداری کاهشی بوده و این کاهش عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه منابع و خشکسالی‌های مکرر است؛ به‌طوری‌که همبستگی بالایی میان داده‌های GRACE و مقادیر برداشت واقعی مشاهده شد که بیانگر کارایی بالای این ترکیب داده‌ها در پایش منابع آب زیرزمینی در مناطق کم‌دسترس می‌باشد(دنیائی،۱۴۰۰).

ماهواره GRACE با ارائه ارزیابی کمی از تغییر جامع توده آب در طول زمان، به بیلان منابع آب زیرزمینی کمک می‌کند(Tregoning et a.,2012). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درزمینه ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی در مناطق مختلف با استفاده از ماهواره GRACEانجام‌شده است. در یک مطالعه موردی در استان کرمانشاه، از داده‌های چاه‌های پیزومتری (۱۳۶۰–۱۳۹۷) و داده‌های ماهواره‌ای GRACE(۲۰۰۲–۲۰۲۰) با سه پردازشگرGFZ[4] ، JPL[5] و CSR[6] برای ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده شد. داده‌های تکمیلی شامل رطوبت خاک، تبخیر–تعرق و آب ناشی از ذوب برف از ماهواره همسان‌سازی داده‌های جهانی استخراج گردید. نتایج نقشه‌برداری پهنه‌ای در محیط GIS نشان داد برخی آبخوان‌ها در وضعیت بحرانی قرار دارند. این مطالعه اهمیت تلفیق داده های زمینی و سنجش‌ازدور را در مدیریت منابع آب زیرزمینی برجسته می‌سازد (حافظ پرست،۱۴۰۰). برای مطالعه مدیریت جامع رودخانه نیل در آفریقا، تغییرات ذخیره آب در رودخانه توسط ماهواره GRACE و اندازه‌گیری بارندگی را تجزیه‌وتحلیل کردند و نتایج نشان داد که یک ارتباط قوی بین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و میزان شارژ با تغییرات بارندگی وجود دارد (Khaki et al.,2018). داده‌های ماهواره GRACE نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی در مناطق مرکزی و جنوبی هند افزایش‌یافته است و داده‌های GRACE برای شناسایی فرآیند ذخیره آب زیرزمینی به‌اندازه کافی کارآمد هستند. نتایج نشان داد که میزان بارندگی دلیل مهمی در ذخیره آب در بیشتر این مناطق است و روند مثبتی دارد(Banerjee and Kumar.,2018) . در مطالعه بر روی آبخوان میانراهان در استان کرمانشاه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مشاهدات چاه‌های پیزومتری، تغییرات سطح آب زیرزمینی بررسی‌شده است. نتایج نشان داد داده‌های مرکز JPL بیشترین همبستگی را با داده‌های زمینی دارد

1- Ground Water Storage (GWS)
2- Gravity Recovery And Climate Experiment(GRACE)
3- GLDAS
4- German Research Centre for Geosciences (GFZ)
5- Jet Propulsion Laboratory (JPL)
6- Center for Space Research (CSR)

(حافظ پرست،۱۴۰۰).

مجموعه داده دیگر که در تحلیل‌های بارش مورداستفاده قرار می گیرد، داده‌های ماهواره CHIRPS[1] است. CHIRPS داده‌های بارش را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های زمینی تولید می‌کند و داده‌هایی با رزولوشن و دقت بالا برای مطالعات اقلیمی ارائه می‌دهد. این مجموعه داده نیز به دلیل گستردگی و دقت بالا، در تحقیقات مختلفی مانند تحلیل الگوهای بارش و تأثیرات تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود. برای بررسی روند تغییرات بارش در منطقه جنوب شرق کشور، از محصول CHIRPS که دارای داده‌های بارش طولانی‌مدت (۴۰سال) می‌باشد، استفاده شد. ارزیابی داده‌های CHIRPS در کل ایران با استفاده از داده‌های بارش ۶۸ ایستگاه و به مدت ۳۰ سال (۱۹۸۷–۲۰۱۷) انجام‌شده است (Ghozat et al, 2021). در تحقیقی با عنوان ارزیابی داده‌های بارش CHIRPS در تحلیل روند مشخصه‌های بارش در نواحی اقلیمی مختلف ایران، به مقایسه روند دو خصوصیت عمق بارش و تعداد روزهای بارانی داده های ماهواره‌ای و مشاهداتی پرداخته شد و نتایج نشان داد روند تغییرات عمق بارش داده‌های CHIRPS بالای ۶۰ درصد با روند داده های مشاهداتی انطباق دارد(شبیری و همکاران،۱۴۰۰).

آبخوان دشت بیرجند به دلیل افزایش مصرف آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف، با کاهش تراز آب زیرزمینی مواجه است. بنابراین پایین آمدن تراز آب زیرزمینی علاوه بر آسیب به منابع آب زیرزمینی، باعث فرونشست دشت نیز می‌شود. در این راستا، توسعه و مدیریت یکپارچه و پایدار منابع آب زیرزمینی بستگی به مطالعه بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و تنوع آن دارد. تغذیه آب زیرزمینی توسط رواناب‌ها علاوه بر تأمین ذخایر آب زیرزمینی، مواد محلول را از لایه‌های بالایی به آب زیرزمینی منتقل می‌کند که ممکن است باعث آلودگی آب زیرزمینی شود. بنابراین، تغذیه آب زیرزمینی بر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، تخمین‌های دقیق از تغذیه آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار آبخوان‌ها ضروری است (Wu et al., 2019). یکی از روش‌های تخمین تغذیه، روش استفاده از نوسانات سطح ایستابی[2] است.

روش نوسانات سطح ایستابی در اوایل دهه ۱۹۲۰ برای برآورد تغذیه‌های دوره‌ای آب زیرزمینی بر اساس تغییرات سطح ایستابی توسعه یافت(Yung et al.,2018). این روش، هنگام بررسی نوسانات فصلی سطح آب در آبخوان یا چاه‌های مشاهده‌ای، افزایش سطح ایستابی را به‌عنوان نشانه‌ای از تغذیه آب زیرزمینی در نظر می‌گیرد. مطالعات متعددی برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی و داده‌های تراز آب استخراج‌شده از ماهواره GRACE انجام‌شده است. تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و تغذیه سالانه آب زیرزمینی را از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ در مالی، آفریقا، با استفاده از داده‌های GRACE و GLDAS برآورد کردند و سپس این نتایج با برآوردهای تولیدشده از طریق روش نوسانات سطح ایستابی با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای موجود مقایسه شد (Barbosa et al.,2022). نبوی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی با عنوان ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره GRACEدر خراسان رضوی، تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهواره GRACE را در بازه اوت ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۶ مورد ارزیابی قراردادند. تغییرات ذخیره آب تولیدشده از داده‌های ماهواره GRACE به همراه داده‌های رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان مستخرج از مدل GLDAS به‌صورت ماهانه ارائه شد. نتایج نشان داد داده‌های GRACE(CENS) کمترین تخمین و داده‌های GRACE(JPL) بهترین تخمین را بر اساس معیارهای خطا با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. مقایسه روند تغییرات زمانی داده‌های ذخیره آب به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE و مدل GLDAS و همچنین مقایسه تغییرات مکانی آن‌ها نشان داد که ماهواره GRACE در تخمین روند تغییرات مکانی و زمانی تغییرات ذخیره آب در خاک بهتر از GLDAS عمل می‌کند (فرجی و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیقی دیگر، پردازش داده‌ها در سامانه گوگل ارث انجین را با استفاده از سه الگوریتم JPL، GFZو CSR برای آبخوان دشت بیرجند انجام داده و نتایج با داده‌های مشاهداتی (۱۳۸۷تا ۱۳۹۷) مقایسه شد، نتایج نشان داد که متغیرهای به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های سنجنده GRACE و داده‌های مشاهداتی دارای ضریب همبستگی ۶۹ درصدی بوده است، به‌علاوه در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ به دلیل کمبود بارش‌ها، تغذیه نشدن آبخوان و اضافه برداشت، سطح ایستابی افت بسیاری کرده است(افتخاری و همکاران، ۱۳۹۸). داده‌های ماهواره GRACE نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی در مناطق مرکزی و جنوب هند افزایش‌یافته و این ماهواره برای شناسایی فرآیند ذخیره آب زیرزمینی به‌اندازه کافی کارآمد است. نتایج نشان داد که میزان بارندگی دلیل مهمی در ذخیره آب در بیشتر این مناطق است و روند مثبتی دارد(Banerjee and Kumar, 2018). بررسی ارتباط بین تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE و میزان بارش در کشور ایران نشان داد که تراز آب زیرزمینی در وضع موجود حوضه‌ی آبریز زاینده‌رود به بارش‌های سال قبل بستگی داشته، زمانی که بارش روند نزولی دارد، روند نوسانات ذخیره آب زیرزمینی به‌طور گسترده‌تری تحت تأثیر بارش قرار می‌گیرد (Arast et al.,2020).

تغذیه آب زیرزمینی در حوضه Ordos چین با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی و داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل هیدرولوژیک GLDAS محاسبه شد، یافته‌های این پژوهش نشان داد

1- Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data(CHIRPS)

2- Water Table Fluctuation(WTF)

کـه تفـاوت کمـی بـین بـرآورد تغذیـه آب زیرزمینـی بـا اسـتفاده از GRACE و مقـادیر تعیـین‌شـده بـا اسـتفاده از یـک نشـانگر زیسـت‌محیطـی وجـود دارد (Wu et al., 2019). در پژوهشـی از داده‌های مدل GLDAS و ماهواره GRACE برای تجزیـه‌وتحلیـل تغییرات ذخیره آب در ایـران اسـتفاده‌شـده اسـت. داده‌هـای مـاهواره GRACE نشان‌دهنده کاهش زیاد ذخیره آب و نوسانات شدید سطح آب در شمال ایران در امتداد سواحل دریای خزر مـی‌باشـد. بیشـترین میزان کاهش ذخیره آب در استان کرمانشاه رخ داده که باعـث شـده یـک سلسـله زمـین‌لـرزه در سـال‌هـای ۲۰۱۷،۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ رخ دهـد(Moghim,2020). از تغییـرات ذخیـره آب زیرزمینـی (TWS) مدل GRACE برای برآورد شاخص خشک‌سالی جهانی[1] استفاده شد که نتایج نشان داد با شاخص‌های خشک‌سالی دیگر همبستگی دارد و این شاخص برای پـایش خشـک‌سـالی جهـانی مـؤثر اسـت (Nie et al,2018). داده‌های ماهواره GRACE می‌تواند بـه‌طـور مـؤثر بـرای ارزیابی ویژگی‌های خشک‌سالی و تغییرات آب زیرزمینی استفاده شوند و این داده‌هـا مـی‌تواننـد در مـورد ویژگـی‌هـای خشـک‌سـالی قـوی قابل‌اعتمـاد باشـند (Sun et al.,2018). نوسـانات آب زیرزمینـی در مانسون تابستانی هنـد بـا اسـتفاده از داده‌هـای مـاهواره GRACE و GLDAS بررسی شد، نتایج نشان داد داده‌هـای مـاهواره GRACE انعطاف‌پذیری مناسبی برای تغییرات آب زیرزمینـی دارد (Singh et al,2019). بـا اسـتفاده از داده‌هـای GRACE و GRACE-FO و مدل‌های یادگیری ماشینDT، RF، MARS تراز سـطح آب سـواحل جنوبی دریای خزر در دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ مدل‌سازی و پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که داده‌های ماهواره GRACE(JPL) بـا R^2=0.788 بیانگر ارتباط مناسب داده‌های مـاهواره‌ای بـا داده‌هـای زمینـی اسـت همچنین مدل MARS عملکرد دقیق‌تری دارد و پیش‌بینی‌ها کـاهش تراز آب تا ۱۲۴ سانتی‌متر را تا سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهنـد (افتخـاری وهمکاران، ۱۴۰۳).

بررسـی پـژوهش‌هـای پیشـین نشـان‌دهنـده توانـایی مـاهواره GRACE در تحلیـل تغییـرات تـراز آب زیرزمینـی اسـت. همچنـین داده‌های ماهواره CHIRPS انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد. بنابراین در این پژوهش، هدف ارزیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینـی و نرخ تغذیـه آبخـوان دشـت بیرجنـد بـا اسـتفاده از ترکیـب داده هـای ماهواره‌ای GRACE ، GRACE-FO و داده‌های بارش مـاهواره‌ای CHIRPS در بستر سـامانه گوگـل ارث انجـین[2] اسـت کـه تـاکنون موردبررسی قرار نگرفته است. گوگل ارث انجین، یک بسـتر تحلیلـی قدرتمند مبتنی بر فضای ابری است که امکان پردازش سریع و دقیـق داده‌های ماهواره‌ای را در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلـف فـراهم می‌سازد.

نوآوری اصـلی ایـن تحقیـق در چنـد محـور کلیـدی قابـل طـرح اسـت:۱- ترکیـب داده‌هـای GRACE/GRACE-FO بـا داده‌هـای بارش ماهواره CHIRPS در محیط GEE برای تحلیل جامع‌تر ارتباط بین بارش و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی.

۲-کاربرد روش نوسانات تراز آب[3] برای استخراج مؤلفه تغذیه آب زیرزمینی از داده‌های ماهواره‌ای، که در مطالعات پیشین به‌ندرت به این شکل مورداستفاده قرارگرفته است.

۳- استفاده هم‌زمان از داده‌های ماهواره GRACE و GRACE-FO این رویکرد امکان پوشش کامل‌تر و پیوسته داده‌ها را در بازه زمانی طولانی‌تر به‌ویژه با توجه به اتمام مأموریت ماهواره GRACE و تداوم آن توسط ماهواره GRACE-FO فراهم می‌سازد.

نتایج این تحقیق می‌تواند به اعتبارسنجی مطالعات آینده در سطح منطقه‌ای کمک کند و زمینه‌ساز توسعه ابزارهای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک گردد. همچنین، درک دقیق‌تر تغییرات مکانی و زمانی در ذخیره آب زیرزمینی در دشت بیرجند، می‌تواند به سیاست‌گذاری مؤثر برای حفاظت از منابع آب در یکی از مناطق حساس زیست‌محیطی کشور یاری رساند.

مواد و روش‌ها

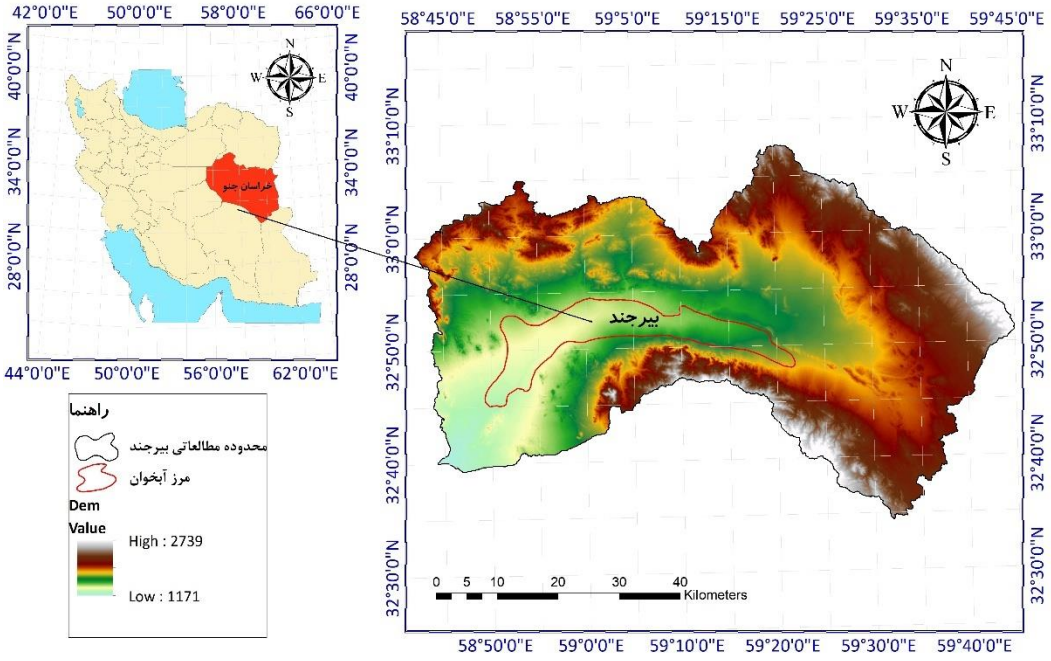
منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه دشت بیرجند است که ازنقطـه‌نظـر تقسـیمات کشوری بخشی از استان خراسان جنـوبی را شـامل مـی‌شـود. اسـتان خراسان جنوبی از سمت شمال هم‌جـوار اسـتان خراسـان رضـوی، از غرب با استان یزد، از جنوب غربی با استان کرمان و از جنوب با استان سیستان و بلوچستان و از شرق با کشور افغانستان هم‌جوار مـی‌باشـد. محـدوده مطالعـاتی بیرجنـد در قسـمت شـمالی ارتفاعـات بـاقران بـا مختصات تقریبی ´ ۳۴ و°۳۲ تا ´ ۸ و°۳۳ عرض جغرافیایی و´ ۴۱ و°۵۸ تا ´ ۴۴ و°۵۹ طول جغرافیایی قرارگرفته است. این دشت حالت کشیده داشته و تمامی پیرامون آن را ارتفاعـات و بخـش مرکـزی را آبخـوان آبرفتی تشکیل می‌دهـد. ایـن دشـت از شـمال بـه ارتفاعـات مـولی، مادرکوه، از جنوب به ارتفاعات باقران، از شرق به کوه بندر و مین آباد و از غرب به ارتفاعات کرنگ و چنگ محدود مـی‌شـود. وسـعت کـل حوضه آبریز دشت بیرجند در حدود ۳۱۵۵ کیلومترمربع بوده که از این میزان حدود ۱۸۴۵کیلومترمربع را دشت و مابقی را ارتفاعـات تشـکیل می‌دهد. حداکثر ارتفاع حوضه از سطح دریـا ۲۷۸۷ متـر در ارتفاعـات باقران (کوه شاه) و حداقل ارتفـاع نیـز۱۱۸۰ متـر در خروجـی دشـت

1- TSDI
2- Google Earth Engine (GEE)
3- Water Table Fluctuation Method

(منطقه فدشک) می‌باشد(همراز و همکاران،۱۳۹۷).

آبخوان بیرجند از نوع آزاد باضخامت رسوبات آبرفتی بین حداکثر ۲۲۵ و حداقل ۵ متر بر اساس چاه‌های حفاری‌شده می‌باشد. میانگین ضخامت رسوبات حدود ۸۷ متر برآورد می‌گردد. آبخوان از نواحی شمالی تغذیه و در بخش غربی تخلیه صورت می‌گیرد. ضخامت آبرفت در بخش شرقی حدود ۱۰۰ متر بوده ولی به علت بالا آمدن سنگ کف و شیب زیاد آن لایه آبدار تشکیل نشده است. در قسمت مرکزی دشت سنگ کف عمق بیشتری داشته و توسط رسوبات آبرفتی دانه‌درشت باضخامت حدود ۱۵۰ متر که توسط رودخانه شاهرود و سرشاخه‌های آن پوشیده شده است. در این قسمت ضخامت لایه اشباع زیاد بوده و مناسب‌ترین قسمت آبخوان دشت را تشکیل می‌دهد. ضخامت آبرفت به سمت شمال کاهش‌یافته و به کمتر از ۵۰ متر رسیده و فاقد لایه اشباع است. میانگین سطح ایستابی حدود ۴۸ متر برآورد می‌گردد. ضریب ذخیره متوسط آبخوان حدود ۵ درصد برآورد شده است. بالاترین رقوم سطح ایستابی در آبخوان حدود ۱۳۵۰ متر در شمال و پایین‌ترین رقوم حدود ۱۱۵۰ متر در جنوب می‌باشد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی، از شمال به‌طرف جنوب است(Moghaddam et al,2019). در شکل (۱) موقعیت آبخوان بیرجند نشان داده‌شده است.



شکل ۱- موقعیت آبخوان واقع در محدوده مطالعاتی دشت بیرجند در استان خراسان جنوبی

ماهواره GRACE و GRACE-FO

زوج ماهواره ثقل سنجی GRACE در ۱۷ مارس ۲۰۰۲ توسط دو سازمان ناسا[1] و [2]مرکز هوافضای آلمان از ایستگاهی واقع در روسیه به فضا پرتاب شد. مأموریت GRACE شامل دو ماهواره هم مدار در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از زمین و با زاویه نسبی ۸۹/۵ درجه بود. فاصله تقریبی دو ماهواره از یکدیگر تقریباً ۲۲۰ کیلومتر بود. اندازه‌گیری لحظه‌ای فاصله و سرعت نسبی بین دو ماهواره توسط یک سیستم راداری در باند K و با دقت ۱$\frac{\mu m}{s}$ انجام می‌شود (Tapley et al.,2004). با توجه به موفقیت مأموریت GRACE، ناسا و DLR تصمیم گرفتند مأموریت جدیدی با عنوان GRACE-FO را آغاز کنند. این مأموریت شامل یک جفت ماهواره جدید است که در ماه می ۲۰۱۸ به فضا پرتاب شد. ماهواره GRACE-FO از فناوری پیشرفته‌تری نسبت به نسل قبلی برخوردار است، ازجمله سیستم لیزری فوق دقیق برای اندازه‌گیری فاصله بین دو ماهواره که دقت

1- National Aeronautics and Space Administration (NASA)

2 - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt(DLR)

داده‌ها را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

ماهواره CHIRPS

ماهواره CHIRPS یکی از منابع معتبر و گسترده برای داده‌های بارش است که توسط گروه مخاطرات اقلیمی[1] توسعه داده‌شده است. این مجموعه داده با ترکیب داده‌های بارش ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی، داده‌هایی با رزولوشن بالا(۵ کیلومتر) و در بازه زمانی گسترده (از سال ۱۹۸۱تا به امروز) ارائه می‌دهد(Prakash,2019).

آزمایشگاه پیش‌رانش جت ناسا JPL

این مرکز، الگوریتم‌های مورداستفاده در توسعه داده‌ها در سامانه Google Earth Engine (GEE)را ارائه کرد. موسسه تحقیقاتی JPL سیستم داده‌های علمی[2] را برای پروژه GRACE ایجاد کرده است وظیفه اصلیSDS پردازش داده‌های اولیه ماهواره GRACE است. داده‌های اولیه به‌عنوان داده‌های سطح صفر (L-0) شناخته می‌شوند. در مراحل بعدی، داده‌های علمی دو محصول دیگر ارائه می‌دهد که تحت عنوان داده‌های سطح یک (L-1) و سطح دو (L-2) شناخته می‌شوند. داده‌های سطح یک (L-1) شامل اطلاعاتی درباره فاصله بین ماهواره‌های دوقلو، شتاب سنج‌ها، GPS و داده‌های مشابه ارائه می‌دهند. داده‌های سطح دو(L-2) که بر اساس داده‌های سطح یک اصلاح و واسنجی شده‌اند، اطلاعات میانگین ماهانه درباره میدان گرانشی زمین را ارائه می‌دهد.

پیش‌پردازش داده‌ها به روش MCMC[3]

این روش یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های جایگذاری چندگانه داده‌های گمشده است که بر پایه نمونه‌گیری تصادفی از توزیع‌های احتمال شرطی عمل می‌کند. این روش با تولید زنجیره‌ای از مقادیر ممکن برای داده‌های گمشده، روابط بین متغیرها را حفظ کرده و امکان تحلیل دقیق‌تری نسبت به روش‌های ساده‌تری مانند جایگذاری با میانگین فراهم می‌سازد MCMC به دلیل تولید چند نسخه کامل از داده‌ها و ترکیب نتایج، عدم قطعیت ناشی از گمشدگی را به‌خوبی مدل‌سازی می‌کند.

داده‌ها

بارش، به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی چرخه آب، نقش کلیدی در تغذیه منابع آب زیرزمینی ایفا می‌کند. به دلیل محدودیت‌های ناشی از استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهداتی، برای ارزیابی نوسانات و تغییرات ذخیره آب در آبخوان بیرجند از داده‌های ماهواره GRACE استفاده شد. در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE مربوط به مرکز پردازش JPL استفاده‌شده است. داده‌های بارش از ماهواره CHIRPS بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ استخراج و با ایستگاه‌های زمینی واقع در محدوده آبخوان دشت بیرجند واسنجی و با روش MCMC پیش‌پردازش شدند. داده‌های ماهواره‌ای GRACE با اطلاعات ایستگاه CHIRPS ترکیب شدند تا میزان بارندگی سالانه در بازه ۲۰۲۴-۲۰۰۳ و تأثیر آن بر ذخایر آب زیرزمینی و تغذیه مجدد آبخوان‌ها بررسی شود .

نوسانات ذخیره آب زیرزمینی[4] به تغییرات حجم آب زیرزمینی در مقایسه با یک مقدار میانگین اشاره دارد. این مقدار نشان‌دهنده افزایش یا کاهش غیرعادی در میزان آب ذخیره‌شده در سفره‌های زیرزمینی است. نوسانات ذخیره آب زیرزمینی معمولاً از داده‌های ماهواره به‌صورت زیر محاسبه می‌شود. (Rodell et al,2009)

$$GWSA= TWS-(SWE+SM+CW) \quad (۱)$$

TWS(Total Water Storage): مجموع کل آب ذخیره‌شده شامل آب‌های سطحی، رطوبت خاک، برف و آب‌های زیرزمینی است.

SWE (Snow Water Equivalent):آب معادل برف

SM(Soil Moisture): رطوبت خاک

CW(Canopy Water): آب موجود در پوشش گیاهی

پردازش تصاویر GRACE و CHIRPS با استفاده از سامانه‌های Google Earth Engine

GEE یک نرم‌افزار رایگان برای پردازش داده‌های مکانی است که به کاربران امکان تحلیل و پردازش داده‌های سنجش‌ازدور را می‌دهد. این سامانه شامل یک بانک اطلاعاتی گسترده است که مجموعه‌ای از تصاویر ماهواره‌ای مانندMODIS ، Sentinel و Landsat و همچنین داده‌های ژئوفیزیکی و اقلیمی مانند DEM و CHIRPSمی‌باشد(Afraz et al., 2021) . یکی از مهم‌ترین مزایای GEE دسترسی آسان به سامانه پردازش‌شده بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده توسط کاربراست به‌طوری‌که کاربران می‌توانند بدون درگیر شدن با مراحل پردازش، از داده‌های آماده استفاده کنند(Yousefi et al., 2022؛ Afraz et al., 2021).

GEE با توجه به سهولت، کارآیی و کاهش هزینه و زمان پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یک ابزار پیشرفته در تحقیقات سنجش‌ازدور موردتوجه قرارگرفته است. در این پژوهش، داده‌های CHIRPS با استفاده از سامانه Google Earth Engine پردازش‌شده و همچنین از داده‌های ماهواره‌ای GRACE بهره‌گیری شده است. یکی از مزیت‌های این سامانه این است که داده‌ها بدون نیاز به بارگذاری، مستقیماً قابل‌استفاده بوده و تنها با فراخوانی پردازش می‌شوند. علاوه بر این، داده‌ها نیازی به اصلاحات هندسی یا

1- Climate Hazards Group
2- Software defined storage(SDS)
3- Markov Chain Monte Carlo(MCMC)
4- Groundwater Storage Anomaly(GWSA)

رادیومتری ندارند. همچنین، حتی در صورت حجم بالای داده‌ها، به سامانه‌پردازشی قدرتمند نیازی نیست، زیرا این سامانه قادر است تمامی داده‌های موجود را ظرف چند دقیقه فراخوانی و پردازش کند. علاوه بر این، GEE مجموعه‌ای از دستورات و کدهای آماده برای پردازش داده‌ها را در اختیار کاربران قرار می‌دهد.

برای تحلیل داده‌های GRACE و استخراج داده‌های مربوط به منطقه مطالعه، از معادله (۲) استفاده شد تا تغییرات جرم را به‌صورت ضخامت لایه آبی نشان دهد. ابتدا باید ضرایب هارمونیک کروی، که بر اساس تغییرات جرم گسترش می‌یابند، بر طبق مدل‌های ماهانه GRACE تعریف شوند. تغییرات جرم بر اساس ضخامت معادل لایه آب به شکل زیر بیان می‌شود(Afraz et al.,2021) . ضرایب هارمونیک کروی[1] ابزاری ریاضی برای نمایش میدان گرانش زمین در قالب ترکیبی از توابع کسینوسی و سینوسی بر روی کره هستند. این ضرایب شامل درجه n و ترتیب m می‌باشند که در آن درجه بیانگر تعداد نوسانات در راستای شمال–جنوب و ترتیب بیانگر تعداد نوسانات در راستای شرق–غرب (طول جغرافیایی) است. با افزایش درجه و ترتیب، دقت مدل افزایش می‌یابد، اما هم‌زمان اختلال و خطای اندازه‌گیری نیز بیشتر می‌شود. برای کاهش این اختلالات، به‌ویژه در ضرایب با درجه و ترتیب بالا، از فیلترهای ریاضی استفاده می‌شود. این فیلترها با حذف نوسانات و اختلالات یا هموارسازی داده‌ها، موجب افزایش دقت تحلیل تغییرات جرم سطح زمین و استخراج بهتر اطلاعاتی مانند تغییرات ذخایر آبی یا جابه‌جایی جرم می‌شوند.

$$\Delta\sigma(\theta,\lambda) = \frac{\alpha * \rho_{ave}}{3}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\frac{2n+1}{1+kn}Pnm(\cos(\theta)) * (\Delta J_{nm}\cos m\lambda + \Delta k_{nm}\sin m\lambda) \quad (۲)$$

$\rho_{ave=}5517kg/m^3$: میانگین جرم حجمی سطح زمین

Kn نشان‌دهنده اعداد لاو است

Δj_{nm} و Δk_{nm} تغییرات ماهانه ضرایب هارمونیک کروی هستند

P_{nm} توابع نرمالیزه

θ انحراف نسبی از محور عمودی است

$\Delta\sigma$ تغییرات چگالی سطح است

α شعاع خارجی کره است

λ گرانش متوسط و n و m درجه و ترتیب هستند

داده‌های سطح دوم GRACE به‌صورت ماهانه در قالب مدل‌های ژئوپتانسیل برای میدان گرانشی زمین ارائه‌شده‌اند. یکی از مسائل برجسته در این داده‌ها وجود اختلال در ضرایب هارمونیک است که با افزایش درجه (n) و مرتبه(m)، شدت آن بیشتر می‌شود. به همین دلیل، فیلترهای عددی برای کاهش ضرایب درجه و مرتبه استفاده می‌شوند تا تغییرات غیرواقعی ناشی از اختلالات حذف شود.

برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از GRACE

برآورد تغذیه سالانه آب زیرزمینی یکی از اجزای مهم تحلیل پایداری سفره‌های آب زیرزمینی است. روش‌های مختلفی برای محاسبه تغذیه آب زیرزمینی وجود دارد، اما انتخاب بهترین روش می‌تواند چالش‌برانگیز باشد، زیرا اکثر این روش‌ها نیاز به داده‌های جامع دارند. تغذیه آب زیرزمینی معمولاً به‌صورت مقطعی و ناپیوسته انجام می‌شود، اما روش‌های ردیاب که در آن از مواد ردیاب استفاده می‌شود، فقط میانگین بلندمدت آن را نشان می‌دهند و اطلاعاتی از تغییرات زمانی تغذیه ارائه نمی‌کنند (Barbosa et al., 2022; Raza et al., 2019). در مقابل، روش نوسانات تراز آب زیرزمینی با استفاده از افزایش سریع سطح آب زیرزمینی پس از یک رویداد بارندگی، می‌تواند میزان تغذیه را در بازه‌های زمانی کوتاه مانند یک رویداد بارش برآورد کند. به همین دلیل، روش نوسانات تراز آب زیرزمینی برای بررسی تغذیه‌های موقتی آب زیرزمینی بسیار مناسب می‌باشد. به‌ویژه برای تحلیل ویژگی‌های فصلی و مقطعی تغذیه کاربرد زیادی دارد. نرخ تغذیه آب زیرزمینی را می‌توان با ضرب تغییر ارتفاع تراز آب در یک بازه زمانی مشخص در ضریب آبدهی ویژه محاسبه کرد (Barbosa et al., 2022)

$$R = S_y\frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (۳)$$

R : تغذیه آب زیرزمینی است که واحد آن cm/year است.

Δh :تغییر ارتفاع سطح ایستابی به cm است

s_y :آبدهی ویژه برحسب درصد بیان می‌شود

Δt :بازه زمانی مورداستفاده برای اندازه‌گیری تغییرات است.

مزیت اصلی روش نوسانات تراز آب زیرزمینی این است که این روش نیازی به فرضیات حاکم بر حرکت آب در منطقه غیراشباع ندارد، بنابراین می‌توان آن را برای روش‌های مختلف تغذیه ازجمله تغذیه مستقیم ناشی از بارش یا آبیاری ، تغذیه غیرمستقیم از کانال‌های سیلابی به کاربرد. تفاوت اصلی بین استفاده از داده‌های GRACE مبتنی بر روش نوسانات سطح ایستابی و سایر کاربردهای این روش، در نحوه تعریف و تشخیص دوره‌های تغذیه آبخوان است. یک دوره تغذیه به بازه‌ای از زمان گفته می‌شود که در آن، مقدار آبی که وارد سفره آب زیرزمینی می‌شود، به‌طور غیرمعمول و قابل‌توجهی بیشتر از حالت عادی و پایدار خودش باشد، و این افزایش معمولاً به خاطر یک رویداد آبی مهم مثل یک بارندگی شدید، سیلاب یا آبیاری سنگین اتفاق می‌افتد .(Wu et al., 2019) یک دوره تغذیه آب زیرزمینی از نقطه کمینه تراز آب زیرزمینی S_L شروع‌شده و در نقطه

1 - Spherical Harmonic Coefficients

بیشینه آن S_P به پایان می‌رسد (شکل ۲).

برای محاسبه میزان تغذیه از منحنی تغییرات، سه رویکرد وجود دارد:

۱. فرض می‌شود که کاهش غیرواقعی قابل‌چشم‌پوشی است.
۲. کاهش غیرواقعی به‌صورت مجزا در هر دوره تغذیه برآورد و اصلاح شود.
۳. رفتار سامانه با استفاده از یک تابع بین تراز آب و نرخ کاهش تعیین شود.(Wu et al., 2019)

در این پژوهش از روش دوم استفاده شد به‌طوری‌که کاهش غیرواقعی برای هر دوره به‌صورت جداگانه تخمین زده و اصلاح شد. بدین منظور منحنی افت از طریق برازش خطی مقدار انحراف ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) به‌عنوان تابعی از زمان، از نقطه اوج در سال گذشته تا پایین‌ترین نقطه کاهش به دست آمد. سپس معادله خطی حاصل تا زمان اوج جدید برون‌یابی شد. درنهایت، مقدار SL به دست آمد که نشان‌دهنده GWSA برون‌یابی‌شده از منحنی افت در زمان اوج است (خط پیوسته). خط‌چین بین SB (tB) و SL (tP) نشان‌دهنده افت محقق نشده است (طبق شکل ۲).

ازآنجاکه تغییر در ذخیره آب زیرزمینی برابر است با حاصل‌ضرب ضریب ذخیره آبخوان در تغییر سطح آب زیرزمینی $\Delta GWSA = S_y * \Delta h$ ، می‌توان نرخ تغذیه آب زیرزمینی (R) را با فرمول زیر به دست آورد.

$$R = \frac{\Delta GWSA}{\Delta t} = \frac{S_P - S_L}{\Delta t} = RS + RD \quad (۴)$$

R: نرخ تغذیه آب زیرزمینی

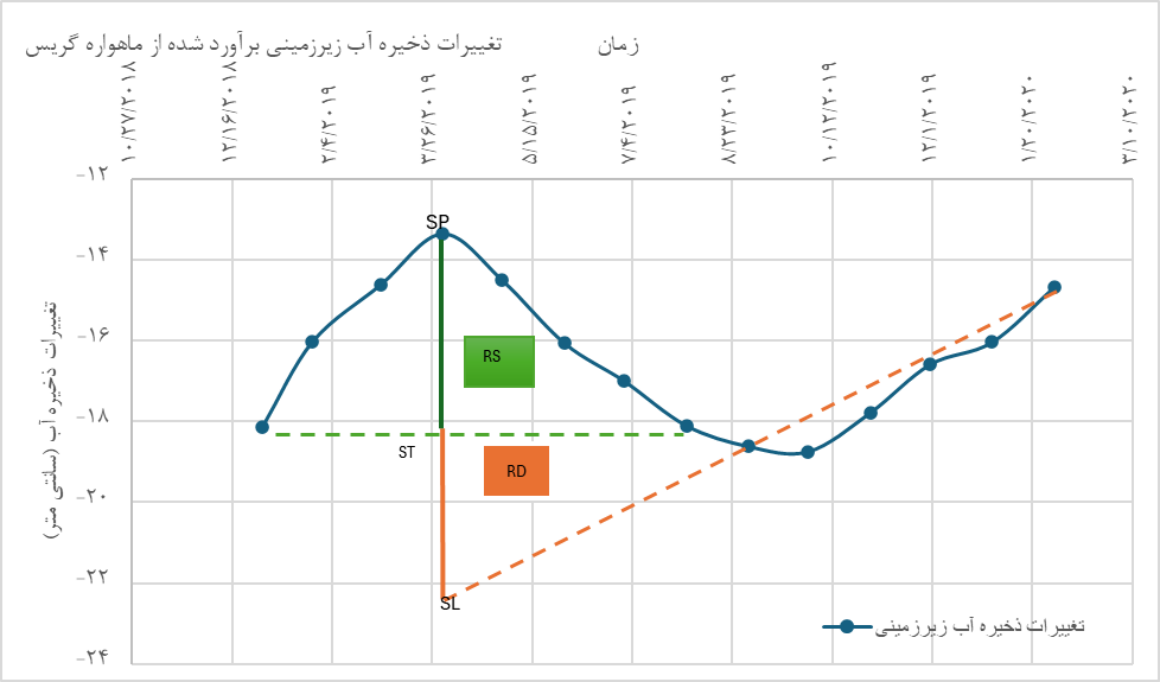
ΔGWS : تغییرات ذخیره آب زیرزمینی

در اینجا S_P اوج افزایش و S_L مقدار انحراف ذخیره آب زیرزمینی برون‌یابی شده از منحنی کاهش به زمان اوج است.

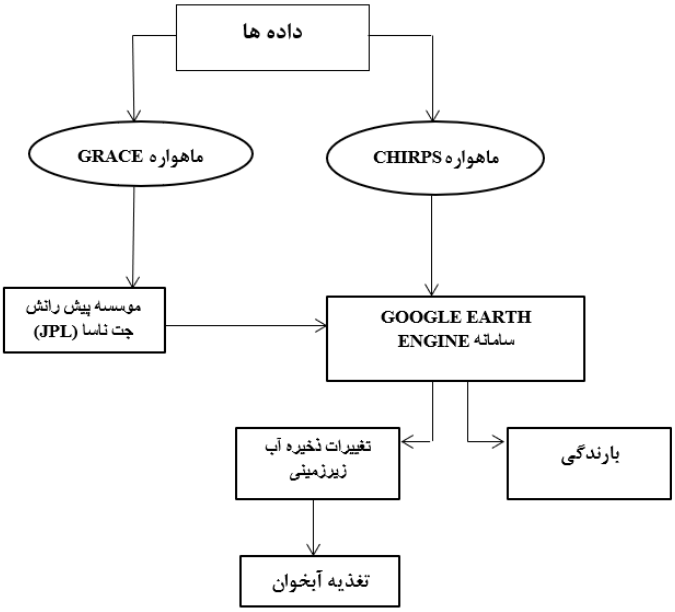
شکل ۳ نمایی کلی از روند انجام مطالعه را بر اساس منابع داده، روش انجام کار و هدف نهایی ارائه می‌دهد.

نتایج و بحث

آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب برای همه مصارف مسکونی، کشاورزی و صنعت در محدوده موردمطالعه است به همین دلیل درک دقیق تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برای ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی ضروری است. این امر به این دلیل است که این تغییرات عمدتاً ناشی از استخراج بیش‌ازحد آب زیرزمینی در شرایط کمبود منابع آبی است و تهدیداتی مانند فرونشست زمین، کاهش بهره‌وری محصولات کشاورزی و افزایش شوری خاک را به دنبال دارد. داده‌های کم و محدود درباره آب زیرزمینی می‌تواند مدیریت این منابع را دشوار سازد، به‌ویژه در دوره‌های طولانی‌مدت که برای ارزیابی پایداری آبخوان ضروری است (Barbosa et al., 2022; Raza et al., 2019).



شکل ۲- نمودار مفهومی نشان‌دهنده انحراف ذخیره آب زیرزمینی-(*RS*: تغذیه واقعی آب زیرزمینی، *RD*: افت محقق نشده، *SP*:نقطه اوج ذخیره آب زیرزمینی، *SL*: ذخیره برون‌یابی شده از منحنی افت)



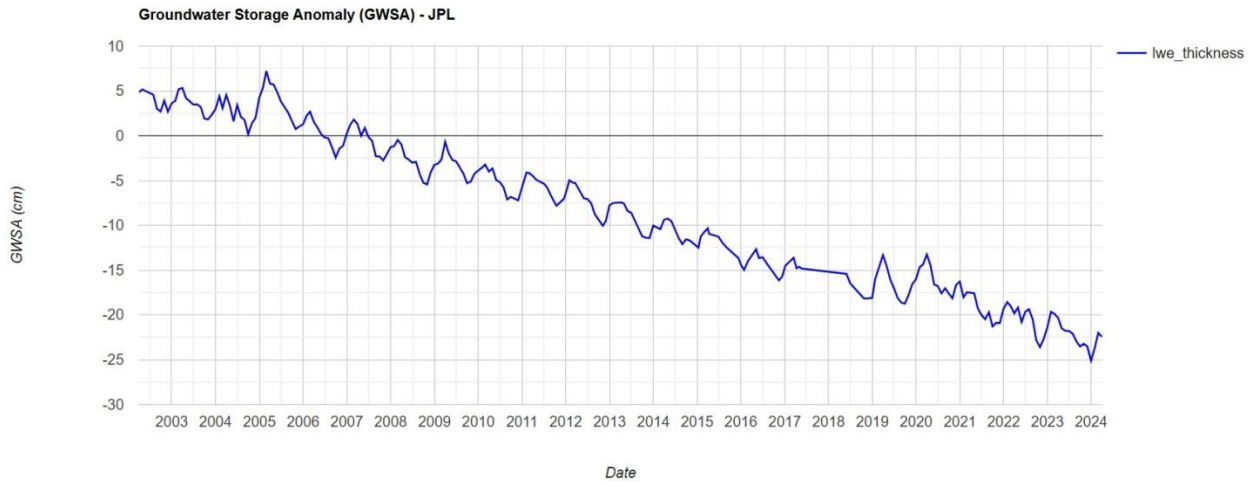
شکل۳ - روند نمای پژوهش

پایش مستمر آب زیرزمینی فرآیندی پرهزینه ازنظر مالی، فنـاوری و زمان است زیرا نیازمند حفر چاه‌های مشاهداتی متعدد و جمع‌آوری و ارزیابی مداوم داده‌های تراز و کیفیت آب زیرزمینی است Barbosa). (et al., 2022تقاضای جهانی برای استفاده از آب‌های زیرزمینـی در حال افزایش است، به‌طوری‌کـه از سـال ۱۹۹۰ تـا ۲۰۱۰ سـالانه ۳٪ افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایـم (Barbosa et al., 2022; Raza et al., 2019).

بـه دلیـل کمبـود منـابع مـالی، امکانـات و فنـاوری، کشـورهای درحال‌توسعه اغلب با کمبود داده مواجه هستند. بـااین‌حـال، مـاهواره GRACE می‌تواند داده‌های هیدرولوژیکی لازم را برای این کشورها تأمین کند. در مناطقی با اقلیم گرم و خشک هماننـد اسـتان خراسـان جنوبی، تنش آبی یک خطر عمده به‌حساب می‌آید. هرمطالعه‌ای بـرای مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح ملی یا آبخـوان آبریـز نیازمنـد در دسترس بودن داده‌های آب زیرزمینی و هیدرولوژیکی است. مـاهواره GRACEروشی جدید برای محاسبه تغییـرات ذخیـره آب زیرزمینـی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ماهواره GRACE، کـه در ایـن تحقیق مورداستفاده قرارگرفته است توانایی زیادی در محاسبه تغییرات آب زیرزمینی با دقت بالا دارد.

امـروزه کـه داده‌هـا و اطلاعـات کـافی از مـاهواره GRACE در دسترس است، مطالعات آب زیرزمینی از درجه اعتبار بالایی برخـوردار هستند. تطابق قابل‌قبـول بـین تغییـرات ذخیـره آب کـل و داده‌هـای استخراج‌شده از ماهواره GRACE از طریق مقایسه بین خروجی‌هـای پیش‌بینی‌شده و داده‌های اندازه‌گیری‌شده مؤید این مطالب است (سید نوید نبوی و همکاران، ۱۳۹۹،زهره فرجی و همکـاران،۱۳۹۶).روشـی که در این تحقیق موردبررسـی قـرار گرفـت مـی‌توانـد بـرای بـرآورد مجموع تغذیه آب زیرزمینی در مقیـاس منطقـه‌ای مورداسـتفاده قـرار بگیـرد و تخمـین‌هـای معقـولی از ذخیـره آب زیرزمینـی در مقیـاس منطقه‌ای ارائه دهد. نتایج این تحقیق نشان داد که ماهواره GRACE قابلیت بالایی در محاسبه تغییـرات آب زیرزمینـی و میـزان بارنـدگی دارد.

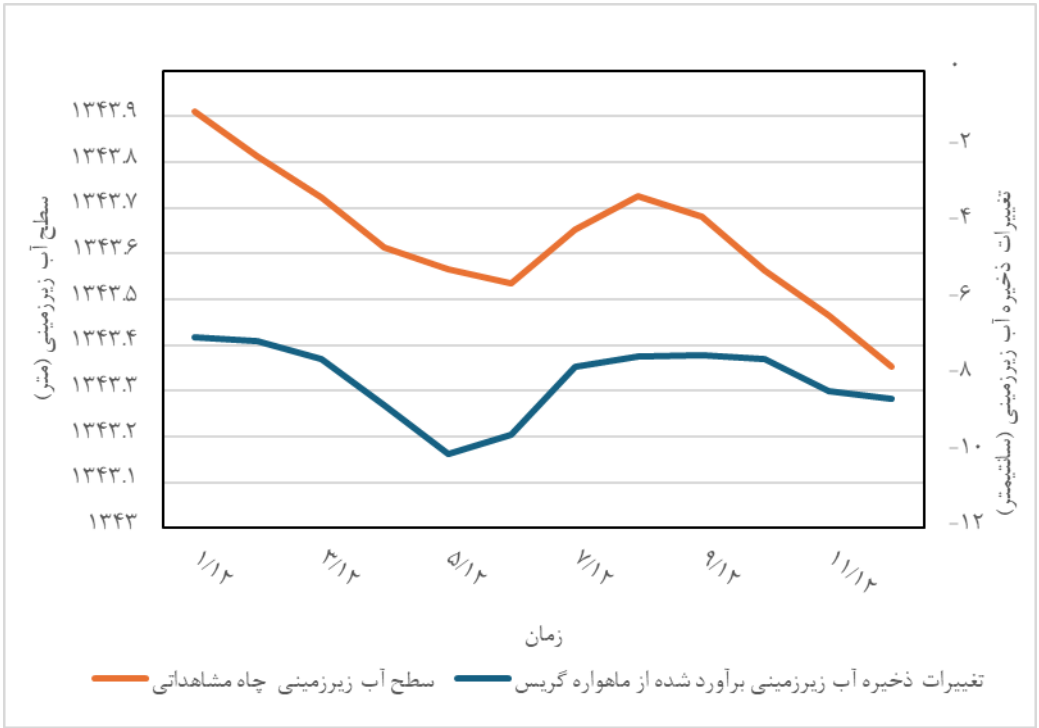
نتایج تغییرات ذخیره آب با استفاده از داده‌هایGRACE میانگین تغییرات ذخیره آب در حوضه آبخوان بیرجنـد بـا اسـتفاده از داده‌هـای موسسه JPL ، پس از پردازش بـا سـامانه بـر خـط آنلایـن GEE در شکل ۴ اشاره‌شده است. بررسی تغییرات مکانی در نوسانات ذخیره آب می‌تواند درک بهتری از این داده‌های منطقه‌ای به مـا ارائـه دهـد. در میان‌سال‌های موردبررسـی در ایـن مطالعـه، سـال ۲۰۲۳ بـه‌عنـوان خشک‌ترین سال بـا بیشـترین کـاهش در ذخیـره آب شناسـایی شـد. درحالی‌که سال‌هـای ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ بیشـترین افـزایش ذخیـره آب را داشت. مقـادیر منفـی GWSA نشـان‌دهنـده کـاهش در ذخیـره آب زیرزمینی در حوضه است، درحالی‌کـه مقـادیر مثبـت GWSA تغذیـه مجدد آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ٤- داده‌های JPL نشان‌دهنده تغییرات تراز آب زیرزمینی

برآورد ذخیره آب زیرزمینی و مقایسه آن با اندازه‌گیری‌های صحرائی

مقدار نوسانات ذخیره آب زیرزمینی اگر مثبت باشد، نشان‌دهنده افزایش ذخیره آب زیرزمینی و اگر منفی باشد، نشان‌دهنده کاهش و تخلیه آب‌های زیرزمینی است. این شاخص در مناطقی که داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای محدود هستند برای پایش تغییرات آب زیرزمینی کاربرد دارد. بااین‌حال، به دلیل کمبود تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه موردمطالعه، تأیید دقت ذخیره آب زیرزمینی برآورد شده دشوار است. برای ارزیابی صحت محاسبات ذخیره آب زیرزمینی، از یازده مجموعه داده منتج از چاه‌های مشاهده‌ای استفاده شد. مقادیر نوسانات ذخیره آب زیرزمینی از طریق استخراج نقاط از سطوح رستری، متناسب با موقعیت مکانی چاه‌ها به‌دست‌آمده است. شکل ۵ سری زمانی ذخیره ماهانه آب زیرزمینی حاصل از GRACE و همچنین تراز آب‌های زیرزمینی اندازه‌گیری‌شده از چاه‌ها را نشان می‌دهد.

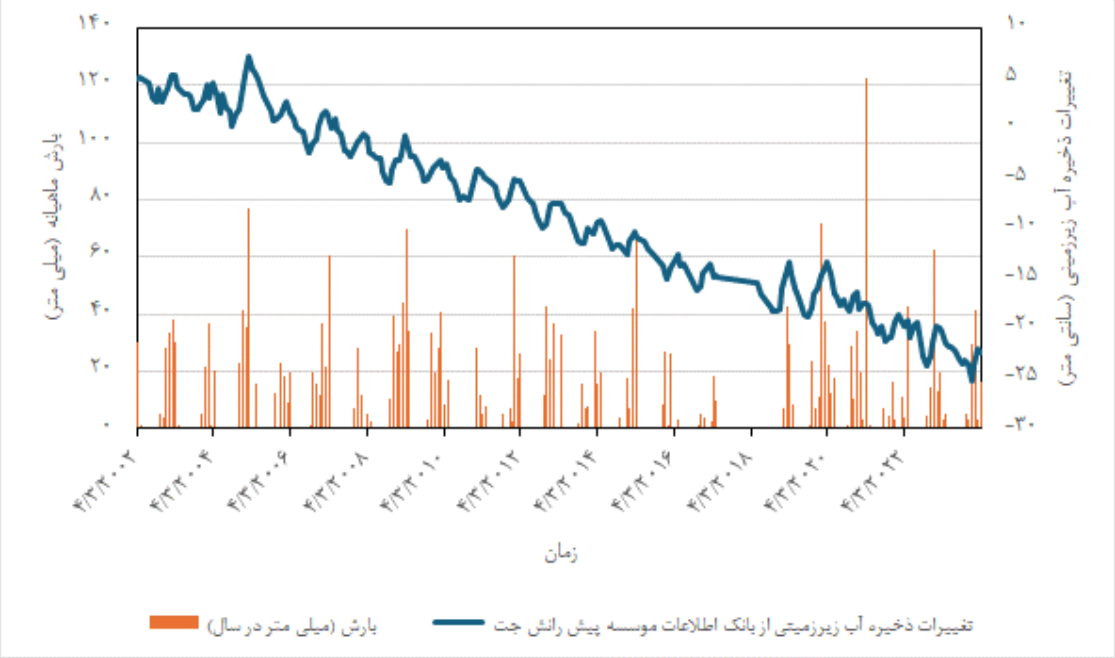


شکل ۵- مقایسه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برآورد شده با تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده از چاه در سال ۲۰۱۲

مقایسه بین تغییرات برآورد شده ذخیره آب زیرزمینی و تغییرات اندازه‌گیری‌شده از چاه‌ها نشان‌دهنده یک‌روند طولانی‌مدت، مشابه است. نوسانات سطح اندازه گیری شده آب زیرزمینی با ذخیره برآورد شده همخوانی دارد.

ارزیابی تأثیر بارندگی بر نوسانات ذخیره آب زیرزمینی مبتنی بر GRACE

بارش به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر ذخیره آب در آبخوان بیرجند است. نتایج نشان داد که داده‌های GRACE پردازش‌شده توسط موسسه پیش‌رانش جت ناسا با داده‌های بارش ماهواره CHIRPS دارای ضریب همبستگی نسبتاً بالایی هستند. این امر نشان می‌دهد که در این منطقه، کاهش بارش با کاهش ذخیره آب زیرزمینی همراه بوده است. شکل ۶ یک سری زمانی فصلی و ماهانه از ذخیره آب زیرزمینی مبتنی بر GRACE و میانگین بارش ماهانه در آبخوان را نشان می‌دهد. در فصل بارندگی، تراز آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تغذیه است و در فصل خشک کاهش تراز آب زیرزمینی مشاهده می‌شود که ناشی از مصرف و کاهش ورودی آب است. نتایج نشان می‌دهد که بارندگی، اصلی‌ترین عامل هیدرولوژیکی تأثیرگذار در ذخیره آب زیرزمینی در این آبخوان است.



شکل٦ – مقایسه نوسانات ذخیره آب زیرزمینی با بارندگی

نتایج تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE

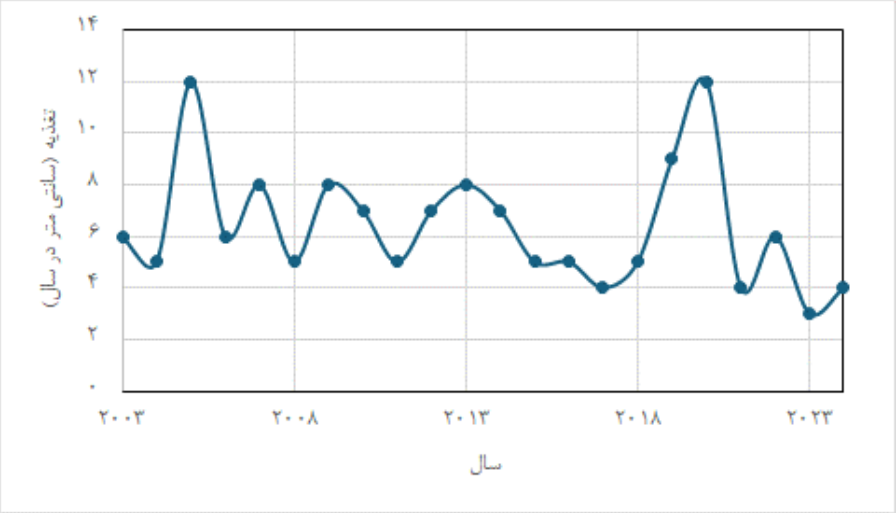
در هرسال از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ یک دوره تغذیه آب زیرزمینی وجود دارد که در شکل ۷ نشان داده‌شده است. میانگین مقادیر ماهانه نوسانات ذخیره آب زیرزمینی در هر منحنی افت، طبق جدول ۲، برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفت.

نرخ تغذیه خالص به‌دست‌آمده در یک دوره ۲۲ ساله بین ۳ تا ۱۲ سانتی‌متر در سال متغیر بوده است و میانگین آن حدود ۶ سانتی‌متر در سال بود. در طول فصول بارانی و مرطوب، مقدار تغذیه آب زیرزمینی بالا است. بااین‌حال، در ماه‌های تابستان و دوره‌های خشک که دما بالاست، نرخ تبخیر و تعرق از میزان رطوبت ناشی از بارش فراتر می‌رود و درنتیجه تغذیه آبخوان‌ها ناچیز بوده و تراز آب زیرزمینی کاهش می یابد.کاهش عدم قطعیت در برآورد تغذیه آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر را می توان با اندازه گیری دقیق بارندگی، آبیاری، تبخیر و تعرق، و میزان رطوبت خاک به دست آورد (Barbosa et al., 2022).

مقایسه نرخ تغذیه آب زیرزمینی با بارندگی سالانه

بارش منبع اصلی تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان دشت بیرجند است. مقایسه بارش سالانه در آبخوان دشت بیرجند از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ و نرخ تغذیه آب زیرزمینی در شکل ۸ نشان داده‌شده است. نمودار هیستوگرام بارش سالانه نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجهی

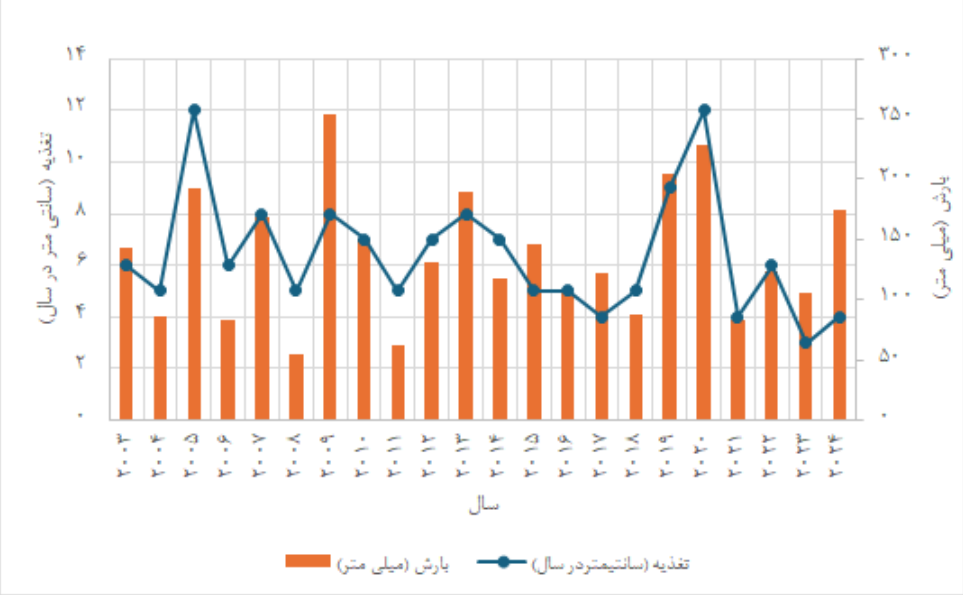
است، به‌طوری‌که بیشترین میزان بارندگی در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۰ رخ‌داده است. کمترین میزان بارندگی در سال ۲۰۰۸ ثبت‌شده است. این روند نشان می‌دهد که تغییرات تغذیه آب زیرزمینی وابسته به میزان بارندگی در آبخوان بیرجند است. افزایش در ذخیره آب زیرزمینی و بارش در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۷- مقادیر تغذیه اندازه‌گیری شده در محدوده مطالعاتی بیرجند

جدول ۱-متغیرهای مورداستفاده در برآورد تغذیه آب زیرزمینی ناشی از نوسانات ذخیره آب زیرزمینی

بارش (میلی‌متر)	تغذیه (سانتی‌متر در سال)	RD	RS	ST	SL	SP	سال
۱۴۳/۵	۶	۴	۲	۳	-۱	۵	۲۰۰۳
۸۶/۵	۵	۲	۳	۲	۰	۵	۲۰۰۴
۱۹۲/۵	۱۲	۹	۳	-۴	-۵	۷	۲۰۰۵
۸۵/۵	۶	۴	۲	-۱	-۳	۳	۲۰۰۶
۱۶۹	۸	۴	۴	-۲	-۶	۲	۲۰۰۷
۵۵	۵	۴	۱	-۱	-۵	۰	۲۰۰۸
۲۵۴/۰۵	۸	۵	۳	-۳	-۸	۰	۲۰۰۹
۱۵۱/۰۸	۷	۳	۴	-۷	-۱۰	-۳	۲۰۱۰
۶۲/۵	۵	۲	۳	-۷	-۹	-۴	۲۰۱۱
۱۳۱/۵	۷	۲	۵	-۱۰	-۱۲	-۵	۲۰۱۲
۱۸۸/۹	۸	۴	۴	-۱۲	-۱۶	-۸	۲۰۱۳
۱۱۷/۷۵	۷	۴	۳	-۱۲	-۱۶	-۹	۲۰۱۴
۱۴۵/۷۵	۵	۳	۲	-۱۲	-۱۵	-۱۰	۲۰۱۵
۱۰۴/۹	۵	۳	۲	-۱۵	-۱۸	-۱۳	۲۰۱۶
۱۲۲/۷	۴	۳	۱	-۱۵	-۱۸	-۱۴	۲۰۱۷
۸۷/۶	۵	۲	۳	-۱۸	-۲۰	-۱۵	۲۰۱۸
۲۰۴/۷	۹	۴	۵	-۱۸	-۲۲	-۱۳	۲۰۱۹
۲۲۸/۸	۱۲	۹	۳	-۱۶	-۲۵	-۱۳	۲۰۲۰
۸۲/۹	۴	۲	۲	-۲۰	-۲۲	-۱۸	۲۰۲۱
۱۲۲/۹	۶	۴	۲	-۲۱	-۲۵	-۱۹	۲۰۲۲
۱۰۵/۲	۳	۱	۲	-۲۲	-۲۳	-۲۰	۲۰۲۳
۱۷۴/۳	۴	۳	۱	-۲۲	-۲۵	-۲۱	۲۰۲۴



شکل ۸- مقایسه میزان تغذیه آب زیرزمینی برآورد شده با بارش سالانه در آبخوان دشت بیرجند

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، داده‌های ماهواره GRACE و روش نوسانات سطح آب، برای برآورد ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان دشت بیرجند استفاده شد. دیگر داده‌های مورداستفاده در این مطالعه شامل داده‌های ماهواره CHIRPS و داده‌های سطح ایستابی بودند. به دلیل محدودیت‌های استفاده از چاه‌های مشاهداتی ، از داده‌های ماهواره GRACE برای ارزیابی نوسانات و تغییرات ذخیره آب در آبخوان دشت بیرجند استفاده شد.

بر اساس داده‌های ماهواره GRACE در مورد نوسانات ذخیره آب بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴، مشخص شد که بیشترین نرخ افزایش تراز آب زیرزمینی نسبت به میانگین بلندمدت حدود ۷ سانتی‌متر در فوریه ۲۰۰۵ رخداده است و بیشترین مقدار کاهش با حدود ۲۵ سانتی‌متر در دسامبر ۲۰۲۳ اتفاق افتاده است. نرخ تغذیه خالص به‌دست‌آمده در این بازه ۲۱ ساله بین ۳ تا ۱۲ سانتی‌متر در ماه متغیر بود و میانگین آن ۶.۴ سانتی‌متر در سال بود. این مقادیر تخمینی با تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه مطابقت دارند.. از سوی دیگر افزایش ذخیره آب ناشی از بارش است، بنابراین افزایش یا کاهش بارش تأثیر مستقیم بر تغییرات ذخیره آب و میزان تغذیه دارد. بااین‌حال کاهش بارش می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ذخیره آب را کاهش دهد، اما عوامل دیگر ازجمله تأثیر فعالیت‌های انسانی باید موردبررسی قرار گیرد. به‌این‌ترتیب باید روش‌های مناسب و جدیدی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در منطقه در نظر گرفت. مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج دنیائی(۱۴۰۰) در استان کرمانشاه نشان می‌دهد که همانند آن مطالعه، ترکیب داده‌های GRACE با مدل‌های هیدرولوژیکی (مانند GLDAS) یا داده‌های تکمیلی می‌تواند تصویر دقیقی از تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد و جایگزین مناسبی برای داده‌های محدود چاه‌های مشاهداتی باشد. همچنین، مشابه با نتایج حافظ پرست (۱۴۰۰) در پایش آبخوان میانراهان، داده‌های GRACE پردازش‌شده با الگوریتم‌های معتبر (مانند JPL) بیشترین انطباق را با داده‌های زمینی داشته و بر اهمیت صحت‌سنجی و تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور و مشاهدات میدانی در مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید دارد.

درمجموع نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان‌دهنده قابلیت مطلوب داده‌های ماهواره GRACE در تخمین سریع و ارزان تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی که فقدان داده مانعی بر مسیر مطالعات و مدیریت منابع آب زیرزمینی است، GRACE یک روش جدید برای برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی ارائه می‌دهد، بااین‌حال هنوز محدودیت‌هایی ازجمله ناتوانی در حل مشکلاتی مانند دقت مکانی پایین و اثر نشت همچنان وجود دارد. با ترکیب داده‌های استخراج‌شده از ماهواره GRACE با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش‌های داده محور می‌توان میزان خطاها را کاهش داده و نتایج قابل‌اعتمادتری به‌دست‌آمده آورد.

منابع

افتخاری، م.، مددی، ک. و اکبری، م. ۱۳۹۸ . پایش نوسان آبخوان دشت بیرجند با تصویرهای ماهواره‌ای GRACE و تحلیل مکانی GIS. مجله پژوهش‌های آبخیزداری.۴(۳۲): ۶۵-۵۱.

افتخاری، م.، دستورانی، م. و حاجی الیاسی، ع. ۱۴۰۳. ارزیابی

روش‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی نوسانات تراز سطح آب سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از ماهوارهGRACE و GRACE-FO. نشریه محیطزیست طبیعی. ۷۷(۳): ۴۶۶-۴۵۳.

حافظ پرست، م. ۱۴۰۰. پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از ماهواره GRACE و GLDAS در استان کرمانشاه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران.۱۲(۴۸):۲۵۷-۲۳۴.

حافظ پرست، م.۱۴۰۰. پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان میانراهان با داده‌های ماهواره GRACE. نشریه آبیاری و زهکشی ایران.۲(۱۵):۴۴۳-۴۲۸.

دنیائی،ع.۱۴۰۰. ارزیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی با ترکیب داده‌های ماهواره GRACE و مدل هیدرولوژیکی GLDAS نواحی خشک و نیمه‌خشک مطالعه موردی استان کرمانشاه. نشریه هیدروژئوموفولوژی. ۲۹(۸):۴۳-۲۳.

شبیری، ش. و شرافتی، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی داده‌های بارش CHIRPS در تحلیل روند مشخصه‌های بارش در نواحی اقلیمی مختلف ایران. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. ۱۲(۴۸):۱۲۴-۱۱۱.

فرجی، ز.، کاویانی، ع. و اشرف زاده، ا .۱۳۹۶. ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در برآورد تغییرات تراز آب زیرزمینی در استان قزوین. مجله اکو هیدرولوژی.۴(۲):۴۷۶-۴۶۳. https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482

نبوی، ن.، علیزاده،ا. و فرید حسینی،ع. ۱۳۹۹. ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ثقل سنجی ماهواره GRACE(مطالعه موردی: خراسان رضوی). نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۴(۳):۸۵۵-۸۶۶. 20.1001.1.20087942.1399.14.3.11.8.

همراز، ب.، شهیدی، ع. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی کیفی آبخوان دشت بیرجند جهت اجرای آبیاری تحت‌فشار با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ نشانگر. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۱۳): ۴۴-۳۴.

Arast, M., Ranjbar, A., Mousavi, S. H., Abdollahi, Kh. and Honarbakhsh, A. 2020. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water Management. 173(4): 189-198.

Afraz, M., Eftekhari, M., Akbari, M., Elyasi, A. and Noghani, Z. 2021. Application assessment of GRACE and CHIRPS data in the Google Earth Engine to investigate their relation with groundwater resource changes (Northwestern region of Iran). Journal of Groundwater Science and Engineering. 9(2): 102–113. DOI:10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.02.002

Barbosa, S. A., Pulla, S. T., Williams, G. P., Jones, N. L., Mamane, B. and Sanchez, J.L. 2022. Evaluating groundwater storage change and recharge using GRACE data: A case study of aquifers in Niger. West Africa. Remote Sensing. 14(7):1532. **https://doi.org/10.3390/rs14071532**

Banerjee, D.C. and Kumar, N. 2018. Assessment of Surface Water Storage trends for increasing groundwater areas in India. Journal of Hydrology. 562:780-788.

Ghozat, A., Sharafati, A. and Hosseini, S.A. 2021. Long-term spatiotemporal evaluation of CHIRPS satellite precipitation product over different climatic regions of Iran. Theoretical and Applied Climatology. 143:211-225.

Khaki, M., Awange, J., Forootan, E. and Kuhn, M. 2018. Understanding the association between climate variability and the Nile's water level fluctuations and water storage changes during 1992–2016. Science of the Total Environment. 645(15): 1509-1521.

Miro, M.E. and Famiglietti, J.S. 2018. Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley. Remote Sensing. 10(1).143 **https://doi.org/10.3390/rs10010143**

Moghim, S. Assessment of Water Storage Changes Using GRACE and GLDAS. Water Resources Management 34, 685–697 (2020). https://doi.org/10.1007/s11269-019-02468-5

Moghaddam, H.K., Moghaddam, H.K., Kivi, Z.R., Bahreinimotlagh, M. and Alizadeh, M.J. 2019. Developing comparative mathematic models, BN and ANN for forecasting of groundwater levels. Groundwater for Sustainable Development, 9(12) :100237. DOI:10.1016/j.gsd.2019.100237

Nie, N., Zhang, T.Y., Chen, H. and Guo, H .2018. A global hydrological drought index dataset based on gravity recovery and climate experiment (GRACE) data. Water Resources Management 32(4):1275–1290. DOI:10.1007/s11269-017-1869-1

Pulla, S. T., Yasarer, H. and Yarbrough, L. D. 2023. GRACE Downscaler: A framework to develop and evaluate downscaling models for GRACE. Remote Sensing, 15(9): 2247. DOI:10.3390/rs15092247

Prakash, S. 2019. Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India. Journal of Hydrology. 571:50–59.

Raza, M., Lee, J.-Y. and Kwon, K. D. 2019. Estimation of quantitative spatial and temporal distribution for groundwater storage in agricultural basin of Korea: Implications for rational water use. Environmental Earth Sciences, 78(5), 169. DOI:10.1007/s12665-019-8179-2

Rodell, M., Velicogna, I. and Famiglietti, J.2009. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature. **460**:999-1002.https://doi.org/10.1038/nature08238

Singh. A.K., Tripathi. J.N., Kotlia. B.S., Singh. K.K. and Kumar.A.2019. Monitoring groundwater fluctuations over India during Indian Summer

Geophysical Research Letters 31(9). **https://doi.org/10.1029/2004GL019920**

Tregoning, P., Mc Clusky S., vanDijk A., Crosbie, RS. and Peña-Arancibia, JL. 2012. Assessment of GRACE Satellites for Groundwater Estimation in Australia. National Water Commission: Canberra, Australia, 36(15): 82- 89, https://doi.org/10.1029/2009GL038718

Wu, Q., Si, B., He, H. and Wu, P. 2019. Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS. Remote Sensing, 11(2), 154. **https://doi.org/10.3390/rs11020154**

Yang, L., Qi, Y., Zheng, C., Andrews, C. B., Yue, S., Lin, S., Li, Y., Wang, C., Xu, Y.and Li, H. 2018. A modified water-table fluctuation method to characterize regional groundwater discharge. Water, 10(4), Article 503.**https://doi.org/10.3390/w10040503**

Yousefi, E., Sayadi, M. H. and Chamenhpour, E. 2022. Google Earth Engine plat form to calculate the hydrometeorology and hydrological water balance of wet lands in arid areas and predict future changes. Journal of Applied Research in Water and Wastewater. 9(1): 52-68.

Monsoon (ISM) and Northeast monsoon using GRACE satellite: Impact on agriculture. Quaterenary International, 507:342-351.https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.036

Seo, J. Y. and Lee, S.I. 2016. Integration of GRACE, models for ground observation, and landsurface groundwater storage variations in South Korea. International Journal of Remote Sensing, 37(24), 5786–5801. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1249301

Sun, Z., Zhu, X., Pan, Y., Zhang, J .and Liu, J .2018. Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin. China. Science of the Total Environment. 634(1):727-738. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.292

Shami, S. and Ghorbani, Z. 2019. Investigating water storage changes in Iran using grace and chirps data in the google earth engine system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42, 981–984. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-981-2019

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M. and Reigber, C. 2004. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 657-672

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۶۷۲-۶۵۳

Assessment of Groundwater Storage and Recharge Variations in the Birjand Aquifer Using GRACE-FO and CHIRPS Satellite Data within the Google Earth Engine Platform

M. dastourani[*1], E. Ghouchanian haghverdi[2], O. khorashadizadeh[3], H. Khozeymeh Nezhad[4]

Recived: Feb.05, 2025 Accepted: Jul.27, 2025

Abstract

Overexploitation of groundwater resources has led to a decline in the groundwater table in the Birjand plain aquifer. In this study, changes in groundwater storage were investigated using GRACE and GRACE-FO satellite data, while annual precipitation was assessed using CHIRPS satellite data on the Google Earth Engine platform over the period from 2003 to 2024. Groundwater recharge was estimated from time series of water storage using the Water Table Fluctuation (WTF) method.The results of the GRACE and GRACE-FO data analysis showed that the maximum increase in groundwater level relative to the long-term average, approximately 7 cm, occurred in February 2005, while the greatest decline, around 25 cm, was recorded in December 2023. The net groundwater recharge rate over the 21-year study period varied between 3 and 12 cm per month, with an average of 4.6 cm per year.This study demonstrates that satellite-based GRACE data provide a reasonably accurate estimation of groundwater storage variations and can effectively reflect monthly trends in groundwater changes in data-scarce regions. As such, these data can serve as valuable tools for informed decision-making in water resource management.

Keywords: CHIRPS, Google Earth Engine, GRACE, GroundWater Storage

1-Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
2- PhD student in Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran & Expert of soil and water, Agriculture and Natural Resources Research Center of South Khorasan Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Birjand, Iran.
3 -MSc in Water Resources Engineering, South Khorasan Regional Water Company, Water Resources Management Company, Birjand, Iran
4- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
(*-Corresponding Author Email: mdastourani@birjand.ac.ir)